CONCRETE
คอนกรีต เทคโนโลยี
TECHNOLOGY

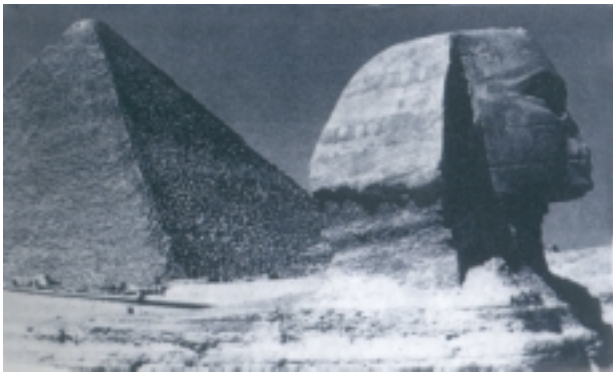
CPAC

คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค

บทที่ 1
คอนกรีตวัสดุสำหรับโครงสร้าง

1.1 คอนกรีตคืออะไร

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่าง ๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสมอันได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 *การใช้ lime มอร์ต้า สร้างปิรามิดตั้งแต่ 2500 ปีก่อนพุทธกาล*

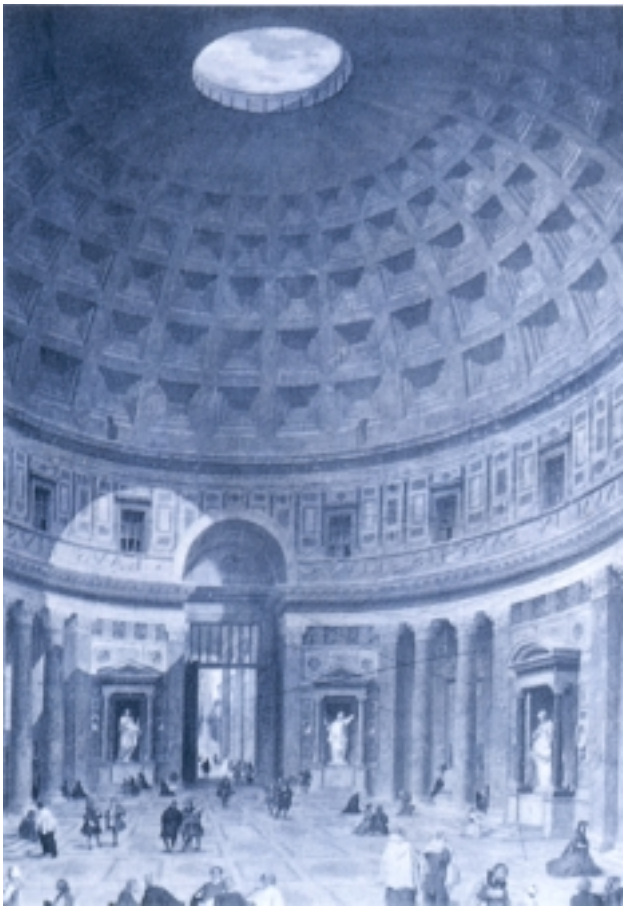
1.2 ประวัติ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมาเป็นเวลาช้านาน จากหลักฐานพบว่ามีการใช้คอนกรีตทำพื้นกระท่อมของชาวประมงและพวกล่าสัตว์สมัยยุคหิน บริเวณริมฝั่งแม่น้ำดานูป ตั้งแต่ 7,600 ปี ที่ผ่านมา หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาคอนกรีตอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 1.2 *โคลีเซี่ยมในประเทศอิตาลี*

ปี	เหตุการณ์
5100 ก่อนพุทธกาล	- ใช้คอนกรีตเทพื้นกระท่อม บริเวณริมแม่น้ำดานูป
2500 ก่อนพุทธกาล	- ได้มีการพัฒนา lime มอร์ต้า สำหรับก่อสร้างปิรามิดในประเทศอียิปต์
2000 ก่อนพุทธกาล	- มีการใช้คอนกรีตบางประเภทในประเทศแถบอเมริกาใต้
500 ก่อนพุทธกาล ถึงปี พ.ศ. 1000	- ชาวกรีกได้พัฒนาคอนกรีตขึ้นและพวกโรมันได้พัฒนาคอนกรีตต่อไป จนได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี สำหรับการก่อสร้างต่าง ๆ เช่น โคลี่เซี่ยม และห้องโถงขนาดใหญ่ (Dome of the Pantheon) ในประเทศอิตาลี เป็นต้น
หลังปี พ.ศ. 1000 พ.ศ. 2299	- สิ้นสุดยุคโรมัน ก็สิ้นสุดการใช้คอนกรีตเช่นกัน - John Smeaton ได้ใช้หินปูนผสมกับดินเหนียว แล้วนำมาเผา จากนั้นนำวัสดุที่ได้นี้ไปใช้ในงานก่อสร้าง ประภาคาร บริเวณช่องแคบอังกฤษ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 1.3 *Dome of the Pantheon*

รูปที่ 1.4 *ประภาคารของ Smeaton*

ปี	เหตุการณ์
พ.ศ. 2367	- การค้นพบของ Smeaton นี้ ทำให้เกิดการพัฒนาของปูนซีเมนต์ และคอนกรีตอย่างรวดเร็ว - Joseph Aspdin ชาวอังกฤษได้ขอจดลิขสิทธิ์ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยให้ความร้อนแก่หินปูนดินเหนียวและนำมาบดให้ละเอียด - ปูนซีเมนต์ที่ได้ชื่อว่า ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) เพราะมีสีเหมือนหินบนเกาะปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ - Joseph Aspdin ได้จัดตั้งหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ Wakefield และซีเมนต์ที่ผลิตถูกนำมาใช้ในโครงการอุโมงค์ลอดแม่น้ำเทมส์ ในปี พ.ศ. 2371 - Aspdin ได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สมัยใหม่
พ.ศ. 2378	- บ้านคอนกรีตหลังแรกของโลกได้ถูกสร้างขึ้นในเมือง Kent ประเทศอังกฤษ ลักษณะเป็นบ้าน 2 ชั้น
พ.ศ. 2397	- William Wilkinson ช่างก่อสร้างชาวเมือง Newcastle ได้จดลิขสิทธิ์ระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 1.5 *ลักษณะหม้อเผาปูนในสมัยต้น ๆ*

รูปที่ 1.6 *อุโมงค์คอนกรีตลอดแม่น้ำเทมส์*

ปี	เหตุการณ์
พ.ศ. 2398	- Jean Loius Lambot ได้สร้างเรือคอนกรีต (Ferro Cement) ลำแรกของโลก โดยใช้คอนกรีตหุ้มบนเหล็กเสริมที่ขึ้นรูปไว้
พ.ศ. 2410	- Joseph Monier วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ทำท่อคอนกรีตเสริมเหล็ก
พ.ศ. 2423	- ได้ค้นพบวิธีเผาซีเมนต์โดย Rotary Kiln
พ.ศ. 2456	- ได้มีการจัดตั้งโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จแห่งแรก
พ.ศ. 2460	- D. Abrahms ได้พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือ "W/C Ratio Law"
พ.ศ. 2463-2493	- พัฒนาข้อกำหนดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ เช่น ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็ว, ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต, ปูนซีเมนต์ลดความร้อน และปูนซีเมนต์ผสม เป็นต้น
พ.ศ. 2468	- ได้พบวิธีการอัดคอนกรีตให้แน่นด้วยเครื่องจี้เขย่า (Vibrator) และมีการใช้คอนกรีตกับงานก่อสร้างทุกประเภท
พ.ศ. 2471	- ค้นพบการใช้คอนกรีตเบา (Lightweight Concrete)
พ.ศ. 2473	- Eugene Freysinnet ได้ค้นพบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete)
พ.ศ. 2481	- ได้ค้นพบ Air Entraining Admixture ซึ่งเหมาะสำหรับคอนกรีต ในที่อุณหภูมิ ต่ำมาก ๆ
ตั้งแต่ พ.ศ. 2488	- ขยายการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปมากยิ่งขึ้น
ตั้งแต่ พ.ศ. 2496	- มีการใช้น้ำยาผสมคอนกรีต
ตั้งแต่ พ.ศ. 2503	- เริ่มใช้คอนกรีตปั๊ม
ตั้งแต่ พ.ศ. 2525	- ได้เกิดปัญหาเรื่องความทนทานของคอนกรีต และเริ่มมีการศึกษาในเรื่องนี้อย่างจริงจัง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

1.3 คอนกรีตกับเหล็กรูปพรรณ

คอนกรีตและเหล็กรูปพรรณเป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้สำหรับงานโครงสร้าง วัสดุทั้ง 2 ชนิดบางครั้งจะใช้รวมก แต่บางครั้งวัสดุทั้ง 2 ก็กลายเป็นวัสดุคู่แข่งซึ่งกันและกัน เพราะวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถทดแทนกันได้ แต่วัสดุทั้ง 2 มีข้อแตกต่างกันที่สำคัญคือ การผลิตเหล็กรูปพรรณทำในโรงงานที่มีการควบคุมอย่างใกล้ชิด คุณสมบัติต่าง ๆ จะถูกตรวจสอบอย่างละเอียดในห้องปฏิบัติการ และมีใบรับรองคุณภาพจากโรงงานผู้ผลิต ดังนั้นผู้ออกแบบเพียงแต่กำหนดขนาดหน้าตัดของเหล็กให้เป็นไปตามมาตรฐานทั่วไปที่ใช้ และผู้ควบคุมการก่อสร้างก็มีหน้าที่ควบคุมให้การเชื่อม การต่อชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เป็นไปตามข้อกำหนด

สำหรับหน่วยงานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตนั้น รูปการณ์จะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง เพราะแม้ว่าคุณภาพของปูนซีเมนต์จะถูกควบคุมจากโรงงานผู้ผลิตอย่างเคร่งคร เช่นเดียวกับการควบคุมการผลิตเหล็ก แต่วัสดุในโครงสร้างคือ คอนกรีตไม่ใช่ปูนซีเมนต์ การหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตต่าง ๆ จะกระทำ ณ หน่วยงานก่อสร้าง ดังนั้นคุณภาพของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับวัสดุองค์ประกอบ, สัดส่วนผสม, การผสม, การลำเลียงและการเทคอนกรีตลงแบบ, การอัดแน่น รวมไปถึงการบ่ม จะเห็นได้ชัดเจนว่า ความสำคัญของการควบคุมคุณภาพคือข้อแตกต่างระหว่างวิธีการผลิตเหล็กกับคอนกรีต คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตและเหล็ก แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

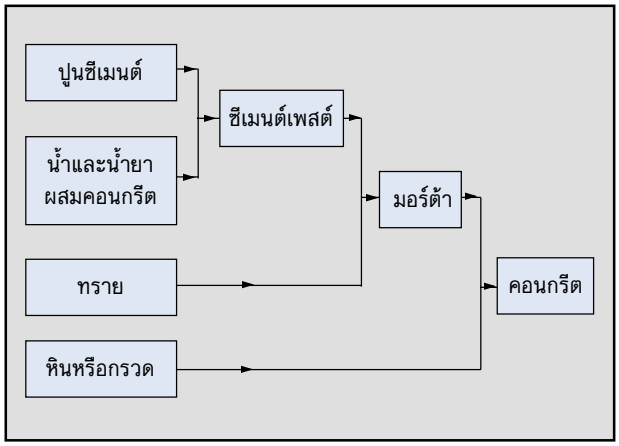
1.4 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)

มอร์ต้า ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่าคอนกรีต (Concrete) ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 *การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต*

วัสดุ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังดึง (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (E) (กก./ตร.ซม.)	ส.ป.ส. การขยายตัว ($10^{-6}/^{\circ}C$)	การนำความร้อน (W/m.k)
คอนกรีต	2,300-2,400	30	$2.5X10^5$	10	3
เหล็ก					
- ทั่วไป	7,800	3,000	$21X10^5$	12	50
- กำลังสูง	7,800	10,000	$21X10^5$	11	45

ตารางที่ 1.1 *การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็ก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

1.5 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

1. ซีเมนต์เพสต์

- หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์มีดังนี้
- เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม
- หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ
- กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ

- คุณภาพของปูนซีเมนต์
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2. มวลรวม

หน้าที่ของมวลรวมมีดังนี้

- เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์
- ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก

คุณสมบัติของมวลรวมที่สำคัญ

- มีความแข็งแรง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
- คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี
- ความต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสี

3. น้ำ

หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมี 3 ประการ คือ

- ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่าง ๆ
- ใช้ผสมทำคอนกรีต
- ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 3 ประการ

- ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์
- ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้
- เคลือบ หิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

4. น้ำยาผสมคอนกรีต

หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่าง ๆ เช่น เวลาการก่อตัว, ความสามารถเทได้, กำลังอัด, ความทนทาน เป็นต้น

1.6 ข้อดีข้อเสียของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันมากตั้งแต่อดีต เนื่องมาจากความสามารถในการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่การนำคอนกรีตไปใช้งานก็ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดบางประการด้วย ในตาราง 1.2 ได้สรุปข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1) สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้ 2) ราคาถูก 3) มีความทนทานสูง 4) ทนไฟได้ดี, ไม่ไหม้ไฟ 5) สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง 6) สามารถทำให้ผิวสวยงามได้	1) ความสามารถรับแรงดึงต่ำ 2) มีความยืดตัวต่ำ 3) มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร 4) อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ

ตาราง 1.2 *ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

1.7 คอนกรีตที่ดีกับคอนกรีตที่ไม่ดี

คอนกรีตที่ดี เป็นคอนกรีตที่ต้องมีคุณสมบัติ เป็นที่พอใจทั้งในสภาพคอนกรีตเหลว กล่าวคือ ตั้งแต่การผสม การลำเลียงจากเครื่องผสม การเทลงแบบหล่อ และการอัดแน่น และเป็นที่พอใจในสภาพคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

คอนกรีตที่ไม่ดี โดยทั่วไปจะมีความข้นเหลวไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เมื่อแข็งตัวจะมีรูโพรงและไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งโครงสร้าง

คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ต้องการ คือ จะต้องมีความข้นเหลวที่จะให้การอัดแน่นในแบบหล่อคอนกรีตตามวิธีการที่ต้องการเป็นไปโดยไม่ต้องใช้ความพยายามอย่างมาก รวมทั้งส่วนผสมจะต้องมีการยึดเกาะกันอย่างเพียงพอสำหรับวิธีการเทคอนกรีตที่จะใช้โดยไม่มีการแยกตัว อันจะเป็นต้นเหตุให้เกิดการไม่สม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต

คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คือต้องได้กำลังอัดตามข้อกำหนด นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีก เช่น ความหนาแน่น ความทนทาน ความสามารถรับแรงดึง ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำหรือของเหลว ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี การทนต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟตและอื่น ๆ

การให้ความสนใจในคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ ได้ถูกนำมาพิจารณาและให้ความสำคัญอย่างจริงจังเมื่อมีข้อกำหนดที่ทันสมัย ซึ่งจะกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการแทนการกำหนดส่วนผสมอย่างง่าย ๆ โดยเพียงบอกปริมาณส่วนผสม

ความรู้ในเรื่องคุณสมบัติของคอนกรีต ทำให้สามารถที่จะเลือกสัดส่วนผสมคอนกรีตได้อย่างเหมาะสมในราคาที่ประหยัด รวมทั้งการให้ความสนใจขบวนการผลิตคอนกรีตก็มีส่วนช่วยให้มีการพัฒนาเครื่องจักร เครื่องมือ นำมาซึ่งการปรับปรุงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีต ซึ่งเสริมให้เกิดประโยชน์ทั้งการประหยัดและประโยชน์ด้านเทคนิค

โดยสรุป การที่จะให้ได้คอนกรีตที่ดีนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- ต้องมีความรู้ในเรื่องคุณสมบัติของวัสดุและหลักการออกแบบ
- ต้องรู้ถึงสภาพทั่วไปของหน่วยงานก่อสร้าง
- วัตถุดิบต่าง ๆ ต้องมีคุณภาพอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด
- ต้องให้ความระมัดระวังในเรื่อง การชั่งตวงส่วนผสมทุกชนิด
- ต้องมีการผสม การลำเลียง การเทลงแบบ และการอัดแน่นอย่างเหมาะสม
- ต้องทำการบ่มอย่างถูกต้อง
- ต้องมีการควบคุมงานคอนกรีตที่ดีทุกขั้นตอน

1.8 ปัจจัยในการทำคอนกรีตที่ดี

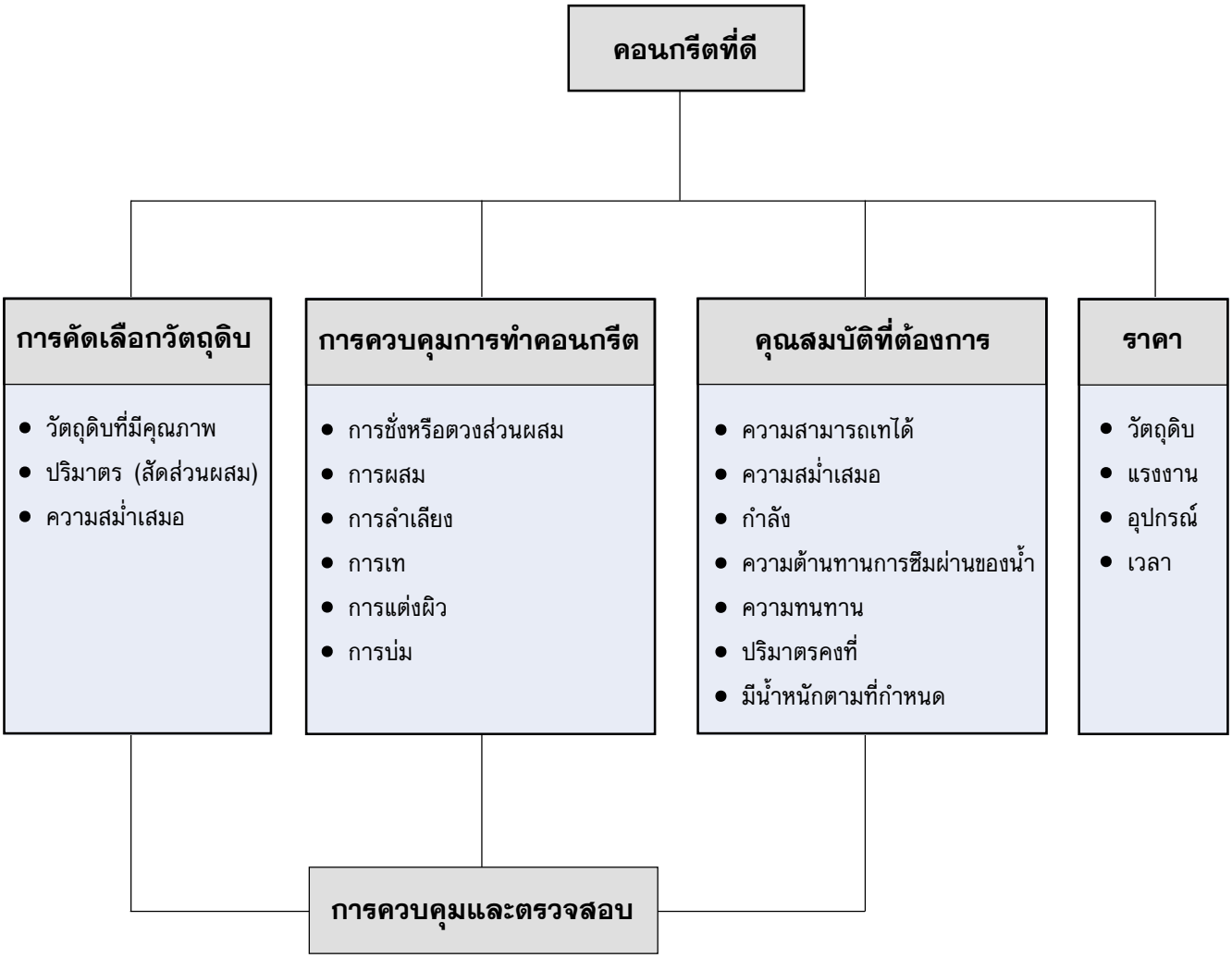
การทำคอนกรีตต้องมีขบวนการผลิตที่เป็นขั้นตอนเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอทั้งทางด้านความสามารถเทได้ (Workability) กำลัง (Strength) ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน (Durability)

กระบวนการทำคอนกรีตทั่ว ๆ ไปอาจเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1) การเลือกหาวัตถุดิบที่เหมาะสม
2) การกำหนดอัตราส่วนผสม
3) การชั่งหรือตวงวัตถุดิบเพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่ถูกต้อง
4) การผสม
5) การลำเลียงคอนกรีตสดไปเทลงแบบ
6) การเท
7) การทำให้คอนกรีตอัดแน่น
8) การแต่งผิว
9) การบ่ม
10) การแกะแบบหล่อคอนกรีตตามระยะเวลาที่ถูกต้อง

กระบวนทำคอนกรีตดังกล่าวนี้ มีปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาหรือคำนึงถึง เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ดีและมีราคาเหมาะสมซึ่งอาจนำมาแสดงเป็นแผนภูมิดังรูปที่ 1.8

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 1.8 *ปัจจัยในการทำคอนกรีตที่ดี*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 2
ปูนซีเมนต์

2.1 ประวัติ

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีกและโรมัน คำว่า ซีเมนต์ มาจากภาษาลาติน มีความหมายทั่ว ๆ ไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี พ.ศ. 2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์ จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทา เหมือนกับหินที่ใช้ก่อสร้าง บริเวณเมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัตถุนี้ว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รวมทั้งได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก รวมทั้งได้มีการเปิดโรงงานผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่น ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2398 ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2414 และประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2425 ส่วนในประเทศไทยได้มีการเริ่มผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ครั้งแรก ในปี พ.ศ. 2456

2.2 กรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

1) Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)

2) Argillaceous Materials ได้แก่ ซิลิก้า อลูมิน่า ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale)

3) Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือศิลาแลง (Laterite)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกออกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

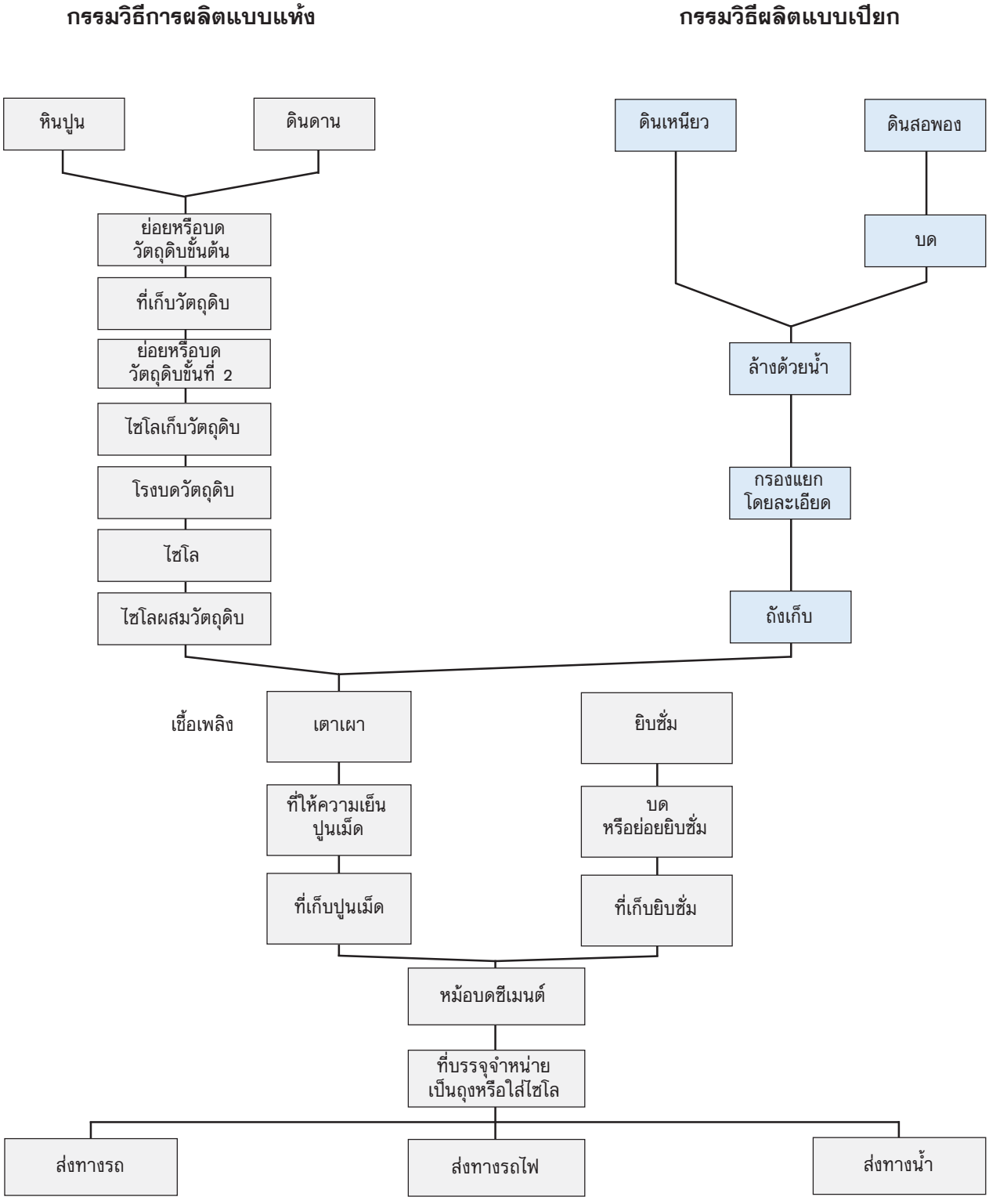
1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียว ถูกนำมาผสมกันให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา (Kiln) กรรมวิธีในการผลิตแบบแห้งนั้น วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ หินปูนและดินดาน จะถูกนำมาผสมกันในสภาพแห้ง ๆ ให้ได้สัดส่วนที่ต้องการ แล้วบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา กรรมวิธีในการผลิตแบบเปียกและแบบแห้ง ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบบดได้ที่แล้วก็จะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ วัตถุดิบต่าง ๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็น Clinker ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงนี้ มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในขณะทำการบดจะมีการเติมยิบซั่มลงไปเล็กน้อย ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ อันจะเป็นผลทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป

สำหรับกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยปัจจุบันนิยมผลิตแบบแห้งซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีที่ทันสมัยที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อย หม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน สามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ถึง 10,000 ตันต่อวัน สำหรับข้อมูลปริมาณความต้องการและการบริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 2.1 *แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ประเทศ	ปริมาณความต้องการปูนซีเมนต์ (ล้านตัน)	การบริโภค (กก./ประชาชน 1 คน)
สิงคโปร์	2.15	800
ญี่ปุ่น	82.00	665
เยอรมัน	40.00	645
ไทย	18.70	335
มาเลเซีย	5.60	320
อเมริกา	71.30	285
อังกฤษ	16.00	280
ฟิลิปปินส์	7.35	115
อินโดนีเซีย	14.05	75

ตารางที่ 2.1 *ปริมาณความต้องการ และการบริโภคปูนซีเมนต์ (ข้อมูลปี 2533)*

2.3 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิก้า, อลูมิน่า และเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na_2O, TiO_2, P_2O_5 และยิปซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.2

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO_2	1 - 25
Al_2O_3	3 - 8
Fe_2O_3	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 - 5.5
Na_2O+K_2O	0.5 - 0.3
TiO_2	0.1 - 0.4
P_2O_5	0.1 - 0.2
SO_3	1 - 3

ตารางที่ 2.2 *ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรคัลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\ CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\ CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรคัลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\ CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

ตารางที่ 2.3 *สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณจากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่าง ๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้น ๆ โดยใช้สูตรการคำนวณของ Bogue ดังนี้ :

ปริมาณ C_3S = 4.07 (CaO) - 7.60 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Fe_2O_3) - 2.85 (SO_3)

ปริมาณ C_2S = 2.87 (SiO_2) - 0.754 (C_3S)

ปริมาณ C_3A = 2.65 (Al_2O_3) - 1.69 (Fe_2O_3)

ปริมาณ C_4AF = 3.04 (Fe_2O_3)

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime

ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.4

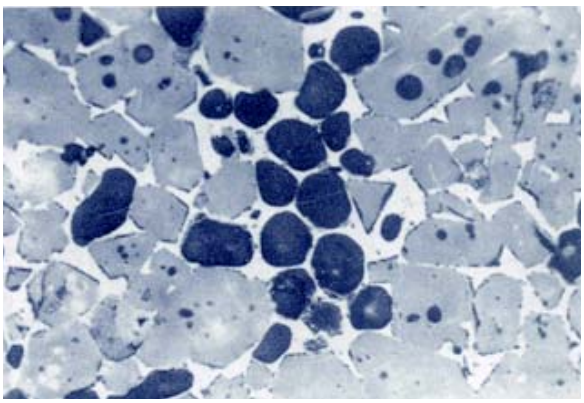
ออกไซด์ต่าง ๆ (%) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารประกอบหลักคำนวณจากสมการของ Bogue
CaO	64.73	C_3S = 4.07 x (64.73 - 1.60) - 7.60 x (21.20) - 6.72 x (5.22) - 1.43 x (3.08) - 2.85 x (2.01) = 50.6%
SiO_2	21.20	
Al_2O_3	5.22	
Fe_2O_3	3.08	
		C_2S = 2.87 x (21.20) - 0.754 x (50.6) = 22.7%
MgO	1.04	
SO_3	2.01	
Na_2O	0.19	C3A = 2.65 x (5.22) - 1.69 x (3.08) = 8.6%
K_2O	0.42	
Loss of Ignition	1.45	C_4AF = 3.04 x (3.08) = 9.4%
Insoluble Residue	0.66	
Free Lime	1.60	

ตารางที่ 2.4 *ตัวอย่างการคำนาณหาสารประกอบหลัก*

2.4 สารประกอบหลัก

1. ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55%



รูปที่ 2.2 *รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลิตรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมดำ*

2. ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

3. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15%

4. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

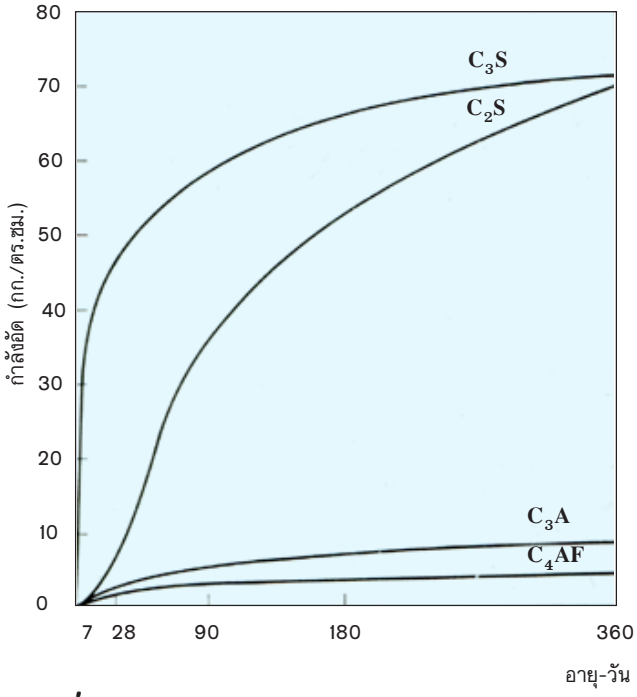
C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10%

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.5 และกราฟรูปที่ 2.3

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(นาที)
2) การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้าสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5) คุณสมบัติอื่น ๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตารางที่ 2.5 *สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*



รูปที่ 2.3 *การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก*

2.5 สารประกอบรอง

1. ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิบซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิบซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิบซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

1) อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O

2) ปริมาณ C_3A

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2. Free Lime (CaO)

Free lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด

2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์

2) ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดตชั่นได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

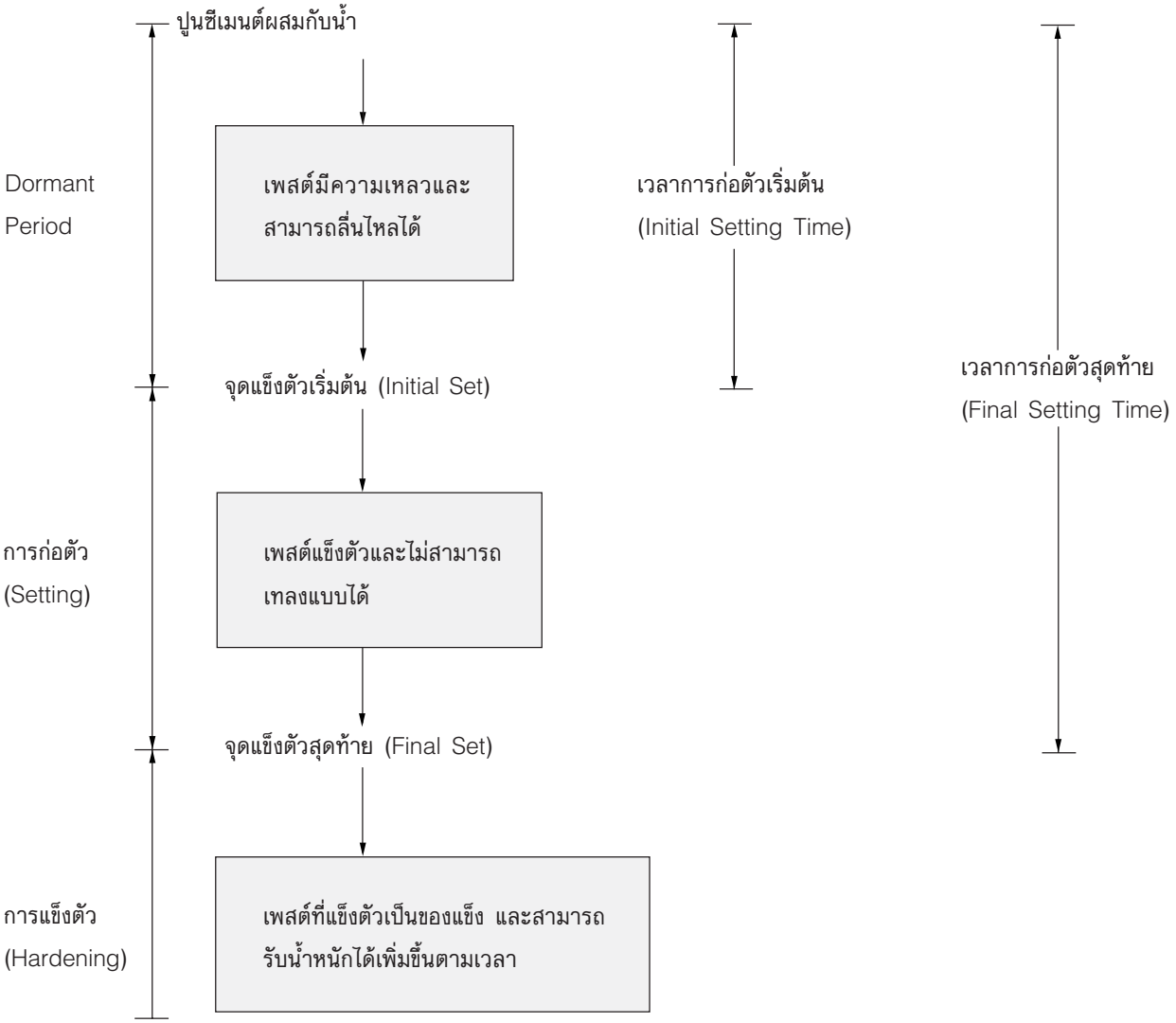
4. อัลคาไลท์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O)

อัลคาไลท์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2.6 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า "จุดแข็งตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ "จุดแข็งตัวสุดท้าย" (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า "เวลาการก่อตัวสุดท้าย" (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า "การแข็งตัว" (Hardening) ขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 *ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

• ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

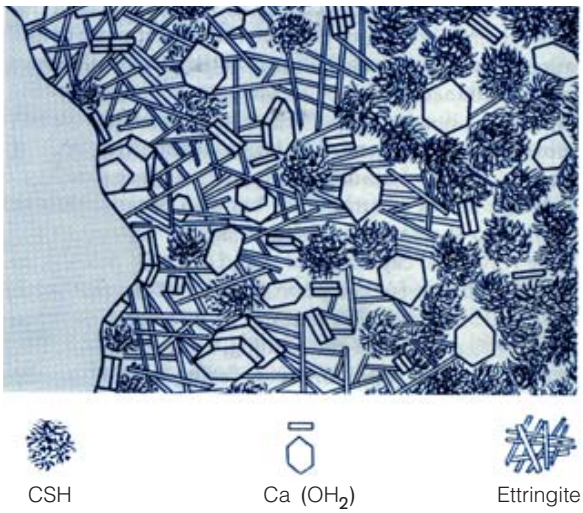
คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

หรือ $2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

หรือ $2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$



รูปที่ 2.5 *แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต*

จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

• ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$$

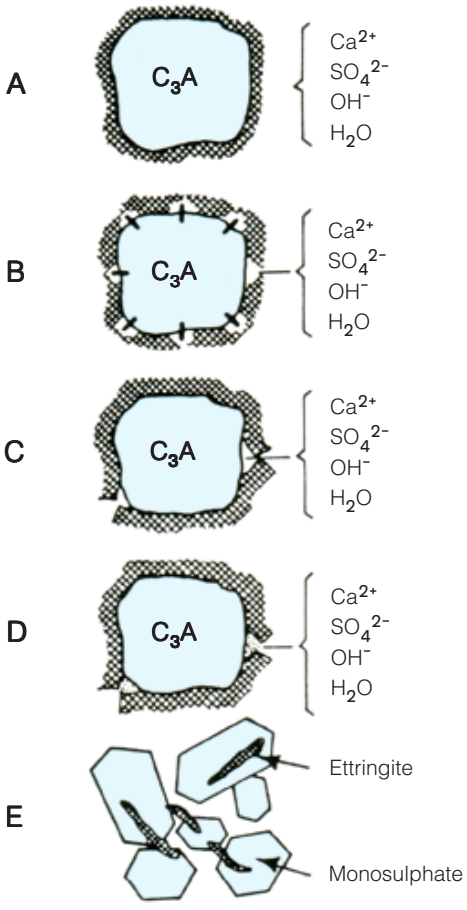
หรือ $C_3A + 6H_2O \longrightarrow 3C_3AH_6$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

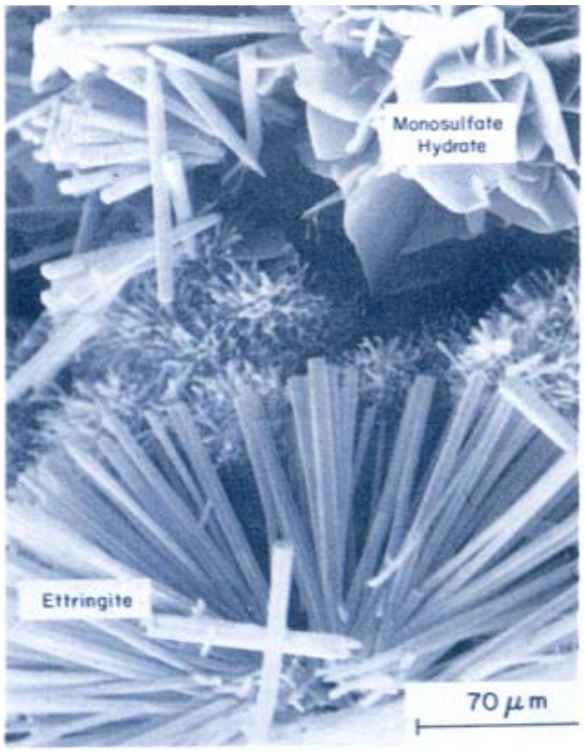
$$C_3A + CaSO_4 \cdot 2H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO4 \cdot 31H_2O \text{ (Ettringite)}$$

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ขั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 *ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A*



รูปที่ 2.7 *ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite*

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)**

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO(Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4$$

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.6

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

ตารางที่ 2.6 *เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

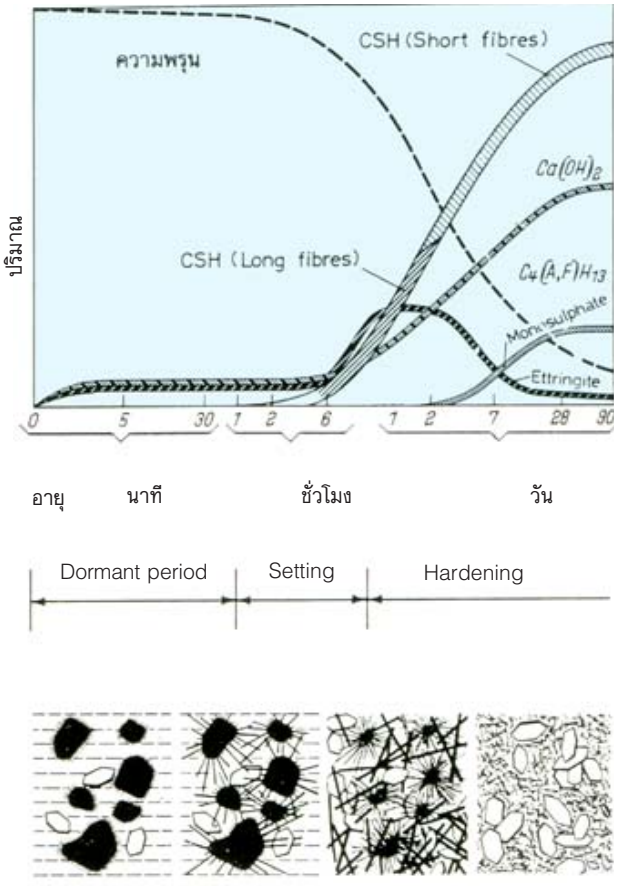
2.8 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งอธิบายการเกิด "Dormant Period" อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ในขณะนั้นซีเมนต์เพสต์ยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง "Dormant Period" ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

แผนภาพแสดงขบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และโครงสร้างของเพสต์ แสดงในรูปที่ 2.8 โดยซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่ $Ca(OH)_2$ จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยม ผลึกของ Ettringite แสดงโดยเส้นบาง ๆ สั้น ๆ และ CSH เส้นเข้มมีความยาวพอสมควร จากรูปที่ 2.8 จะพบว่าระหว่าง Dormant Period เม็ดซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH gel เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัว CSH gel นี้ก่อให้เกดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของเพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป อลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ เริ่มก่อตัวและ Ettringite ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน C_3S และ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเพสต์ลดลงในระยะยาว



รูปที่ 2.8 *แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์*

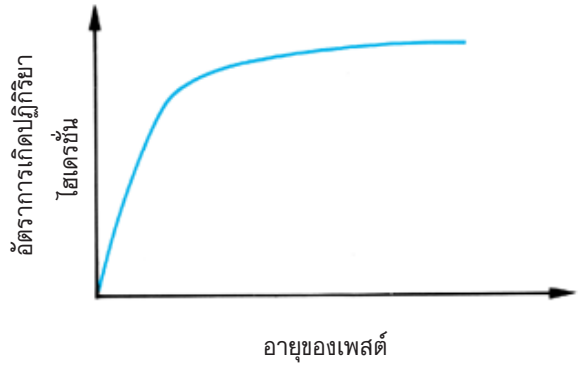
2.9 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้แก่

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่อง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 *อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น*

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ จากตารางที่ 2.6 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

2.10 ประเภทของปูนซีเมนต์

• ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคเขียว เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

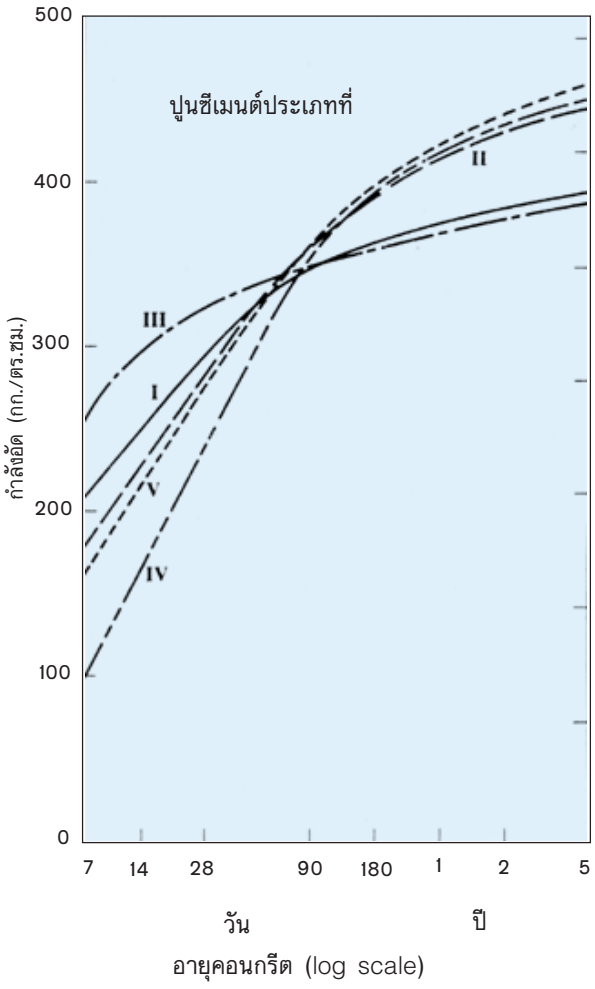
ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้ ปัจจุบันประเภทนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverlized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) ซึ่งจะอธิบายละเอียดในเรื่องวัสดุใหม่ในงานก่อสร้าง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C_3A ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดช้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างฟ้าและตราปลาฉลาม

เกณฑ์กำหนด คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 และ 2.8 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 *การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ำสุดร้อยละ		21.0			
2. อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0			
3. เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0		6.5	
4. มักเนเซียมออกไซด์ (MgO) สูงสุดร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงสุดร้อยละ					
5.1 เมื่อมี 3 CaO · Al_2O_3 ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
5.2 เมื่อมี 3 CaO · Al_2O_3 มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
6. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss of Ignition) สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
7. กากที่ไม่ละลายในกรดด่าง (Insoluble Residue) สูงสุดร้อยละ 0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
8. ไตรคัลเซียมซิลิเกต (3 CaO · SiO_2) สูงสุดร้อยละ				35.0	
9. ไดคัลเซียมซิลิเกต (2 CaO · SiO_2) ต่ำสุดร้อยละ				40.0	
10. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (3 CaO · Al_2O_3) สูงสุดร้อยละ		8.0	15.0	7.0	5.0
11. ผลบวกของไตรคัลเซียมซิลิเกต และไตรคัลเซียมอลูมิเนต		58.0			
12. เททระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกสองเท่าไตรคัลเซียมอลูมิเนต [4 CaO · Al_2O_3 · Fe_2O_3 + 2 (3 CaO · Al_2O_3)] หรือสารละลายแข็ง [4 CaO · Al_2O_3 · Fe_2O_3 + 2 CaO · Fe_2O_3] แล้วแต่กรณีสูงสุดร้อยละ				20.0	

ตารางที่ 2.7 *เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ให้เลือกวิธีทดสอบได้)					
1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิมิเตอร์ (Turbidimeter Test Wagner)					
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1,600	1,600		1,600	1,600
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1,500	1,500		1,500	1,500
1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี (Air Permeability Test, Blaine) ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2,800	2,800		2,800	2,800
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2,600	2,600		2,600	2,600
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (Autoclave Expansion) สูงสุดร้อยละ	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) (ให้เลือกทดสอบได้)					
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gillmore Test)					
ก่อตัวระยะต้น (Initial Set) ไม่น้อยกว่า - นาที	60	60	60	60	60
การก่อตัวระยะปลาย (Final Set) ไม่มากกว่า - ชั่วโมง	10	10	10	10	10
3.2 ทดสอบแบบไวแคท (Vicat Test) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เล่ม 9) การเริ่มก่อตัวไม่น้อยกว่า- นาที	45	45	45	45	45
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 13 โดยปริมาณกว่า ร้อยละ	12	12	12	12	12

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
5. แรงอัด (Compressive Strength) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์ มอร์ตา (Mortar Cube) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด (Graded Standard Sand) 2.75 ส่วน โดยน้ำหนักเตรียมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ เล่ม 12 ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้					
1 วันในอากาศชื้น กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร			120		
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ — กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร	150	130		55	105
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ — กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร	245	245		140	210
6. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Heat of Hydration)					
7 วัน สูงสุด คาลอรี่ต่อกรัม		70		60	
28 วัน สูงสุด คาลอรี่ต่อกรัม		80		70	
7. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุดร้อยละ	50	50	50	50	50
8. การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต (Sulphate Expansion) 14 วัน สูงสุด ร้อยละ					0.045

ตารางที่ 2.8 *เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พิเศษ

นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อีกบางประเภทที่นิยมใช้กันในประเทศไทย

ปูนซีเมนต์ขาว (White Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี C_4AF อยู่ต่ำมากจึงมีสีขาว โดยทั่วไปความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนประเภทนี้จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A และ C_3S สูงกว่า เหมาะสำหรับงานตบแต่งต่าง ๆ เช่น งานหินขัด การปูกระเบื้องและงานสถาปัตยกรรมอื่น ๆ ปูนซีเมนต์ขาวที่มีใช้อยู่ในประเทศไทยได้แก่ ตราช้างเผือก ตราเสือเผือก ตรามังกร ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 3.05-3.10 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปที่มีค่า 3.15 เล็กน้อย

ปูนซีเมนต์สำหรับบ่อน้ำมัน (Oil Well Cement) โดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง ผสมกับสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปูนประเภทนี้จะใช้สำหรับงานเจาะบ่อน้ำมัน โดยจะผสมปูนซีเมนต์ประเภทนี้แล้วปั๊มลงไปใต้ดิน บางทีต้องปั๊มลงไปถึงความลึก 6,000 เมตร หรือมากกว่าและอุณหภูมิถึง 170 องศาเซลเซียส ซีเมนต์เพสต์นี้ยังต้องเหลวพอที่จะทำงานได้จนถึงประมาณ 3 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะแข็งตัวโดยเร็ว

ปูนซีเมนต์ซิลิก้า หรือปูนซีเมนต์ผสม (Silica Cement) ผลิตโดยการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับทรายหรือหินปูน ประมาณ 25-30% คุณสมบัติทั่วไปของปูนประเภทนี้คือ จะแข็งตัวช้า ไม่ยืดหรือหดตัวมาก ช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับผสมทำปูนก่อปูนฉาบ นอกจากนี้ปูนประเภทนี้จะให้กำลังอัดไม่สูงนัก ตัวอย่างปูนประเภทนี้ เช่น ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตราจูเห่า และตรานกอินทรีย์ คุณลักษณะของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.9

• ปูนซีเมนต์อื่น ๆ

High Alumina Cement (HAC) หรือ Calcium Aluminate Cement ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส เพื่อทนทานต่อซัลเฟต แต่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการกำลังอัดอันรวดเร็ว HAC ได้จากการเผารวมกันของหินปูน และ Bauxite ซึ่งก็คือ อลูมิ - เนียม ที่อุณหภูมิ 1,600 องศา จากนั้นนำมาบด สารประกอบของ HAC นี้จะแตกต่างอย่างมากจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป รวมทั้งสีของ HAC ก็จะเข้มกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบของเหล็กอยู่ในจำนวนมาก HAC บางทีเรียกว่า "Ciment Fondu" ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ทั่ว ๆ ไปมาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เฉพาะในกรณีที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ในงานที่ต้องการใช้คอนกรีตทนซัลเฟตได้ดีมาก ๆ งานซ่อมคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะได้กำลังอัดสูงถึง 240 กก./ตร.ซม. ในเวลาเพียง 6-8 ชั่วโมง รวมไปถึงการทำอิฐทนไฟ แต่อย่างไรก็ตาม HAC มีข้อเสียคือ ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น หรือเมื่อใช้คอนกรีตนี้เป็นเวลานานจะเกิดการสลายตัว "Conversion" โดยความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และความสามารถในการผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลที่ตามมาคือ กำลังอัดจะลดลงถึง 80% ในการใช้งานไม่ควรที่จะนำ HAC ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่ว ๆ ไป เพราะจะก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Flash Set)

Magnesium Phosphate Cement หรือชื่อที่รู้จักทางการค้า คือ Set 45 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ถูกคิดค้นขึ้นในประเทศอเมริกา มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ จะแข็งตัวและให้กำลังอัดสูงมากภายในเวลาเพียง 45 นาที เหมาะสำหรับใช้ในงานซ่อมต่าง ๆ โดยเฉพาะจะใช้ซ่อมแซมพื้นสนามบินในเวลาเกิดสงคราม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

คุณสมบัติ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบของเบลน (Air Permeability Test, Blaine) ต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	 2,800	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 6 ข้อกำหนดการหาความละเอียดโดยแอร์เพร์มีอะบิลิติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 204)
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (Autoclave Expansion) สูงสุดร้อยละ	 0.6	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 11 ข้อกำหนดการหาความขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 151)
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) ไม่น้อยกว่า-นาที	 45 นาที	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 9 ข้อกำหนดการก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 191)
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) โดยปริมาณสูงสุดร้อยละ	12	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 13 ข้อกำหนดการหาปริมาณอากาศในมอร์ต้า (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 185)
5. แรงอัด (Compressive Strength) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า (Mortar Cube) ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้		ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 12 ข้อกำหนดการหาแรงอัด (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 109)
หนึ่งวันในอากาศชื้น — เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)	6.4	
สองวันในน้ำ	(65)	
หนึ่งวันในอากาศชื้น — เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)	11.3	
หกวันในน้ำ	(115)	
6. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	 50	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 15 ข้อกำหนดก่อตัวผิดปกติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 451)

ตารางที่ 2.9 *คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม*

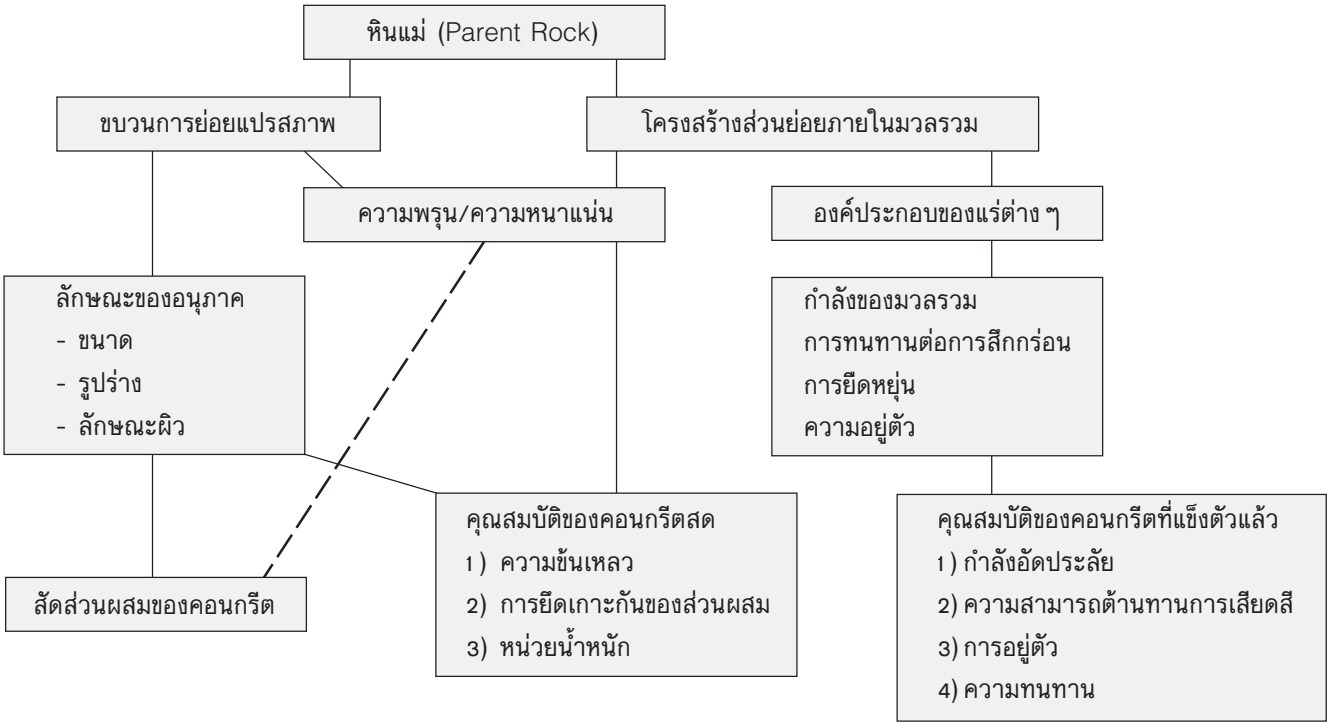
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 3
มวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นที่สงสัยเลยว่า ทำไมคุณภาพของมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในเรื่องนี้อย่างมาก

ในอดีต มวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานโดยกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์เท่านั้น ในปัจจุบันนี้พบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีก ประการแรก เนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวม มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์

คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 *แผนภาพแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในเนื้อมวลรวมและขบวนการย่อยแปรสภาพจะเป็นตัวพิจารณาคุณสมบัติของมวลรวม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3.1 ประเภทของมวลรวม

เราสามารถแบ่งมวลรวมตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) **มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate)** เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ

2) **มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate)** เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ได้จากการเผาดิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักจะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

1) **มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate)** มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300-1,100 กก./ลบ.ม.

2) **มวลรวมปกติ (Normal Weight Aggregate)** มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400-3,000 กก./ลบ.ม.

3) **มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate)** มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กก./ลบ.ม.

หรือถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาด เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) **มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)** ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2) **มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)** ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากในส่วนผสมคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น

Silt จะมีขนาดประมาณ 0.07 มม.

Clay จะมีขนาดอยู่ช่วง 0.02-0.06 มม.

3.2 กรรมวิธีการผลิต

- **กรรมวิธีการผลิตหิน**

ประเทศไทยนิยมใช้หินปูนในงานก่อสร้างเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากมีภูเขาหินปูนกระจายอยู่ทั่วประเทศ การจะนำหินที่อยู่ตามธรรมชาติมาใช้นั้น จะต้องการแปรรูปให้มีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

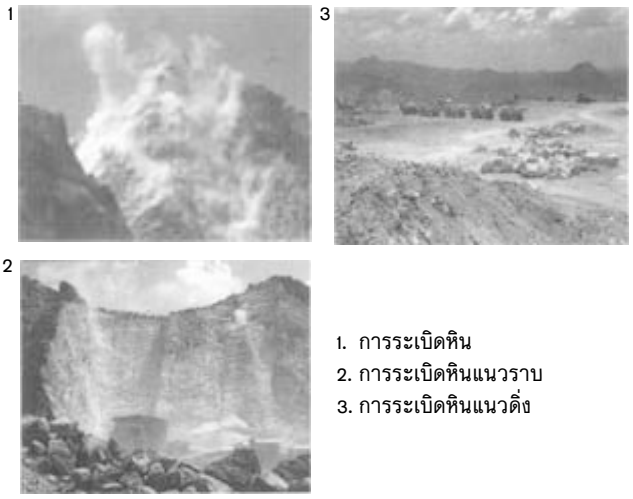
ขั้นตอนที่ 1 สำรวจหาแหล่งหินที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานจากนั้นจึงขอสัมปทานของพื้นที่นั้น

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้รับสัมปทานพื้นที่นั้นแล้ว จึงทำการเปิดหน้าเหมืองโดยการระเบิด ซึ่งสามารถทำการระเบิดได้ 2 วิธี คือ

วิธีแรก ทำการระเบิดหินตามแนวดิ่ง ลาดขึ้นไปตามความชันของหน้าผา วิธีนี้โรงโม่ส่วนใหญ่นิยมใช้ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีผลเสียคือ เป็นวิธีที่ค่อนข้างอันตราย

วิธีที่สอง ทำการระเบิดหินตามแนวราบ ลักษณะคล้ายขั้นบันได โดยเริ่มกระบวนการระเบิดหิน ไล่ลงมาจากแนวยอดเขา วิธีนี้ใช้เงินลงทุนสูง แต่ให้ผลดีคือ มีความปลอดภัยสูงกว่าแบบแรกมาก

รูปที่ 3.2 *การระเบิดหิน*

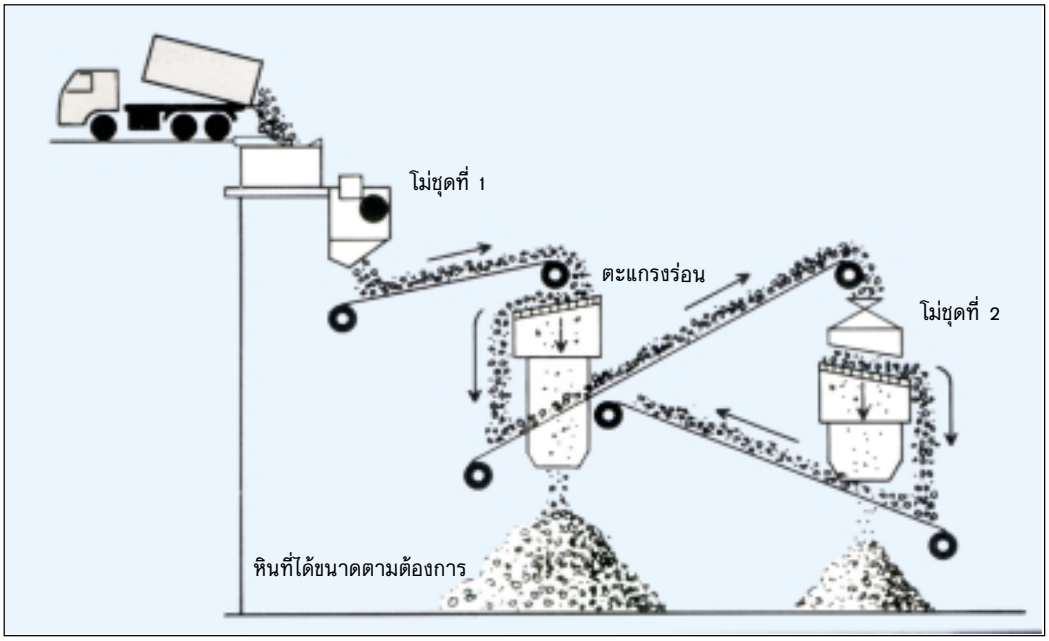


1. การระเบิดหิน
2. การระเบิดหินแนวราบ
3. การระเบิดหินแนวดิ่ง

ทั้งนี้ หินที่ได้จากการระเบิด จะมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะนำมาใช้งาน จึงต้องนำมาโม่ให้มีขนาดเหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้งาน

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการโม่หิน ลำเลียงหินที่ได้จากการระเบิดลงสู่ปากโม่ บริเวณปากโม่จะมีตะแกรงคัดแยกหินที่มีขนาดเล็กกว่า 8 นิ้วออก ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่ จะผ่านเข้าสู่เครื่องโม่ตัวที่ 1 ซึ่งจะทำการย่อยหินให้มีขนาดเล็กลงจนได้ขนาดประมาณ 8 นิ้ว - NO. 4 จากนั้นสายพานจะลำเลียงหินผ่านตะแกรงชุดที่ 2 เพื่อแยกหินที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่ต้องการออกไป ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการก็จะลำเลียงเข้าสู่เครื่องโม่ชุดที่ 2 ซึ่งจะทำหน้าที่โม่หินจนมีขนาดที่ต้องการเกือบหมด หลังจากขั้นตอนนี้ หินจะผ่านเข้าไปยังตะแกรงร่อน เพื่อร่อนแยกคัดขนาดหินที่ต้องการไว้ ทั้งนี้อาจมีหินบางส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ สายพานจะนำหินวกกลับเข้าสู่เครื่องโม่ชุดที่สองอีกครั้งต่อเมื่อผ่านโม่จนครบขั้นตอนจนได้หินที่มีขนาดตามต้องการ สายพานจะลำเลียงหินไปกองเก็บเพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.3 *แผนภาพแสดงขั้นตอนการโม่หิน*

● กรรมวิธีการผลิตทราย

ทรายที่ใช้ผลิตคอนกรีต สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด คือ

- ทรายแม่น้ำ
- ทรายบก

ทรายแม่น้ำ

เป็นทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อย ๆ ตกตะกอน สะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จะตกตะกอนอยู่บริเวณต้นน้ำ ส่วนทรายละเอียดนั้นก็จะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ

การนำทรายขึ้นจากท้องน้ำ จะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมาตามท่อ แล้วทิ้งทรายลงบนตะแกรงของเรืออีกลำ ตะแกรงจะทำหน้าที่ร่อนแยกกรวดที่มีขนาดใหญ่ออกก่อนที่จะดูดทรายขึ้นบนเรืออีกลำ

เมื่อทรายเต็มเรือ ก็จะใช้เรืออีกลำลากเรือบรรทุกทรายไปยังท่าทราย ทรายที่ได้จะยังไม่สะอาดนัก เนื่องจากมีสารอินทรีย์ เศษตะกอนของดินโคลนปะปนอยู่ โดยทั่วไปจะต้องมีการล้างทรายอีกครั้ง คือเมื่อเรือบรรทุกทรายมาถึงท่า ทรายจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณใกล้ท่า โดยการเปิดท้องเรือให้ทรายไหลลงแม่น้ำ แต่ถ้าเรือที่ลำเลียงทรายเปิดท้องเรือไม่ได้ ก็จะใช้สายพานลำเลียงทรายทิ้งลงในแม่น้ำ จากนั้นจะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมา ทำวิธีการเดียวกันกับการดูดทรายขึ้นตากท้องน้ำครั้งแรก แตกต่างกันที่ตะแกรงที่ใช้จะสามารถแยกได้ทั้งทรายหยาบและทรายละเอียด ทรายที่ได้จัดเป็นทรายที่สะอาด เพราะผ่านการชะล้างถึง 2 ครั้ง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 3.4 *เรือดูดทรายขึ้นล้างบนตะแกรง*

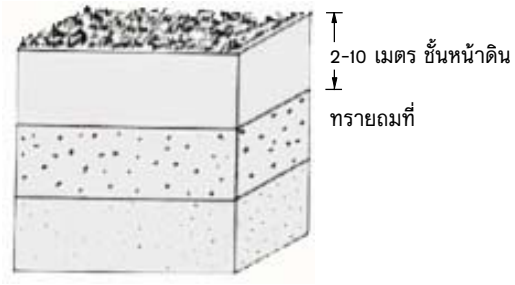
ขั้นต่อไป คือการลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock โดยใช้สายพานลำเลียงตากเรือไปเก็บไว้ในยุ้งจนเต็มเมื่อยุ้งเต็มก็จะลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock ต่อไป ทรายที่เก็บไว้ในยุ้งสามารถลำเลียงลงรถบรรทุกได้โดยสะดวก เพียงเปิดปากยุ้งให้ทรายไหลลงในรถบรรทุกเอง ส่วนทรายที่กอง Stock อยู่หากจะนำไปใช้จะใช้รถตัก ขนทรายใส่รถบรรทุกอีกครั้ง

รูปที่ 3.5 *ลักษณะของกองเก็บทราย*

ทรายบก

เป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอน ทับถมกันของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดิน โดยมีซากพืช ซากสัตว์ทับถมที่ผิวหน้า ซึ่งเราเรียกกันว่า หน้าดิน ที่มีความหนาประมาณ 2-10 เมตร

การนำทรายมาใช้ เริ่มจากการเปิดหน้าดินก่อนด้วยรถตักดิน จากนั้นจะขุดดินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน จนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ แล้วนำเรือดูด ดูดทราย ผ่านมาตามท่อ โดยปลายท่อจะมีตะแกรงแยกกรวดออก ขณะเดียวกันก็สามารถติดตั้งตะแกรงเพื่อแยกทรายหยาบและทรายละเอียดได้ ทรายที่ผ่านการร่อนแยกทรายหยาบและทรายละเอียด ทรายที่ผ่านการร่อนแยกจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณริมฝั่ง จากนั้นก็จะใช้รถตัก ตักทรายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.6 *ภาพตัดชั้นหน้าดิน*

รูปที่ 3.7 *เรือดูด ดูดทรายในแอ่งน้ำ*

รูปที่ 3.8 *ตะแกรงแยกกรวด*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3.3 คุณสมบัติทั่วไป

มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้มวลรวมควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1) ความแข็งแกร่ง (Strength)

มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือ จะรับแรงกดได้ 700-3,500 กก./ตร.ซม. ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวมที่ใช้

2) ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance)

ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสีของมวลรวมมักจะถูกใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตที่จะต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือขัดสี เช่น งานผิวถนน, พื้นโรงงาน, พื้นสนามบิน เป็นต้น ดังนี้ มวลรวมที่ใช้ได้ดี ควรมีความแข็งแรง, เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่มหรือเป็นรูพรุนหรือแตกละเอียดได้ง่าย

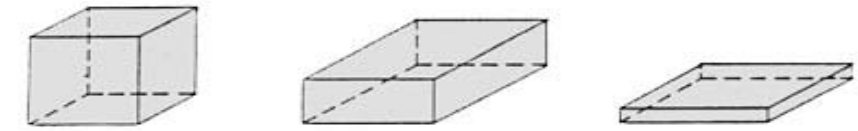
3) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในบางพื้นที่มวลรวมบางประเภทจะทำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าวโดยทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Alkalis-Aggregate Reaction (AAR)

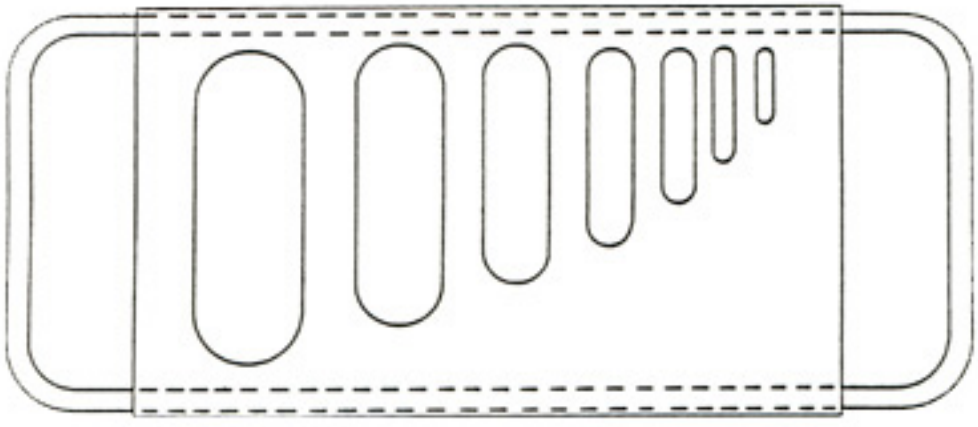
4) รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Texture)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด มากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบ หรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเทได้ (Workability) เดียวกัน ตามมาตรฐานอังกฤษ มีการกำหนดการทดสอบรูปร่างของมวลรวมไว้ 2 ประการ คือ

1) การทดสอบความแบน (Flakiness) ซึ่งคือ อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของมวลรวม ในรูปที่ 3.9 แสดงรูปร่างของหินที่มีระดับความหนาแตกต่างกัน และรูปที่ 3.10 แสดงเครื่องทดสอบความแบนของมวลรวม



รูปที่ 3.9 *รูปร่างของหินที่มีระดับความแบนที่แตกต่างกัน*

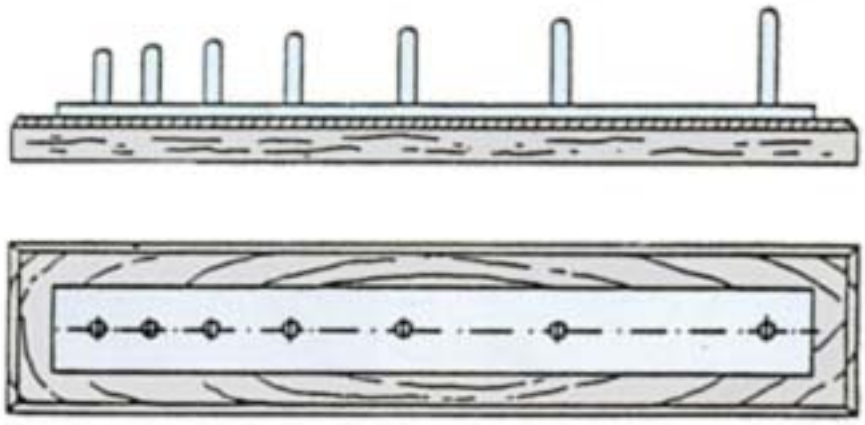


รูปที่ 3.10 *เครื่องทดสอบความแบนของหิน (Thickness gauge)*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) การทดสอบความยาวเรียว (Elongated) ซึ่งคืออัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของมวลรวม ในรูปที่ 3.11 แสดงรูปร่างของหินที่มีระดับความยาวเรียวแตกต่างกัน และในรูปที่ 3.12 แสดงเครื่องทดสอบความยาวเรียว

รูปที่ 3.11 *รูปร่างของหินที่มีระดับความยาวเรียวที่แตกต่างกัน*



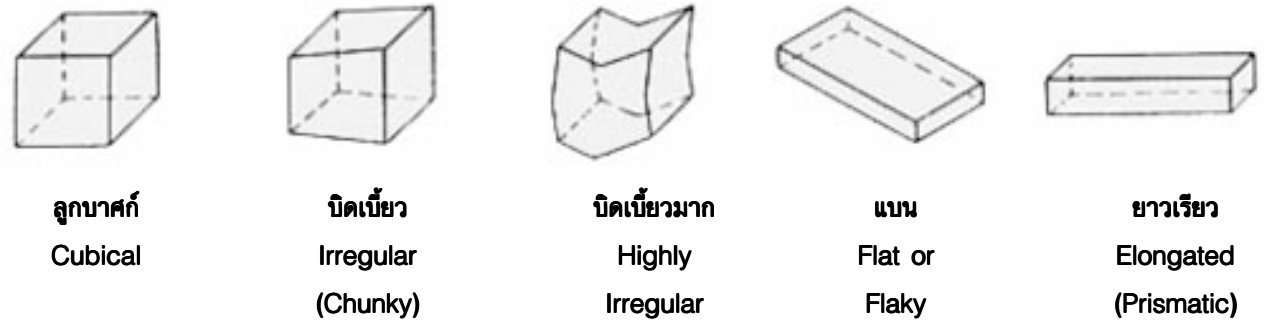
รูปที่ 3.12 *เครื่องทดสอบความยาวเรียวของหิน (Length gauge)*

ส่วนลักษณะผิวของมวลรวมจะมีผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยว เมื่อมีผิวหยาบด้านหรือมีรูพรุนมาก จะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวดี แต่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

กลม (Rounded)

เป็นเหลี่ยมมุม (Angular)



รูปที่ 3.13 *การแบ่งชนิดของมวลรวมตามรูปร่างของอนุภาค*

มาตรฐาน มอก.566 ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและลักษณะของมวลรวมไว้ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

การแบ่งประเภท	ลักษณะ	ตัวอย่าง
กลม	เกลี้ยงไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากถูกน้ำกัดเซาะหรือจากการเสียดสีกันเอง	กรวดทรายจากแม่น้ำหรือชายทะเล
ไม่สม่ำเสมอหรือมีส่วนกลมอยู่บ้าง	ไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติหรือถูกเสียดสีมาบ้าง และมีเหลี่ยมมน	กรวดทรายที่ได้จากบ่อหิน เหล็กไฟที่ได้จากพื้นดินหรือขุดขึ้นมา หินรูปลูกบาศก์
เหลี่ยม	มีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่เรียบบรรจบกันและเห็นได้ชัด	หินที่ย่อยจากเครื่องไม่ทุกแบบ หินที่ตกตามไหล่เขา
แบน	วัสดุที่มีความหนาไม่มากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยมด้วย	หินที่มีลักษณะเป็นชั้น

ตารางที่ 3.1 *การแบ่งประเภทของมวลรวมและลักษณะตาม มอก.566*

เนื้อผิว	ตัวอย่าง
ใสคล้ายแก้ว	หินเหล็กไฟดำ
เรียบ	หินเชิร์ต หินชนวน หินอ่อน และหินไรโอโลต์บางชนิด
เป็นเม็ด	หินทราย หินอูไลต์
เป็นผลึก	อย่างละเอียด :
	บะซอลต์ แทรกโคต์ แกรโนไฟร์
	อย่างกลาง :
	โดเลอไรต์ แกรโนไฟร์ แกรนูไลต์ ไมโครแกรนิต หินปูนบางชนิด และหินโดโลไมต์ส่วนใหญ่
	อย่างหยาบ :
	แกบโบร ไนส์ แกรนิต แกรโนไดโอไรต์ ไซอีไนต์
เป็นโพรงรวงผึ้ง หรือเป็นรูพรุน	สกอเรีย พัมมิช ทราส

ตารางที่ 3.2 *ลักษณะผิวของมวลรวม ตาม มอก.566*

5) ส่วนคละ (Gradation)

ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การทำคอนกรีตที่ดีนั้น แต่ละก้อนของมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ตาม นอกจากนี้ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมเมื่อนำมาผสมรวมกันแล้ว มวลรวมที่ขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างก้อนของมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะใช้ยึดมวลรวมเข้าด้วยกัน รวมทั้งอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ดังนั้น การใช้มวลรวมที่ส่วนขนาดคละที่เหมาะสมจึงทำให้ลดปริมาณซีเมนต์เพสต์ลง ทำให้ประหยัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้

รูปที่ 3.14 *ขนาดต่าง ๆ ของมวลรวม*

3.4 คุณสมบัติที่ต้องใช้พิจารณาในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ผู้ออกแบบต้องทราบถึงคุณสมบัติของมวลรวมดังนี้

1) ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมที่ใช้
2) ขนาดคละ
3) ปริมาณความชื้นและการดูดซึม
4) ความถ่วงจำเพาะ
5) หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง

1. ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมที่ใช้ (Maximum Size of Aggregate)

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ พิจารณาได้จากการทำการหาส่วนคละของมวลรวม แล้วดูผลจากเปอร์เซ็นต์ที่ค้างว่าตะแกรงร่อนใหญ่ (หยาบ) ที่สุดอันใดมีเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงอันที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ชั้น เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมนั้น ดังแสดงในตัวอย่าง

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักค้าง (กรัม)	% ค้าง
1"	12	-
3/4"	1,384	7
1/2"	8,031	41
3/8"	8,676	43
เบอร์ 4	573	3
เบอร์ 8	609	3
ถาดรอง	513	3
รวมน้ำหนัก	19,800	100

พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ จะเห็นว่า ตะแกรงร่อนใหญ่ที่สุดที่มีหินค้างบนตะแกรงร่อน (%ค้าง) เกิน 15% คือ ตะแกรงร่อน 1/2" ขนาดของตะแกรงร่อนที่ใหญ่กว่านี้ 1 ชั้น คือ ตะแกรงร่อน 3/4" ดังนั้นขนาดใหญ่ที่สุดของหินนี้คือ 3/4"

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการ และขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมน้อยกว่ามวลรวม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ที่ขนาดเล็กเมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า เพื่อให้มีความสามารถในการเทได้เท่ากัน หรือถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่ากัน กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น ถ้าใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้น เพราะสามารถลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั่นเอง

ผู้ออกแบบจำเป็นต้องตัดสินใจเลือกขนาดใหญ่สุดของมวลรวม โดยมีข้อพิจารณาเลือกดังนี้

1) ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมต้องมีขนาดไม่เกิน 1/5 ของส่วนที่แคบสุดของแบบหล่อ หรือ

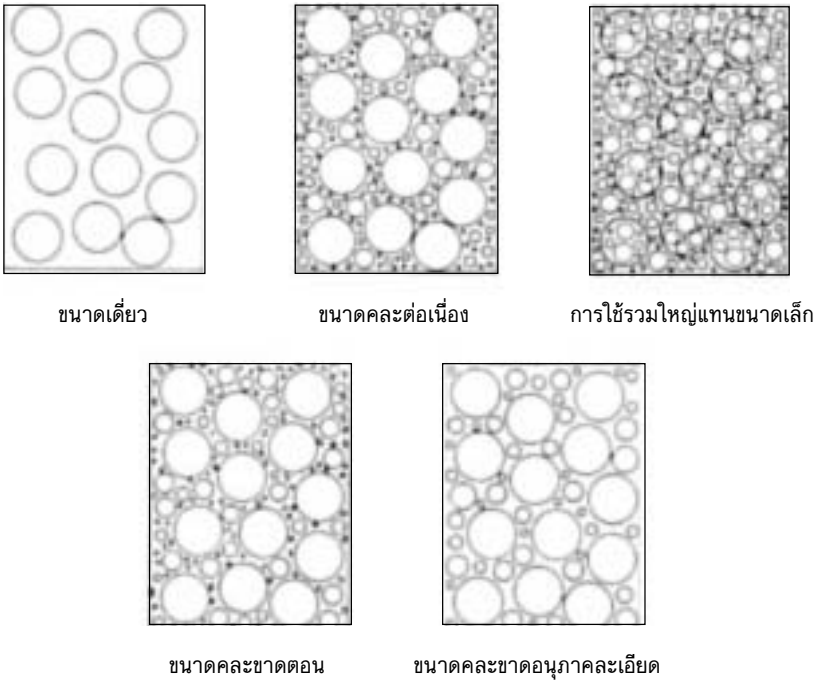
2) ขนาดไม่เกิน 3/4 ของระยะแคบสุด ระหว่างเหล็กเสริม หรือระหว่างเหล็กเสริมกับแบบหล่อ หรือ

3) ขนาดไม่เกิน 1/5 ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อคอนกรีตปั๊ม

ข้อกำหนดที่กล่าวนี้จะหมายถึง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ ในงานก่อสร้างทั่วไปจะมีขนาดไม่เกิน 40 มิลลิเมตร

2. ขนาดคละ (Gradation)

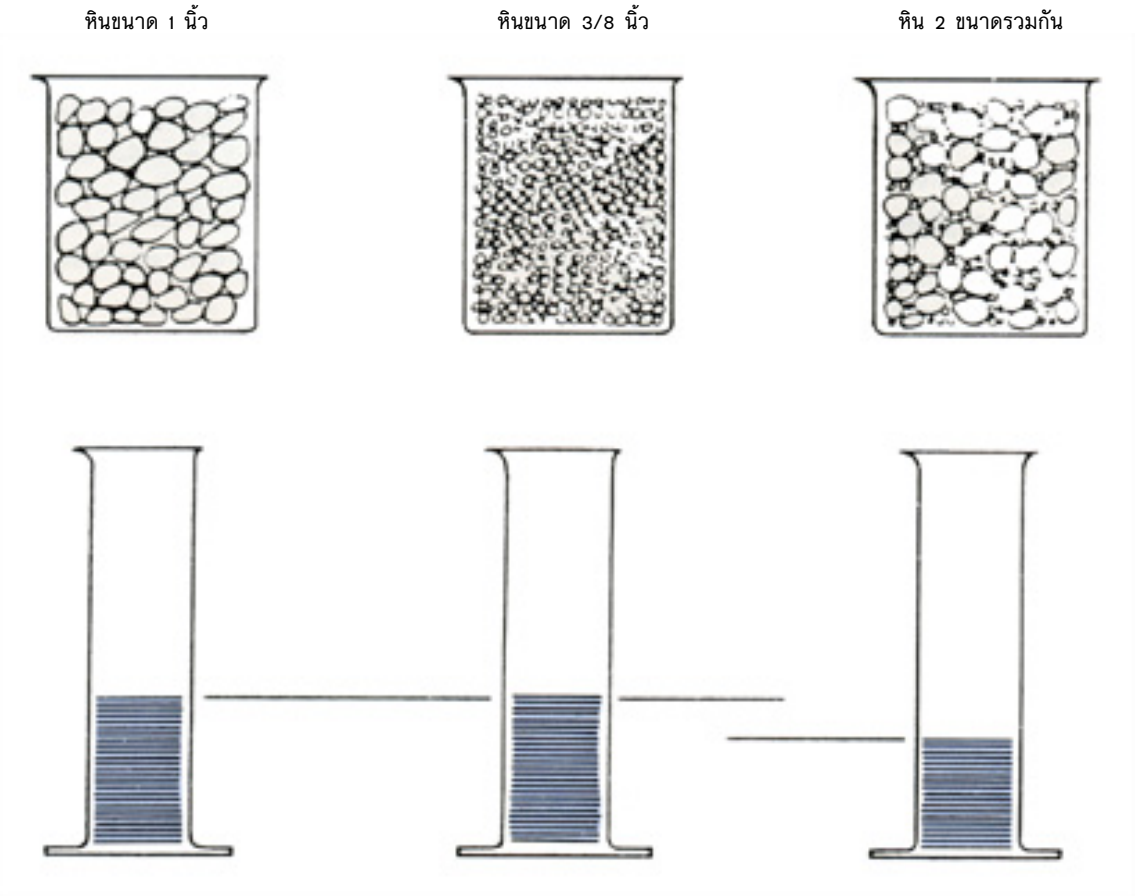
ขนาดคละคือ การกระจายของขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณของเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการสำหรับคอนกรีตสด คอนกรีตจะมีราคาประหยัดเมื่อใช้เนื้อซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุดในการผลิตคอนกรีต โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต เช่นความสามารถในการเทได้, การทำให้แน่น, การปาดและการแต่งผิวหน้า, กำลังอัดและความทนทานยังเป็นไปตามข้อกำหนด



รูปที่ 3.15 *การเรียงตัวของมวลรวมขนาดคละต่าง ๆ กัน*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพิ่มเติมให้เต็มช่องว่างเมื่อใช้หิน 2 ขนาดคละกัน จะน้อยกว่าเมื่อใช้หินเพียงขนาดเดียว (Single Size) นั้นคือ ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลง ถ้าใช้หินและทรายหลายขนาดที่ลดหลั่นมาผสมกันโดยมีสัดส่วนที่พอเหมาะแล้ว จะทำให้ช่องว่างเหลือน้อยที่สุด ทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุด ซึ่งก็คือ คอนกรีตจะมีราคาต่ำลง



รูปที่ 3.16 *มวลรวมที่มีขนาดคละดี จะใช้ปริมาณน้ำสำหรับผสมน้อย*

• การวิเคราะห์ขนาดคละ

วิธีการที่ใช้ประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยตะแกรง โดยการเก็บตัวอย่างปริมาณหนึ่งมาร่อนบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ซึ่งวางเรียงกันตามขนาดช่องว่างของตะแกรงจากขนาดใหญ่สุดข้างบนถึงขนาดเล็กสุด และถาดรองด้านล่าง แล้วทำการร่อน อาจใช้มือโยกเขย่าหรือใช้เครื่องร่อน การร่อนจะทำโดยใช้ตะแกรงเคลื่อนไหวทั้งทางราบและทางแนวดิ่งรวมทั้งการตบเขย่าเพื่อให้วัสดุตัวอย่างเคลื่อนไหวอยู่บนตะแกรงตลอดเวลา ผลการวิเคราะห์จะนำมาใส่ตารางซึ่งประกอบด้วย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ช่องที่ 1 น้ำหนักของวัสดุที่ค้างอยู่บนตะแกรง

ช่องที่ 2 ค่าร้อยละของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

ช่องที่ 3 ค่าร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐาน

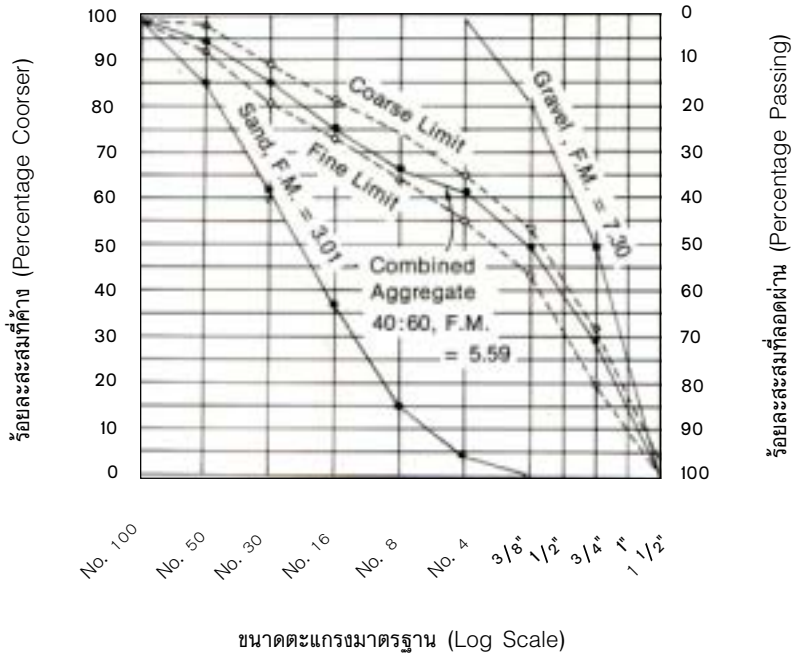
ช่องที่ 4 ค่าร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.3

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักค้างที่บนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	32	2.0	2.0	98.0
8	90	5.9	7.9	92.1
16	211	13.7	21.6	78.4
30	530	34.5	56.1	43.9
50	530	34.5	90.6	9.4
100	140	9.1	99.7	0.3
ถาดรอง	5	0.3	100.0	
น้ำหนักรวม	1,538	100		

ตารางที่ 3.3 *การวิเคราะห์ขนาดคละ*

• แผนภูมิคละ

แผนภูมิคละ คือ การแสดงผลการวิเคราะห์วัสดุผสมบนกระดาษกราฟ โดยให้แกนตั้งแสดงน้ำหนักร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ค้าง หรือผ่านตะแกรงแต่ละขนาด แกนนอนแสดงขนาดช่องเปิดของตะแกรง กระดาษกราฟที่ใช้ควรเป็นแบบ Semi-Log Scale โดยมี Log Scale บนแกนนอน โดยทั่วไปแผนภูมิมีขนาดคละจะประกอบด้วย กราฟขีดจำกัดล่าง, ขีดจำกัดบน ตามข้อกำหนด และกราฟขนาดคละของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 *แผนภาพส่วนคละของมวลรวม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.)

โมดูลัสความละเอียด คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยที่

โมดูลัสความละเอียด (F.M.) = $^{1}/_{100}$ (ผลบวกของร้อยละสะสมของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน)

ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ คือขนาด เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 ตัวอย่างการหาค่า F.M. ของทราย จากตารางที่ 3.3 หาได้ดังนี้

F.M. = 1/100 (2 + 7.9 + 21.6 + 50.1 + 90.6 + 99.7)
= 2.78

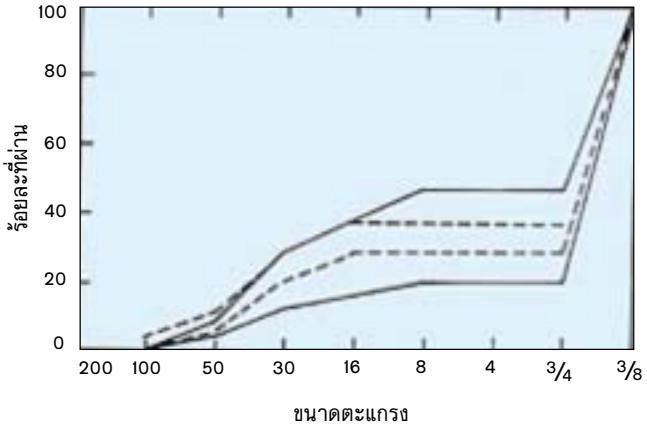
ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ทรายที่มีค่า F.M. สูง คือทรายจะมีความหยาบมาก เช่นทรายที่มีค่า F.M. = 3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทรายที่มีค่า F.M. = 2.3 เป็นต้น ทรายที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่า ๆ กัน

• ข้อจำกัดอื่น ๆ เกี่ยวกับขนดคละ

ปริมาณอนุภาคละเอียดที่ผ่านตะแกรง เบอร์ 50 และ 100 มีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด, การแต่งผิวหน้า และการเยิ้มของน้ำบนผิวคอนกรีตสด (Bleeding) นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็ก ๆ ยังช่วยให้คอนกรีตเกาะตัวรวมกันได้ดี มาตรฐาน ASTM กำหนดปริมาณอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เป็น 10% แต่ปริมาณนี้ไม่เพียงพอสำหรับ การปาดแต่งผิวหน้าด้วยเครื่องไม้ ปริมาณที่ควรจะมีคือ ผ่านเบอร์ 50 อย่างน้อย 15% และเบอร์ 100 อย่างน้อย 5% แต่ต้องมิให้มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% เพราะอนุภาคขนาดเล็กนี้มักประกอบด้วยดินเหนียวซึ่งมีผล 2 ประการใหญ่ คือ จะต้องใช้ปริมาณน้ำจำนวนมาก และเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีตจะไม่ดีด้วย

• ขนาดคละขาดตอน (Gap Grading)

ขนาดคละขาดตอน คือ มวลรวมที่ขาดอนุภาคขนาดกลางขนาดหนึ่งขนาดใดหรือหลายขนาด ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถเทได้ เมื่อนำมวลรวมนี้ไปผสมคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงจะเกิดปัญหาแยกตัว (Segregation) ได้ง่าย



รูปที่ 3.18 *ลักษณะแผนภาพของมวลรวมที่มีขนาดคละขาดตอน*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3. ปริมาณความชื้นและการดูดซึม (Moisture and Absorption)

มวลรวมมีรูพรุนภายในบางส่วนที่ติดต่อกับผิวนอก ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดความชื้น นอกจากนี้น้ำบางส่วนยังสามารถเกาะบริเวณผิวของมวลรวม ดังนั้นมวลรวมที่เก็บอยู่ในสภาพธรรมชาติ จึงมีความชื้นต่าง ๆ กันไป สภาพความชื้นนี้มีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต คือ หากมวลรวมอยู่ในสภาพแห้งก็จะดูดน้ำผสมเข้าไป ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จริงลดลง หากเปียกชื้นก็ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จริงสูงกว่าที่ควรจะเป็น

• สภาพความชื้น

อาจแบ่งสภาพความชื้นออกได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้

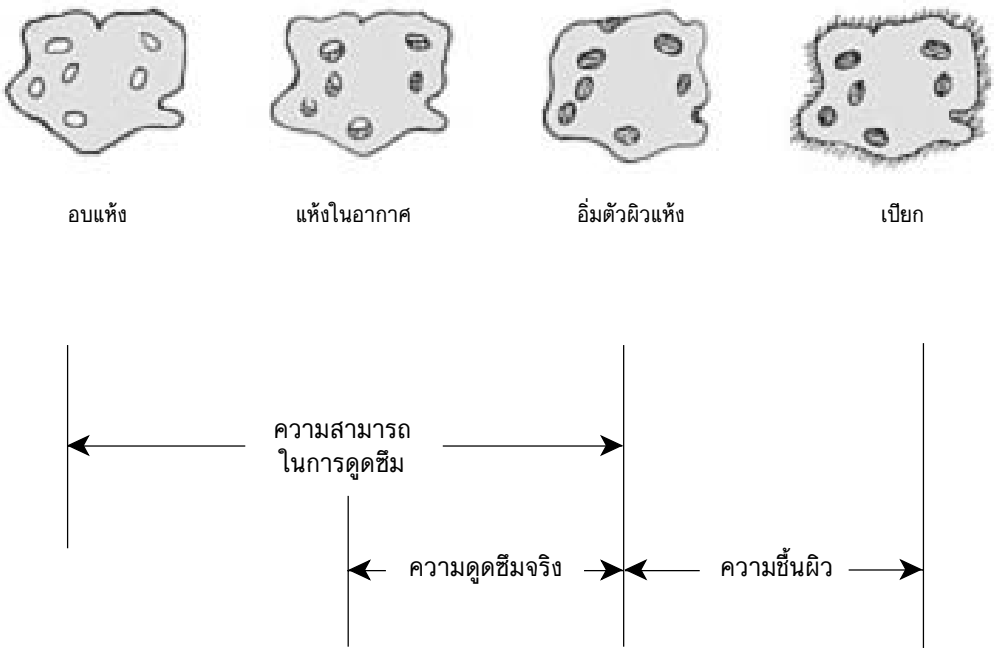
1. อบแห้ง (Oven-Dry, OD) ความชื้นถูกขับออกด้วยความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศา จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 12 ชั่วโมง)

2. แห้งในอากาศ (Air-Dry, AD) ผิวแห้ง แต่อาจมีน้ำในรูพรุน

3. อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface-Dry, SSD) รูพรุนเต็มไปด้วยน้ำ แต่ผิวแห้ง

4. เปียก (Wet, W) รูพรุนเต็มไปด้วยน้ำ และมีน้ำบนผิวด้วย

ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมทุกครั้ง จะถือว่ามวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วจึงปรับปริมาณน้ำตามลักษณะอิ่มตัวผิวแห้งนั้นจะเรียกว่า "ความจุในการดูดซึม" ผลต่างของความชื้นในลักษณะอิ่มตัวผิวแห้ง กับความชื้นในลักษณะแห้งด้วยอากาศเรียกว่า "การดูดซึม"

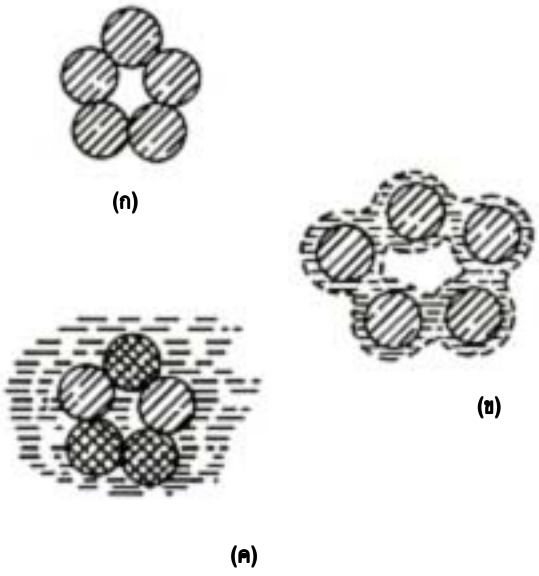


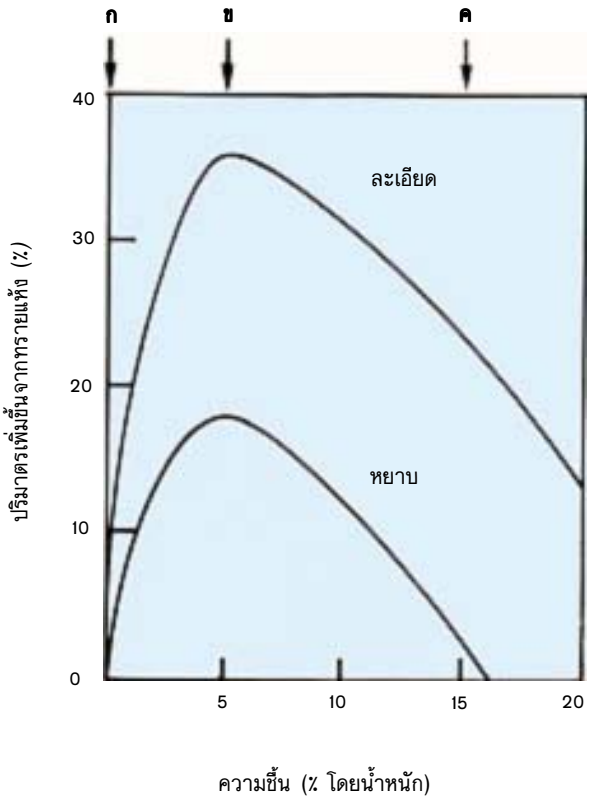
รูปที่ 3.19 *สภาพความชื้นของมวลรวม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปริมาณเพิ่มของทราย (Bulking of Sand)

ตามปกติมวลรวมหยาบในสภาพเก็บรักษาจะอยู่ในสภาพแห้งในอากาศโดยมีปริมาณการดูดซึมจริงน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมวลรวมละเอียดมักจะเปียกและมีความชื้นบนผิวระหว่าง 3-5 เปอร์เซ็นต์ เหตุที่มวลรวมละเอียดมีปริมาณเพิ่มมากก็เพราะปริมาณน้ำที่เคลือบอยู่บนผิวอนุภาค นอกจากนี้ความตึงของผิวน้ำยังทำให้ความหนาของน้ำที่เคลือบผิวสูงขึ้นและผลักดันให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดห่างออกจากกัน ซึ่งเราเรียกว่า Bulking ซึ่งมีผลให้การหาส่วนผสมคอนกรีตด้วยการตวงปริมาตรมีโอกาสผิดพลาด เราจึงควรใช้วิธีชั่งน้ำหนักแทน และการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมควรทำในสภาพอบแห้ง เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นบนผิวมวลละเอียดจนเปียก แรงตึงผิวจะหายไป ดังนั้นจึงมีปริมาตรลดลงเหมือนสภาพแห้งดังรูปที่ 3.20





รูปที่ 3.20 *ปริมาตรเพิ่มปรากฏของมวลรวมละเอียด (ก) แห้ง (ข) ชื้นเล็กน้อย (ค) เปียก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

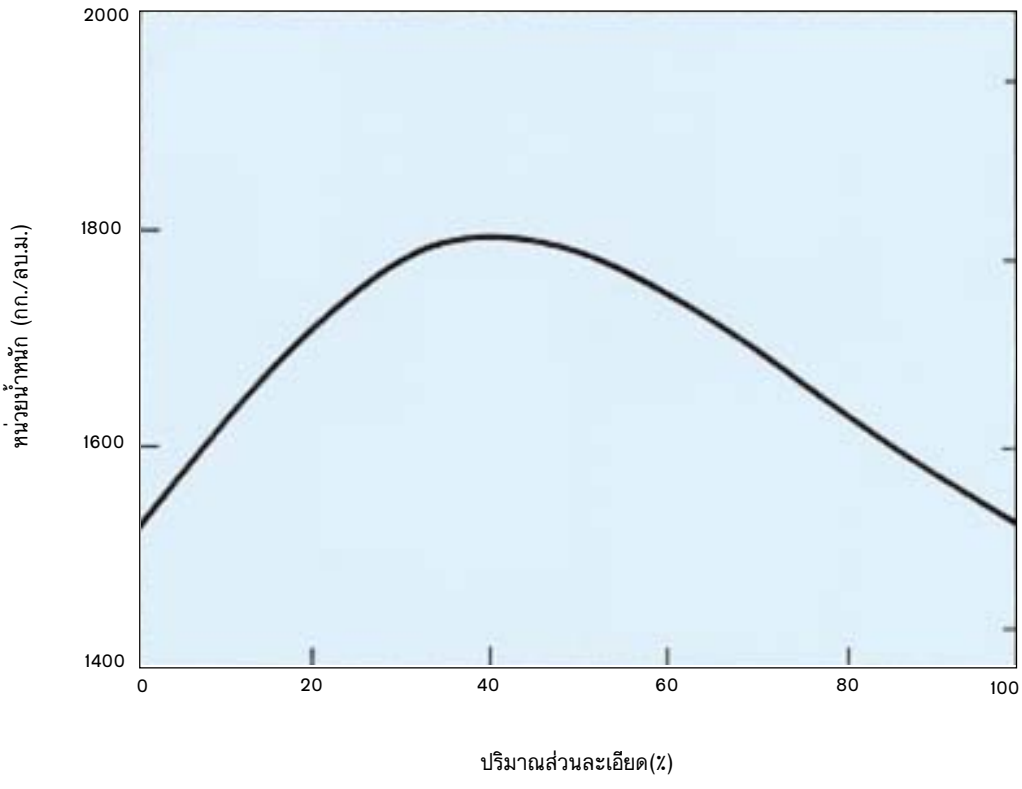
4. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลรวมต่อความหนาแน่นของน้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสม และรูพรุนของก้อนวัสดุ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทยจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 และ 2.65 ตามลำดับ ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในการแปลงปริมาตรเป็นน้ำหนักหรือกลับกัน

5. หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง (Unit Weight and Void)

หน่วยน้ำหนัก คือ น้ำหนักของมวลรวมในขนาดคละที่ต้องการต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างระหว่างมวลรวม ที่มวลรวมน้ำหนักหนึ่ง ๆ จะบรรจุลงได้ ดังนั้น หน่วยน้ำหนักย่อมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการบดอัดและสภาพความชื้น เราใช้หน่วยน้ำหนักในการคำนวณหาปริมาตรเมื่อใช้วิธีตวงในการวัดส่วนผสมของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่ใช้อยู่ทั่ว ๆ ไปในประเทศไทยมีค่า 1,400-1,600 กก./ลบ.เมตร การนำเอามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมาผสมกับด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ จะมีผลต่อหน่วยน้ำหนักของมวลรวมผสมดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้มวลรวมละเอียด 34-40% โดยน้ำหนัก ดังนั้น ถ้าคำนึงถึงเฉพาะราคาคอนกรีต (ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุด) เราควรใช้เปอร์เซ็นต์ทรายในช่วงดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสดด้วย



รูปที่ 3.21 *ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณมวลรวมละเอียด*

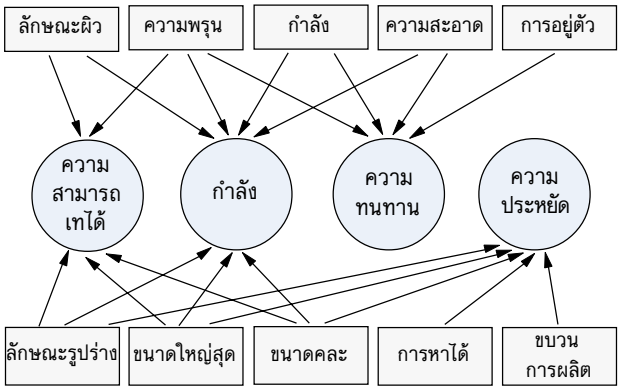
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3.5 คุณสมบัติของมวลร่วมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมจะส่งผลถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 *คุณสมบัติของมวลรวมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต*

คุณสมบัติของคอนกรีต	คุณสมบัติของมวลรวมที่เกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์
ความทนทาน	
การต้านทานต่อ Freezing และ Thawing	Soundness, ความพรุน, โครงสร้างของรูพรุน ในเนื้อมวลรวม, การซึมผ่านของน้ำ, ปริมาณการอิ่มตัว, การรับแรงดึง ลักษณะและโครงสร้างของผิว, สิ่งเจือปน
การต้านทาน Wetting และ Drying	โครงสร้างของรูพรุนในเนื้อมวลรวม, โมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
การต้านทานต่อ Heating และ Cooling	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
การต้านทานต่อการสึกกร่อน	ความแข็ง
การทำปฏิกิริยากับ Alkali ในคอนกรีต	ปริมาณของ Siliceous ที่เป็นส่วนประกอบ
กำลัง	กำลัง, ลักษณะผิว, ความสะอาด, รูปร่างขนาดใหญ่สุด
Shrinkage และ Creep	โมดูลัสยืดหยุ่น, รูปร่างของมวลรวม, ขนาดคละ, ความสะอาด, ขนาดใหญ่สุด และสิ่งเจือปน
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน, โมดูลัสยืดหยุ่น
การนำความร้อน	การนำความร้อน
ความร้อนจำเพาะ	ความร้อนจำเพาะ
หน่วยน้ำหนัก	ความถ่วงจำเพาะ, รูปร่าง, ส่วนคละ, ขนาดใหญ่ที่สุด
โมดูลัสยืดหยุ่น	โมโล้สยืดหยุ่น, Poisson's Ratio
การลื่นของผิวหน้า	แนวโน้มการขัดเป็นมันของผิวหิน
การประหยัด	รูปร่าง, ส่วนคละ, ขนาดใหญ่ที่สุด, จำนวนขั้นตอน ในการผลิต, ความยากง่ายในการหามวลรวม



รูปที่ 3.22 *อิทธิพลของคุณสมบัติของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

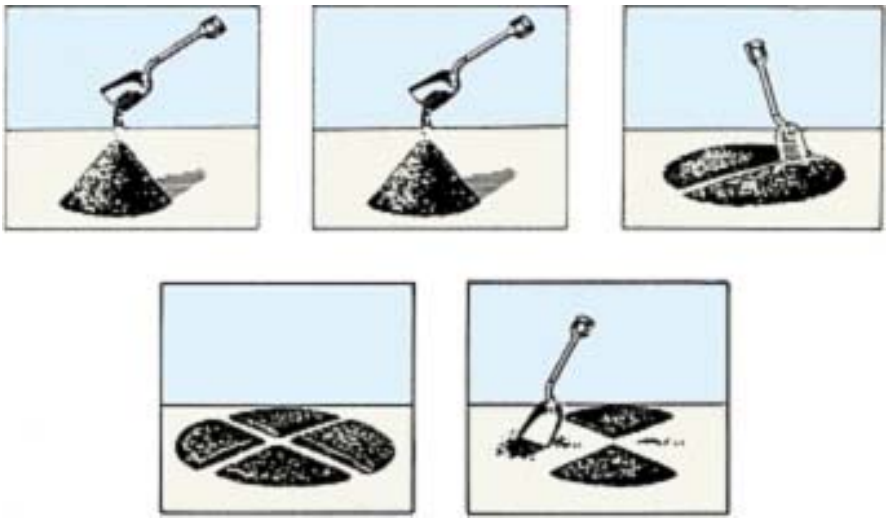
3.6 การทดสอบคุณสมบัติ

มวลรวมที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องได้รับการสุ่มเก็บจากต้นแหล่ง หรือ ณ สถานที่กองเก็บ และต้องนำมาทำการแบ่งส่วนก่อนการทดสอบ เพื่อให้ได้ตัวแทนของตัวอย่างถูกต้อง การแบ่งส่วนของตัวอย่างอาจทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1) ใช้ Riffle Sampler โดยเทตัวอย่างมวลรวมผ่าน Sample Splitter ซึ่งจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนผ่านช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.23

2) ใช้วิธีแบ่งสี่ ทำโดยการผสมมวลรวม จากนั้นแบ่งออก เป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน นำ 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันมาทดสอบ และทิ้ง 2 ส่วนที่เหลือไป ดังแสดงในรูปที่ 3.24

รูปที่ 3.23 *การแบ่งส่วนตัวอย่างโดยใช้ Riffle Sampler*



รูปที่ 3.24 *วิธีแบ่งสี่*

การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

การทดสอบกลุ่มที่ 1 ทดสอบหาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมวลรวมนี้มาผสมคอนกรีต เช่น กำลัง, ลักษณะรูปร่างและผิว, ความถ่วงจำเพาะ, การดูดซึม, การต้านทานการเสียดสี หน่วยน้ำหนัก ซึ่งการทดสอบคุณสมบัตินี้จะทดสอบเฉพาะเมื่อเปลี่ยนแหล่งมวลรวมใหม่ หรือเมื่อสงสัยในคุณสมบัติเท่านั้น

การทดสอบกลุ่มที่ 2 ทดสอบหาคุณสมบัติทั่ว ๆ เช่น ส่วนคละ, ความชื้น, ความสะอาด และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งจะต้องทำการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ถ้าแบ่งการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม ตามวิธีการทดสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 3.5

การทดสอบทางฟิสิกส์ Physical Tests	การทดสอบทางกล Mechanical Tests	การทดสอบทางเคมี Chemical Tests
• ขนาดคละ • รูปร่างและลักษณะผิว • ความหนาแน่น • ความถ่วงจำเพาะ • การดูดซึมน้ำ • การหดตัว	• การทดสอบกำลัง - Impact Value - Crushing Value - 10% Fine • ความทนทาน - ความต้านทานการเสียดสี - Attrition	• ปริมาณ คลอไรด์ • ปริมาณ ซัลเฟต • ปริมาณสารอินทรีย์

ตารางที่ 3.5 *ประเภทของการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม*

ในตารางที่ 3.6 เป็นการรวบรวมการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม สำหรับงานคอนกรีตตามมาตรฐานอังกฤษและอเมริกา

การทดสอบ	มาตรฐานอังกฤษ (BS)	มาตรฐานอเมริกา (ASTM)
คำจำกัดความ	882	C 125
ส่วนคละ - ข้อกำหนด	882	C 33
ส่วนคละ - การทดสอบ	812 ส่วนที่ 1	C 136
การสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบ	812 ส่วนที่ 1	D 75
การแบ่งประเภทมวลรวม	812 ส่วนที่ 1	C 294
รูปร่างของมวลรวม	812 ส่วนที่ 1	-
ลักษณะผิว	812 ส่วนที่ 1	-
ปริมาณดินเหนียว, ฝุ่น, Silt	812 ส่วนที่ 1	C 117
ความแบน, ความยาว, การเป็นเหลี่ยมมุม	812 ส่วนที่ 1	-
ความถ่วงจำเพาะ - หิน	812 ส่วนที่ 2	C 127
- ทราย	812 ส่วนที่ 2	C 128
ปริมาณความชื้น	812 ส่วนที่ 2	C 70
สารอินทรีย์	812 ส่วนที่ 1	C 40
กำลังของมวลรวม	812 ส่วนที่ 3	-
Soundness	-	C 88
Alkali-Aggregate-Reaction	-	C 289
หน่วยน้ำหนัก	-	C 29
การต้านทานการเสียดสี	-	C 131

ตารางที่ 3.6 *มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3.6 ข้อกำหนดคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต

1. ขนาดคละของมวลรวม (ASTM C33)

มวลรวมละเอียด		มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1"		ขนาดใหญ่สุด 3/4"
ขนาดตะแกรง	% ผ่าน	ขนาดตะแกรง	% ผ่าน	% ผ่าน
3/8"	100	1 1/2"	100	-
เบอร์ 4	95 - 100	1"	95-100	100
8	80 - 100	3/4"	-	90-100
165	50 - 85	1/2"	25-60	-
30	25 - 60	3/8"	-	20-55
50	10 - 30	เบอร์ 4	0-10	0-10
100	2 - 10	เบอร์ 8	0-5	0-5

2. สิ่งเจือปนต่าง ๆ

สิ่งเจือปน	ผลต่อคอนกรีต	ข้อกำหนดสูงสุด (% โดยน้ำหนัก)	
		มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
• วัสดุที่ขนาดเล็กกว่า 75 µm หรือตะแกรงเบอร์ 200 - มวลผสมคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี - มวลผสมคอนกรีตสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป	กระทบต่อความสามารถเทได้ ต้องเพิ่มน้ำในส่วนผสม	 3 5	 1 1
• ก้อนดินและวัสดุเปราะอื่น ๆ	กระทบต่อความสามารถเทได้ และการต้านทานการเสียดสี	3	5
• ถ่านและลิกไนท์	กระทบต่อความทนทานและก่อให้เกิดรอยเปื้อนบนผิว	0.5-1	0.5
• Chert (ที่ ถ.พ. น้อยกว่า 2.4)	กระทบต่อความทนทาน	-	5

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3. ความสามารถต้านการเสียดสี

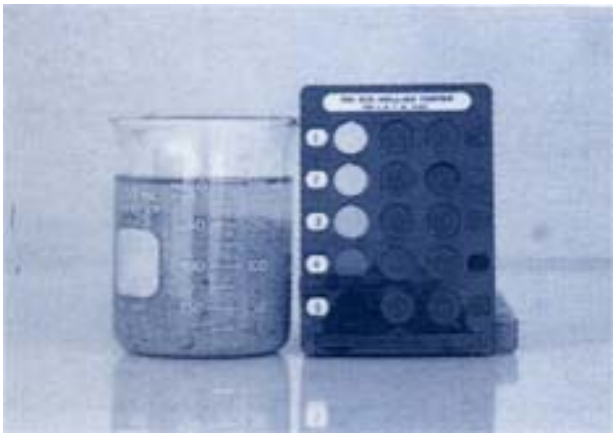
ทดสอบโดยเครื่องลอสแองเจลีส แล้วส่วนที่แตกออกต้องไม่เกิน 50%

4. การอยู่ตัว (Soundness)

การทดสอบการอยู่ตัวของมวลรวม เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการสลายตัวของมวลรวมในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต แต่ทั่วไปจะทดสอบในแมกนีเซียมซัลเฟต โดยแช่จำนวน 5 รอบ แล้วน้ำหนักจะต้องสูญไปไม่เกิน 18%

5. สารอินทรีย์ที่เจือปนในมวลรวมละเอียด

ทดสอบโดยการแช่ทรายไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3% แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นเปรียบเทียบสีของสารละลายที่ได้กับแผ่นกระจกสีมาตรฐาน ถ้าสีของสารละลายเข้มกว่าสีมาตรฐานเบอร์ 3 จะถือว่าทรายนั้นมีสารอินทรีย์เจือปนมาก ถ้าต้องใช้ผสมคอนกรีตจะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างอื่นประกอบอีกครั้ง



รูปที่ 3.25 *การทดสอบความสะอาดของทราย*

3.8 การเก็บรักษามวลรวม

ระหว่างการขนย้ายและกองเก็บมวลรวมไว้รอการใช้งานหรือขนย้ายต่อไป อาจเกิดผลเสียคือ การแยกแยะของมวลรวมขนาดต่าง ๆ กัน และการแตกหักของมวลรวม

การแยกแยะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของมวลรวมในระนาบเอียง มวลรวมขนาดใหญ่ที่หนักกว่า มักไหลลงไปรวมกันใกล้เชิงระนาบเอียง ส่วนมวลรวมขนาดเล็กกว่าคงติดค้างอยู่ตอนบนของระนาบเอียง นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเทมวลรวมเมื่อมีลมแรง เพราะลมสามารถพัดพามวลรวมขนาดเล็กไปได้ไกลกว่าขนาดใหญ่กว่า วิธีการป้องกันที่ดีก็โดยการแยกเก็บมวลรวมหยาบเป็นสัดส่วนตามช่วงขนาดที่ใกล้เคียงคือ ขนาด 5 ถึง 10, 10 ถึง 20, 20 ถึง 40 มม. ฯลฯ ออกเป็นกอง ๆ ซึ่งเราสามารถนำมารวมกันก่อนการใช้งาน ดังนี้หากมีการแยกแยะเกิดขึ้นก็เป็นเพียงในช่วงแคบ ๆ ตามกลุ่มกองของมวลรวมที่แยกกันเท่านั้น สำหรับการป้องกันการแตกหัก ก็ด้วยการเทมวลรวมขนาดเกิน 40 มม. ลงในที่เก็บผ่านขั้นบันได นั่นคือไม่ควรปล่อยให้ตกจากที่สูง ๆ เพราะมวลรวมมีโอกาสแตกหักได้ง่าย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 4
น้ำ

ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในบทนี้จะมาพิจารณาถึงเรื่องคุณภาพของน้ำ ซึ่งมีความสำคัญมากเพราะสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่นเวลาการแข็งตัว กำลังอัด ทำให้สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอและอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริม ด้วยเหตุนี้การเลือกน้ำที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับผสมและบ่มคอนกรีตจึงจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ

4.1 ความสำคัญของน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตคอนกรีต โดยทำหน้าที่ 3 ประการคือ

1) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น รวมทั้งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้

2) ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น

3) ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรก

เราต้องการน้ำที่มีคุณภาพดี และปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต กฎเกณฑ์ทั่วไปของน้ำที่จะใช้ผสมคอนกรีต คือ น้ำที่ดื่มได้นับเป็นน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตได้เสมอ ส่วนปริมาณน้ำผสม นอกจากจะมีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวแล้วยังมีผลต่อกำลังและความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วย

ปัญหาที่มักพบอยู่เสมอเกี่ยวกับปริมาณน้ำในงานคอนกรีต คือ

1) ในขณะเป็นคอนกรีตสด คอนกรีตต้องการน้ำจำนวนเพียงให้ลื่นไหลเข้าแบบได้ แต่ผู้ทำงานมักจะใส่น้ำปริมาณมากเพื่อให้คอนกรีตเหลวมาก สะดวกในการเทแต่กำลังอัดจะลดต่ำลง

2) ในขณะเป็นคอนกรีตแข็งตัวแล้ว คอนกรีตต้องการน้ำจำนวนมาก เพื่อบ่มให้กำลังอัดได้พัฒนาขึ้นตามเวลา แต่ผู้ทำงานก็มักจะละเลยการบ่มคอนกรีต

โดยสรุปคือ คอนกรีตที่ใช้งานทั่วไปจะได้กำลังต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เพราะใช้น้ำไม่เหมาะสมนั่นเอง

4.2 สิ่งเจือปน

ถ้าในน้ำที่ผสมคอนกรีตมีสิ่งเจือปนอยู่มากเกินระดับหนึ่งอาจก่อปัญหาทางด้านคุณภาพ อันได้แก่

1) กำลังและความทนทานของคอนกรีตลดลง

2) เวลาการก่อตัวเปลี่ยนแปลงไป

3) คอนกรีตเกิดการหดตัวมากกว่าปกติ

4) อาจมีการละลายของสารประกอบภายในคอนกรีตออกมาแข็งตัวบนผิวนอก (Efflorescence)

สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตมี 3 ประเภท คือ ตะกอน, สารละลาย, อนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์ หากมีสิ่งเจือปนเหล่านี้ปริมาณน้อย ก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรง

●ตะกอน

หากน้ำมีปริมาณตะกอนเกินกว่า 2,000 ส่วนต่อล้าน (ppm.) อาจจะทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมากกว่าปกติ การหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น หรือทำให้เกิดขี้เกลือบริเวณผิวของคอนกรีต (Efflorescence) ดังนั้นถ้าน้ำที่ใช้ขุ่นมาก ควรปล่อยให้ตกตะกอนเสียก่อน แต่ตะกอนของเห็ดราหรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ มักไม่ยอมตกตะกอน และในระหว่างการผสมคอนกรีตสารอนินทรีย์เหล่านี้จะเริ่มละลายตัว ผลก็คือ ซีเมนต์จะก่อและแข็งตัวช้าลง นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมากจนกำลังของคอนกรีตลดลงหรือในทางตรงกันข้าม บางครั้งอาจมีผลกระทบกระเทือนต่อการทำงานของสารกักกระจายฟองอากาศ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- **สารละลายอนินทรีย์**

ตามปกติเราสามารถใช้น้ำที่มีสารละลายอนินทรีย์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 2,000 ส่วนต่อล้านได้อย่างปลอดภัย ยกเว้นสารละลายบางชนิด เช่น โซเดียมซัลไฟด์เพียง 100 ส่วนต่อล้านก็อาจก่อปัญหาได้ ในทางตรงกันข้าม เราสามารถใช้น้ำทะเลซึ่งมีเกลือละลายอยู่ถึง 35,000 ส่วนต่อล้าน (3.5%) ทำคอนกรีตได้ หากให้ความระมัดระวังอย่างเต็มที่ ในบางครั้งเรายังใช้ประโยชน์โดยใช้สารละลายเป็นสารผสมเพิ่มเช่น แคลเซี่ยมคลอไรด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัว สารละลายของคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตจะทำให้ซีเมนต์ก่อตัวเร็วขึ้น แต่หากใช้สารละลายของคาร์บอเนตหรือซัลเฟตมากเกินไปอาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

สารละลายของเกลืออนินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟต อาร์ซีเนตและบอเรทส์ เราสามารถอนุโลมความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้ ได้ถึง 500 ส่วนต่อล้าน สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงในระดับดังกล่าวจะพบได้เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งไม่ได้ผ่านระบบกำจัดสิ่งสกปรกหรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่

เราสามารถใช้น้ำที่มีความเป็นกรดโดยไม่มีผลเสียต่อคอนกรีต แต่หากระดับ PH ของน้ำอยู่ต่ำถึง 3.0 ก็มักก่อให้เกิดปัญหา น้ำที่มีความเป็นด่างสูง เช่น มีปริมาณโซเดียมหรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เกิน 500 ส่วนต่อล้าน อาจก่อให้เกิดปัญหาในการก่อตัวอย่างรวดเร็วและกำลังของคอนกรีตลดลง

น้ำทะเล ประกอบด้วยเกลือซัลเฟต และคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียม ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น แต่เมื่ออายุ 28 วัน กำลังอัดจะลดลงเพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของ Ettringite ช้าลง นอกจากนี้ไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการสึกกร่อนของเหล็กเสริม จึงไม่ควรใช้น้ำทะเลสำหรับคอนกรีตอัดแรง หรือแม้แต่คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาถ้าสามารถหลีกเลี่ยงได้

- **สารละลายอินทรีย์**

สารอินทรีย์ทำให้น้ำมีสีและทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ช้าลง สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีผลเสียต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หรือก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สูง ตามปกติจึงต้องระมัดระวังการใช้น้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมยกเว้นกรณีที่น้ำได้ผ่านโรงกำจัดน้ำเสียซึ่งจะลดสารละลายอินทรีย์ลงในระดับที่ปลอดภัย

วิธีสังเกตอย่างง่ายว่าน้ำนั้นใช้ผสมคอนกรีตได้หรือไม่มีดังนี้

ความสะอาด น้ำต้องไม่มีสารเน่าเปื่อย ปฏิกูล หรือตะไคร่น้ำ

สี น้ำต้องใส ถ้ามีสีแสดงว่ามีสารแขวนลอยต่าง ๆ มาก

กลิ่น น้ำต้องไม่มีกลิ่นเน่า ถ้ามีกลิ่นก็มักจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก

รส น้ำต้องไม่มีรส ถ้ามีรสกร่อยหรือเค็ม แสดงว่ามีเกลือแร่อยู่มาก ถ้ามีรสเปรี้ยว แสดงว่าเป็นกรด ถ้าฝาด แสดงว่าเป็นด่าง แต่โดยทั่วไปความเป็นกรดหรือด่างของน้ำมักไม่มากจนสามารถชิมรสแล้วรู้

4.3 ข้อกำหนดของน้ำผสมคอนกรีต

ข้อกำหนดทั่วไปที่เกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต จะต้องมีขอบเขตระดับความเข้มข้นไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

ปริมาณของแข็ง ไม่มากกว่า	2,000	ppm.
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (PH) อยู่ในช่วง	6-8	
ปริมาณซัลเฟต ไม่มากกว่า	1,000	ppm.
ปริมาณคลอไรด์ ไม่มากกว่า	500	ppm.

นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดของเขตความเข้มข้นของสิ่งเจือปนโดยละเอียด ดังตารางที่ 4.1

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

สิ่งเจือปน	ความเข้มข้นสูงสุด (PPM)	ผลกระทบ/ตัวอย่าง
ตะกอน	2,000	- ตะกอนดินเหนียว สารอินทรีย์
เห็ดรา	500-1,000	- เพิ่มฟองอากาศ
เกลือคาร์บอเนต	1,000	- ลดเวลาก่อตัว
เกลือไบคาร์บอเนต	400-1,000	- 400 ส่วนต่อล้านส่วน สำหรับเกลือไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม
โซเดียมซัลเฟต	10,000	- อาจเพิ่มกำลังระยะแรก แต่ลดกำลังระยะยาว
แมกนีเซียมซัลเฟต	40,000	
โซเดียมคลอไรด์	20,000	- ลดเวลาการก่อตัว
แคลเซียมคลอไรด์	50,000	- เพิ่มกำลังระยะแรก
แมกนีเซียมคลอไรด์	40,000	- ลดกำลังสูงสุด
เกลือของเหล็ก	40,000	
ฟอสเฟต, อาร์ซีเนต, บอเรทส์	500	- ลดเวลาการก่อตัว
เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก	500	
กรดอนินทรีย์	10,000	- PH ไม่ต่ำกว่า 3.0
โซเดียมไฮดรอกไซด์	500	
โซเดียมซัลซัลไฟล์	100	- ควรหล่อคอนกรีตทดสอบ
น้ำตาล	500	- มีผลต่อการก่อตัว

ตารางที่ 4.1 *ขอบเขตและผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำ*

4.4 การทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบน้ำผสมคอนกรีตนี้ จะทำการทดสอบเปรียบเทียบการก่อตัวและกำลังอัดกับน้ำกลั่นปริมาณที่จะนำมาทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 5 ลิตร น้ำที่เหมาะสำหรับผสมคอนกรีตควรมีคุณสมบัติดังนี้

1) ค่าการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ต่างจากตัวอย่างที่ทำจากน้ำกลั่นไม่เกิน 30 นาที

2) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของตัวอย่างที่ใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องได้ค่าไม่น้อยกว่า 90% ของกำลังอัดของตัวอย่างที่ใช้น้ำกลั่น

ถ้าผลการทดสอบที่ได้ออกนอกค่าที่กำหนด แสดงว่าน้ำนั้นมีผลต่อคอนกรีต อาจแก้ไขโดยการเปลี่ยนแหล่งน้ำที่จะนำมาผสมคอนกรีต หรือถ้าผลการทดสอบแสดงว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 80% ของค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ใช้น้ำกลั่น อาจใช้น้ำนี้แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต

4.5 คุณภาพน้ำที่ใช้ล้างมวลรวมและบ่มคอนกรีต

น้ำสำหรับล้างคอนกรีต ควรมีคุณสมบัติเหมือนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต เพราะน้ำนี้จะเคลือบอยู่บนผิวของมวลรวมและสามารถเข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตเหมือนกับน้ำที่ใช้ผสม ข้อที่ควรระวังคือ ต้องคอยเปลี่ยนน้ำที่ใช้ล้างมวลรวมอย่างสม่ำเสมอ เพราะเมื่อล้างไปช่วงเวลาหนึ่ง น้ำจะขุ่น การใช้ต่อไปจะไม่เกิดผลดีอย่างไร กลับอาจทำให้เกิดความสกปรกเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนน้ำสำหรับบ่มคอนกรีต ไม่ควรมีสิ่งเจือปนที่จะทำปฏิกิริยากับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น สารพวกซัลเฟต หรือสารที่ทำให้เกิดคราบสกปรก อันจะส่งผลให้ ผิวคอนกรีตเกิดรอยเปื้อน หรือเป็นตัวการทำให้สีจับกับผิวคอนกรีตได้ไม่ดี และหลุดร่อนในภายหลัง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 5
สารผสมเพิ่ม

5.1 คำจำกัดความ

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต (Concrete Admixture) หมายถึง สารใด ๆ นอกเหนือไปจากน้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย อันใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตขณะยังเหลวอยู่หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ, สิ่งแวดล้อม และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่ว ๆ ไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถเทได้, เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว, ควบคุมหรือดัดแปลงการพัฒนากำลังอัด, ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง แต่พึงระลึกไว้เสมอว่าสารผสมเพิ่มมิได้มีส่วนช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดีหรือการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง

ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้สารผสมเพิ่มไปทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ กล่าวคือ ใช้ปูนซีเมนต์ทั่ว ๆ ไปผสมกับสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งจะปรับปรุงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการได้ สารผสมเพิ่มที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่บางชนิดเป็นผงซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุพื้นฐานวัสดุเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว รวมทั้งต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ แร่ธาตุในมวลรวมและต่อเหล็กเสริม ดังนั้นก่อนที่จะใช้น้ำยาผสมคอนกรีตควรมีการศึกษาข้อจำกัดการใช้งาน การตรวจสอบคุณภาพและทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งควรใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด มิฉะนั้นอาจจะก่อให้เกิดผลเสียหายได้

5.2 ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่ผลิตออกจำหน่ายทั่ว ๆ ไป มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 กลุ่ม คือ

1) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent)

ใช้เพื่อเพิ่มความทนทาน กรณีที่คอนกรีตต้องสัมผัสกับสภาพที่เย็นจัด เช่น ในพื้นห้องเย็น หรือในบริเวณที่มีหิมะปกคลุมบางช่วงเวลา และสารผสมเพิ่มนี้ยังปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว

2) สารเคมีผสมคอนกรีต(Chemical Admixture)

เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ควบคุมการก่อตัวและการแข็งตัวหรือปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวเป็นต้น

3) สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้ปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เพิ่มความคงทน ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน

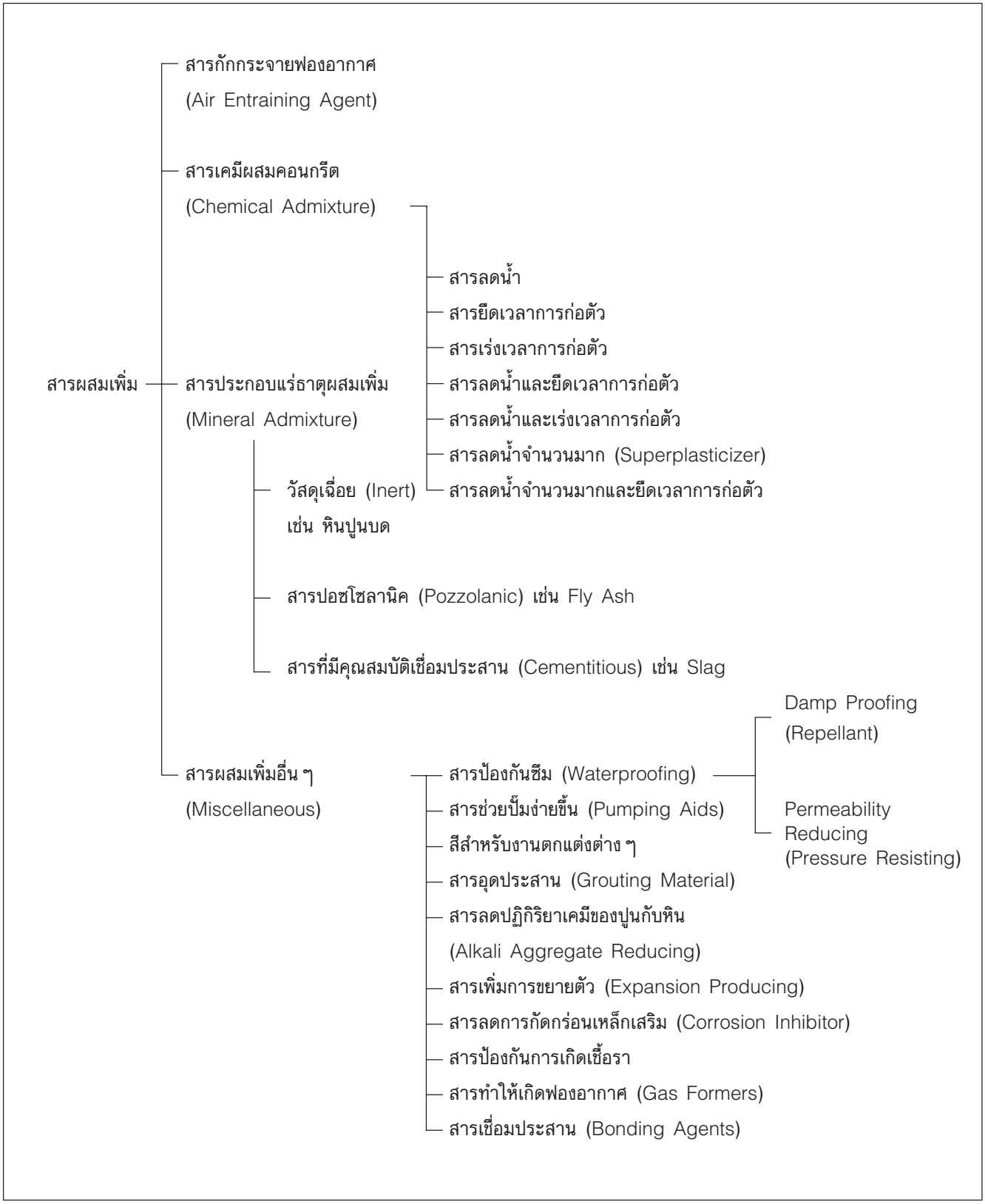
4) สารผสมเพิ่มอื่น ๆ

ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 3 ประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น

รายละเอียดของการแบ่งสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตารางที่ 5.1 *การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม*



© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5.3 การใช้สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มได้เข้ามามีบทบาทอย่างรวดเร็วในวงการก่อสร้าง ประเทศที่เจริญแล้ว ได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาใช้คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มถึง 90% ในออสเตรเลีย ญี่ปุ่น และเยอรมัน มียอดการใช้ 80%, 80% และ 60% ตามลำดับ ส่วนในประเทศไทยวงการก่อสร้างเพิ่งตื่นตัวเรื่องการใช้สารผสมเพิ่มอย่างจริงจังในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้ยอดคอนกรีตที่ผสมสารผสมเพิ่มยังมีปริมาณไม่มาก แต่ยอดปริมาณการใช้ในปัจจุบันได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วมากก็ด้วยเหตุผลที่สำคัญ คือ คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการทำงานมาก คือ คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้หรือเหลวอยู่นานกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ทำให้สะดวกทั้งด้านการลำเลียงและการทำให้คอนกรีตอัดแน่นในแบบซึ่งส่งผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลงด้วย สิ่งสำคัญที่พึงระลึกไว้เสมอ คือ สารผสมเพิ่มไม่สามารถช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดี หรือการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หากแต่ใช้เมื่อไม่สามารถปรับปรุงคอนกรีตด้วยการปรับปรุงส่วนผสม

ในตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตที่สามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงได้โดยสารผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 5.2 *คุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโดย สารผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ*

คุณสมบัติที่ต้องการ	ประเภทของสารผสมเพิ่ม					
	สารลดน้ำ	สารเร่ง	สารหน่วง	สารลดน้ำจำนวนมาก	สารกักกระจายฟองอากาศ	อื่น ๆ
การก่อตัวและแข็งตัว						
- เร่งอัตราการพัฒนากำลังอัดช่วงต้น	**	*		*		
- เร่งการก่อตัว		*				
- หน่วงการก่อตัว			*			
ความสามารถเทได้และคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวอื่น ๆ						
- เพิ่มความสามารถเทได้โดยกำลังอัดไม่สูญเสียไป	*			*		
- ลดอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	**		**	**		
- ลดการเยิ้ม					*	*
- ลดการแยกตัว					*	*
- เพิ่มความสามารถปั๊มได้				**	*	*
คอนกรีตแข็งตัวแล้ว						
- เพิ่มกำลังอัดโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์หรือลดความสามารถเทได้	*			*		
- ปรับปรุงความทนทาน	**			*	*	
- ปรับปรุงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ	*			*	**	*
- ปรับปรุงแรงยึดระหว่างคอนกรีต						*

** ผลทางตรง* *** ผลทางอ้อม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5.4 ข้อระวังในการใช้งาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารผสมเพิ่ม มักเนื่องมาจากความไม่เข้าใจว่าสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ๆ มีผลต่อคอนกรีตอย่างไรบ้าง ข้อพึงระมัดระวังที่ผู้ใช้ควรยึดปฏิบัติคือ

1) สารผสมเพิ่มที่จะนำมาใช้ควรมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐาน เช่น ของประเทศไทยควรเป็นไปตาม มอก. 733-2530 "สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต" รวมทั้งต้องมีข้อมูลเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

- ผลของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีต
- อิทธิพลอื่น ๆ ที่สารผสมเพิ่มมีต่อคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นทางที่เป็นประโยชน์หรือเป็นผลเสีย
- คุณสมบัติทางกายภาพของสารผสมเพิ่ม
- ความเข้มข้นของส่วนประกอบที่สำคัญ
- ส่วนประกอบอื่น ๆ ที่อาจมีผลเสียต่อคอนกรีต เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ฟอสเฟต น้ำตาล ไนเตรด และ แอมโมเนีย
- PH
- ผลเสียต่อผู้ใช้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว
- วิธีการเก็บและอายุการใช้งาน
- การตระเตรียมและวิธีการผสมเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต
- ปริมาณที่ควรใช้ ปริมาณสูงสุดที่อาจใช้ได้ และข้อเสียที่เกิดจากการใช้เกินปริมาณกำหนด

2) ควรใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำพร้อมกับตรวจดูผลว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบควรทำในสภาวะของการใช้งาน เพราะผลอันแท้จริงของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ คือชนิดของซีเมนต์ คุณสมบัติของมวลรวมและสารไม่บริสุทธิ์ที่มีอยู่ ส่วนผสม วิธีและระยะเวลาการผสม ช่วงเวลาที่ใส่สารผสมเพิ่มอุณหภูมิของ คอนกรีตและสภาพการบ่ม

3) ควรใช้วิธีการวัดปริมาณสารผสมเพิ่มที่แน่นอน ซึ่งสำคัญมากในกรณีของสารกักกระจายฟองอากาศและสารผสมเพิ่มเคมี ทั้งนี้เพราะปริมาณที่ผสมมักต่ำกว่า 0.1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นหากมีการผสมเกินปริมาณที่กำหนดอาจก่อให้เกิดผลเสียอย่างมาก

4) ผลของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีต สารผสมเพิ่มทั่ว ๆ ไปมักมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตหลายอย่างพร้อม ๆ กัน

5.5 สารกักกระจายฟองอากาศ

สารกักกระจายฟองอากาศ เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิว (Organic Surfactants) โดยก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและจะคงตัว โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25-1 มม.

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้ (Entrain Air) แตกต่างจากโพรงอากาศ (Entrapped Air) ซึ่งมีขนาดใหญ่และจะเกิดในบางบริเวณอันเนื่องมาจากการจี้เขย่าคอนกรีตไม่ดีพอ สารกักกระจายฟองอากาศนี้ช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ (Frost) หรือเกลือที่ทำให้น้ำแข็งละลาย (De-Icing Salts) นอกจากนี้ยังช่วยเสริมความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดด้วย

• วัตถุดิบ

สารกักกระจายฟองอากาศนี้ผลิตขึ้นจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทำกระดาษ, น้ำมันและอาหารสำเร็จรูปจากสัตว์ วัตถุดิบที่สำคัญได้แก่ ยางไม้ ไขมัน หรือน้ำมันสัตว์และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มาจากยางไม้หรือจากไขมันของสัตว์และพืช เป็นต้น

• ลักษณะการทำงาน

สารกักกระจายฟองอากาศ ประกอบด้วยตัวเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบนผิวของอนุภาคซึ่งมักรวมกันอยู่ระหว่างผิวน้ำและอากาศ ทำให้แรงดึงผิวของน้ำลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กมากกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต โดยฟองอากาศนี้จะถูกทำให้อยู่ตัวด้วย

• ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตสด

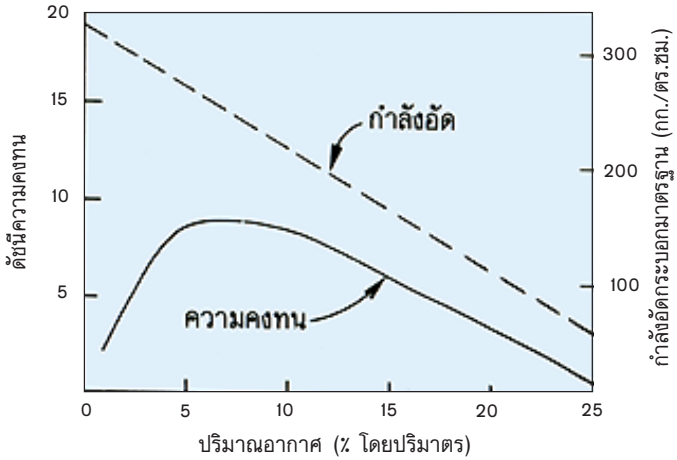
การกักกระจายฟองอากาศมีผลดีต่อความสามารถในการใช้งานและการเกาะตัวของคอนกรีตเหลว โดยลดการแยกตัวและการเยิ้ม ไม่ว่าจะมีค่ายุบตัวมากหรือน้อยก็ตาม ในคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเดียวกัน คอนกรีตที่มีฟองอากาศจะใช้งานได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะเทลงแบบและบดอัดได้ง่ายกว่า หรือมีความสามารถเทได้ดีกว่านั่นเอง ในส่วนผสมที่เหลว ฟองอากาศจะช่วยลดการแยกแยะที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการใช้งาน

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

การเพิ่มปริมาณอากาศ 5% จะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 15-50 มม. โดยมีปริมาณเพสท์คงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลรวมละเอียดขนาดเล็กซึ่งยืดหยุ่นได้และมีแรงเสียดทานต่ำ จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในเนื้อคอนกรีตเหลว คอนกรีตจึงมีลักษณะคล้ายกับว่ามีทรายมาก คุณสมบัตินี้ใช้ได้ผลดีสำหรับส่วนผสมที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก ตามปกติจะไม่ใช้การกักกระจายฟองอากาศเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว แต่ใช้เพื่อลดปริมาณทรายและน้ำสำหรับค่ายุบตัวหนึ่ง ๆ การเพิ่มปริมาณอากาศ 5% สามารถทำให้ลดปริมาณน้ำได้ 20-30 ลิตร/ลบ.ม ซึ่งทำให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และเป็นส่วนหนึ่งที่ทดแทนกำลังอัดที่ลดลงเพราะปริมาณอากาศที่สูงขึ้น

• ผลของสารกักกระฟองอากาศต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต ตามปกติคอนกรีตที่มีฟองอากาศกำลังอัดจะลด 5% ทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของฟองอากาศ 1% รูปที่ 5.1 แสดงผลให้เห็นว่า ปริมาณอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ทั้งกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตลดน้อยลง



รูปที่ 5.1 *ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน*

จะเห็นได้ว่าสารกักกระจายฟองอากาศจะมีผลกระทบต่อความสามารถเทได้ กำลังอัดและปริมาตรของคอนกรีต ดังนั้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจำต้องนำปัจจัยเหล่านี้มาพิจารณาด้วย

• ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกักกระจายฟองอากาศ

ผลของการกักกระจายฟองอากาศขึ้นอยู่กับ

1) วัสดุผสมคอนกรีตและสัดส่วนผสม

- ส่วนละเอียด เช่น ทรายละเอียด หรือปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ
- ปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยลดขนาดของหิน
- สัดส่วนของทรายมีความสำคัญต่อปริมาณฟองอากาศ การเพิ่มทรายขนาด 300-600 ไมโครเมตร จะก่อให้เกิดปริมาณฟองอากาศมากขึ้น แต่ถ้ามีทรายที่ละเอียดมาก โดยเฉพาะทรายที่ได้จากการบดหินจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ
- น้ำที่เหมาะสำหรับคอนกรีตไม่มีผลต่อปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น แต่น้ำกระด้างจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ ดังนั้นจึงต้องใส่ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้น
- การใช้สารผสมเพิ่มอื่น ๆ ร่วมกับสารกักกระจายฟองอากาศจะต้องทำอย่างระมัดระวัง ในบางกรณีอาจจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ หรือในบางกรณีจะต้องใส่สารผสมเพิ่มอื่น ๆ หลังจากที่ฟองอากาศเกิดขึ้นก่อนแล้ว เป็นต้น

2) การผสมและการจี้เขย่า

- ปริมาณฟองอากาศจะถูกกระทบด้วย ชนิด อัตรา และเวลาที่ใช้ในการผสม รวมทั้งปริมาณคอนกรีตที่ถูกผสม การยืด เวลาการผสมจะส่งผลให้ฟองอากาศลดลง
- คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จะก่อให้เกิดฟองอากาศได้ยากมากและปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถเทได้มากขึ้น ตลอดช่วงค่ายุบตัว 25-150 มม.
- การจี้เขย่าคอนกรีตมากเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศลดลง

3) สภาพแวดล้อม

- ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตจะเป็นปฏิภาคผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 10°C เป็น 32°C ปริมาณฟองอากาศจะลดลงประมาณ 50%

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5.6 สารเคมีผสมคอนกรีต

สารเคมีผสมคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ใส่ผสมลงในคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ออกเป็น 7 ประเภท คือ

ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing)

ประเภท B สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)

ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)

ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)

ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)

ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing-High Rage)

ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing-High Range and Retarding)

1. สารลดปริมาณน้ำ

สารลดปริมาณน้ำหรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer หมายถึง สารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสม โดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศหรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีต การใช้สารลดปริมาณน้ำให้เกิดประโยชน์ทำได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ใช้เพื่อช่วยให้งานเทคอนกรีตที่ทำได้ยาก เช่น โครงสร้างที่บางหรือมีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตนี้จะมีความสามารถเทได้ดี ง่ายต่อการจี้เขย่าเข้าแบบ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและซีเมนต์

กรณีที่ 2 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการโดยใช้ปริมาณน้ำลดลงในขณะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ นั่นคือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น การต้านทานการซึมผ่านของน้ำและความคงทนสูงขึ้นหรืออาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังอัดโดยไม่สามารถเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพราะจะเกิดปัญหาด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดการหดตัวทำให้เกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากแผ่ เป็นต้น

กรณีที่ 3 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นั่นคือ เราสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้

● วัตถุดิบ

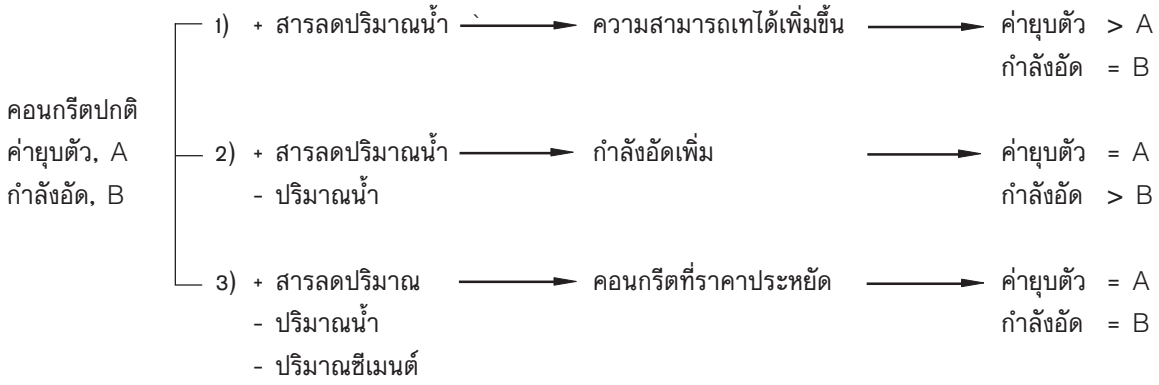
สารลดปริมาณน้ำได้มาจากสารประกอบหลัก 3 ชนิด คือ

1) เกลือและสารประกอบของ Lignosulphonate

2) เกลือและสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid

3) Polymer เช่น Hydroxylated Polymers

สารลดปริมาณน้ำนี้ ทั่ว ๆ ไปจะทำมาจากสารประกอบ 2 ชนิดแรก



รูปที่ 5.2 *ประโยชน์การใช้สารลดปริมาณน้ำ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ทำไมต้องลดปริมาณน้ำ

การลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นสิ่งที่สำคัญมาก สำหรับงานคอนกรีตจะพบว่าสารเคมีผสมคอนกรีต 5 ใน 7 ชนิด จะมีคุณสมบัติลดปริมาณน้ำ ก่อนที่จะอธิบายในรายละเอียด เราควรมาพิจารณาถึงหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีตอีกทีเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการผลิตคอนกรีตโดยจะทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ

1. เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือปฏิกิริยา Hydration

2. ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อซีเมนต์จะเข้าเกาะและแข็งยึดติดกัน

3. ทำหน้าที่หล่อลื่นให้หิน ทราย ซีเมนต์ อยู่ในสภาพเหลวสามารถไหลเข้าแบบได้ง่าย

น้ำจำนวนพอดีที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือประมาณ 28 ± 1% ของน้ำหนักซีเมนต์ หรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) = 0.28 ± 0.01 แต่คอนกรีตทั่วไปใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.35 น้ำเกินนี้จะเข้าไปทำหน้าที่ในข้อ 2 และ 3 ทำให้คอนกรีตเหลว ทำงานได้สะดวกขึ้น น้ำส่วนนี้ถูกเรียกว่า "น้ำส่วนเกิน" (Excess Water)

น้ำส่วนเกิน ถ้ามีมากเกินไปจะมีผลเสียต่อคอนกรีต คือ

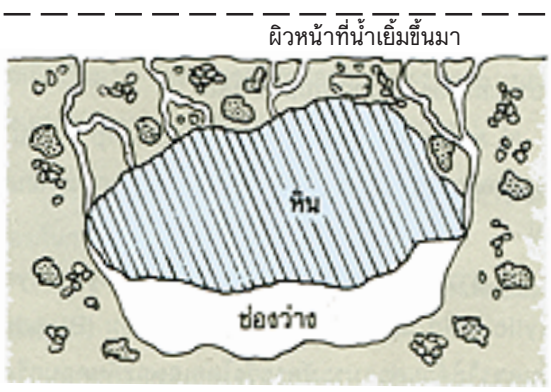
1) เกิดการเยิ้มของน้ำขึ้นมาที่ผิวหน้ามาก (Bleeding)

2) เกิดการแยกตัว

3) กำลังอัดต่ำลง

4) เกิดการหดตัว

5) ทำให้เกิดรูพรุน มีผลทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน



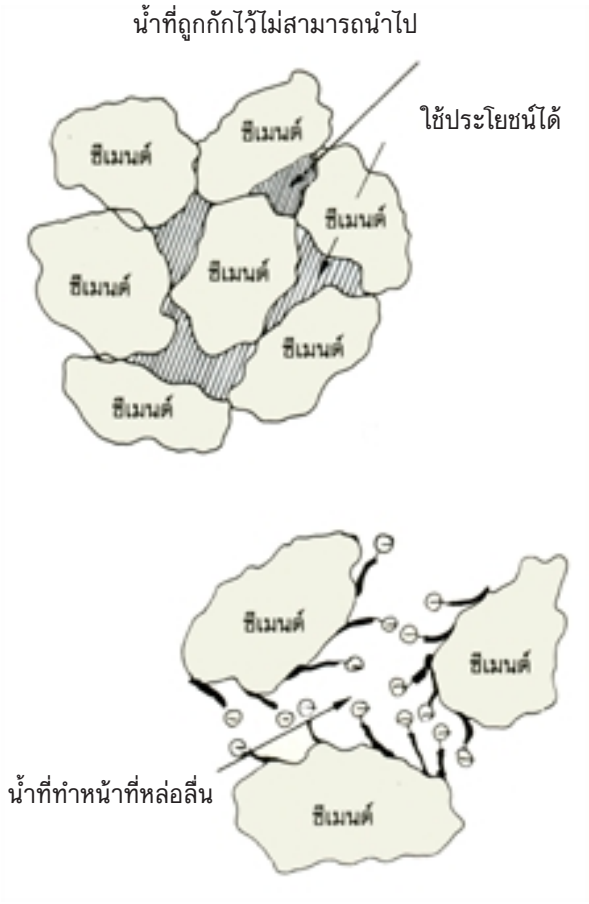
รูปที่ 5.3 *คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป*

ในรูปที่ 5.3 แสดงลักษณะคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไป น้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งคือการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแอ่งน้ำดังกล่าว จะกลายเป็นโพรงอากาศทำให้ความทนทานและกำลังอัดคอนกรีตต่ำลง

• ลักษณะการทำงาน

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติในการช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวต่อระหว่างของแข็งและน้ำในคอนกรีต ปกติอนุภาคซีเมนต์ต่าง ๆ ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว ซึ่งอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้อนุภาคซึ่งมีประจุต่างกันจะดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ซึ่งสามารถดูดน้ำได้จำนวนมากทำให้เหลือน้ำหล่อลื่นคอนกรีตเหลวอยู่น้อย โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยทำให้ประจุเป็นกลาง หรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่าง ๆ กลายเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันทำให้แยกตัวกันในเนื้อเพสต์ น้ำที่ผสมไปในคอนกรีตส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของเพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 5.4 *ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ*

• ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้ของสารลดปริมาณน้ำ

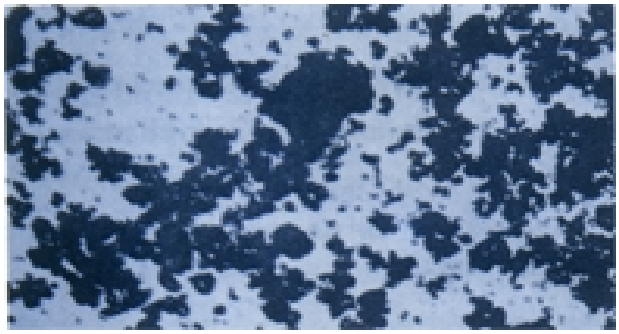
2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

3) ชนิดของมวลรวมและส่วนคละ

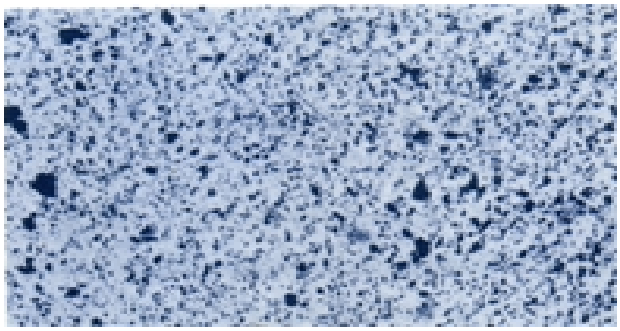
4) สัดส่วนผสม

5) อุณหภูมิ

ถ้าใช้สารลดปริมาณน้ำในปริมาณปกติ ปริมาณน้ำที่ลดลงจะอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตามควรทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่จะให้บรรลุคุณสมบัติที่เหมาะสม



a)



b)

รูปที่ 5.5 *a) อนุภาคของซีเมนต์จะจับตัวอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ*
b) การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ

• ผลต่อคอนกรีตสด

1) สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่น ๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25-50 มม.

2) สารลดปริมาณน้ำที่มีสารประกอบของ Hydroxy-carboxylic Acid จะสามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารประกอบของ Lignosulphonate

3) ค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump Loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะมากกว่าคอนกรีตทั่วไป

4) สารลดปริมาณน้ำที่มาจากเกลือของ Hydroxy-carboxylic Acid มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ดังนั้นควรใช้ด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมาก

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5) สารลดปริมาณน้ำที่มาจาก Lignosulphonate จะลดการเยิ้มเนื่องจากสารประกอบพวกนี้จะก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 1-3%

6) โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วยเวลาการก่อตัวเล็กน้อย

7) ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต สารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีต (Heat of Hydration)

• ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1) ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

2) เนื่องจากสารลดปริมาณน้ำส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นั่นคือ กำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงขึ้น ผลทางอ้อมก็คือ กำลังอัดช่วงต้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

3) การหดตัว (Drying Shrinkage) และ Creep จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากัน

4) ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้ความทนทานและการกันซึมสูงขึ้น เพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2. สารยืดเวลาการก่อตัว

สารยืดเวลาการก่อตัวเป็นสารเคมีที่หน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งส่งผลหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตด้วย สารผสมเพิ่มชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในงานคอนกรีตในเขตร้อน เช่น ในประเทศไทยเป็นต้น เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดเร็วมาก เวลาการก่อตัวของซีเมนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานคอนกรีตประเภทอื่น ๆ อีกเช่น

1) งานโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยยืดเวลาการก่อตัวเพื่อป้องกันการเกิด Cold Joint

2) งานเขื่อน โดยลดความร้อนในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว

3) งานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ซึ่งบางครั้งต้องยืดเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตออกไป 6-8 ชั่วโมง

• วัตถุดิบ

สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้

1) กรด Lignosulphonic และเกลือของมัน

2) กรด Hydroxycarboxylic และเกลือของมัน

3) น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล

4) เกลืออนินทรีย์

สารเคมีหลาย ๆ ตัวจะเหมือนกับของสารลดปริมาณน้ำแต่จะใช้ในปริมาณที่มากกว่า

• ลักษณะการทำงาน

มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ แต่ทฤษฎีที่สำคัญที่สามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ดี คือ สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวนี้จะถูกดูดซึมไว้บนผิวของอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับอนุภาคซีเมนต์ลดลง นั่นคือ การหน่วงเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

• ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารยืดเวลาการก่อตัว

2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

3) เวลาที่เติมสารยืดเวลาการก่อตัว

4) อุณหภูมิ

สารยืดเวลาการก่อตัวจะขยายเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตทั้งเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ส่วนผลด้านการยืดเวลาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อย จะยืดเวลาได้นานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูง

ความสามารถในการยืดเวลาการก่อตัวของสารผสมเพิ่มนี้จะดีขึ้นหากว่าเติมน้ำยาประเภทนี้ 2-3 นาที หลักจากการใส่น้ำผสม และจะให้ผลเต็มที่เมื่อเติม 10 นาที หลังผสม ถ้าเติมหลัง 2-4 ชั่วโมง สารผสมเพิ่มนั้นจะไม่ก่อให้เกิดผลด้านการยืดเวลาการก่อตัว ปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- **ผลต่อคอนกรีตสด**

1) ผลโดยตรงคือ หน่วงเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้นาน รวมทั้งมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลง

2) หน่วงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ปริมาณความร้อนทั้งหมดยังคงเดิม

3) สารยืดเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มจะเพิ่มการหดตัว (Plastic Shrinkage) เพราะว่าคอนกรีตจะเหลวอยู่นานกว่าปกติ ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมสารยืดเวลาการก่อตัวจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มอย่างถูกต้องและเพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าว (Plastic Cracking) ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าปล่อยให้คอนกรีตแห้งก่อนคอนกรีตจะมีกำลังอัดเพียงพอ

- **ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว**

1) กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการยืดเวลาการก่อตัว แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2-3 วัน กำลังอัดจะใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

2) อัตราการเกิด Drying Shrinkage และ Creep เพิ่มขึ้น แต่ค่ารวมจะไม่เปลี่ยนแปลง

3. สารเร่งเวลาการก่อตัว และแข็งตัว

สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัวเป็นสารที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลเร่งการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานดังต่อไปนี้

1) งานก่อสร้างเร่งด่วน เช่น งานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว, งานซ่อมแซมต่าง ๆ

2) งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตในโรงงาน เพื่อจะให้การหมุนเวียนแบบหล่อทำได้อย่างรวดเร็ว

3) งานคอนกรีตในฤดูหนาว สำหรับในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นจัด

สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะแตกต่างจากสารที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างกะทันหัน (Set Accelerating Admixture) ซึ่งจะก่อตัวภายใน 2-3 นาที และเหมาะในงาน Shotcrete สำหรับอุดรูรั่วภายใต้ความดันของน้ำ หรือการซ่อมแซมอย่างกะทันหัน

- **วัตถุดิบ**

สารเร่งเวลาการก่อตัวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารเคมีดังนี้

1) Calcium Chloride

2) Calcium Formate

3) Calcium Nitrate

คัลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้เร่งการก่อตัวของคอนกรีตอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการ คือ ราคาไม่แพง และ หาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้พบว่าคัลเซียมคลอไรด์จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต ดังนั้นจึงหันมาสนใจสารเคมีอื่นที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ (Chloride-Free) อันได้แก่ Calcium Formate และล่าสุดได้มีการพัฒนาสารเร่งการก่อตัวที่มีสารเคมีหลักคือ Calcium Nitrate ขึ้นใช้อย่างแพร่หลาย

ลักษณะการทำงาน

สารเร่งเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทำหน้าที่เสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ผลก็คือ จะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารเร่งการก่อตัว

2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

3) อุณหภูมิ

คัลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ดีกว่า Calcium Formate และ Calcium Nitrate รวมทั้งราคาถูกกว่าอย่างมากด้วย และการเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารผสมนี้ในปริมาณที่มากขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ สัดส่วนผสม ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมากกว่าส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- **ผลต่อคอนกรีตสด**

เวลาการก่อตัวและแข็งตัวจะลดลง แต่ทั้งนี้ได้มีข้อกำหนดควบคุมไว้ ไม่ให้การก่อตัวเกิดเร็วมากจนไม่สามารถนำคอนกรีตนั้น ๆ ไปใช้งานได้

- **ผลต่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว**

1) กำลังอัดในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กำลังอัดในระยะยาว (Long Term Strength) ที่มีอายุมากกว่า 28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

2) Calcium Chloride จะเพิ่มทั้ง Drying Shrinkage และ Creep

3) Calcium Chloride ที่ใส่ไปเร่งการก่อตัว จะมีผลทำให้ความสามารถทนทานต่อ ซัลเฟตของคอนกรีตลดลง รวมทั้งยังกระตุ้นให้เกิด Alkali Aggregate Reaction สำหรับในกรณีที่มวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์

4) คอนกรีตจะมีความสามารถทนทานต่อ Erosion และ Abrasion ทุกช่วงอายุมากกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

5) คัลเซียมคลอไรด์จะเร่งการสึกกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ความระมัดระวัง

4. สารเคมีผสมคอนกรีตอื่น ๆ

เราได้กล่าวถึง สารเคมีผสมคอนกรีตที่สำคัญ 3 ชนิดไปแล้ว ที่เหลืออีก 4 ประเภทคงจะไม่กล่าวในรายละเอียด ทั้งนี้เพราะสารผสมเพิ่มที่เหลือจะเป็นการรวมสาร 3 ประเภทต้นเท่านั้น เราจะพิจารณาเฉพาะประเด็นที่สำคัญเท่านั้น คือ

1) สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานคอนกรีตผสมเสร็จ

2) สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก

มักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า "Superplasticizer" สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ 15-30% ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดัน มีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่ว ๆ ไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเพราะการลดน้ำในปริมาณมาก ๆ ทำให้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวด Pre-Stressed ได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

3) สารลดประมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่พัฒนาล่าสุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมาก ๆ เช่นในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือเสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มนี้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ทำให้สามารถลื่นไหลเข้าไปในทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบ โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมากนัก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่ว ๆ ไปว่า "Flow Concrete"

คุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) ควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 5.3

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตารางที่ 5.3 *สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่าง ๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐาน*

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด						
	สารลดน้ำ	สารหน่วงการก่อตัว	สารเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำพิเศษ	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว
น้ำ ร้อยละของปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีตควบคุม ไม่เกิน	95			95	95	88	88
ระยะเวลาการก่อตัว เทียบกับคอนกรีตควบคุม ชั่วโมง:นาที							
การก่อตัวระยะต้น							
อย่างน้อย		ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	-	ช้าลง 1:00
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
การก่อตัวระยะปลาย							
อย่างน้อย	-	-	เร็วขึ้น 1:00	-	เร็วขึ้น 1:00	-	-
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	-	ช้าลง 3:30	-	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
ความต้านแรงอัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 1 วัน	-	-	-	-	-	140	125
3 วัน	110	90	125	110	125	125	125
7 วัน	110	90	100	110	110	115	115
28 วัน	110	90	100	110	110	110	110
ความต้านแรงดัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 3 วัน	100	90	110	100	110	110	110
7 วัน	100	90	100	100	100	100	100
28 วัน	100	90	90	100	100	100	100

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5.7 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

สารผสมเพิ่มชนิดนี้มักจะเป็นผงละเอียด ซึ่งใส่รวมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานคอนกรีตเหลว และเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ หรือวัสดุเฉื่อย (Inert)

2) วัสดุชนิด Pozzolana

3) วัสดุที่มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementitious)

1. วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำหรือวัสดุเฉื่อย

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตเหลว โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือที่มีปริมาณซีเมนต์อยู่น้อย คอนกรีตแบบนี้อาจแยกตัวได้ง่ายไม่เหมาะสำหรับการลำเลียงและเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตนี้ด้วยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ อาจทำไม่ได้ เพราะเหตุผลทางด้านราคาหรือทางเทคนิค เช่นทำให้มีความร้อนจากไฮเดรชั่นมากในคอนกรีตเหลว วิธีการที่ทำได้คือการใส่แร่ธาตุ เช่นผงหินปูน หินเขี้ยวหนุมาน เศษหิน ลงผสมคอนกรีต ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมโยงเหมาะสำหรับการปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

2. วัสดุชนิด Pozzolana

Pozzolana คือวัสดุประเภทซิลิก้า ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสานหรือ Calcium Silicate Hydrate เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้นเราอาจใช้ Pozzolana ในรูปของสารผสมเพิ่มซึ่งใส่ในสถานที่ก่อสร้าง หรือในรูปของซีเมนต์ผสม

นอกเหนือจากการเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ขาดซีเมนต์แล้วมันยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เราสามารถใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนซีเมนต์ประเภทที่สี่สำหรับโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของงานและอาจสูงถึง 15-35% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยซิลิก้าที่ทำปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ขี้เถ้าภูเขาไฟและหิน Tuff, Pumicite, Opaline, Chert ดินเหนียว และหิน Shale โดยปกติต้องนำมาบดให้ละเอียดและเผา, Fly Ash เป็นขี้เถ้าอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว

การใช้สาร Pozzolana มักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

รายละเอียดของ Fly Ash หรือที่มีชื่อเรียกทางการว่า Pulverized Fuel Ash (PFA) จะได้กล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

5.8 สารผสมเพิ่มอื่น ๆ

สารผสมเพิ่มประเภทนี้ ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในงานจำเพาะเจาะจงบางอย่าง เช่น

1. สารป้องกันซึม

ใช้ป้องกันการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีรูพรุนมากส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุประเภทสบู่หรือน้ำมัน

2. สารกันความชื้น

เป็นพวกกรดไขมันหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อาจจะทำให้น้ำไม่จับที่ผิวคอนกรีต แต่จะไม่สามารถทนน้ำที่มีแรงดันมากได้

3. สารช่วยให้ปั๊มง่าย

ช่วยให้คอนกรีตยึดเกาะตัวกัน เคลื่อนผ่านท่อปั๊มไปได้ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีปริมาณซีเมนต์ต่ำ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4. สารอุดประสานหรือสารกรอกฉีด

ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการอัดฉีดเข้าไปในซอกหรือบริเวณแคบ ๆ โดยป้องกันการแยกตัว การเยิ้ม รวมทั้งเพิ่มการยึดเกาะเพื่อให้ปั๊มได้สะดวกเหมาะที่จะนำไปใช้กับงาน Stabilize ฐานราก อุดรอยร้าวหรือรอยต่อในงานคอนกรีต อุดช่องว่างในงานคอนกรีตอัดแรงระบบ Bonding เป็นต้น

5. สารเพิ่มการขยายตัว

มีสารเคมีหลัก คือ Calcium Sulpho-Aluminate จะทำให้ซีเมนต์ธรรมดาเป็นซีเมนต์แบบขยายตัว เพื่อใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่ว ๆ ไป

6. สารลดการกัดกร่อนเหล็กเสริม

เป็นเกลือของสารเคมีที่มีประจุที่เกิดออกไซด์ได้

7. สารเชื่อมประสาน

ส่วนใหญ่ทำมาจาก Polymer Latex ใช้เพิ่มเสริมการยึดเกาะตัวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่หรือระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 6
วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต

การศึกษาวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต (Concrete Technology) ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในศตวรรษนี้ โดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภท อื่น ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติ ต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และที่สำคัญยิ่งคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน รวมทั้งต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมด้วย โดยได้มีการนำวัสดุอื่น ๆ มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)
2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) และ
3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรง คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ทางอ้อม คือ เป็นการนำของเสีย (Waste) มาใช้ ซึ่งช่วยขจัดปัญหาเรื่องมลภาวะด้วย

6.1 กรรมวิธีการผลิต

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)

PFA เป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ถ่านหินที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ดินดาน, ดินเหนียว, ซัล-ไฟด์ และคาร์บอเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่าง ๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิก้า และอลูมินา

2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

GGBS เป็นของเหลือ (By-Product) ของขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม Slag ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการหลอมตัวของคัลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่าน Coke

คุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของ Slag ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Slag อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงดัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา Slag ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที ผลก็คือ Slag ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านขบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป สุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพเพื่อดูความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี

3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

MS หรือ Silica Fume หรือ Condensed Silica Fume เป็นของเหลือ (By-Product) จากขบวนการผลิต Silicon Metal หรือ Ferrosilicon Alloy โดยการนำเอาวัตถุดิบอันได้แก่ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของ Amorphous Silica โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของ MS จะแตกต่างจาก PFA และ GGBS คือ MS ในแหล่งเดียวกันจะมีความผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับขบวนการผลิต Silicon หรือ Ferrosilicon ค่อนข้างบริสุทธิ์มาก

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

6.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของ PFA GGBS และ MS จะเหมือนกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่สัดส่วนจะแตกต่างกัน ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 6.1

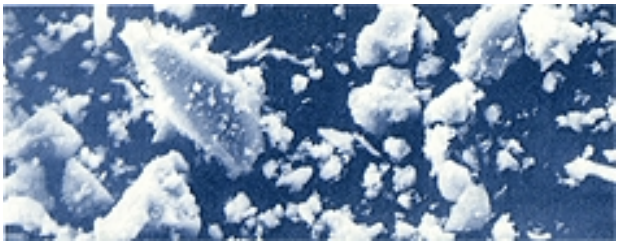
ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ต – แลนด์ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
SiO_2	20	48	37	92
Al_2O_3	5	26	11	0.7
Fe_2O_3	3	10	0.3	1.2
CaO	65	3	40	0.2
MgO	1.1	2	7	0.2
SO_3	2.4	0.7	0.3	-
Na_2O	0.2	1.0	0.4	1.2
K_2O	0.9	3.0	0.7	1.9
ออกไซด์อื่น ๆ	1.4	1.3	2.3	2.6
Loss of Ignition	1	5	-	-

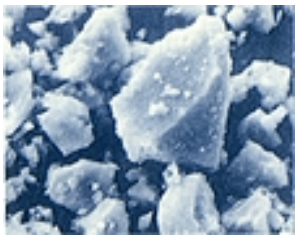
ตารางที่ 6.1 *องค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS*

6.3 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 6.2

ซีเมนต์





GGBS *PFA*

รูปที่ 6.1 *อนุภาคของซีเมนต์ PFA และ GGBS, PFA มีรูปร่าง ค่อนข้างกลมในขณะที่ซีเมนต์และ GGBS มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

คุณสมบัติ	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
ความละเอียด (ตร.ซม./กรัม)	3,400	3,800	3,500	150,000
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลบ.ม.)	1,400	900	1,200	240 600 (อัดตัวแน่น)
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซม.)	3.15	2.3	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึง เทาเข้มหรือบางครั้ง สีน้ำตาล	ขาว	เทาดำ

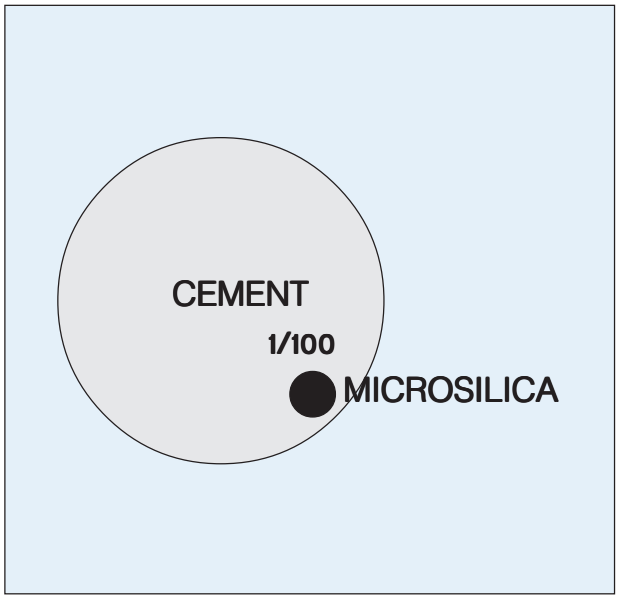
ตารางที่ 6.2 *ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS*

จากตารางที่ 6.2 จะพบว่า

1) OPC, PFA และ GGBS ที่เหมาะสำหรับผสมคอนกรีต จะมีความละเอียดใกล้เคียงกัน แต่ MS จะมีความละเอียดสูงมาก

2) จากค่าความถ่วงจำเพาะถ้านำ PFA, GGBS หรือ MS มาผสมกับ OPC โดยน้ำหนักจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนละเอียดเมื่อเทียบกับ OPC ที่น้ำหนักเท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผู้ออกแบบจะต้องนำมาพิจารณา

3) MS ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ประมาณ 100 เท่า ซึ่งทำให้การจัดเก็บและการลำเลียงทำได้ลำบาก การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการผสมน้ำกับ MS ในอัตราส่วนเท่ากัน เพื่อให้ได้ของเหลว (Slurry) สะดวกต่อการจัดเก็บและการลำเลียง รวมทั้งช่วยให้การกระจายตัวของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตสดดีขึ้นด้วย



รูปที่ 6.2 *ขนาดของ Microsilica เทียบกับปูนซีเมนต์*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

6.4 ลักษณะการทำงาน

1. Pulverized Fuel Ash

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Free Lime หรือ Calcium Hydroxide $Ca(OH)_2$ ดังสมการ

ปูนซีเมนต์+น้ำ $\rightarrow$ CSH + $Ca(OH)_2$

CSH ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมให้ส่วนผสมของคอนกรีตจับตัวกัน ส่วน $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นนี้ประมาณ 25% โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใด ๆ ในบางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ก่อให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต (Efflorescence) หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้การยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ต้าไม่ดีนัก แต่เมื่อใส่ PFA เป็นส่วนผสม SiO_2 ที่มีอยู่จำนวนมากใน PFA นี้ จะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ และก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นดังสมการ

$Ca(OH)_2$ + SiO_2 จาก PFA + น้ำ $\rightarrow$ CSH

CSH ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวที่เพิ่มขึ้นนี้ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังอัด, ความทนทาน, การต้านการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2. Ground Granular Blast Furnace Slag

เนื่องจาก GGBS มีองค์ประกอบทางเคมีของ CaO อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ GGBS จะใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแล้ว ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 ใน GGBS กับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่งดังสมการ

ปูนซีเมนต์ + น้ำ $\rightarrow$ CSH + $Ca(OH)_2$

GGBS + น้ำ $\rightarrow$ CSH + $Ca(OH)_2$

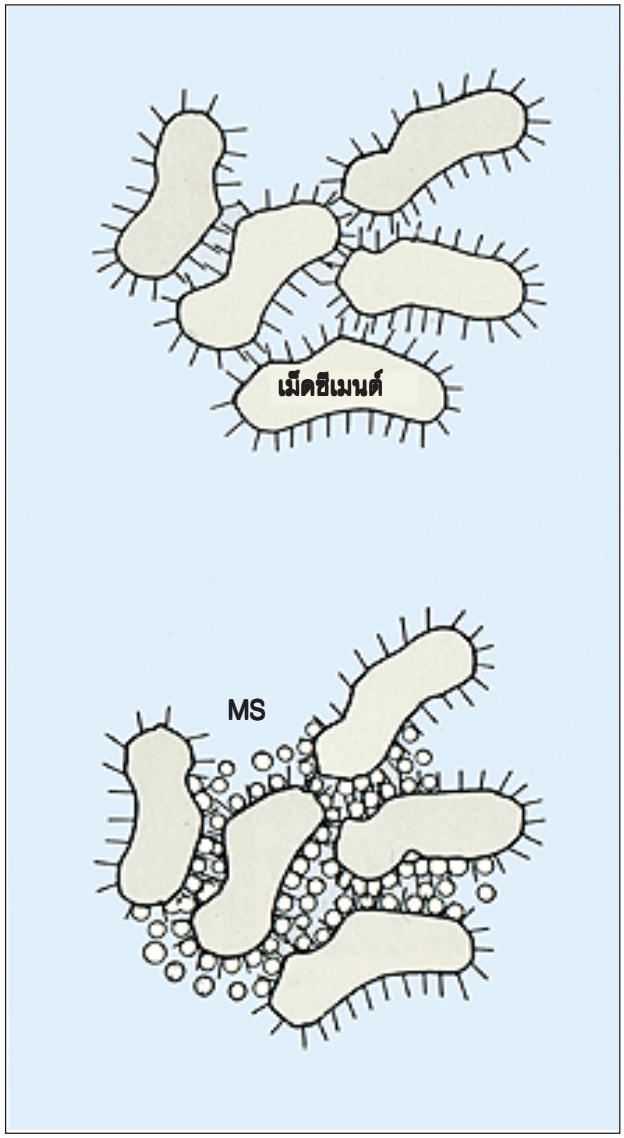
$Ca(OH)_2$ + SiO_2 จาก GGBS + น้ำ $\rightarrow$ CSH

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ GGBS อาจเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้โดยการบด GGBS ให้มีความละเอียดมากขึ้น

3. Microsilica

เนื่องจาก MS มีปริมาณ SiO_2 อยู่สูงถึงกว่า 90% ปฏิกิริยาของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตจะเหมือนกับของ PFA แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วมาก เนื่องจาก MS มีความละเอียดสูงมากส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลายเป็นไปได้เร็วกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

นอกจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้ว MS ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ด้วยผลทางกายภาพอีกด้านหนึ่งกล่าวคือ MS เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงมาก เป็นผลดีทั้งด้านกำลังอัดและความทนทาน



รูปที่ 6.3 *อนุภาคของ Microsilica แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดซีเมนต์*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

6.5 คุณประโยชน์และการใช้งาน

1. Pulverized Fuel Ash

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ PFA เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) **ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีต** ทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ PFA ซึ่งมีรูปร่างกลม ดังแสดงในรูป 6.1

2) **ลดการเยิ้ม (Bleeding)** และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด

3) **อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง** ซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่

4) **เพิ่มกำลังอัดคอนกรีต**ที่อายุมากกว่า 28 วัน

5) **เพิ่มความทนทานของคอนกรีต** ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการความสามารถเทได้เท่ากัน
- ปฏิกิริยาระหว่าง PFA กับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

การใช้งาน PFA ทำได้ 2 ลักษณะ

1) ผสม PFA กับซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการจากโรงงานผสม

2) ใช้ PFA เสมือนเป็นส่วนผสมอีกส่วนหนึ่งของคอนกรีต โดยผสม ณ โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ

ปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วง 15-50% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อควรคำนึงถึงในการใช้ PFA

1) PFA โดยทั่ว ๆ ไปจะลดกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรก

2) การบ่มมีผลอย่างมากต่อคอนกรีตที่ผสม PFA กล่าวคือ การพัฒนากำลังอัดของ PFA คอนกรีตจะเกิดเมื่อคอนกรีตนั้นได้รับการบ่มชื้นเท่านั้น

2. Ground Granular Blast Furnace Slag

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ GGBS เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) **ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมด้วย Slag** จะช้ากว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ส่งผลให้ **ความร้อนจากปฏิกิริยาต่ำ** ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่, เขื่อน เป็นต้น

2) **คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต, น้ำทะเล และสารเคมีได้ดี**

3) **ลดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction** ในคอนกรีตที่ใช้หินที่ทำปฏิกิริยากับ Alkali ในปูน

4) **ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี (Low Permeability)** ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงาน สระว่ายน้ำ ถังเก็บน้ำ เป็นต้น

5) **เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด (Flexural Strength)** คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

การใช้งาน GGBS ทำได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับ PFA โดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 25-65% แต่สำหรับ Supersulphate ซีเมนต์จะผสม Slag สูงถึง 85%

ข้อคำนึงการใช้ GGBS

1) เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วย GGBS จะช้ากว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

2) กำลังอัดในช่วงต้นจะพัฒนาช้าและการบ่มจะมีผลอย่างมากเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสม

3. Microsilica

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ MS เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) **ลดการเยิ้ม (Bleeding)** และการแยกตัวของคอนกรีตสด

2) **เพิ่มกำลังอัด** ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

3) **เพิ่มความหนาแน่น** ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมาก ส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก

การใช้งาน MS ในทางปฏิบัติเราสามารถใช้ MS ผสมคอนกรีตได้ 2 ลักษณะ คือ

1) ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของแข็งผสมไปในคอนกรีตลักษณะเดียวกับปูนซีเมนต์

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของเหลวเหมือนน้ำยาผสมคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

ปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 7-10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อคำนึงถึงในการใช้ MS

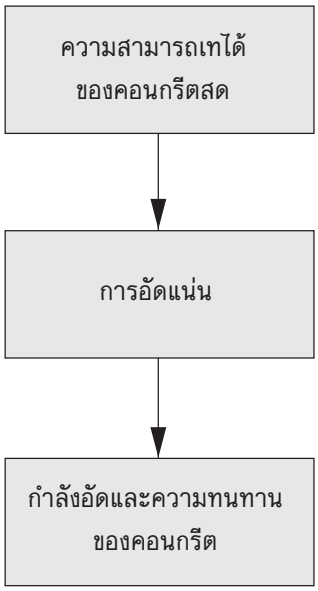
1) คอนกรีตที่ผสม MS ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) ผสมเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว

2) คอนกรีตสดที่ผสม MS มีแนวโน้มจะเกิด Plastic Shrinkage Crack มากกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงควรหาวิธีการป้องกัน

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 7
คุณสมบัติของคอนกรีตสด

เมื่อได้พิจารณาวัสดุองค์ประกอบของคอนกรีตแล้ว ในบทนี้จะมากล่าวถึงคุณสมบัติของคอนกรีตสด ซึ่งมีความสำคัญมาก เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด, การคงตัว ความทนทาน การต้านทานและการซึมผ่านของน้ำ ล้วนแต่เป็นผลมาจากการอัดแน่น และการทำให้คอนกรีตอัดแน่น รวมถึงการขนส่ง การเทลงแบบ และการแต่งผิวหน้า โดยไม่มีการแยกตัว ล้วนแต่เป็นผลมาจาก ความสามารถเทได้ ของคอนกรีตสดทั้งสิ้น



รูปที่ 7.1 *คุณสมบัติของคอนกรีตสด ส่งผลโดยตรงต่อกำลังและความทนทาน*

7.1 คำนิยาม

ความสามารถเทได้ (Workability)

คือปริมาณงานที่ใช้ในการอัดคอนกรีตให้แน่นโดยปราศจากการแยกตัว

การยึดเกาะ (Cohesion)

คือคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีตที่สามารถจับรวมตัวเป็นกลุ่มหรือสลายตัวออกจากกันได้ยาก

ความข้นเหลว (Consistency)

คือสภาพความเหลวของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเป็นส่วนใหญ่ ความข้นเหลวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของความสามารถในการใช้งาน และสามารถวัดค่าได้ชัดเจนในรูปของค่ายุบตัว, การไหล เป็นต้น

การแยกตัว (Segregation)

คือการแยกออกของส่วนประกอบต่าง ๆ ในเนื้อคอนกรีต ทำให้ส่วนผสมมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ

การเยิ้ม (Bleeding)

คือการแยกตัวชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อส่วนประกอบที่หนักกว่าจมตัวลงดันน้ำซึ่งเบาที่สุดขึ้นสู่ผิวคอนกรีต

7.2 ความสามารถเทได้

คำจำกัดความของความสามารถเทได้ก็คือผลรวมของพลังงานหรือกำลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระหว่างอนุภาคที่จะก่อให้เกิดการอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์

โดยทฤษฎีพลังงานนี้จะต้องเอาชนะแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคของส่วนผสมในเนื้อคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติพลังงานที่ใส่เข้าไปนี้จะต้องเอาชนะทั้งแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาค แรงเสียดทานระหว่างส่วนผสมคอนกรีตกับไม้แบบและเหล็กเสริม นอกจากนี้พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการเขย่าไม้แบบ และเขย่าคอนกรีตที่อัดแน่นเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตตามคำนิยาม สิ่งที่เราวัดความสามารถเทได้เป็นวิธีการที่เราประยุกต์มาใช้ให้เหมาะสมเท่านั้น

เพราะว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะผันแปรหรือถูกกระทบโดยตรงโดยช่องว่างที่ปรากฏอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่อัดแน่น ดังนั้นควรทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

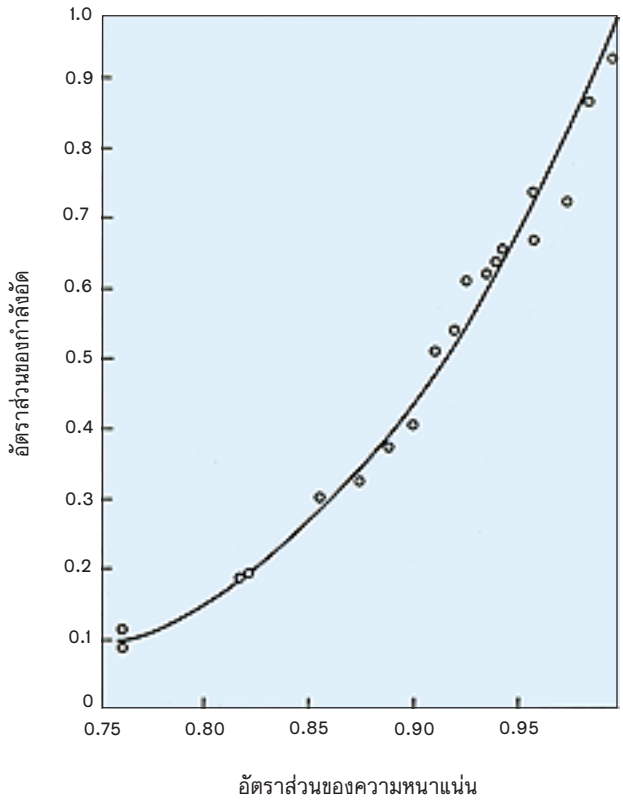
ไปได้ นั้นคือจำเป็นต้องทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้เพียงพอเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถอัดแน่นได้ดี โดยใช้พลังงานที่เหมาะสมภายใต้สภาพที่กำหนด

ในรูปที่ 7.2 จะเห็นว่า ช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตจะทำให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมากโดยช่องว่างที่เกิดขึ้น 5% สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงถึง 30% ช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตมี 2 ประเภท คือ

1) ช่องว่างเนื่องจากการจี้เขย่าไม่ดี (Entrapped Air)

2) ช่องว่างที่เกิดจากน้ำส่วนเกิน (Excess Water) ที่ระเหยออกไป

การลดช่องว่างนี้ทำได้โดยการเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำ เลือกใช้มวลรวมที่มีส่วนคละดีคอนกรีตต้องมีความเหลวพอที่จะจี้เขย่าเข้าแบบได้ง่าย รวมทั้งควรเลือกใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ และที่สำคัญที่สุดคือต้องมีการจี้เขย่าคอนกรีตอย่างถูกต้องและเพียงพอ



รูปที่ 7.2 *ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของกำลังอัด*

การทดสอบความสามารถเทได้ทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความแข็งของคอนกรีต ตามปกติทั่ว ๆ ไปนิยมใช้การทดสอบการยุบตัวซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่แพร่หลายที่สุด แต่ยังมีวิธีอื่น ๆ อีกดังแสดงในตารางที่ 7.1

การทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ	ขอบข่ายการใช้
1) การอัดแน่น	BS 1881	คอนกรีตแข็ง-แข็งมาก
2) เวลา Vebe	BS 1881	คอนกรีตแข็ง-แข็งมาก
3) การยุบตัว	ASTM C 172/BS 1881	คอนกรีตทั่วไป
4) การจมตัวของลูกบอลล์	ASTM C 360	คอนกรีตเหลวปานกลาง
5) การไหลตัว	DIN 1048	คอนกรีตเหลวมาก

ตารางที่ 7.1 *การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

7.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความสามารถเทได้

ความสามารถเทได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มาเกี่ยวข้องดังนี้

องค์ประกอบ	ผลกระทบ
1) จำนวนน้ำในส่วนผสม	• เพิ่มน้ำจะทำให้เกิดการหล่อลื่นในระหว่างอนุภาพมากขึ้น • น้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่างเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วมากขึ้นดังนั้นควรหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม • ปริมาณน้ำที่พอเหมาะกับช่องว่างระหว่างมวลรวมจึงมีผลต่อการหล่อลื่น
2) คุณสมบัติของหิน–ทราย	• หินทรายที่มีส่วนคละดีจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดี • หินที่กลมผิวเกลี้ยงจะให้การลื่นไหลดีกว่าหินที่แบนและผิวขรุขระ • ความพรุนของมวลรวมจะทำให้การดูดซึมน้ำสูงและลดความสามารถเทได้ลง • ถ้าต้องการให้ความสามารถเทได้เท่ากันมวลรวมที่ละเอียดต้องใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่ามวลรวมที่หยาบ
3) ส่วนผสมของคอนกรีต	• ภายใต้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ค่าความสามารถเทได้จะเพิ่มขึ้นถ้าอัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ (A/C) ลดลง • ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนทรายต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) ต่ำสามารถก่อให้เกิดการแยกตัวได้รวมทั้งความสามารถในการเทได้จะต่ำลงด้วย • ถ้าใช้ทรายในส่วนผสมมากอาจทำงานง่ายขึ้น แต่จะสิ้นเปลืองปริมาณซีเมนต์มากขึ้น ถ้าจะคงกำลังอัดเท่าเดิม
4) ชนิดของปูนซีเมนต์	• ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะต้องการน้ำมาก
5) สารผสมเพิ่ม	• สารผสมเพิ่มที่เป็นผงละเอียด จะช่วยเพิ่มความลื่นไหลแทนส่วนของซีเมนต์ • สารเพิ่มฟองอากาศ (Air Entraining Agent) จะทำให้การลื่นไหลดีขึ้นแต่กำลังอัดอาจลดลง • น้ำยาประเภทลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัวจะช่วยเพิ่มการลื่นไหล

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

นอกจากนี้ยังมีอีก 2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตนั่นคือ

1) เวลาและ

2) อุณหภูมิ

คอนกรีตสดจะแข็งตัวตามเวลาที่ผ่านไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำผสมคอนกรีตบางส่วนถูกดูดซับไปโดยมวลรวม บางส่วนระเหยไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตที่ถูกแสงแดดและลม เช่นคอนกรีตที่ใช้ทั่วไปในประเทศไทย และน้ำบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ความแข็งตัวของคอนกรีตสามารถวัดได้โดยการวัดความสามารถเทได้ที่สูญเสียไปกับเวลาที่ผ่านไปโดยรู้กันในชื่อว่า "Slump Loss" ซึ่งผันแปรกับ

1) ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

2) ชนิดของปูนซีเมนต์

3) อุณหภูมิของคอนกรีต

4) ความสามารถเทได้เริ่มต้น

กล่าวคือ ถ้าอากาศร้อน การสูญเสียน้ำจะเร็วความสามารถเทได้จะลดลงหรือ ณ อุณหภูมิสูง การก่อตัวจะเกิดเร็วขึ้น เวลาการทำงานและความสามารถเทได้จะลดลงเป็นต้น การทดสอบ Slump Loss อยู่ในหัวข้อ 7.8

7.4 การยึดเกาะและการแยกตัว

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ดีจะต้องมีความสามารถเทได้ไม่มีการแยกตัวขององค์ประกอบ (Segregation) หรือคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอมีเนื้อเดียวกันตลอดทุกส่วนนั่นคือคอนกรีตมีการยึดเกาะ (Cohesion) ที่ดีนั่นเอง

รูปที่ 7.3 *คอนกรีตที่ออกแบบไม่ถูกต้องจะแยกตัว*

- **รูปแบบของการแยกตัวของคอนกรีต**

1) มวลรวมหยาบแยกตัวออกจากส่วนผสม เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคอนกรีตผ่านทางชันหรือมวลรวมหยาบจมตัวลงมากกว่ามวลรวมละเอียด

2) น้ำปูนแยกตัวออกจากส่วนผสมเนื่องจากส่วนผสมเหลวมากเกินไป

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

● **สาเหตุของการแยกตัวของคอนกรีต**

1) ใช้หินทรายที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมาก

2) ใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่เหมาะสม เช่น เหลวหรือแข็งมากเกินไป

3) การขนย้าย การเทลงแบบ และการจี้เขย่าไม่ถูกวิธี

- ลำเลียงคอนกรีตที่เหลวมากไปเป็นระยะทางไกล
- เทคอนกรีตไหลผ่านรางที่เปลี่ยนทิศทาง
- ปล่อยคอนกรีตผ่านสิ่งกีดขวาง
- จี้เขย่าคอนกรีตนานเกินไป
- จี้เขย่าให้คอนกรีตไหลไปตามแบบหรือให้คอนกรีตแผ่เป็นพื้นที่กว้าง

● **วิธีการป้องกันการแยกตัว**

1) ใช้หินทรายที่มีขนาดคละดีมีความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันไม่มาก

2) ทำให้คอนกรีตเหลวและมีความสามารถเทได้โดยใช้น้ำยาประเภทลดน้ำหรือน้ำยาลดน้ำจำนวนมาก

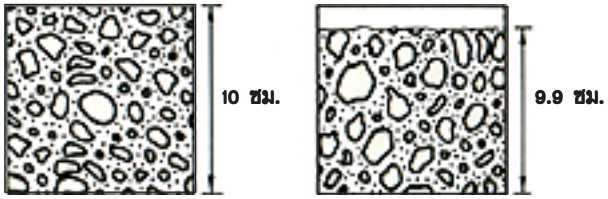
3) เลือกสัดส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสม

4) ใช้เครื่องจี้เขย่าคอนกรีตอย่างถูกวิธี

รูปที่ 7.4 *คอนกรีตที่เหลวมากด้วยน้ำยาผสมคอนกรีตไม่มีการแยกตัว*

7.5 การเยิ้ม

การเยิ้ม (Bleeding) คือ การคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีตซึ่งเกิดหลังจากการจี้เขย่าคอนกรีตเข้าแบบแล้วลักษณะที่สำคัญคือจะมีน้ำบางส่วนที่ลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่ผิวหน้าของคอนกรีตสดเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นของแข็งในส่วนผสมจมตัวลงและดันน้ำที่เป็นองค์ประกอบที่เบาที่สุดให้ลอยตัวขึ้นการหาค่าการเยิ้มสามารถแสดงออกมาเป็นปริมาณซึ่งได้จากอัตราส่วนค่ายุบตัวลงต่อหน่วยความสูงของคอนกรีตดังแสดงในตัวอย่าง



รูปที่ 7.5 *การหาค่าการเยิ้มของคอนกรีต*

$$\text{ค่าการเยิ้ม} = \frac{0.1}{10.0} \times 100 = 1\%$$

การเยิ้มจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือ

1) ผิวด้านบนของคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดหรือมีกำลังอัดต่ำที่สุด เมื่อคอนกรีตแข็งตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการเป็นฝุ่นที่ผิว (Dusting) และถ้าต้องเทคอนกรีตทับบนผิวนี้เช่นการเทคอนกรีตฐานรากขนาดใหญ่จะเกิดชั้นที่อ่อนแอและเป็นรูพรุนทำให้โครงสร้างนี้ขาดความทนทาน

2) นอกจากน้ำที่ลอยตัวขึ้นมาแล้ว น้ำบางส่วนจะถูกกักไว้ใต้มวลรวมหยาบหรือเหล็กเสริม ก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าและมวลรวมหรือเหล็กเสริมลดลงอย่างมาก และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะเกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียว การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น การเยิ้มนี้จะพบได้บ่อยในงานเทคอนกรีตพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น พื้นถนน เป็นต้น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 7.6 *การเยิ้มของคอนกรีตก่อให้เกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียว*

- **ปัจจัยที่มีผลต่อการเยิ้ม**

1) ปริมาณน้ำในส่วนผสม การลดน้ำจะลดการเยิ้ม

2) คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ การเยิ้มจะลดลงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น

3) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซีเมนต์ที่เป็นด่างมากหรือที่มี C_3A มากจะมีการเยิ้มน้อย

4) อุณหภูมิ

5) สัดส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมากมีแนวโน้มจะเกิดการเยิ้มน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์น้อย

6) สารกักกระจายฟองอากาศจะลดการเยิ้ม

7.6 เวลาการก่อตัว (Setting Time)

เวลาการก่อตัวมีความสำคัญมากต่อการทำงานคอนกรีตโดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเทคอนกรีต การก่อตัวจะมี 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 7.7

เริ่มผสม — การเริ่มก่อตัว (Stiffening Time) — การก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) — การก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

รูปที่ 7.7 *ขั้นตอนการก่อตัวของคอนกรีต*

1) การเริ่มก่อตัว (Stiffening Time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 5 กก./ตร.ซม. หรือ 70 ปอนด์/ตารางนิ้ว ณ เวลานี้คอนกรีตเริ่มแข็งกระด้าง

2) การก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวรับแรงเสียดทานได้ 35 กก./ตร.ซม. หรือ 500 ปอนด์/ตารางนิ้ว ณ เวลานี้คอนกรีตจะแข็งตัวแล้ว ถ้าเทคอนกรีตสดทับลงไปอีกจะก่อให้เกิด Cold Joint

3) การก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือเวลาที่คอนกรีตแข็งตัวสมบูรณ์ โดยสามารถรับแรงเสียดทานได้ 276 กก./ตร.ซม. หรือ 4,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

การทำงานเทคอนกรีตจะต้องให้เสร็จสิ้นก่อนเวลาการเริ่มก่อตัว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านน้ำยาผสมคอนกรีตประเภทยืดเวลาการก่อตัว ซึ่งยืดเวลาการก่อตัวได้ ตั้งแต่ 2-8 ชั่วโมง

- **ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัว**

การก่อตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ประการที่สำคัญคือ

1) ชนิดของปูนซีเมนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ C_3A, C_3S และยิบซั่มในส่วนผสม

2) อุณหภูมิของอากาศ

3) ความชื้นสัมพัทธ์

4) ความหนาบางของโครงสร้างคอนกรีต

ในบางกรณีอาจมีปัญหาด้านการก่อตัวผิดปกติของคอนกรีตซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1) การก่อตัวผิดจังหวะ (False Set) คือ หลังจากผสมระยะหนึ่งคอนกรีตจะแข็งตัวชั่วขณะแต่พอผสมต่อไป ก็จะเหลวเหมือนคอนกรีตปกติ สาเหตุเกิดจากโมเลกุลของน้ำในยิบซั่มถูกดึงออกไปในขบวนการบด ดังนั้นเมื่อเริ่มผสม ยิบซั่มนี้จะดึงน้ำบางส่วนเพื่อคืนตัวเป็นยิบซั่มอย่างเดิม โดยเริ่มจับเป็นกลุ่มแล้ว ค่อย ๆ กระจายตัวออก จึงทำให้เกิดการแข็งตัวชั่วขณะหนึ่ง

2) การก่อตัวเร็ว (Flash Set) ลักษณะการก่อตัวจะเกิดขึ้นเร็วมากและจะไม่คืนกลับสู่สภาพเหลวอีก กรณีเช่นนี้จะเกิดเมื่อมีส่วนผสมของ Calcium Aluminate หรือ Monosulfo Aluminate มากเกินไป

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

7.7 คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ดี

คอนกรีตสดคือ คอนกรีตที่ยังมีความเหลวเหมาะที่จะนำไปใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญที่ถือว่าเป็นคอนกรีตที่ดีดังนี้

- ผสมได้เพียงพอจนมีเนื้อสม่ำเสมอเหมือนกันทั้งโม่
- มีความสามารถเทได้
- ไม่เกิดการแยกตัว ระหว่างการลำเลียงหรือขณะเทคอนกรีต
- ไม่เกิดการเยิ้มมากเกินไปจนทำให้การแต่งผิวหน้าไม่สะดวก และมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว
- มีเวลาในการก่อตัวนานพอที่สามารถทำงานได้
- มีอุณหภูมิพอเหมาะไม่สูงเกินไป จนมีผลกระทบต่อความสามารถเทได้ และเวลาในการก่อตัว
- ควรมีปริมาณฟองอากาศพอเหมาะ ซึ่งมีผลต่อความสามารถเทได้
- สำหรับคอนกรีตที่ใช้เทด้วยปั๊มควรมีคุณสมบัติที่สำคัญคือต้องไม่แยกตัวเมื่อถูกแรงอัดจากปั๊ม และไหลในท่อได้สะดวก
- สำหรับคอนกรีตที่ใช้เทฐานรากขนาดใหญ่ การมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีค่ายุบตัวสูง Slump Loss ช้า และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

7.8 การทดสอบคอนกรีต

• วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่ถูกออกแบบไว้นั้น มีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่ายุบตัว, เวลาการแข็งตัว, ปริมาณอากาศตามที่ต้องการหรือไม่ การทดสอบแต่ละอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้ผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะเลือกทดสอบเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานเท่านั้น

• มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 192
Standard Method of
MAKING AND CURING CONCRETE TEST SPECIMENTS IN THE LABORATORY

• วิธีการทดสอบ

หลังจากออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมที่ได้มาทำการชั่งน้ำหนัก ซีเมนต์ หิน ทราย รวมทั้งวัดปริมาตรน้ำและน้ำยา ตามส่วนผสมโดยต้องคำนวณปรับน้ำหนักของหิน ทราย ตามค่าความชื้นในสภาพที่เป็นจริง เสร็จแล้วนำวัตถุดิบดังกล่าวเทใส่โม่

โม่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมี 2 ลักษณะคือ

1) โม่แบบ Tilt

2) โม่แบบ Pan

โม่แบบ Tilt

โม่แบบ Pan

รูปที่ 7.8 *ลักษณะเครื่องผสมคอนกรีตที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ก่อนที่จะผสมคอนกรีตใช้จริง ควรผสมมอร์ต้า เคลือบโม่ก่อน เพื่อส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมถูกต้องและเพื่อให้วัตถุดิบทั้งหมดผสมเข้ากันได้ดี ลำดับการใส่วัตถุดิบจึงมีความสำคัญ โดยจะใส่ หิน ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำตามลำดับ ถ้ามีการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตจะผสมน้ำยากับน้ำแล้วเทส่วนผสมใส่ในโม่

- **วิธีการผสมตามมาตรฐานมีดังนี้**

1) ผสมส่วนผสม 3 นาที

2) หยุดเครื่องผสม 3 นาทีปิดฝาโม่กันไม่ให้น้ำระเหยออก

3) ผสมต่ออีก 2 นาที

หลังจากผสมเสร็จเรียบร้อยให้เทคอนกรีตใส่รถเข็นเพื่อนำไปทดสอบ

1. การวัดอุณหภูมิ

วัดอุณหภูมิอากาศ และวัดอุณหภูมิของคอนกรีต บันทึกเป็นข้อมูลไว้ใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติคอนกรีต เช่น เวลาการก่อตัว และความสามารถในการเทได้ เป็นต้น

2. การทดสอบค่าการยุบตัว

วัตถุประสงค์

เพื่อหาความสามารถไหลได้ หรือความสามารถในการเทคอนกรีตสดลงแบบ

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 143

Standard Test Method of

SLUMP OF PORTLAND CEMENT CONCRETE

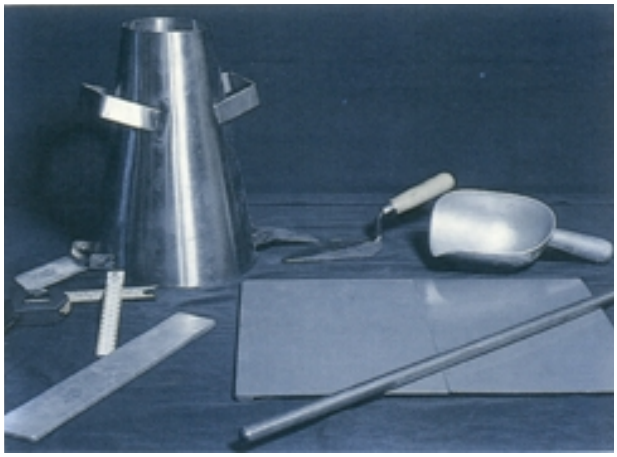
อุปกรณ์

1) โคนรูปทรงกรวยตัด เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 10 ซม. และด้านล่าง 20 ซม. สูง 30 ซม. มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบทั้ง 2 ข้าง

2) เหล็กตำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม. ปลายกลมมน

3) แผ่นเหล็กสำหรับรอง

4) ช้อนตัก เกรียงเหล็ก ตลับเมตรหรือไม้วัด



รูปที่ 7.9 *อุปกรณ์ทดสอบค่ายุบตัว*

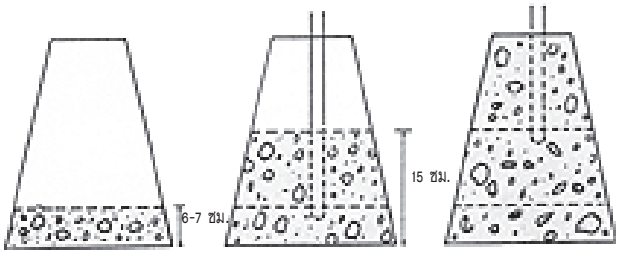
วิธีทดสอบ

1) นำอุปกรณ์จุ่มน้ำให้เปียก

2) วางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบ นำโคนขึ้นวางใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้าง

3) ใช้ช้อนตักตักคอนกรีตใส่ลงในโคนโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาณเท่า ๆ กัน ชั้นที่ 1 ใส่คอนกรีตในโคนสูงประมาณ 6-7 ซม. ตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง ในการตำต้องตำให้ทั่วพื้นที่ ใส่คอนกรีตชั้นที่ 2 จนได้ส่วนสูงประมาณ 15 ซม. ตำให้ทะลุถึงคอนกรีตชั้นที่ 1 เล็กน้อย ใส่คอนกรีตชั้นที่ 2 จนเต็มตำให้ทะลุคอนกรีตชั้นที่ 2 เพียงเล็กน้อยปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ รวมทั้งทำความสะอาดบริเวณโคนและแผ่นเหล็กรอง

4) ดึงโคนขึ้นตรง ๆ ไม่หมุน



รูปที่ 7.10 *ปริมาณคอนกรีตที่ใส่ในโคนและการตำ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

5) วางโคนลงข้าง ๆ คอนกรีตแล้ววัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ค่ายุบตัวคือ ค่าระยะที่คอนกรีตยุบตัวจากเดิม โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีตที่ยุบตัวในการวัดให้วัดละเอียดถึง 0.5 ซม.

รูปที่ 7.11 *การวัดค่ายุบตัว*

รูปแบบการยุบตัวของคอนกรีต

การยุบตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปมี 3 แบบ คือ

1) การยุบตัวแบบถูกต้องเป็นการยุบตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของตัวคอนกรีต

2) การยุบตัวแบบเฉือนเป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีตส่วนบน ในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง

3) การยุบตัวแบบล้ม เป็นการยุบตัวที่เกิดจากคอนกรีตมีความเหลวมาก

ยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) | ยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) | ยุบตัวแบบล้ม (Collapse Siump)

รูปที่ 7.12 *รูปแบบการยุบตัว*

ค่าคลาดเคลื่อนในค่าการยุบตัว

มาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนในค่าการยุบตัว มีค่า ± 2.5 ซม. เช่น ถ้าต้องการค่ายุบตัว 7.5 ซม. ค่าที่ยอมรับได้คือ 7.5 ± 2.5 ซม. หรือ 5-10 ซม.

ค่ายุบตัวสำหรับงานชนิดต่าง ๆ และงานพิเศษแสดงอยู่ในตารางที่ 7.2 และ 7.3

ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว (ซม.)
ฐานราก	7.50 ± 2.5
แผ่นพื้น, คาน, ผนัง ค.ส.ล.	10.0 ± 2.5
เสา	10.0 ± 2.5
ครีบ ค.ส.ล.และผนังบาง ๆ	10.0 ± 2.5

ตารางที่ 7.2 *ค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ*

ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว (ซม.)
ถนน, สนามบิน	5.0 ± 2.5
งานที่ใช้คอนกรีตปั๊ม	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะระบบแห้ง	10.0 ± 2.5
งานเทคอนกรีตใต้น้ำ (Trimie)	มากกว่า 15
งานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15

ตารางที่ 7.3 *ค่าการยุบตัวสำหรับงานพิเศษบางประเภท*

3. การทดสอบเวลาก่อตัว

วัตถุประสงค์

เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่จะนำคอนกรีตไปใช้งาน

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 403

Standard Test Method of

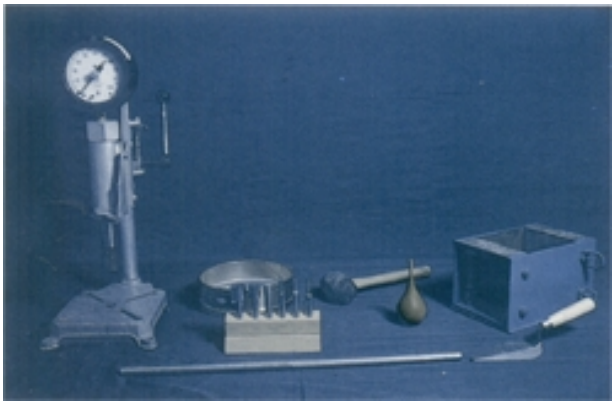
TIME OF SETTING OF CONCRETE

MIXTURE BY PENETRATION RESISTANCE

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

อุปกรณ์

1) เครื่องมือหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
2) ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4
3) เหล็กตำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม.
4) แบบรูปทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ซม.
5) ฆ้อนยาง, ลูกยาง, เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 7.13 *อุปกรณ์ทดสอบเวลาการก่อตัวของคอนกรีต*

วิธีการทดสอบ

1) นำคอนกรีตร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2) นำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เทลงแบบลูกบาศก์ที่เตรียมไว้โดยใส่ให้ความสูงต่ำกว่าขอบแบบประมาณครึ่งซม.

3) ใช้เหล็กตำให้ทั่วพื้นที่ ใช้ฆ้อนยางตีข้าง ๆ แบบเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากส่วนผสม

4) วัดอุณหภูมิ

5) ปาดผิวหน้าให้เรียบ

6) วางทิ้งไว้เมื่อมีน้ำลอยตัวขึ้นมาให้ใช้ลูกยางดูดน้ำออก

7) ยกแบบวางบนเครื่องทดสอบที่ใส่หัวกดไว้เรียบร้อย แล้วกดให้หัวกดจมในเนื้อคอนกรีต 2.5 ซม. จดค่าน้ำหนักที่ขึ้นบนสเกล เวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลากด และขนาดของหัวกด

หัวกดที่ใช้มีให้เลือกตั้งแต่ขนาดพื้นที่ 1, 1/2, 1/4, 1/10, 1/20, 1/40 ตารางนิ้ว ในการทดสอบจะเลือกหัวกดให้เหมาะสมกับสภาพคอนกรีตโดยในช่วงแรกจะใช้หัวกดขนาดใหญ่และเมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตยิ่งแข็งตัว จะเลือกหัวกดขนาดเล็กลง ในการทดสอบต้องหาแรงต้านทานอย่างน้อย 6 จุดเพื่อนำมาเขียนกราฟ

การคำนวณ

$$\text{แรงต้านทาน} = \frac{\text{น้ำหนักที่อ่านได้จากสเกล}}{\text{พื้นที่หัวกด}}$$

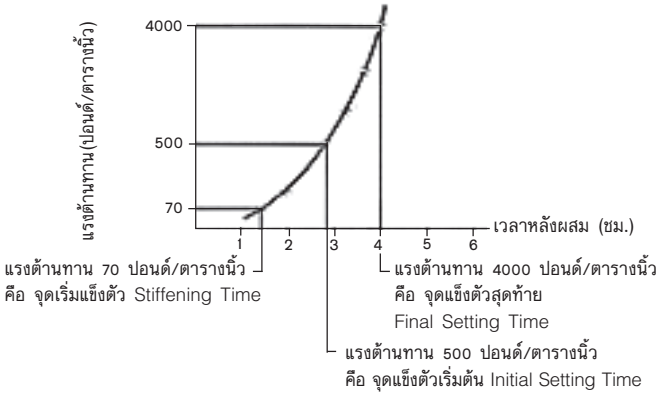
การเขียนกราฟ

เมื่อได้ค่าแรงต้านทานและเวลาหลังจากผสมนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟ

แกนนอน คือ เวลาหลังจากผสมคอนกรีต หน่วยเป็นชั่วโมง

แกนตั้ง คือ ค่าแรงต้านทาน หน่วยเป็น ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ กก./ตร.ซม.

ลงจุดที่ได้และลากเส้นกราฟนำกราฟมาหาค่าเวลาการก่อตัวของคอนกรีต



รูปที่ 7.14 *กราฟแสดงวิธีการหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต*

ข้อควรระวัง

1. ในการใช้หัวกดคอนกรีตนี้ระยะระหว่างช่องที่กดต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดที่ใช้ และต้องไม่น้อยกว่าครึ่งนิ้ว

2. จุดที่กด จะต้องห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว

รูปที่ 7.15 *ระยะช่องว่างของการทดสอบเวลาการก่อตัว*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4. การทดสอบปริมาณอากาศ

วัตถุประสงค์

งานก่อสร้างบางประเภท เช่น งานก่อสร้างห้องเย็น, งานก่อสร้างเขื่อน ในข้อกำหนดให้ใช้คอนกรีตที่มีปริมาณอากาศ 3-5% ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทดสอบว่าปริมาณอากาศในคอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่

ปริมาณอากาศถ้าน้อยกว่าข้อกำหนดจะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านความทนทาน

ปริมาณอากาศถ้ามีมากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

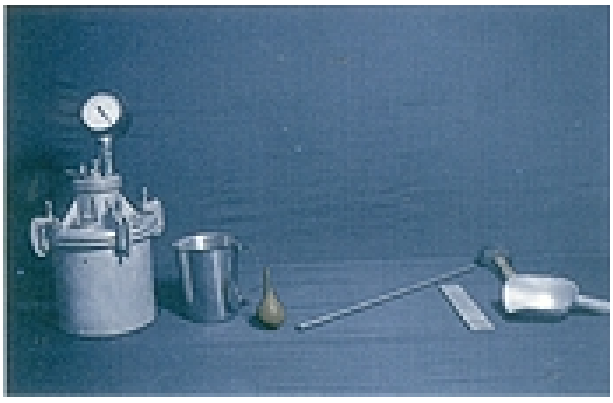
อุปกรณ์

1) แอร์มิเตอร์

2) เหล็กตำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม.

3) ฆ้อนยาง, ลูกยาง, ภาชนะใส่น้ำ แผ่นเหล็กสำหรับปาดหน้า

4) ช้อนตัก



รูปที่ 7.16 *อุปกรณ์ทดสอบปริมาณอากาศ*

วิธีทดสอบ

1) นำอุปกรณ์ทั้งหมดไปจุ่มน้ำให้เปียก

2) ตักคอนกรีตใส่ลงในแอร์มิเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กันในแต่ละชั้นตำ 25 ครั้งด้วยเหล็กตำ

3) ใช้ฆ้อนยางตีรอบ ๆ แอร์มิเตอร์ 10-15 ครั้ง เพื่อไล่อากาศในคอนกรีตออกให้หมด

4) ใช้แผ่นเหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทำความสะอาดบริเวณขอบแอร์มิเตอร์ ปิดฝาและขันสกรูให้แน่น

5) เปิดวาล์วสำหรับใส่น้ำทั้งสองข้าง ใช้ลูกยางดูดน้ำใส่จนเต็มโดยสังเกตจากน้ำที่ไหลออกมาอีกด้านหนึ่งเมื่อน้ำเต็มปิดวาล์ว

6) อัดอากาศเข้าไปในหม้อลมที่อยู่บริเวณฝาปิดจนเต็มโดยสังเกตจากหน้าปัดของเครื่อง เข็มจะชี้ที่เลขศูนย์

7) กดปุ่มอัดอากาศ ดูค่าปริมาณอากาศจากหน้าปัด

8) บันทึกค่า

การประเมินผล

ในการหาปริมาณอากาศควรทำ 2 ครั้ง และค่าที่ได้ทั้ง 2 ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.2% นำค่าที่ได้ทั้ง 2 มาหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้คือค่าปริมาณอากาศในคอนกรีต

5. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตหน่วยน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณว่า ถูกต้องหรือไม่

มาตรฐานที่ใช้

BS 1881 : PART 107

Method of Determination of DENSITY OF COMPACTED FRESH CONCRETE

อุปกรณ์

1) ถังใส่คอนกรีตขนาดมาตรฐาน ความจุ 10 ลิตร

2) เหล็กตำหน้าตัดเหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว

3) เหล็กปาดหน้าคอนกรีต

4) เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กก.

5) ช้อนตัก

รูปที่ 7.17 *อุปกรณ์ทดสอบหน่วยน้ำหนัก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

วิธีทดสอบ

1) ชั่งน้ำหนักถังเปล่าบันทึกค่าไว้

2) นำคอนกรีตใส่ลงในถัง โดยแบ่งเป็น 6 ชั้น ใช้เหล็กตำ ตำคอนกรีตให้แน่น ในแต่ละชั้นต้องตำไม่น้อยกว่า 60 ครั้ง ทำจนครบ 6 ชั้น

3) ใช้เหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ

4) นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งบันทึกน้ำหนักที่ได้

5) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาหน่วยน้ำหนัก

การคำนวณ

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = $\frac{\text{น้ำหนักคอนกรีตในถัง}}{\text{ปริมาณถัง}}$

ในการคำนวณหน่วยน้ำหนัก ควรให้มีความละเอียดถึง 10 กก./ลบ.ม.

6. การทดสอบการไหลตัว

วัตถุประสงค์

ปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตที่มีความเหลวมาก ซึ่งจะทำให้เหลวโดยการใส่น้ำยาลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) คอนกรีตที่ได้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. การทดสอบการยุบตัวไม่เหมาะสมจึงใช้วิธีการวัดการไหลของคอนกรีตแทน

มาตรฐานที่ใช้

DIN 1048 : PART 1
Method for
DETERMINATION OF FLOW

อุปกรณ์

1) โต๊ะเขย่า (Flow table) ขนาด 70 x 70 ซม.

2) โคนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 13 ซม. ด้านล่าง 20 ซม. สูง 20 ซม. มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบ

3) ไม้ตำหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 40 x 40 มม.

4) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก

รูปที่ 7.18 *อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว*

วิธีการทดสอบ

1) ทำอุปกรณ์ทั้งหมดให้เปียก

2) วางโคนลงกลางโต๊ะเขย่าให้ตรงรอยขีด ใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้าง

3) ตักคอนกรีตใส่โคน 2 ชั้น แต่ละชั้นตำด้วยไม้ตำ 10 ครั้ง

4) เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทำความสะอาดโต๊ะเขย่า

5) ยกโคนขึ้นตรง ๆ

6) ยกโต๊ะเขย่าขึ้นให้ถึงขอบและปล่อยลงทำอย่างนี้ 15 ครั้ง คอนกรีตจะแผ่กระจายบนโต๊ะเขย่า

7) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออก โดยวัด 2 แนวที่ตั้งฉากกัน

8) ค่าการไหลตัวของคอนกรีต คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 2 ที่วัดได้

การประเมินผล

มาตรฐานกำหนดว่า คอนกรีตที่ไหลตัว (Flow Concrete) ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง ทั้ง 2 แนว ต้องมากกว่า 55 ซม.

ในการทดสอบการไหลตัวของคอนกรีตนี้ ยังสามารถบอกได้ว่าคอนกรีตนั้นเหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ โดยดูจากคอนกรีตหลังจากการทดสอบ ถ้าคอนกรีตมีการแยกตัวแสดงว่าคอนกรีตนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานให้ทำการปรับส่วนผสมใหม่

7. การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

วิธีการทดสอบนี้ เป็นการจำลองสภาพคอนกรีตที่อยู่ในโม่ผสม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

วัตถุประสงค์

เพื่อดูว่าคอนกรีตนั้นจะมีค่ายุบตัวลดลงตามเวลาอย่างไร

อุปกรณ์

ในการทดสอบนี้ใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่ายุบตัว

วิธีการทดสอบ

1) นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อย วัดอุณหภูมิ และหาค่ายุบตัวเริ่มต้น

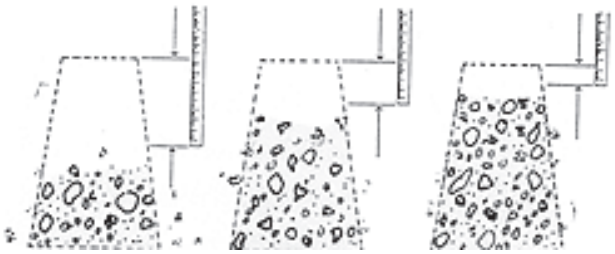
2) เทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสมทิ้งไว้ โดยปิดฝาโม่ไม่ให้น้ำระเหยออก และควรเปิดเครื่องผสมเป็นระยะ

3) เทคอนกรีตมาหาค่ายุบ และบันทึกค่า

4) ทำเช่นนี้ทุก ๆ 15 นาทีจนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว

นำผลทดสอบที่ได้มาหาเวลาที่เหมาะสมในการที่จะนำคอนกรีตไปใช้งาน

ค่ายุบตัวของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป



0 นาที 15 นาที 30 นาที

รูปที่ 7.19 *การสูญเสียค่าการยุบตัว*

เวลาหลังผสม	การยุบตัว (ซม.)	
นาที	ไม่ใส่น้ำยา	ใส่น้ำยาประเภทยืดเวลาการก่อตัว
0	10	10
15	9	10
30	7.5	9
60	5	7.5
90	3	6

ตารางที่ 7.4 *การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่น้ำยาผสมคอนกรีต*

7.9 การวัดค่าความสามารถเทได้อื่น ๆ

นอกจากการวัดความสามารถเทได้โดยวิธีหาค่ายุบตัวและการทดสอบการไหลของคอนกรีตที่กล่าวไปแล้ว ยังมีวิธีการทดสอบความสามารถเทได้ที่เหมาะสมกับงานประเภทต่าง ๆ อีกโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น

วัตถุประสงค์

เพื่อหาว่าคอนกรีตนั้น ๆ มีความสามารถทำงานได้มากน้อยขนาดใด วิธีการนี้เหมาะสำหรับการวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่แห้งหรือมีความสามารถทำงานได้ต่ำ เพราะการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตที่แห้งเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่า Compacting Factor เปลี่ยนไปมาก แต่สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูง จะให้ค่าไม่แตกต่างกันมาก

มาตรฐานที่ใช้

BS 1882 : PART 103 : 1983
Method for Determination of COMPACTING FACTOR

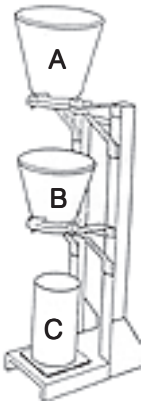
อุปกรณ์

1) เครื่อง Compacting Factor ซึ่งประกอบด้วย กรวยบน (A) กรวยล่าง (B) และภาชนะรูปทรงกระบอก (C) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.

2) เหล็กตำ

3) เครื่องชั่ง 25 กก.

4) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก



รูปที่ 7.20 *อุปกรณ์ทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

วิธีการทดสอบ

1) ใช้ช้อนตัก ตักคอนกรีตใส่ในกรวยบน (A) จนเต็มปาดผิวหน้าจนเรียบ

2) เปิดฝาล่างของกรวยบน (A) ให้คอนกรีตตกลงมาในกรวยล่าง (B) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจะมีคอนกรีตส่วนหนึ่งล้นออกไป

3) เปิดฝาล่างของกรวยล่าง (B) ให้คอนกรีตตกลงในภาชนะรูปทรงกระบอก (C)

4) ปาดผิวหน้าคอนกรีตในภาชนะรูปทรงกระบอก (C) ให้เรียบ

5) ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของคอนกรีตในภาชนะ C ถือว่าเป็น Weight of Partially Compacted Concrete

6) เทคอนกรีตในภาชนะ C ออกจากนั้นนำคอนกรีตใหม่ใหม่เป็นชั้น ๆ 6 ชั้น เท่า ๆ กัน กระทุ้งให้แน่นอย่างเต็มที่ปาดผิวหน้าให้เรียบ

7) ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักคอนกรีตอัดแน่นในภาชนะ C ถือว่าเป็น Weight of Fully Compacted Concrete

8) คำนวณหาค่า Compaction Factor (C.F.)

$$C.F. = \frac{\textit{Weight of Partially Compacted Concrete}}{\textit{Weight of Fully Compacted Concrete}}$$

ค่าที่ได้จะบอกเป็นเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ข้อควรระวัง

1) ส่วนผสมคอนกรีตต้องมีขนาดใหญ่สุดของหินไม่เกิน 1 นิ้วครึ่ง หรือ 38 มม.

2) ในกรณีที่คอนกรีตแห้งมาก ๆ คอนกรีตจะมาอุดกันที่ด้านล่างของกรวยและจะค้างต้องใช้เหล็กกระทุ้งแยงให้คอนกรีตไหลลงไปข้างล่าง

2. การทดสอบวีบี (Vebe Test)

ชื่อ Vebe นี้ได้มาจากชื่อของ V.Bahrner ชาวสวีเดน ผู้คิดค้นและพัฒนาวิธีการทดสอบนี้

มาตรฐานที่ใช้

BS 1881 : PART 104 : 1983

Method for Determination of VEBE TIME

อุปกรณ์

1) ชุดเครื่องมือมาตรฐานสำหรับทดสอบ Vebe ที่ประกอบด้วยกรวยตัด ชุดเขย่ามาตรฐาน

2) เหล็กตำ

3) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก

4) นาฬิกาจับเวลา

วิธีการทดสอบ

1) วางกรวยสำหรับหาค่ายุบตัวที่กลางชุดเขย่าตักคอนกรีตใส่แล้วดึงกรวยขึ้น

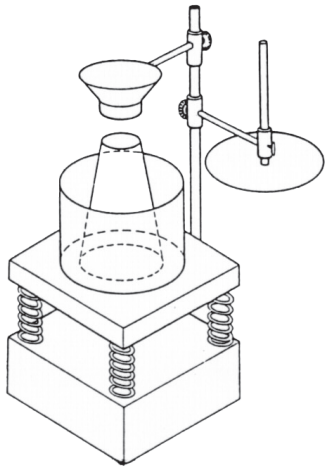
2) เลื่อนแผ่นแก้ววางลงบนคอนกรีต

3) เริ่มทำการเขย่าจนกว่าผิวของแผ่นแก้วสัมผัสกับคอนกรีตทั่วแผ่น โดยสังเกตช่องอากาศใต้แผ่นแก้วจะค่อย ๆ ถูกกำจัดไป

4) จับเวลาตั้งแต่เริ่มเขย่าจนเสร็จ เป็นวินาที เวลาที่ได้คือเวลาวีบี

วิธี Vebe นี้ เหมาะสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น และเหมาะสำหรับคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งโดยเวลาวีบีอยู่ระหว่าง 5-30 วินาที วิธีนี้ไม่ควรใช้กับส่วนผสมคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดใหญ่เกิน 1 นิ้วครึ่ง นอกจากนี้การใช้ความชำนาญในการบอกถึงเวลาที่ผิวล่างของแผ่นแก้วสัมผัสคอนกรีตทั่วทั้งแผ่นทำให้เวลาวีบีที่ได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้ทำการทดสอบ

วิธี Vebe นี้เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบ Compacting Factor แล้วพบว่าวิธี Compacting Factor อาจเกิดข้อผิดพลาดในคอนกรีตที่มีความแห้งมาก ๆ เนื่องจากคอนกรีตจะติดกรวยไม่ค่อยไหลลงแต่วิธีวีบีนี้จะให้ค่าที่ดีกว่าและเป็นวิธีที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ๆ อย่างมาก



รูปที่ 7.21 *อุปกรณ์ทดสอบ Vebe*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3. การทดสอบการจมของลูกบอลล์เคลลี่

วิธีนี้เป็นการทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ง่ายและทำได้รวดเร็ว โดยสังเกตุจากการรวมของลูกกลมโลหะเคลลี่ (Kelly Ball)

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 360

Test for BALL PENETRATION IN FRESH PORTLAND CEMENT CONCRETE

อุปกรณ์

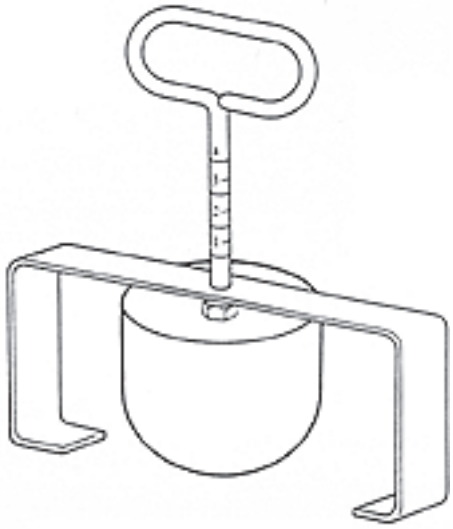
เครื่องมือที่ใช้ทดสอบนี้ได้คิดค้นโดย J.W. Kelly จึงตั้งชื่อว่า Kelly Ball ซึ่งประกอบด้วยลูกกลมโลหะเคลลี่ (Kelly Ball) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 ซม. หนัก 14 กก.

วิธีการทดสอบ

1) ตักคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ ๆ ใส่ในภาชนะซึ่งมีความลึกไม่น้อยกว่า 20 ซม. และความกว้างทางด้านข้างไม่น้อยกว่า 45 ซม.

2) หย่อนลูกกลมโลหะเคลลี่อย่างเบา ๆ ลงบนคอนกรีตซึ่งทำให้เรียบได้ระดับแล้ว

3) สังเกตความลึกของการจมตัวอ่านจากสเกลของเครื่องมือนี้



รูปที่ 7.22 *Kelly Ball*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

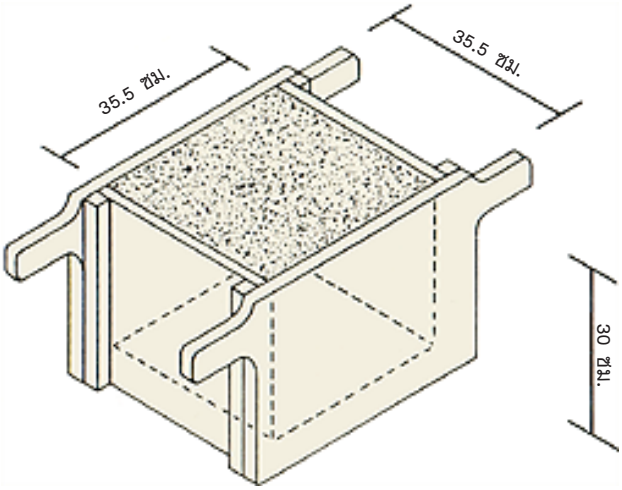
บทที่ 8
การผสม, การลำเลียง, การเทลงแบบ และการอัดแน่น

การที่จะทำให้คอนกรีตในโครงสร้างที่มีคุณภาพสม่ำเสมอปราศจากช่องว่างและรอยต่อ ได้กำลังอัดและความทนทานตามข้อกำหนด ไม่ได้เกิดจากการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ดี และการทดสอบตามวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงวิธีการและขั้นตอนในการทำงาน อันได้แก่ การชั่งตวงสัดส่วนผสม วิธีการผสม การลำเลียง การเตรียมการสำหรับการเทคอนกรีต การเท การทำให้คอนกรีตอัดแน่น การแต่งผิวตลอดจนการบ่ม

8.1 การวัดส่วนผสม

การวัดส่วนผสมอาจทำได้ 2 วิธีคือ การตวงส่วนผสมโดยปริมาตร และการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก

- **การวัดส่วนผสมโดยปริมาตร** เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก และคอนกรีตที่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ แต่หากทำให้ถูกต้องก็สามารถผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพได้พอสมควร โดยผู้รับเหมาควรใช้กะบะมาตรฐานในการตวงปริมาตรของหิน ทราย อย่างไรก็ตาม ความชื้นบนผิวมวลรวม จะมีผลต่อหน่วยน้ำหนักอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของมวลรวมละเอียด ซึ่งอาจมีหน่วยน้ำหนักเมื่อชื้นต่างจากเมื่อแห้งถึง 30% การวัดปริมาณปูนซีเมนต์โดยทั่วไปจะประมาณจากจำนวนถุง เพราะปูนซีเมนต์มีน้ำหนักแน่นอน คือ 1 ถุง หนัก 50 กก. ส่วนปริมาณน้ำอาจใช้ค่ายุบตัวเป็นตัวควบคุม



รูปที่ 8.1 *ถังไม้มาตรฐานใช้ในการตวงปริมาตร หิน ทราย*

- **การวัดส่วนผสมด้วยการชั่งน้ำหนัก** เป็นวิธีที่แน่นอนกว่าการตวงปริมาตรมาก เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ งานคอนกรีตกำลังอัดปานกลาง-สูง การวัดด้วยน้ำหนักยังมีผลดีต่อการปรับน้ำหนักส่วนผสมตามสภาพความชื้นของมวลรวมอีกด้วย มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตผสมเสร็จ มอก.213 กำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการชั่งน้ำหนักไว้ดังสรุปในตารางที่ 8.1

วัตถุดิบ	ปริมาณ	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
1) ปูนซีเมนต์	น้อยกว่า 200 กก. มากกว่าหรือเท่ากับ 200 กก.	± 2% ± 1%
2) มวลรวม	น้อยกว่า 500 กก. มากกว่าหรือเท่ากับ 500 กก.	± 3% ± 2%
3) น้ำ	-	± 3%
4) สารผสมเพิ่ม	-	± 3%

ตารางที่ 8.1 *ขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการชั่งน้ำหนักวัสดุเพื่อใช้ผสมคอนกรีตตาม มอก.213 - 2520*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

8.2 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีต เป็นการนำปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีตและวัสดุผสมอื่น ๆ ผสมคลุกเคล้าเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเคลือบหรือหุ้มผิวของมวลรวมทั้งหมดด้วยซีเมนต์เพสต์ และเพื่อผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันอันจะส่งผลให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี ถ้าการผสมไม่ทั่วถึง จะทำให้คุณภาพของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ กำลังและคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่เป็นไปตามต้องการ

- **วิธีการผสมคอนกรีต** สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1) การผสมด้วยมือ เหมาะกับงานขนาดเล็กที่ไม่เคร่งครัดเรื่องคุณภาพเพราะคุณภาพคอนกรีตที่ได้มักไม่ค่อยสม่ำเสมอ วิธีการจะทำโดยผสมปูนและทรายให้เข้ากันก่อนแล้วจึงใส่หิน สุดท้ายจะใส่น้ำในปริมาณที่กำหนดปล่อยให้น้ำซึมเข้าในส่วนผสม ขณะหนึ่งแล้วผสมจนเข้ากัน ตักนำไปใช้งาน

2) การผสมด้วยเครื่อง เครื่องที่ใช้ทั่ว ๆ ไปจะเป็นแบบ Batch Mixer คือส่วนผสมจะถูกลำเลียงเข้าไปผสม จากนั้นจะถูกปล่อยออก แล้วจึงลำเลียงส่วนผสมอีกส่วนหนึ่งเข้าไปใหม่

- **เครื่องผสมคอนกรีต**

เครื่องผสมคอนกรีต ถ้าจำแนกตามลักษณะการผสม สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ

1) Batch Mixer เป็นเครื่องผสมที่ผสมครั้งละ 0.5,1 ลบ.ม หรืออื่น ๆ ตามที่เครื่องสามารถจุได้

2) Continuous Mixer เครื่องผสมชนิดนี้ จะผสมคอนกรีตอย่างต่อเนื่องส่วนมากจะออกแบบไว้ใช้กับงานเฉพาะเช่น ใช้กับงานเทคอนกรีตถนน หรือสนามบิน เป็นต้น

แต่ถ้าจำแนกตามรูปลักษณะของเครื่องผสม สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

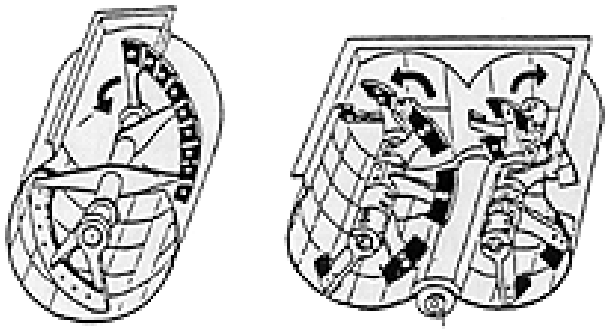
Drum Mixer และ Pan Mixer

1) Drum Mixer สามารถจำแนกออกได้อีก 4 ประเภท คือ

- Tilting Drum Mixer เครื่องผสมแบบนี้ ตัว Drum สามารถเอียงได้สำหรับการเทคอนกรีตออก ใบกวนอยู่ภายในการคายคอนกรีตออกทำได้รวดเร็ว และไม่เกิดการแยกตัว ดังนั้นเครื่องผสมแบบนี้จะเหมาะสำหรับผสมคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำ ๆ หรือส่วนผสมที่ใช้หินขนาดใหญ่

- Non-Tilting Drum Mixer แกนของเครื่องผสมจะอยู่ในแนวนอนตลอดเวลา การปล่อยคอนกรีตออกจากเครื่องผสมทำได้โดยการสอดรางเข้าไปใน Drum หรือโดยการหมุน Drum กลับทิศทาง เนื่องจากอัตราการคายคอนกรีตที่ช้า ดังนั้นอาจมีการแยกตัวเกิดขึ้นได้ เพราะหินอาจถูกปล่อยออกมาช้า ส่วนการใส่วัตถุดิบลงในเครื่องผสมทำโดยใช้ Loading Skip

- Stationery Drum Mixer หรือ Horizontal Shaft Mixer เครื่องผสมแบบนี้ ตัว Drum จะไม่เคลื่อนที่ มีเพียงใบกวนด้านในที่เคลื่อนที่ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องผสม 2 ชนิดแรกที่ตัว Drum และใบกวนหมุนไปพร้อม ๆ กัน เครื่องผสมชนิดนี้ประกอบด้วย Drum ทรงกระบอกวางอยู่ในแนวนอนและมีเพลาวางตัวอยู่ในแนวนอน โดยมีใบกวนติดอยู่ซึ่งอาจเป็นเพลาเดียวหรือเพลาคู่ดังแสดงในรูปที่ 8.2 เครื่องผสมชนิดนี้ นิยมใช้ในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ เพราะสามารถผสมได้ทีละมาก ๆ ใช้เวลาผสมน้อย และคายคอนกรีตออกได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดคือไม่เหมาะที่จะใช้คอนกรีตที่แห้งมาก ๆ



(a) (b)

รูปที่ 8.2 *Drum Mixer แบบเพลาเดี่ยว (a) และแบบเพลาคู่ (b)*

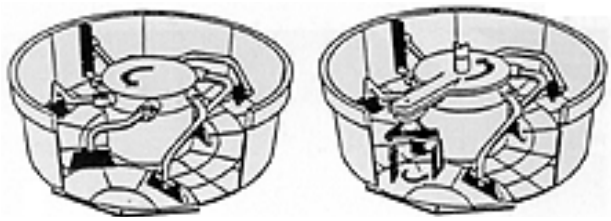
- Dual Drum Mixer บางครั้งใช้ในงานก่อสร้างถนน โดยมี Drum อยู่ 2 ชุด คอนกรีตจะถูกผสมใน Drum ชุดที่ 1 ช่วงเวลาหนึ่ง แล้วถ่ายลงมาผสมต่อใน Drum ชุดที่ 2 ก่อนจะเทออก เพื่อนำไปใช้งาน ประโยชน์คือทำให้สามารถผลิตคอนกรีตได้ปริมาตรมากเป็น 2 เท่า

2) Pan-Type Mixer เป็น Forced-Action Mixer แตกต่างจาก Drum Mixer ซึ่งคอนกรีตใน Drum จะตกลงอย่างอิสระ เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ คือ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

Circular Pan และมีใบกวนติดอยู่กับแกน และจะหมุนรอบแกนที่ตั้งได้ฉากกับแกนของ Pan Mixer บางชนิด Pan จะหมุน บางชนิดใบกวนจะหมุน และมีบางชนิดที่ทั้ง 2 สิ่งหมุนสวนทิศทางกันในเวลาเดียวกัน คอนกรีตจะถูกผสมอย่างดีมาก เครื่องผสมแบบนี้จะมีอุปกรณ์ที่ปัดมอร์ต้าไม่ให้ติดข้าง Pan

Pan Mixer นี้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับคอนกรีตที่แข็ง และมีส่วนผสมที่มีการยึดเกาะกันอย่างมาก เช่นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มาก ดังนี้จะใช้สำหรับงานคอนกรีตอัดแรง และใช้ผสมคอนกรีตจำนวนน้อย ๆ หรือ ผสมมอร์ต้าในห้องปฏิบัติการ



(a) (b)

รูปที่ 8.3 *Pan Mixer แบบธรรมดา (a) และแบบที่มีใบกวนเพิ่ม (b)*

นอกจากเครื่องผสมที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการใช้รถผสมคอนกรีต ผสมคอนกรีตอีกด้วย โดยภายในตัวโม่จะมีใบกวนและใบผสม ประสิทธิภาพการผสมจะขึ้นอยู่กับใบกวนและใบผสม รวมทั้งจำนวนวัตถุดิบที่ใส่เข้าไป โดยทั่ว ๆ ไปจะผสมคอนกรีตครั้งละ 1 ลบ.ม. จนครบจำนวน 5-6 ลบ.ม.

- **การป้อนวัตถุดิบลงเครื่องผสม**

ไม่มีกฎทั่วไปเกี่ยวกับลำดับของการป้อนวัตถุดิบลงเครื่องผสม แต่ทั่ว ๆ ไป จะมีขั้นตอนดังนี้

1) เติมน้ำประมาณ 10% ลงในเครื่องผสมเสียก่อน

2) ป้อนมวลรวม อันได้แก่หินและทราย เข้าเครื่องผสม

3) เริ่มเติมปูนซีเมนต์หลังจากป้อนมวลรวมเข้าไปแล้ว 10%

4) เติมน้ำ 80% ระหว่างการป้อนวัสดุอื่น ๆ และเติมน้ำ 10% สุดท้าย เมื่อป้อนวัสดุอื่น ๆ ทั้งหมดเข้าเครื่องแล้ว

5) หากมีการใส่น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทผง ควรผสม รวมกับปูนซีเมนต์ก่อน หากเป็นของเหลว ควรละลายน้ำยาผสม กับน้ำ

สำหรับในห้องปฏิบัติการ จะเริ่มจากการใส่ทรายก่อน ตามด้วยหินบางส่วน ปูนซีเมนต์และน้ำ และใส่หินที่เหลือลงไปสุดท้าย เพื่อที่จะทำให้มอร์ต้าที่จับกันอยู่แตกตัวออก

- **เวลาในการผสม**

เวลาที่ใช้ในการผสมขึ้นอยู่กับ

- ชนิดและขนาดของเครื่องผสม
- สภาพของเครื่องผสม
- อัตราการหมุนของเครื่อง
- ปริมาณคอนกรีตที่ผสม
- ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้

เวลาที่เหมาะสมที่สุด คือเวลาที่ทำให้ได้ส่วนผสมที่สม่ำเสมอทุก ๆ ครั้งที่ผสม ซึ่งจะได้จากการทดสอบผสมในสภาพที่ใช้งานจริง โดยสรุปได้ดังนี้

1) ส่วนผสมที่แห้ง ขาดซีเมนต์ จะต้องผสมเป็นเวลานาน

2) มวลรวมที่เป็นเหลี่ยมมุม ต้องผสมนานกว่ามวลรวมที่กลม

ตามมาตรฐานของอเมริกา แนะนำให้ใช้เวลาอย่างน้อย 1 นาที ในการผสมคอนกรีตภายใน 1 ลบ.ม. แรก และเพิ่มเวลา 20 วินาทีต่อปริมาณคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น 1 ลบ.ม. เวลาผสมสูงสุดไม่ควรเกิน 5 นาที ดังแสดงในตารางที่ 8.2

ความจุของเครื่องผสม (ลบ.ม.)	เวลาขั้นต่ำในการผสม (นาที)
1	1.00
1.5	1.25
2.5	1.50
3.0	1.75
4.0	2.00
4.5	2.25

ตารางที่ 8.2 *เวลาขั้นต่ำในการผสมคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา*

- **การผสมนานเกินไป**

ถ้าคอนกรีตถูกผสมเป็นเวลานาน น้ำจะระเหยออกจากคอนกรีตนั้น ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ลดลง และกำลังจะเริ่มพัฒนาขึ้น ผลที่เกิดขึ้น 3 ประการคือ

1) มวลรวมที่อ่อนจะแตก ทำให้ส่วนละเอียดเพิ่มขึ้น และความสามารถเทได้ลดลง

2) ผลของแรงเสียดทานก่อให้อุณหภูมิของส่วนผสมเพิ่มขึ้น

3) ปริมาณฟองอากาศลดลง

การผสมซ้ำเป็นช่วง ๆ จนถึง 2-3 ชั่วโมง จะไม่เป็นอันตรายต่อกำลังและความทนทาน แต่ความสามารถเทได้จะลดลง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ถ้าไม่มีการป้องกันการสูญเสียน้ำหรือความชื้นจากเครื่องผสม การเพิ่มปริมาณน้ำ เพื่อให้ค่าความสามารถเทได้เหมือนเดิม ที่เรียกว่า Re-Tempering จะก่อให้กำลังอัดต่ำลง และมีการหดตัว (Shrinkage) เพิ่มขึ้น โดยผลนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไป

8.3 การลำเลียง

เมื่อผสมคอนกรีตเสร็จเรียบร้อย จำเป็นที่จะต้องทำการลำเลียงคอนกรีตจากเครื่องผสม หรือจากบริเวณที่ผสมไปยังบริเวณที่จะเทลงแบบ การลำเลียงที่ถูกต้องควรทำในลักษณะที่จะให้ได้คอนกรีตที่สม่ำเสมอ ไม่แยกตัวก่อนเทลงแบบ และต้องมีวิธีป้องกันคอนกรีตจากสภาพแวดล้อมที่จะมีผลเสีย เช่น ความร้อนและความชื้น เป็นต้น

การเลือกวิธีการลำเลียง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- ปริมาณและอัตราความเร็วในการเทคอนกรีต
- ขนาดและชนิดของงานก่อสร้าง
- ลักษณะภูมิประเทศ, สถานที่ทำงาน, เส้นทางในการขนส่ง
- ค่าใช้จ่าย อันได้แก่ ค่าแรงงาน, ราคาค่าเครื่องจักร

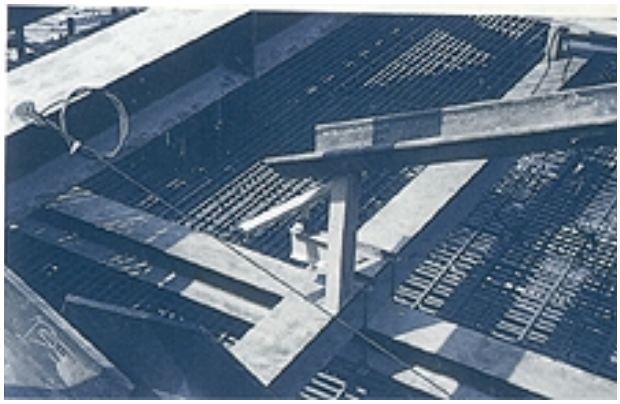
วิธีการลำเลียงที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน มีดังนี้ การใช้รถเข็น, รถดัมพ์, รถคอนกรีตผสมเสร็จ, สายพาน และคอนกรีตปั๊ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ที่ผสมคอนกรีตอยู่ในระดับเดียวกับบริเวณที่ต้องการจะเทคอนกรีต

- โดยการใช้คนหาม ควรเลือกใช้ถังใส่คอนกรีตที่มีขนาดเหมาะสม ซึ่งคนงานสามารถหาบได้สะดวก ลักษณะนี้เหมาะกับ งานก่อสร้างขนาดเล็ก
- โดยการใช้รถเข็น เมื่อเข็นไปถึงที่ก่อสร้างแล้วควรจะเทใส่กะบะแล้วคลุกเคล้าอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะนำไปเท แต่ถ้าระยะทางสั้น ๆ ไม่จำเป็นต้องทำการคลุกเคล้าอีกสำหรับพื้นที่ ๆ ไม่มีการเสริมเหล็กจำนวนมากและยุ่งยาก ก็จัดการเทลงไปในแบบได้เลย
- โดยการใช้รถคอนกรีตผสมเสร็จ ซึ่งเหมาะกับงานก่อสร้างที่รถผสมคอนกรีตสามารถเข้าเทได้ถึงหน่วยงาน

2) ที่ผสมคอนกรีตอยู่ในระดับสูงกว่าบริเวณที่ต้องการเทคอนกรีต

สำหรับงานก่อสร้างบางชนิดจำเป็นต้องตั้งเครื่องผสมคอนกรีตไว้สูงกว่างานที่ต้องการเทคอนกรีต วิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขนคอนกรีต มักจะใช้รางลำเลียง อาจจะเป็นรางเหล็กหรือไม้ก็ได้ สิ่งที่ต้องระวังสำหรับการขนคอนกรีตด้วยวิธีนี้ก็คือส่วนผสมของคอนกรีตจะต้องไม่แห้งหรือเหลวเกินไป จะต้องเหลวพอดีที่จะไหลในรางได้ง่ายและไม่เกิดการแยกตัว และคอนกรีตสามารถที่จะไหลลงไปในที่ ๆ ต้องการอย่างสม่ำเสมอได้



รูปที่ 8.4 *การลำเลียงคอนกรีตโดยใช้ราง*

3) ที่ผสมคอนกรีตอยู่ในระดับต่ำกว่าบริเวณที่ต้องการเทคอนกรีต

- โดยการใช้รอกเข้าช่วย งานก่อสร้างอาคารหลาย ๆ ชั้นไม่สามารถนำเครื่องผสมคอนกรีตขึ้นไปผสมแต่ละชั้นได้ จำเป็นจะต้องผสมชั้นล่างแล้วใช้เชือกดึงถังเหล็กที่มีคอนกรีตอยู่เต็มขึ้นไป ข้อควรระวังในการใช้ วิธีใช้รอกนี้ นั่งร้านที่รับรอกต้องแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักคอนกรีตในถังและการดึงเชือกได้
- โดยการใช้คนยืนเรียงแถวโดยใช้วิธีการส่งถังเหล็กที่บรรจุคอนกรีตขึ้นไปเป็นช่วง ๆ จากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่ง
- อาจใช้ลิฟท์ ทาวเวอร์เครน หรือรถเครน เป็นต้น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 8.5 *การลำเลียงคอนกรีตโดยใช้เครน*

4) ที่ผสมคอนกรีตอยู่ห่างจากบริเวณที่ต้องการเทคอนกรีต

ปัจจุบันสถานที่ก่อสร้างมีจำกัดไม่สามารถผสมคอนกรีต ณ หน่วยงานก่อสร้างได้ จำเป็นต้องใช้คอนกรีตผสมเสร็จ ซึ่งมีโรงงานที่ใช้ในการผสมคอนกรีตอยู่นอกหน่วยงานก่อสร้างแล้วลำเลียงโดยรถผสมคอนกรีตสู่บริเวณที่ต้องการเทคอนกรีต วิธีการปฏิบัติคือ คอนกรีตจะถูกผสมเสร็จเรียบร้อยจากโรงงาน ลำเลียงใส่รถ และจัดส่งไปที่หน่วยงานก่อสร้าง เมื่อถึงที่ก่อสร้างก็จะทำการผสมอีกครั้งก่อนเทลงแบบหรือภาชนะที่รองรับ

5) การใช้คอนกรีตปั๊ม

การเทด้วยวิธีนี้เหมาะกับงานขนาดใหญ่ และต้องใช้ปริมาณของคอนกรีตเป็นจำนวนมาก และสถานที่ทำงานจำกัด โดยการต่อท่อส่ง ซึ่งท่อส่งนี้ออกจะเลี้ยวหรือโค้งได้ตามต้องการ สำหรับระยะทางที่จะปั๊มคอนกรีต จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องปั๊ม

รูปที่ 8.6 *การลำเลียงคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตปั๊ม*

6) การใช้สายพานส่งคอนกรีต

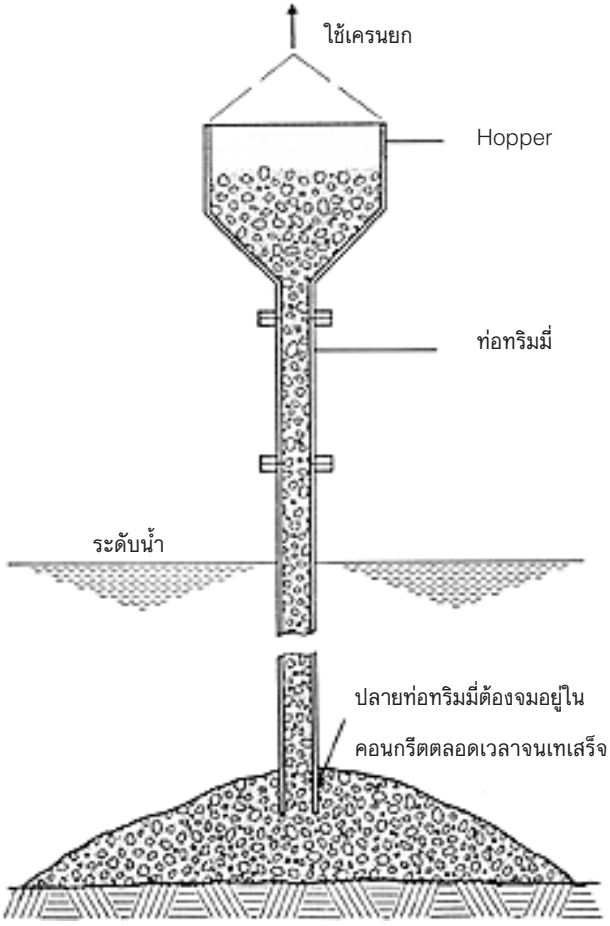
การใช้วิธีนี้สามารถใช้ได้ผลดีทั้งระดับที่อยู่ต่ำและสูงกว่าหรือระดับราบ การแยกตัวของมวลรวมมีไม่มาก เพราะทุกจุดจะเคลื่อนไปพร้อมกันบนสายพาน สำหรับการส่งคอนกรีตด้วยวิธีนี้ต้องหาทางระวังการสูญเสียของน้ำ เนื่องจากแสงแดดและลม

7) การใช้ท่ออัดส่งหรือฉีด (Shotcrete)

สำหรับวิธีนี้เหมาะกับงานทำท่ออุโมงค์ ห้องใต้ดิน โครงสร้างเปลือกบางหรือโครงสร้างที่มีส่วนโค้ง เว้ามาก ๆ โดยใช้เครื่องฉีดหรือพ่นคอนกรีต ทีละน้อยสู่บริเวณที่ต้องการจากนั้นต้องทำการตบแต่งผังคอนกรีตอีกครั้ง

8) การเทคอนกรีตในน้ำ (Underwater Concreting)

วิธีนี้ใช้ในงานก่อสร้างท่าเรือ หรือเขื่อน หรือรากฐานก่อสร้างในทะเลหรือแม่น้ำ ซึ่งต้องทำอย่างระมัดระวัง เพื่อมิให้คอนกรีตแยกตัว ก็ต้องใช้วิธีเทคอนกรีตลงไปตามท่อหรือสูบส่งคอนกรีตนั้นลงไปยังที่ก่อสร้างนั้นอย่างช้า ๆ



รูปที่ 8.7 *การเทคอนกรีตใต้น้ำ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

8.4 การเทและการอัดแน่น

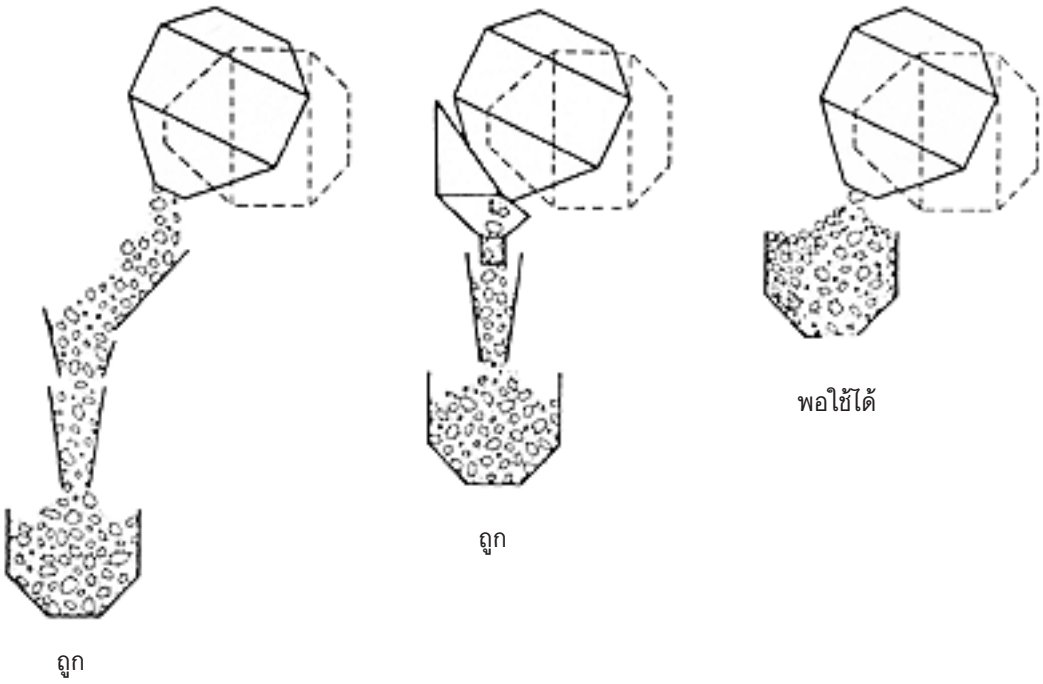
การเทและการอัดแน่นคอนกรีตที่ถูกวิธี จะเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในขบวนการผลิตคอนกรีต อันรวมตั้งแต่การชั่งตวงส่วนผสม, การผสม, การลำเลียง และการบ่มคอนกรีต ความสำเร็จของการเทและการอัดแน่นจะเกิดได้เฉพาะหน่วยงานก่อสร้างที่มีการวางแผน และการเตรียมงานที่ดีเท่านั้น เนื่องจากวิธีการทั้ง 2 ดำเนินไปพร้อม ๆ กัน และเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นควรถือว่า การเทและการอัดแน่นเป็นขั้นตอนเดียวเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในที่นี้ เราจะแยกพิจารณาเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

- **การเทคอนกรีต**

วัตถุประสงค์หลักของการเทคอนกรีตคือ การนำคอนกรีตไปให้ใกล้จุดที่ต้องการจะเทมากที่สุด โดยต้องทำอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการแยกตัวและคอนกรีตสามารถถูกอัดแน่นได้อย่างเต็มที่ วิธีการเทคอนกรีตที่ถูกและไม่ถูกแสดงดังในรูปที่ 8.8 ถึง 8.14

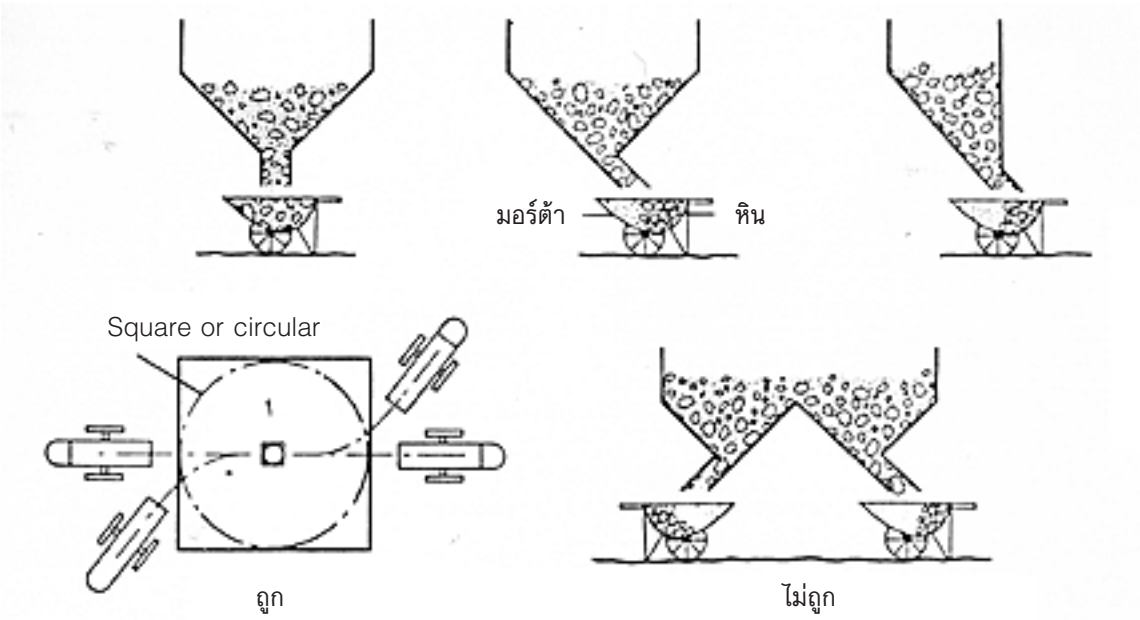
การลำเลียงคอนกรีตอาจทำได้หลายวิธีตั้งแต่การใช้รถเข็น, Drumper, รถผสมคอนกรีต หรือใช้ปั๊ม โดยต้องการเทให้ตรงจุดที่ต้องการมากที่สุด แต่ในหลายกรณีไม่สามารถทำได้ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้น ข้อเสนอแนะเหล่านี้ควรระลึกไว้เสมอ

- หลีกเลี่ยงการใช้มือดันหรือใช้เครื่องจี้เขย่า ดันคอนกรีตให้เคลื่อนที่
- ควรเทคอนกรีตให้เป็นชั้นที่สม่ำเสมอ ไม่ใช่กองเป็นภูเขาหรือเป็นชั้นตามแนวเอียง
- ความหนาของการเทแต่ละชั้น ควรเหมาะสมกับวิธีการจี้เขย่า เพื่อให้มั่นใจว่าฟองอากาศหนีออกจากด้านล่างของชั้นนั้น ๆ ได้
- อัตราการเทคอนกรีตลงแบบ และอัตราการเขย่าเข้าแบบควรเท่ากัน
- โครงสร้างที่สามารถเห็นได้ชัดเจน เช่น เสา, กำแพง ของสะพาน หรือทางยกระดับ ควรเทคอนกรีตเข้าแบบด้วยอัตราอย่างน้อย 2 เมตร/ชั่วโมง และหลีกเลี่ยงการล่าช้าอันจะทำให้เกิด Cold Joint

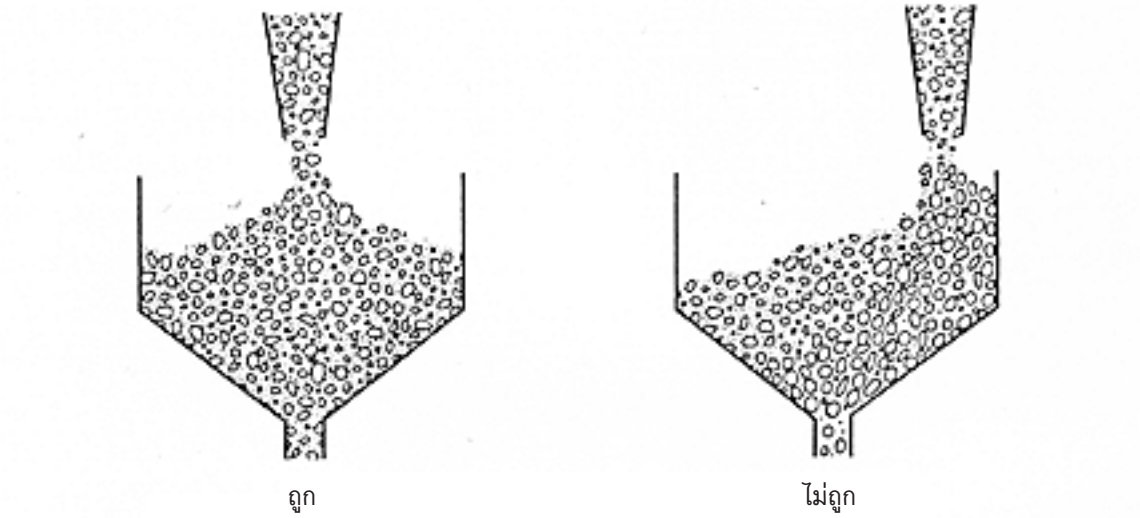


รูปที่ 8.8 *การป้องกันการแยกตัวจากการเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม*

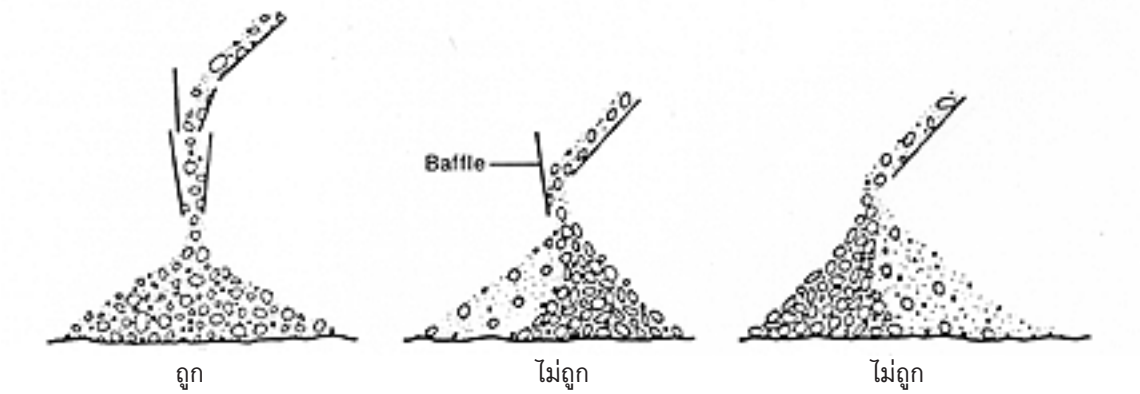
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 8.9 *การป้องกันการแยกตัวจากการเทคอนกรีตออกจาก Hopper*

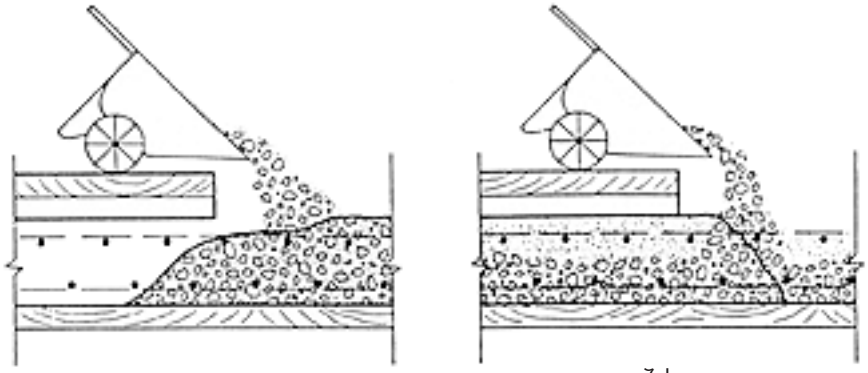


รูปที่ 8.10 *การป้องกันการแยกตัวเมื่อเทคอนกรีตลงภาชนะ (Bucket)*

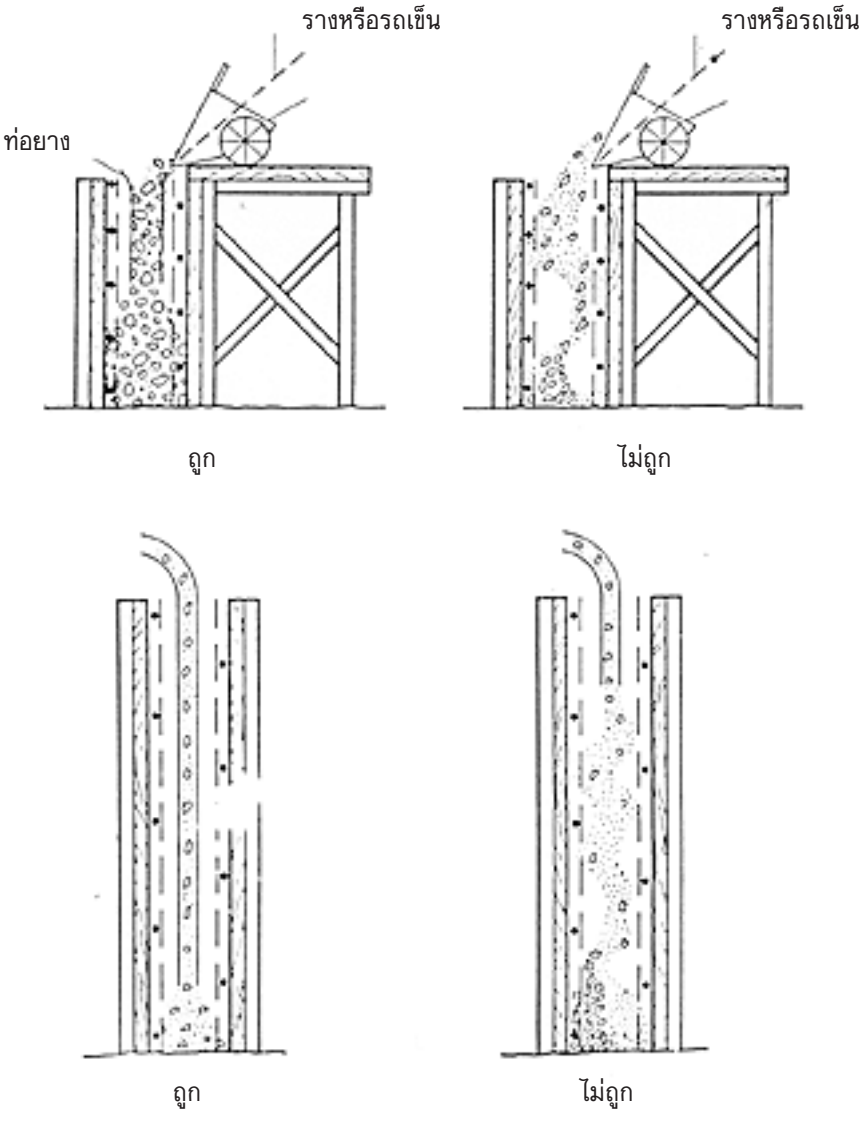


รูปที่ 8.11 *การป้องกันการแยกตัวบริเวณปลายราง*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

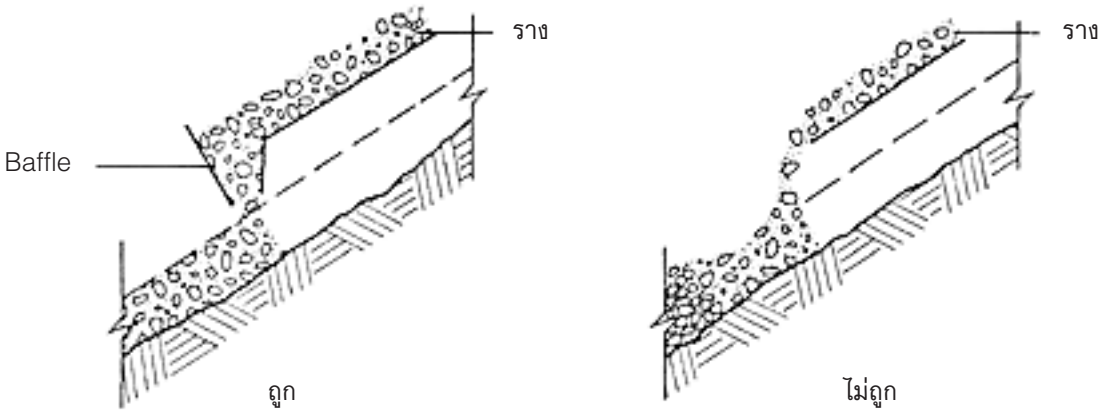


รูปที่ 8.12 *การเทคอนกรีตจากรถเข็น*



รูปที่ 8.13 *การเทคอนกรีตสำหรับเสาหรือกำแพง*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 8.14 *การเทคอนกรีตพื้นเอียง*

- คอนกรีตในแต่ละชั้น ควรจะได้รับการจี้เขย่าให้อัดแน่นก่อนที่จะเทคอนกรีตชั้นต่อ ๆ ไป และชั้นต่อ ๆ ไป ควรเทในขณะที่คอนกรีตชั้นล่างยังเหลวอยู่ เพื่อจะได้โครงสร้างที่มีเนื้อเดียวกัน

- ควรหลีกเลี่ยงการเทคอนกรีตให้ไปปะทะไม้แบบหรือเหล็กเสริม สำหรับโครงสร้างที่มีความสูง ควรต่อท่อคอนกรีต (Tremie) เพื่อให้มั่นใจว่าเทคอนกรีตได้ถูกตำแหน่งที่ต้องการและลดการแยกตัว

- ควรเทคอนกรีตในแนวตั้งฉากกับแกนของโครงสร้าง งานคอนกรีตในปัจจุบัน มีวิธีการเทที่ใช้เทคนิคพิเศษ เช่น Slip -forming, Tremie Method, Shotcreting, Preplaced Aggregate หรือ Roller Compacted Concrete ซึ่งรายละเอียดบางเรื่องอยู่ที่ส่วนสุดท้ายในเรื่องคอนกรีตพิเศษ ต่าง ๆ

- Slip-Forming เป็นวิธีการเทคอนกรีตและการเขย่าแบบอย่างต่อเนื่อง โดยใช้คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำ ซึ่งต้องมีการควบคุมคุณสมบัติอย่างดี วิธีนี้สามารถเทคอนกรีตได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน Slip-Forming ในแนวตั้งจะเคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ รอให้คอนกรีตมีกำลังเพียงพอ เพื่อรองรับคอนกรีตใหม่ที่เทลงอย่างต่อเนื่อง

- Tremie Method เหมาะสำหรับเทคอนกรีตในที่ลึก ๆ ที่การอัดแน่น โดยวิธีทั่วไปทำไม่ได้ และในกรณีที่เทคอนกรีตใต้น้ำ การเทโดยวิธีนี้ต้องใช้คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้สูง ไหลลงผ่านท่อด้วยแรงดึงดูด ไปในแนวตั้งของท่อ ซึ่งจะดึงขึ้นทีละเล็กน้อย ส่วนผสมควรจะมีการเกาะยึดกันดี ไม่แยกตัว โดยทั่วไปใช้ปริมาณซีเมนต์ที่สูงและใช้ทรายมากรวมทั้งมีการใช้น้ำยาช่วยเพิ่มความสามารถเทได้ด้วย

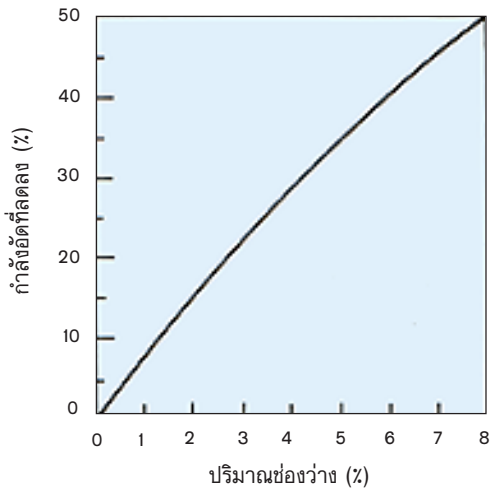
- **การอัดแน่น**

วัตถุประสงค์ของการอัดแน่นก็เพื่อ ที่จะไล่อากาศ (Entrapped Air) ออกจากส่วนผสมคอนกรีตให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และบังคับให้ส่วนผสมต่าง ๆ เข้าใกล้กัน เพื่อจะได้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่มีช่องว่างน้อยที่สุด

ปริมาณของ Entrapped Air จะสัมพันธ์โดยตรงต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีต ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีค่ายุบตัว 7.5 ซม. จะมีอากาศอยู่ประมาณ 5% ในขณะที่คอนกรีตที่มีค่ายุบตัว 2.5 ซม. จะมีอากาศอยู่ถึง 20% นั่นคือเหตุผลที่จะต้องทำการอัดแน่นอย่างดี สำหรับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวน้อย

เหตุผลที่สำคัญในการที่จะต้องขจัดฟองอากาศออกไปจากคอนกรีต คือ

1) ช่องว่าง (Void) จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยทุก ๆ 1% ของอากาศ (Entrapped Air) จะทำให้กำลังอัด ลดลง 5-6%



รูปที่ 8.15 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ลดลงกับช่องว่างในเนื้อคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) ช่องว่างจะเพิ่มความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ซึ่งส่งผลให้ความทนทานลดลง

3) ช่องว่างที่อยู่ใต้เหล็กเสริมจะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับมอร์ต้า

4) ช่องว่างทำให้ผิวคอนกรีตดูไม่สวยงามหรืออาจก่อให้เกิดรูโพรง (Honeycombing)

สรุป คอนกรีตที่อัดแน่นอย่างสมบูรณ์จะมีเนื้อแน่น มีความแข็งแรง ทนทาน และป้องกันการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต ส่วนคอนกรีตที่อัดแน่นไม่ดี จะไม่แข็งแรง ไม่ทนทาน เกิดรูโพรง และมีความพรุนมาก

- **เครื่องจี้เขย่า**

เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต อาจแบ่งตามการใช้งานได้ 3 ประเภทคือ

1) Internal Vibrators

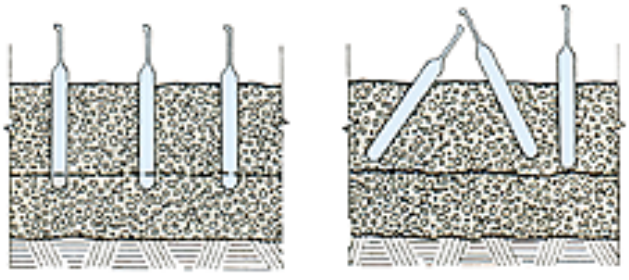
เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยหัวจี้ Poker ซึ่งต่อสายมาจากมอเตอร์ วิธีใช้จะจุ่มหัวจี้ลงในคอนกรีตที่เหลว โดยหัวจี้จะปล่อยคลื่นความถี่ที่เหมาะสมลงไปบางทีเรียกเครื่องจี้เขย่าแบบนี้ว่า Poker Vibrator หรือ Immersion Vibrator

ความถี่ที่ใช้ทั่วไปคือ 70-200 Hz อุปกรณ์นี้ควรจะง่ายต่อการเคลื่อนย้าย เพื่อที่ว่าคอนกรีตจะได้ถูกเขย่าทุก ๆ 0.5-1 เมตร ในเวลา 5 วินาที-2 นาที ขึ้นอยู่กับความข้นเหลวของส่วนผสม การพิจารณาว่าคอนกรีตอัดแน่นสมบูรณ์ ทำได้โดยดูจากผิวหน้าของคอนกรีตซึ่งจะต้องไม่เป็นรูพรุนและต้องไม่มีมอร์ต้ามากเกินไป

ใช้เครื่องจี้เขย่าคอนกรีตอย่างถูกต้อง

วิธีการ

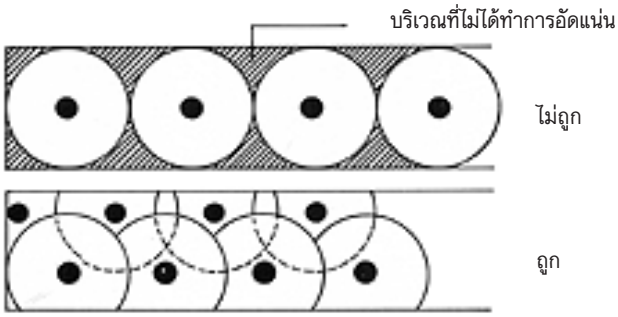
1) ต้องจุ่มหัวจี้ลงไปตลอดความลึกของคอนกรีตสด และจี้ไปถึงชั้นล่างด้วย ถ้าคอนกรีตในชั้นล่างยังเหลวอยู่



ถูก ไม่ถูก

รูปที่ 8.16 *การใช้เครื่องจี้เขย่า*

2) การจี้เขย่าต้องให้ทั่วบริเวณคอนกรีต โดยต้องกำหนดระยะการจี้ที่ถูกต้อง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการอัดแน่น



รูปที่ 8.17 *การจี้เขย่าคอนกรีต*

3) เมื่อจี้เขย่าเสร็จแล้ว ควรดึงหัวจี้ขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อให้ช่องเปิดที่เกิดจากหัวจี้ปิดตัวเองได้สนิท ไม่มีฟองอากาศขังอยู่

ขนาดของหัวจี้ (มม.)	รัศมีทำการ (มม.)	อัตราการลบ.ม./ชั่วโมง	การใช้งาน
20-30	180-150	0.8-2	โครงสร้างบาง ๆ หรือในที่ ๆ ทำงานยาก ที่ใช้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมากกว่า 5 ซม. ในบางครั้งจะใช้ร่วมกับเครื่องจี้เขย่าขนาดใหญ่ ในบริเวณที่มีเหล็กเสริม, ท่อ หรืออุปสรรคต่อการอัดแน่น
35-40	130-250	2-4	สำหรับเสา กำแพง ที่ใช้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมากกว่า 5 ซม.
50-75	180-350	3-8	โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีเหล็กเสริมไม่มากนักที่ใช้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวตั้งแต่ 2.5 ซม. ขึ้นไป

ตารางที่ 8.3 *สรุปขนาดที่เหมาะของ Poker สำหรับงานแต่ละประเภท*

2) External Vibrators

เครื่องเขย่าแบบนี้จะติดอยู่กับไม้แบบ ซึ่งวางอยู่บนจุดวางที่ยืดหยุ่นได้ ดังนั้นทั้งไม้แบบและคอนกรีตจะถูกเขย่าไปพร้อม ๆ กัน ผลคือ คอนกรีตจะถูกอัดแน่นโดยการเขย่าของไม้แบบ ซึ่งไม้แบบประเภทนี้จะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรง ไม่บิดงอ หรือมีการรั่วไหลของน้ำปูน

เครื่องเขย่าประเภทนี้จะใช้ความถี่ในช่วง 50-150 Hz ส่วนมากมักใช้งานคอนกรีตอัดแรง หรือโครงสร้างขนาดบาง ที่มีรูปร่างและความหนาไม่เหมาะที่จะใช้ Internal Vibrator

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

การทำงานต้องเทคอนกรีตใส่แบบเป็นชั้นบาง ๆ เนื่องจากฟองอากาศไม่สามารถถูกขับออกจากคอนกรีตที่มีความหนามาก ๆ ได้ และตำแหน่งของเครื่องจี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ในขณะเทคอนกรีต

3) Vibrating Table

Vibrating Table หรือโต๊ะเขย่า เป็นวิธีการเขย่าที่เหมาะสมสำหรับงานชิ้นล่างคอนกรีตอัดแรง โดยมีประโยชน์ในแง่ที่การเขย่าทำได้อย่างสม่ำเสมอวิธีการนี้อาจพิจารณาได้เหมือนกับกล่องหรือไม้แบบยึดติดกับเครื่องจี้เขย่า ซึ่งตรงข้ามกับ External Vibrators แต่หลักการในการเขย่าคอนกรีตและไม้แบบไปพร้อม ๆ กันเหมือนกับ ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 25-120 Hz

8.5 การเขย่าคอนกรีตซ้ำ (Revibration)

การจี้เขย่าเพื่อให้คอนกรีตอัดแน่นที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการเขย่าคอนกรีตทันทีทันใด หลังการเทคอนกรีต เพื่อจะทำให้คอนกรีตอัดตัวกันแน่น ก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว แต่เพื่อให้มั่นใจว่าเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีต 2 ผิว คอนกรีตด้านล่างควรได้รับการเขย่าซ้ำ(Revibrated) ซึ่งเป็นที่สงสัยกันว่าอาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

ในความเป็นจริง การเขย่าซ้ำที่ 1-2 ชั่วโมง หลังจากการเทคอนกรีต จะช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตถึง 15% เนื่องจากน้ำที่ถูกขังไว้จะถูกขับออกจากขบวนการเขย่าซ้ำนี้ ด้วยเหตุผลเดียวกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะปรับปรุงขึ้นอย่างมาก และยังช่วยลดการแตกร้าว (Plastic Shrinkage) ด้วย

ถึงแม้ว่าจะมีประโยชน์ ขบวนการจี้เขย่าซ้ำไม่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นการเพิ่มงานอีกขั้นตอนหนึ่งของการเทคอนกรีต ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุน และถ้าการจี้เขย่าซ้ำช้าไปขบวนการนี้อาจก่อให้คอนกรีตเสียหายได้

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 9
กำลังอัดของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ คุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งในบทนี้จะกล่าวเพียงกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติด้านกำลัง ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ จะกล่าวในบทต่อ ๆ ไป

9.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ3 ประการ คือ

1. กำลังของมอร์ต้า
2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

• กำลังของมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ต้านี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ, ปริมาณ, กำลัง, ลักษณะผิว, ขนาดใหญ่สุด, การดูดซึม, และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

• กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ต้าที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวม จะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ต้า ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง

ขนาดของมวลรวม จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

• แรงยึดเหนียวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้า

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่าง ๆ ในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางในการหล่อและทิศทางในการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยเหตุผลที่ว่าจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าต่ำลง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

1. คุณสมบัติของวัสดุผสม

● **ปูนซีเมนต์** เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้ เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

● **มวลรวม** มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ดีมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็กสำหรับคอกนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดคละไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่นกัน

● **น้ำ** น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2. การทำคอนกรีต

● **การชั่งตวงส่วนผสม**

- **การชั่งตวงส่วนผสม** หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

- **อัตราส่วนผสม** จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

● **การผสมคอนกรีต**

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้น้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

● **การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น**

จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะ หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

3. การบ่มคอนกรีต

● **ความชื้น** จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

● **อุณหภูมิ** ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

● **เวลาที่ใช้ในการบ่ม** ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4. การทดสอบ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำในรูปของการชักตัวอย่างคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังต่อไปนี้

- **ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ** การใช้แท่งทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่าง ดังแสดงในตารางที่ 9.1

ขนาดตัวอย่าง รูปทรงลูกบาศก์ (ซม.)	กำลังอัดสัมพัทธ์	ขนาดตัวอย่าง รูปทรงกระบอก (ซม.)		กำลังอัดสัมพัทธ์
		เส้นผ่าศูนย์กลาง	ส่วนสูง	
7.5	106	5	10	109
10	104	7.5	15	106
15	100	15	30	100
20	95	20	40	97
25	92	30	60	91
		45	90	87
		60	120	84
		90	180	82

ตารางที่ 9.1 *ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด*

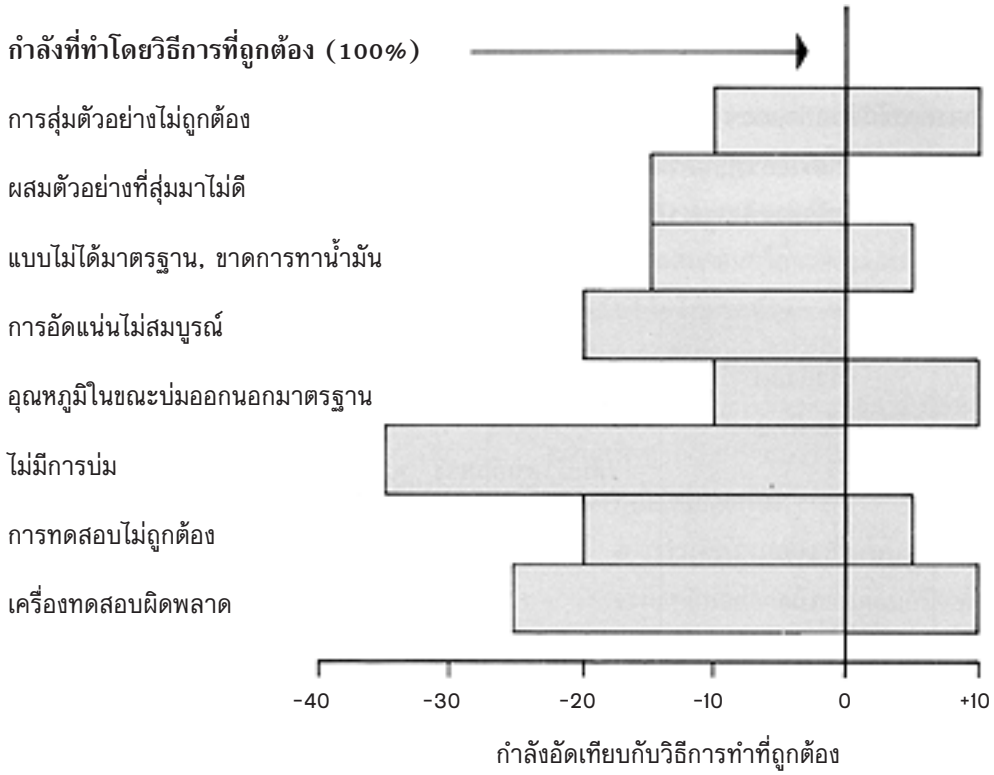
นอกจากนี้ ความสูงของก้นตัวอย่างจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 9.2

สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D)	ค่าปรับแก้ของกำลัง
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

ตารางที่ 9.2 *ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต่อกำลังอัด*

- **วิธีการทำตัวอย่าง** การทำให้คอนกรีตแน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า
- **ความชื้นในแท่งทดสอบ** ในขณะที่จะทำการทดสอบถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า
- **อัตราการกด** ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 9.1 *สิ่งที่ทำให้กำลังอัดผันแปรเนื่องจากการทำและทดสอบก้อนตัวอย่าง*

ค่าผลของอัตราการกดแสดงในตารางที่ 9.3

อัตราการกด				เปอร์เซ็นต์ของกำลังเทียบกับ
นาที	ชั่วโมง	วัน	ปี	อัตราการทดสอบมาตรฐาน
2				100
10				95
30				92
60	1			90
	4	0.17		88
		100		78
		365	1	77
			3	73
			30	69

ตารางที่ 9.3 *ผลของอัตราการกดต่อกำลังอัด*

- **เครื่องทดสอบ**

น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งจะเกิดได้ดังนี้

1) ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวดิ่ง

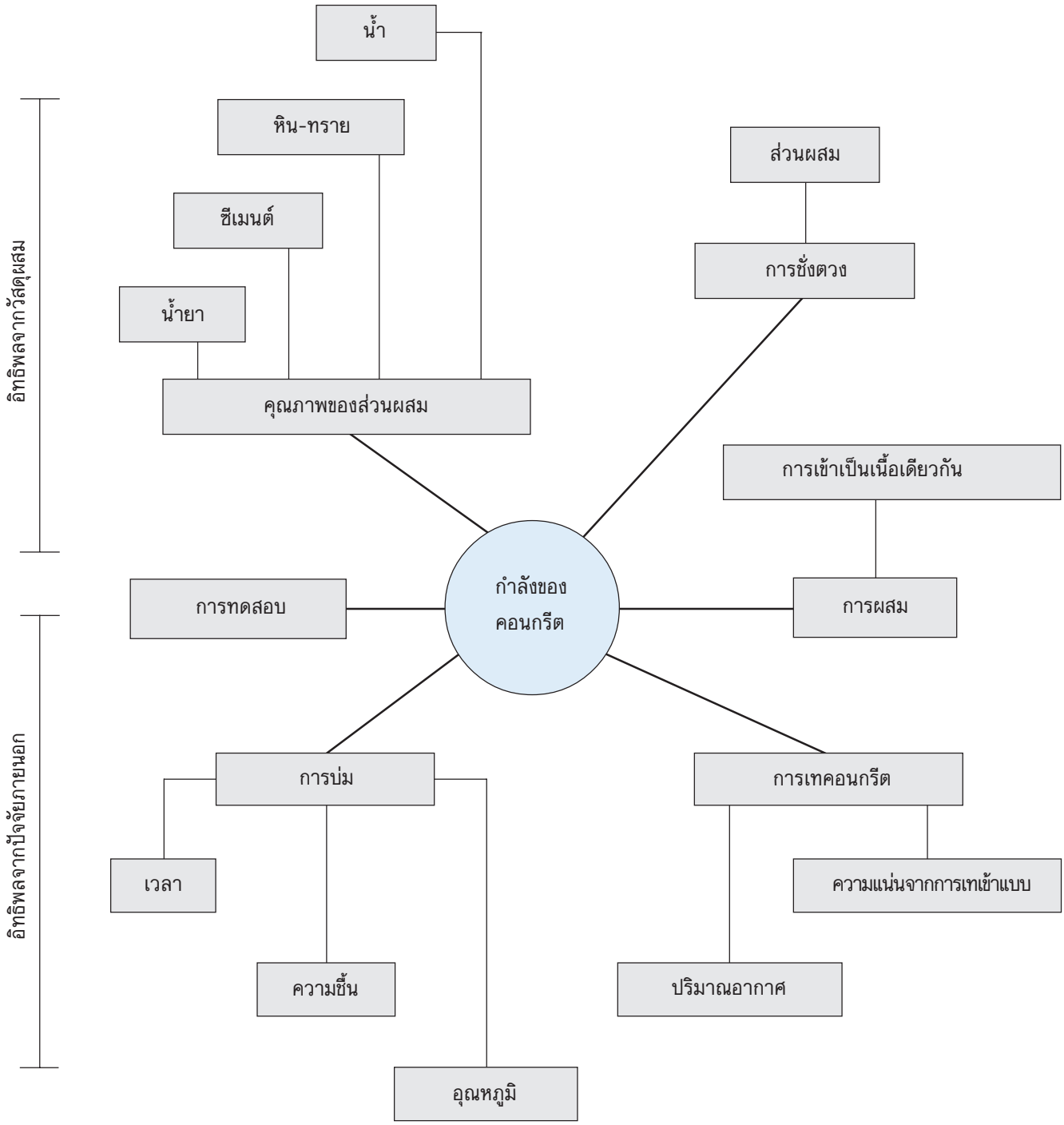
2) แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง

3) แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย

4) แผ่นรองกดจะต้องเรียบเป็นระนาบ

5) ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับของคอนกรีต

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 9.2 *สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

9.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก

ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย มี 2 รูปทรงคือ

1) รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

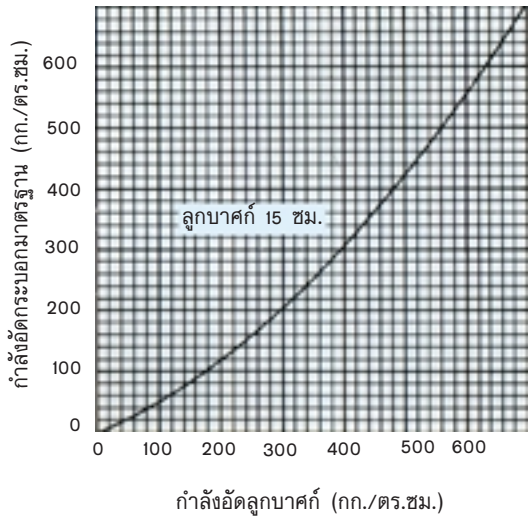
2) รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาดที่ใช้คือขนาด 15 x 15 x 15 ซม.

กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้จะแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบ

1. แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดก่อให้เกิด Confining Stress ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

2. องค์ประกอบเรื่องความชะรูด กล่าวคือเนื่องจากรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าด้านกว้างทำให้ผลด้าน Confining Stress ลดลงอย่างมาก

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน วสท.) ได้ให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์กับกำลังอัดรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 *การแปลงกำลังอัดลูกบาศก์ เป็นกำลังอัดกระบอกมาตรฐาน*

นอกจากนี้ตามมาตรฐานอุตสหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ มอก. 213-2520 ได้เสนอชั้นคุณภาพคอนกรีต และกำลังอัดของ 2 รูปทรงไว้ ดังตารางที่ 9.4

ชั้นคุณภาพ	การต้านแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	
	รูปทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ซม.	รูปทรงกระบอก 15 x 30 ซม.
C 10/8	100	80
C 12.5/10	125	100
C 15/12	150	120
C 20/15	200	150
C 25/20	250	200
C 30/25	300	250
C 35/30	350	300
C 40/35	400	350
C 45/40	450	400

รูปที่ 9.4 *การเปรียบเทียบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกตาม มอก. 213-2520*

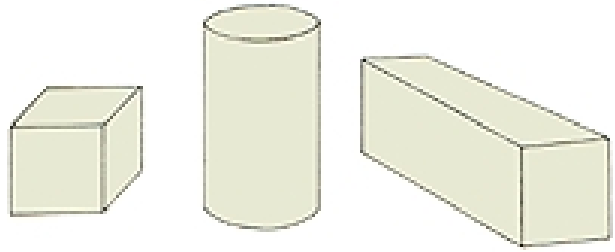
9.4 การทำก้อนตัวอย่างและการทดสอบกำลังอัด

คอนกรีตที่เหมาะสำหรับงานก่อสร้าง นอกจากมีความเหลวพอที่จะเทได้แล้ว เมื่อเป็นคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วยังต้องสามารถรับกำลังอัดได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเก็บก้อนตัวอย่าง และนำมาทดสอบตามเวลาต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้

ก้อนตัวอย่างในงานคอนกรีตที่ใช้ในประเทศไทย มีดังนี้

1. ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม.
2. ตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
3. ตัวอย่างรูปคานขาด 15 x 15 x 60 ซม.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ตัวอย่างรูปคาน

รูปที่ 9.4 *ลักษณะก้อนตัวอย่าง*

1. การทำก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

มาตรฐานที่ใช้

BS 1881:PART 3

Method of MAKING AND CURING TEST SPECIMENS

อุปกรณ์

1) แบบหล่อก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ซม.
2) เหล็กตำ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว
3) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก

รูปที่ 9.5 *อุปกรณ์ทำก้อนตัวอย่าง รูปทรงลูกบาศก์*

วิธีทำ

1) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
2) ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นตำด้วยเหล็กตำ 35 ที
3) เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ

2. การทำก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 192

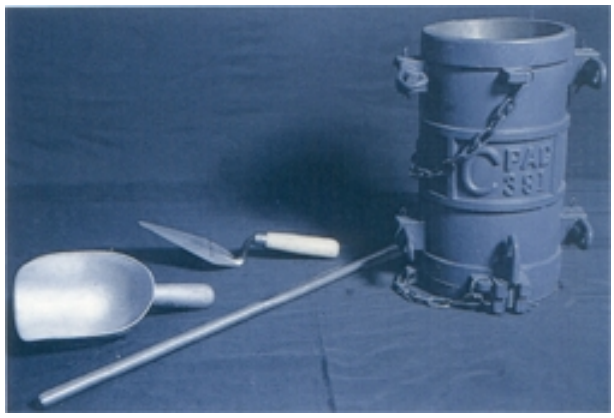
Standard Method of

MAKING AND CURING CONCRETE TEST

TEST SPECIMENS IN THE LABORATORY

อุปกรณ์

1) แบบหล่อก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
2) เหล็กตำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ปลายกลมมน
3) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก



รูปที่ 9.6 *อุปกรณ์ทำก้อนตัวอย่าง รูปทรงกระบอก*

วิธีทำ

1) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
2) ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นตำด้วยเหล็กตำ 25 ที
3) เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

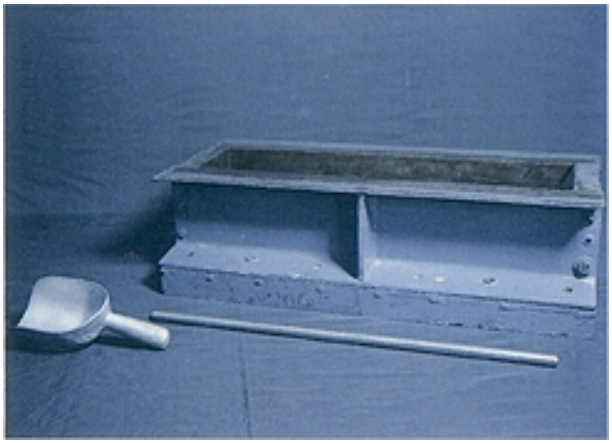
3. การทำตัวอย่างรูปคาน

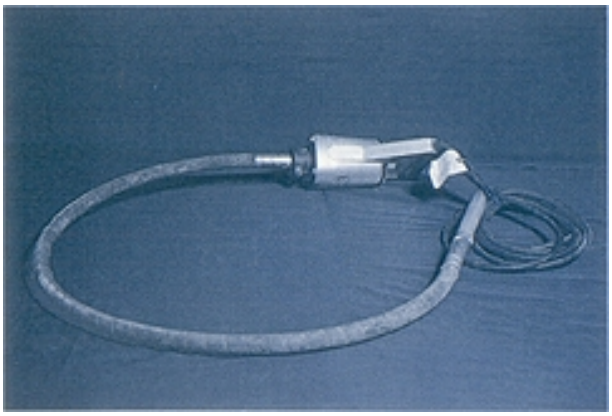
ทำตามมาตรฐาน **ASTM C 192** เช่นกัน

การทำตัวอย่างรูปคานนี้ ใช้ทดสอบกำลังดัด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการให้รับแรงดัดเช่น พื้นสนามบิน เป็นต้น

อุปกรณ์

1) แบบหล่อรูปคานขนาด 15 x 15 x 60 ซม.
2) เหล็กตำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ปลายกลมมน หรือ เครื่องจี้คอนกรีต
3) ช้อนตัก, เกรียงเหล็ก





รูปที่ 9.7 *อุปกรณ์ทำตัวอย่าง รูปคาน*

วิธีทำ

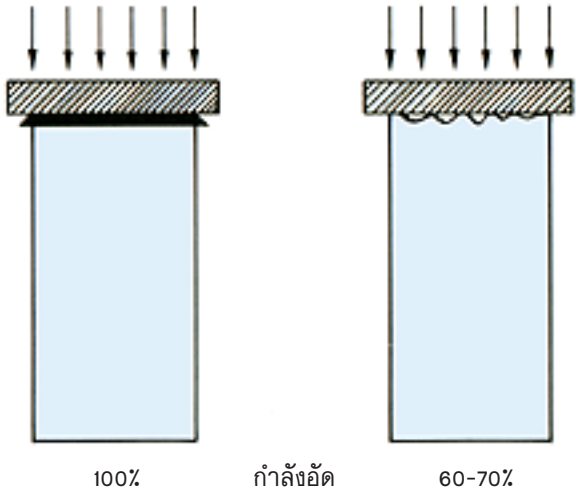
1) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
2) ตักคอนกรีตใส่ลงแบบ โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นตำด้วย เหล็กตำ 60 ที หลังจากนั้นปาดผิวหน้าให้เรียบ

ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำเสร็จแล้ว ควรใช้กระสอบที่เปียกชื้นคลุมไว้ แล้วป้องกันน้ำระเหยออกทิ้งคอนกรีตไว้ในแบบประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบออก เขียนรายละเอียดต่าง ๆ บนหน้าก้อนปูน เช่น วันที่ทำตัวอย่าง หมายเลขตัวอย่าง เป็นต้น จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่มโดยการแช่น้ำ จนถึงเวลาที่จะทำการทดสอบ โดยทั่วไปจะทดสอบที่อายุคอนกรีต 7 วัน และ 28 วัน

เมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบ นำก้อนตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มทิ้งไว้ให้ผิวแห้ง ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด จดบันทึกไว้ ถ้าเป็นตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ หรือ รูปคาน นำไปทดสอบได้เลย แต่ถ้าเป็นตัวอย่างรูปทรงกระบอก หลังชั่งน้ำหนักแล้วต้องทำการ cap ก้อนตัวอย่างทั้ง 2 ด้านด้วยกำมะถันเสียก่อน

วัตถุประสงค์ของการ Cap ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก

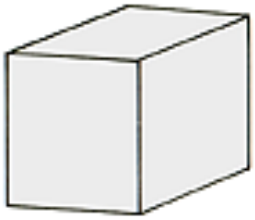
1) เพื่อให้ผิวทั้ง 2 ด้าน ของตัวอย่างเรียบ
2) เพื่อให้แนวแกนของแท่งตัวอย่างตั้งได้ฉากกับแนวราบหลังจาก cap เสร็จเรียบร้อยและกำมะถันแห้งดีแล้ว ก็สามารถนำก้อนตัวอย่างเข้าทดสอบได้



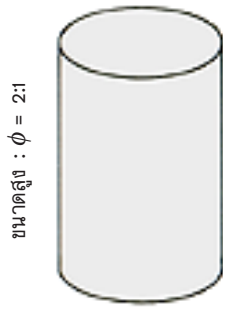
รูปที่ 9.8 *ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ CAP หัวและไม่ CAP หัว*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4) การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์



ตัวอย่างรูปทรงกระบอก

มาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์

BS 1881 : PART 4

Method of

TESTING CONCRETE FOR STRENGTH

มาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก

ASTM C 39

Test Method for

COMPRESSIVE STRENGTH OF CYLINDRICAL

CONCRETE SPECIMENS

วิธีการทดสอบ

1) นำก้อนตัวอย่าง วางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด
2) เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4-3.4 กก./ตร.ซม./วินาที
3) กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้
4) นำค่าน้ำหนัก และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}}$$

หน่วยที่ใช้ทั่วไปคือ

1. กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)
2. นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)

5. การทดสอบกำลังดัดคอนกรีต

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 78

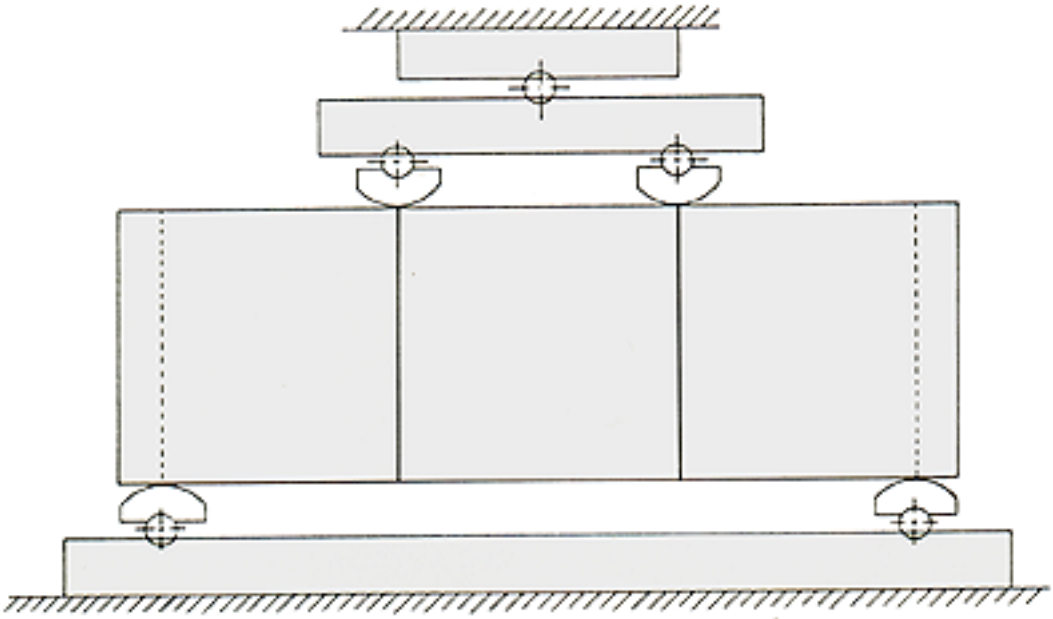
Standard Test Method for

FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE

วิธีการทดสอบ

1) นำแท่นทดสอบตัวอย่างรูปคาน ติดเข้ากับเครื่องทดสอบ
2) แบ่งก้อนตัวอย่างตามยาว โดยเหลือบริเวณปลายไว้สองส่วน ส่วนละ 7.5 ซม. ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วน เท่า ๆ กัน ส่วนละ 15 ซม.
3) วางก้อนตัวอย่าง ลงบนแท่น โดยให้รอยขีดอยู่ตรงกับฐานของแท่น
4) นำแท่นกดด้านบน วางบนก้อนตัวอย่างให้ตรงรอยขีดเช่นกัน
5) ตั้งน้ำหนักกดให้คงที่ อัตราที่ใช้คือ 0.14-0.20 กก./ตร.ซม./วินาที
6) เปิดเครื่องกดน้ำหนัก จนก้อนตัวอย่างหัก
7) บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังดัด

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 9.9 *การทดสอบกำลังดัดคอนกรีต*

การคำนวณ

กรณีที่ 1) เมื่อก้อนตัวอย่างแตกอยู่ในช่วงกลาง (Middle Third of Span)

$$R = \frac{Pl}{bd^2}$$

กรณีที่ 2) เมื่อก้อนตัวอย่างไม่แตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{3\ Pa}{bd^2}$$

R = Modulus of Rupture
P = Maximum Load
l = ความยาว Span
a = ระยะทางเฉลี่ยจากจุดที่แตกไปยัง Support ที่ใกล้กว่าวัดด้าน Tension
b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน
d = ความลึกเฉลี่ยของคาน

9.5 การประเมินผลการทดสอบ

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตจากหน่วยงานก่อสร้างก็คือ เพื่อประเมินผลและควบคุมให้แน่ใจว่า คอนกรีตที่ผลิตขึ้นมีคุณภาพและกำลังอัดที่สม่ำเสมออยู่ในระดับที่ต้องการ แต่เนื่องจากคอนกรีตไม่ใช่มวลที่เกิดจากการผสมของวัตถุจนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นคอนกรีตจึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปในแต่ละรุ่นผสมและแม้แต่รุ่นผสมเดียวกันก็ยังมีคุณสมบัติผันแปรกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนผสม การผสม การลำเลียง การเท การบ่ม และตัวอย่างคอนกรีต นอกจากการผันแปรอันเกิดจากลักษณะของคอนกรีตเองแล้ว คุณสมบัติของคอนกรีตยังถูกทำให้เปลี่ยนแปลงออกไปได้เนื่องจากวิธีการทดสอบ เพื่อหาคุณสมบัตินั้น ๆ อีกด้วย เช่น การหล่อแท่งตัวอย่าง การดูแล และการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต เป็นต้น สรุปแล้วก็คือ ในการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตจากสนามต้องยอมรับว่า ค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าที่แตกต่างและค่าผันแปรนี้ต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ด้วย สำหรับการที่จะกำหนดขอบเขตและควบคุมนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการทางสถิติพร้อมกันกับความเข้าใจในลักษณะของคอนกรีตและการทดสอบคอนกรีตด้วย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ความผันแปรของกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีต

กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมทั้งวัตถุดิบ ขบวนการผลิต และขบวนการทดสอบ ซึ่งเมื่อสรุปจะได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต มีค่าผันแปรอันเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

1) การผันแปรเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต (ผันแปรในขบวนการผลิต)

2) การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ (ผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.5

การผันแปรในสมบัติของคอนกรีตเอง	การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ
การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ - ควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมไม่ดีพอ - ความชื้นในหินและทรายมีมาก การผันแปรในปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม - ขนาดคละของหินและทราย - วัสดุผสมมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ **การผันแปรในคุณภาพและอัตราส่วนผสมของวัสดุ** - หิน, ทราย - ซีเมนต์	**วิธีการสุ่มตัวอย่างไม่เหมาะสม** **วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่แน่นอน** - ปริมาณการกระทุ้ง - การเคลื่อนย้ายตัวอย่าง - การดูแลตัวอย่างคอนกรีตสด **การเปลี่ยนแปลงจากการบ่ม** - อุณหภูมิ - ความชื้น **วิธีดำเนินการทดสอบไม่ดี** - การหล่อฝา - การทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 9.5 *สรุปความผันแปรของกำลังอัด*

• การประเมินผล

1) การประเมินผลความผันแปรในขบวนการผลิต

ในการประเมินผลนี้ จะพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังอัดของคอนกรีต ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าการควบคุมยังไม่ดีพอต้องปรับปรุง ความสัมพันธ์ระหว่างความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับระดับการควบคุมสรุปได้ดังนี้

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)	น้อยกว่า 28	28 – < 35	35 – < 42	42 – < 49	มากกว่า 49
ระดับการควบคุมขบวนการผลิต	ดีเลิศ	ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง

ตารางที่ 9.6 *เกณฑ์ในการประเมินการควบคุมการผลิต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) การประเมินผลความผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ

ในการประเมินนี้ จะพิจารณาค่า สัมประสิทธิ์ความผันแปร ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าการควบคุมยังไม่ดีพอ ต้องปรับปรุง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร กับระดับการควบคุม สรุปได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ความผันแปร (%)	น้อยกว่า 3.0	3.0 – < 4.0	4.0 – < 5.0	5.0 – < 6.0	มากกว่า 6.0
ระดับการควบคุมขบวนการควบคุมคุณภาพ	ดีเลิศ	ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง

ตารางที่ 9.7 *เกณฑ์ในการประเมินการควบคุมคุณภาพ*

- **ตัวอย่าง** การประเมินผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีต ถ้าโรงงานผลิตคอนกรีต 3 แห่ง ผลิตคอนกรีตมีค่าการควบคุมดังตาราง

โรงงาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การผันแปร % (%)
A	42	7.0
B	33	5.0
C	55	3.0

จากค่าในตารางสามารถสรุประดับการควบคุมได้ดังนี้

โรงงาน	ระดับการควบคุมขบวนการผลิต	ระดับการควบคุมขบวนการควบคุมคุณภาพ
A	พอใช้	ต้องปรับปรุง
B	ดีมาก	พอใช้
C	ต้องปรับปรุง	ดีมาก

9.6 สาเหตุที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

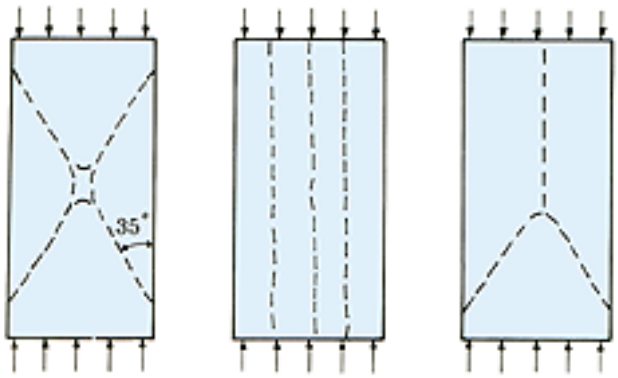
การที่กำลังอัดของคอนกรีต ได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลาย ๆ ประการอันได้แก่

1) ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
2) ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3) ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี
4) การผสมไม่ดีพอ
5) มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากเกินข้อกำหนด
6) ใช้หินทรายที่สกปรก
7) ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8) ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
9) การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10) การบ่มไม่เพียงพอ
11) การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
12) อุณหภูมิผันแปรไป

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

9.7 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 9.10 (a) โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง วัสดุผสมและความเสียดทานภายใน ดังนั้นมุมของการแตกหัก จึงมีค่าเท่ากับ $45^{\circ} - \frac{\varnothing}{2}$ เมื่อ $\varnothing$ เป็นมุมของความเสียดทานภายใน ของคอนกรีตซึ่งมีค่าประมาณ 20 องศา ดังนั้นระนาบของความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตจึงเบี่ยงประมาณ 35 องศา ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างอาจเป็นการแตกแบบแยกออก (Spliting Failure) ดังรูปที่ 9.10 (b) หรืออาจเป็นการรวมของลักษณะการแตกของทั้ง 2 แบบ (Combination Shear and Splitting Failure) ดังรูปที่ 9.10 (c)



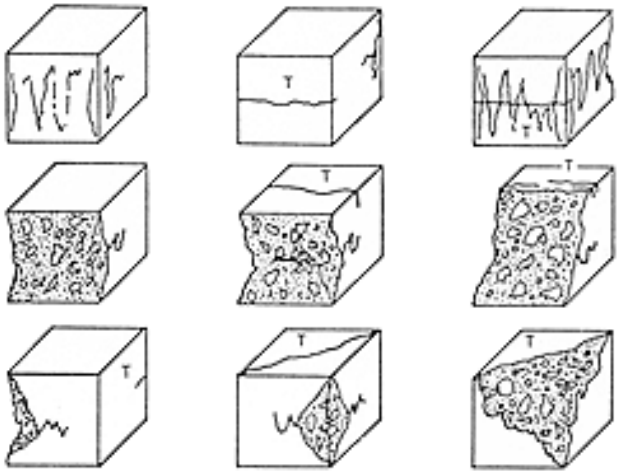
Shear or 'cone' failure (a) | Splitting or 'columnar' failure (b) | Combination shear and splitting failure (c)

รูปที่ 9.10 *การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก*

ส่วนลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปปิรามิด ดังแสดงในรูปที่ 9.11

Explosive failure

(a)



T = Tensile Crack

(b)

รูปที่ 9.11 *(a) ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องและ*
(b) การแตกที่ไม่ถูกต้อง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 10
การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ 1) ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีตและ

2) รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน

2) เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วยทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

10.1 กรรมวิธีการบ่ม

เราแบ่งกรรมวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ

1. การบ่มที่อุณหภูมิปกติ
2. การบ่มที่อุณหภูมิ และความกดดันสูง

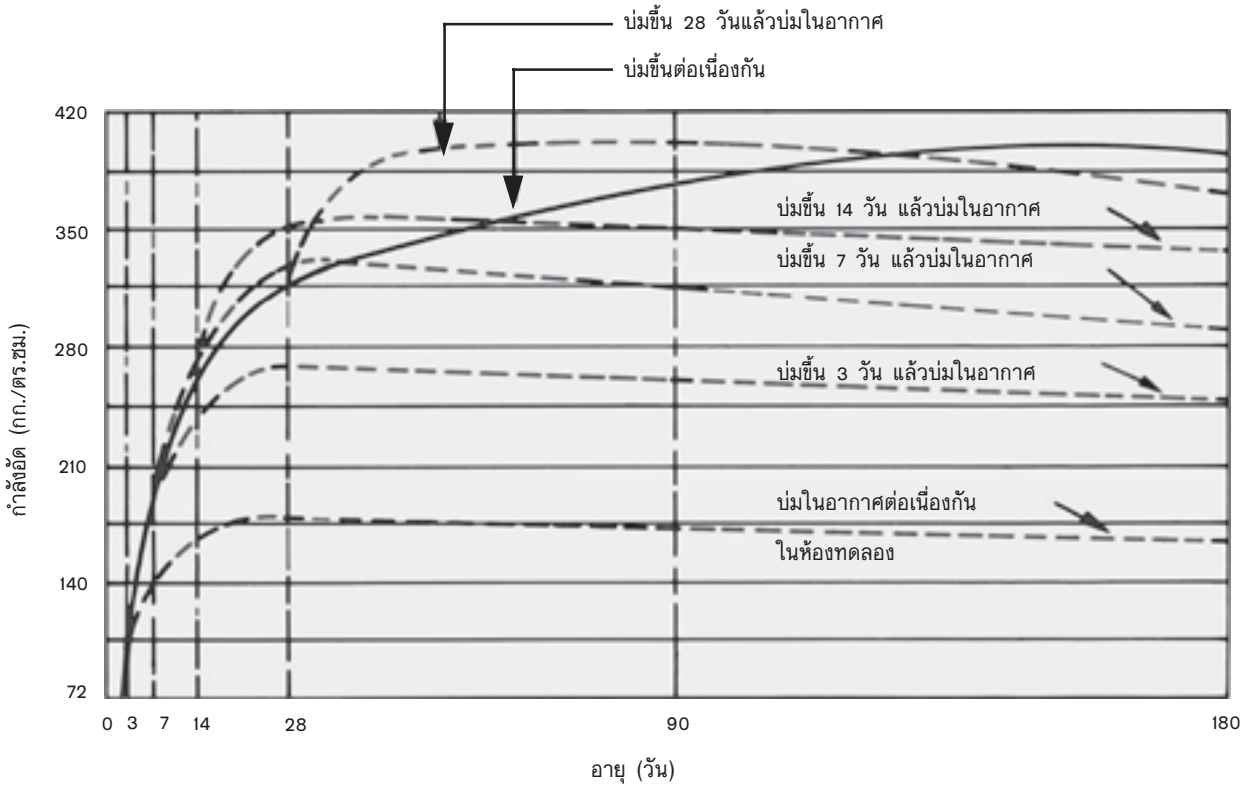
รูปที่ 10.1 แสดงอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งสรุปได้ดังนี้

- กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันแรก ๆ ถ้าได้รับการบ่ม ซึ่งชี้ถึงความสำคัญของการบ่มในระยะแรก
- กำลังของคอนกรีตมีโอกาสเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังอายุ 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มของกำลังจะช้าลง แต่ก็ยังเพิ่มขึ้นตลอดเวลา หากได้รับการบ่มที่ดี
- หากขาดความชื้น กำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นสักระยะหนึ่ง เพราะความชื้นที่เหลืออยู่ แต่หลังจากนั้นกำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เช่นกำลังของคอนกรีตที่ได้รับการบ่ม 3 วัน จะมีกำลังเพียง 75-80% ของกำลังคอนกรีตที่บ่มชื้นครบ 28 วัน

จะเห็นได้แล้วว่า เราควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ นั่นคือ บ่มจนกว่าคอนกรีตมีกำลังสูงตามที่ต้องการ ในทางปฏิบัติมักไม่สามารถบ่มคอนกรีตได้นานนัก ทั้งนี้ก็เพราะข้อจำกัดในเรื่อง กำหนดการก่อสร้างและค่าใช้จ่าย จากรูป 10.1 แสดงให้เห็นว่า การบ่มชื้นถึง 7 วัน ทำให้เราสามารถได้กำลังของคอนกรีตสูงทัดเทียมกับกำลังคอนกรีตที่บ่มและทดสอบในสภาพชื้นถึง 28 วัน ตามมาตรฐานอเมริกาแนะนำให้ใช้เวลาบ่มชื้น 7 วัน สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป หรือเวลาที่จำเป็นเพื่อให้ได้กำลัง 70% ของกำลังอัดหรือกำลังดัดที่กำหนดแล้วแต่ว่าเวลาไหนน้อยกว่ากัน แต่สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณมาก ๆ เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ เราจำเป็นต้องบ่มนานถึงอย่างน้อย 2 สัปดาห์

ในกรณีที่การบ่มต้องหยุดชะงักไประยะเวลาหนึ่งด้วยเหตุผลใด ๆ ก็ตาม เมื่อคอนกรีตได้รับความชื้น ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็สามารถเกิดขึ้นต่อไป ทำให้กำลังของคอนกรีตสูงเพิ่มขึ้นไปอีก

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 10.1 *ผลของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต*

10.2 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ

สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การเพิ่มความชื้น และวิธีป้องกันการเสียความชื้น

1) การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลงด้วยจึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน การบ่มแบบนี้ทำได้หลายวิธี รวมทั้งมีข้อดีข้อเสีย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10.1

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การขังน้ำ เหมาะสมกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบ เช่น แผ่นพื้นทั่วไป, ดาดฟ้า, พื้นสะพาน, ถนนทางเท้าสนามบิน **วิธีการ** ทำโดยใช้ดินเหนียวหรือก่ออิฐทำเป็นคันโดยรอบของงานคอนกรีตที่จะบ่ม **ข้อควรระวัง** อย่างให้น้ำที่ใช้บ่มมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10°C	1. ทำได้สะดวก, ง่าย, ราคาถูก 2. วัสดุหาได้ง่าย เช่นดินเหนียวและน้ำ 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ 4. ซ่อมแซมได้สะดวก, รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายตัวอย่างเช่นทำคันดินเหนียวและพังก็สามารถซ่อมได้ทันที	1. ต้องหมั่นตรวจดูรอยแตกร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้อยู่เสมอ, มิฉะนั้นน้ำจะซึมหนี 2. ต้องเก็บทำความสะอาดบริเวณคอนกรีตที่บ่มเมื่อเสร็จงานบ่มเรียบร้อยแล้ว
2. โดยการฉีดน้ำหรือพรมน้ำ **วิธีการ** ใช้ได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง เช่น ผนัง, กำแพง, และพื้น	1. ทำได้สะดวก ได้ผลดี 2. ค่าใช้จ่ายถูก 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ 4. ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา	1. ไม่เหมาะสมกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก 2. ไม่สะดวกกับการฉีดกับกำแพงในแนวดิ่ง เพราะน้ำจะแห้งเร็ว
3. โดยการใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม **วิธีการ** เช่นนำผ้าใบ กระสอบ ซึ่งอุ้มน้ำได้ ถ้าเป็นผ้าใบควรเป็นสีขาว เพราะสะท้อนความร้อนได้ดี และรอยต่อต้องเหลื่อมกันให้มาก ถ้าใช้ฟางหรือขี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 ซม. คลุมให้ทั่วและฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ	1. ได้ผลดีมาก ราคาไม่สูงเกินกว่าที่จะทำ 2. ทำได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง ในกรณีที่ใช้ผ้าใบและกระสอบ 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ 4. สามารถหาวัสดุมาใช้ได้ง่าย	1. ถ้าอากาศร้อนจะแห้งเร็ว 2. ถ้าที่กว้าง ๆ ถ้าใช้ผ้าใบคลุมจะเสียค่าใช้จ่ายมาก 3. ต้องฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ 4. ต้องพิจารณาก่อนที่จะนำมาใช้ว่าวัสดุนั้นเป็นอันตรายต่อซีเมนต์หรือผิวคอนกรีตหรือไม่

ตารางที่ 10.1 *วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) **วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต** วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอก การป้องกันความชื้นวิธีนี้ได้แก่การใช้กระดาษกันน้ำ ผ้าพลาสติกหรือสารเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังไม่ถอดก็สามารถป้องกันการเสียความชื้นได้เช่นกัน วิธีการบ่มแบบนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10.2

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การใช้กระดาษกันน้ำซึมได้คลุม กระดาษนี้ทำด้วยกระดาษเหนียวยึดติดกันด้วยกาวประเภทยางมะตอยและเสริมความเหนียวด้วยใยแก้วและมีคุณสมบัติยืดหดตัวไม่มาก **วิธีการใช้** รอยต่อควรเหลื่อมกันให้มากพอสมควร และรอยต่อระหว่างแผ่นต้องผนึกติดแน่นด้วยกาว หรือ เทป หรือทรายก็ได้	1. ทำได้สะดวก รวดเร็ว 2. ป้องกันคอนกรีตไม่ให้แห้งได้เร็วแต่ต้องคอยราดน้ำไว้ด้วย 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้	1. ราคาแพง 2. ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน 3. ไม่สะดวกในการเก็บรักษาต่อไปเมื่อนำมาใช้งานต่อ
2. การใช้แผ่นพลาสติกคลุม เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และสามารถใช้คลุมงานคอนกรีตที่จะบ่มได้ทันทีที่ต้องการ	1. มีน้ำหนักเบา ปฏิบัติงานง่าย 2. ได้ผลดีในการป้องกันน้ำที่ระเหยออกไปจากคอนกรีต 3. ไม่ต้องราดน้ำให้ชุ่มอยู่ภายใน	1. บางมาก, ชำรุดง่าย 2. ต้องหาของหนักทับเพื่อกันปลิว 3. ราคาแพง ถ้าใช้ในการคลุมงานคอนกรีตที่กว้าง ๆ
3. การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต มีหลายสีด้วยกัน เช่น ใส ขาว เทาอ่อน และดำ สำหรับสีขาวจะเหมาะสมกว่าเพราะสะท้อนความร้อนและแสงได้ดีกว่า โดยการใช้พ่นคลุมพื้นผิวคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว ๆ เช่นลานบินหลังคากว้าง ๆ งานพิเศษต่าง ๆ หรือตึกสูง ๆ ที่น้ำส่งขึ้นไปได้ลำบาก	1. สะดวก รวดเร็ว 2. ได้ผลดีพอสมควร ถ้าน้ำยานั้นเป็นของแท้ และมีความเข้มข้นตามมาตรฐานของผู้ผลิต 3. ไม่ต้องคอยรดน้ำ 4. ไว้ใช้ในกรณีที่การบ่มด้วยวิธีอื่นไม่ได้ผล	1. ค่าใช้จ่ายสูง 2. ต้องจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับพ่นทุกครั้ง 3. ต้องใช้บุคคลากรที่เคยทำมาก่อนการพ่น 4. น้ำยาเคมีที่ใช้พ่นอาจทำอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ในระยะใกล้เคียงได้
4. การบ่มโดยใช้แบบ ต้องพ่นไม้แบบให้มีความชื้นอยู่เสมอ ไม้แบบจะป้องกันการเสียความชื้นได้ดีมาก ฉะนั้นควรรักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุดหลังจากถอดแบบแล้วจึงใช้วิธีอื่นต่อไป	1. ทำได้สะดวก 2. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้	1. ต้องใช้ไม้แบบจำนวนมาก 2. ช้าเพราะต้องนำไม้แบบไปใช้งานอื่นต่อไป 3. ถ้าเป็นไม้แบบเก่า, ต้องเสียเวลาทำความสะอาดไม้แบบ

ตารางที่ 10.2 *วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

10.3 การบ่มที่อุณหภูมิสูง

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 10.2 ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คานและพื้น เป็นต้น ข้อดีในการปฏิบัติ คือ

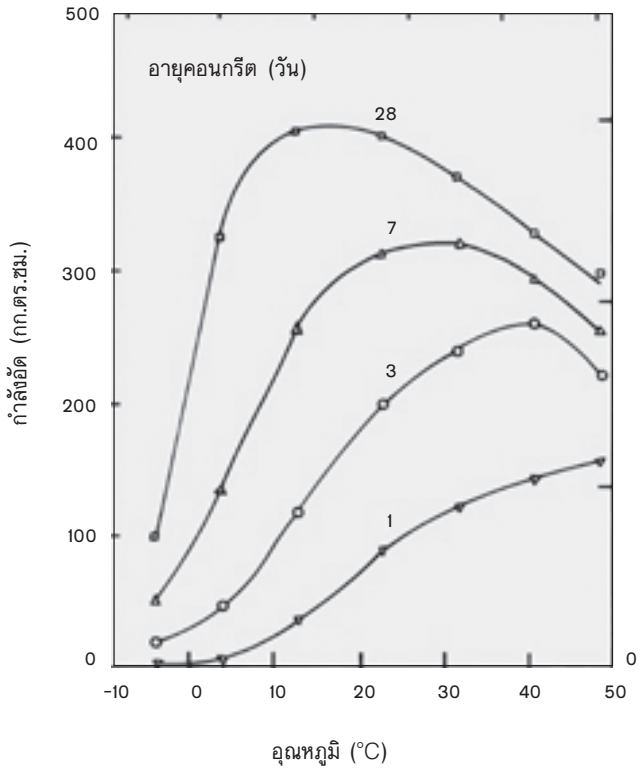
- สามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น
- ประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว
- คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งานได้ดี

- **การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing)**

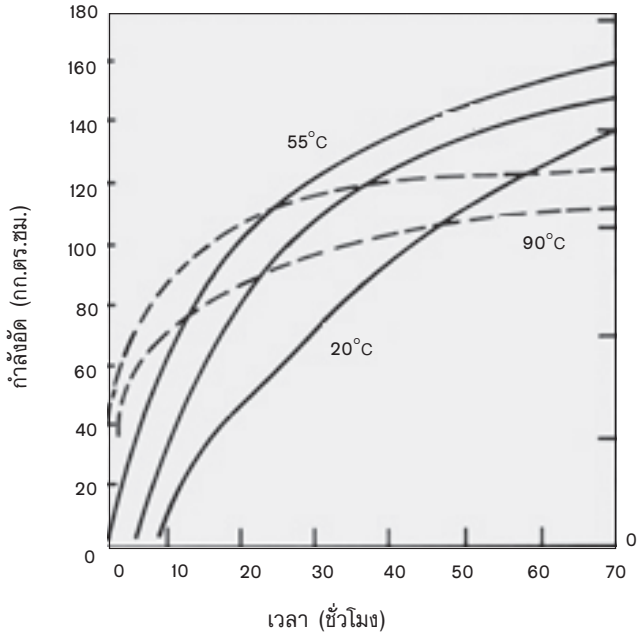
อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40-100 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65-80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยสูงสุดจะมีค่าต่ำ อุณหภูมิที่ต่ำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูงแต่ด้วยอัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ ความสัมพันธ์เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 10.3

นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว สิ่งที่สำคัญก็คือเวลาที่ใช้ในการบ่มซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลา การค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เวลาที่อุณหภูมิสูงสุดจริง และการลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิปกติ รูปที่ 10.4 แสดงขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิ ควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 2-6 ชั่วโมงหลังการหล่อ ก่อนที่จะสัมผัสกับไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขั้นเบื้องต้นก่อน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิไม่ควรให้เกิน 30 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง เวลาที่คอนกรีตอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดเป็นสิ่งกำหนดปริมาณกำลังที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิหรือที่เรียกว่า Maturity ดังแสดงในรูปที่ 10.5 อัตราการลดอุณหภูมิหลังการบ่ม มีความสำคัญน้อย ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีความแข็งแรงสูงแล้ว โดยปกติควรใช้อัตราการลดอุณหภูมิระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง

ในหลาย ๆ โอกาส เราใช้การบ่มด้วยไอน้ำนี้เพื่อให้ได้กำลังสูงพอที่ให้ความปลอดภัยต่อการถอดแบบและขนย้ายเท่านั้น จากนั้นก็สามารถบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นตามปกติได้ คอนกรีตที่บ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันจะมีคุณสมบัติไม่ต่างจากคอนกรีตที่บ่ม ณ อุณหภูมิต่ำ

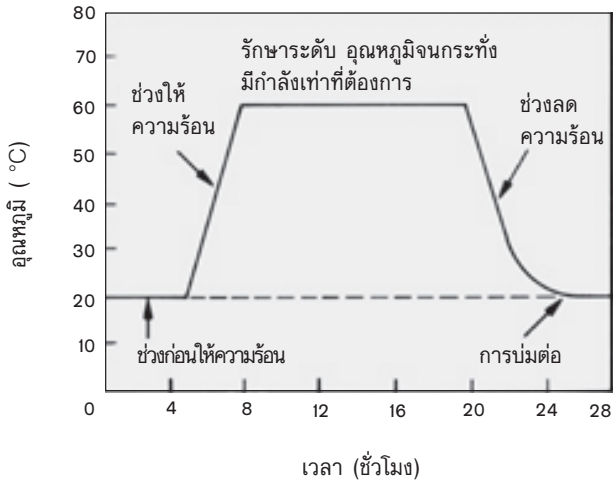


รูปที่ 10.2 *ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มกับกำลังอัดของคอนกรีต*

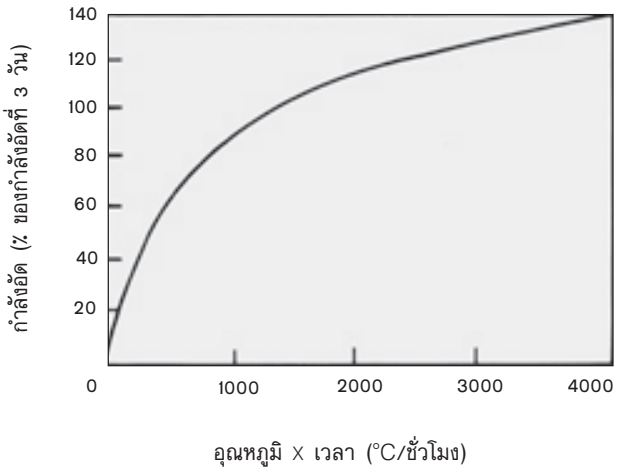


รูปที่ 10.3 *ผลของอุณหภูมิของการบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำต่อกำลังของคอนกรีตในระยะแรก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 10.4 *ขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิสำหรับการบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ*



รูปที่ 10.5 *อิทธิพลของผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิต่อผลการเพิ่มของกำลังอัด*

- **การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)**

หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส เราต้องให้ความกดดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิท ซึ่งมีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160-210 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6-20 atm สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารประกอบ ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และมีผลดีที่สำคัญ คือ

- สามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมงเพราะคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติเป็นเวลา 28 วัน
- มีการหดตัวและการล้าลดลงมาก
- ทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้น
- กำจัด Efflorescence
- มีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม

ในทางปฏิบัติ การบ่มแบบนี้สิ้นค่าใช้จ่ายสูงและใช้ได้กับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น มีการใช้การบ่มนี้สำหรับผลิตภัณฑ์จำเพาะบางอย่าง เช่น แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน เป็นต้น

10.4 ระยะเวลาการบ่ม

โดยทั่วไประยะเวลาของการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและรูปร่างของแท่งคอนกรีต อุณหภูมิที่ใช้บ่ม และความชื้นในขณะบ่ม เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ถือได้ว่า จะมีผลต่อระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ซึ่งอาจจะถึง 1 เดือน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทำเขื่อน หรือเพียง 3 วัน สำหรับคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดกำลังสูงเร็ว

สำหรับงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ ซึ่งกำหนดเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปกตินิยมกำหนดระยะเวลาการบ่มไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งผลิตขึ้นในประเทศไทย ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 10.3

ประเภทของงาน	คอนกรีตที่ใช้		
	ปูนซีเมนต์ผสม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3
งานธรรมดา			
- เสา คาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
- พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน ฯลฯ	8 วัน	8 วัน	4 วัน
- ถนนชั้นหนึ่ง ลานจอดหรือทางวิ่งของเครื่องบิน	-	14 วัน	7 วัน
- เสาเข็มสำหรับจะนำไปตอกเป็นฐานราก	21 วัน	14 วัน	7 วัน
งานพิเศษ			
- แผ่นพื้นบาง ๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
- รูปหล่อที่เล็กบางซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ผสมมาก	-	21 วัน	7 วัน

ตารางที่ 10.3 *เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 11
คุณสมบัติด้านกำลังอื่นๆ

นอกจากกำลังอัดแล้ว คุณสมบัติด้านกำลังอื่นๆ ของคอนกรีตที่น่าสนใจ ควรศึกษา ได้แก่กำลังดึง, กำลังดัด, กำลังเฉือน, กำลังยึดเหนี่ยว, กำลังกระแทก และอื่นๆ

11.1 กำลังดึง (Tensile Strength)

ความต้านทานในด้านรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำมาก คือ ประมาณ 10% ของกำลังอัดประลัย ถึงแม้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่การทราบค่ากำลังดึงนี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การหดตัว และมีประโยชน์อย่างมากในงานคอนกรีตอัดแรง งานสิ่งก่อสร้างเก็บของเหลว เป็นต้น

วิธีการวัดค่าแรงดึงในคอนกรีต ทำได้ 3 วิธี คือ

- Direct Tensile Test
- Flexural Strength Test
- Splitting Test

• Direct Tensile Test

โดยปกติแล้วการให้แรงดึงโดยตรงกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะทำได้ยากมากเพราะ

- เกิดการเยื้องศูนย์ของก้อนตัวอย่าง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมาก
- มีหน่วยแรงอื่นแทรกเข้ามาจากหัวจับยึด ซึ่งเกิดเป็นหน่วยแรงเฉพาะที่และในที่สุดจะเกิดการแตก ณ บริเวณนี้
- เมื่อมีการร้าว มันจะแพร่ขยายไปอย่างรวดเร็วกำลังดึงที่ได้จะเป็นของบริเวณที่กำลังต่ำสุดซึ่งไม่ตรงต่อความเป็นจริงในโครงสร้าง

จากเหตุผลทั้ง 3 นี้ ผลจากการทดสอบจึงให้ค่าที่แตกต่างกันได้มาก ทำให้ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานวิธีทดสอบแบบนี้ขึ้น

• Flexural Strength Test

การทดสอบคานคอนกรีตซึ่งจะหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดงอของคอนกรีตได้ในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยเป็นค่าหน่วยแรงดึงที่สูงสุด ณ จุดแตกร้าวในคานที่ทำการทดลอง ซึ่งหาค่าได้ตามสมการ

$$f_b = \frac{PL}{bd^2}$$

f_b = โมดูลัสการแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)
P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)
L = ช่วงความยาวคาน (ซม.)
b,d = ความกว้าง, ความลึกของคาน (ซม.)

กำลังดัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีนี้ จะแตกต่างจากกำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต เนื่องจากหน่วยการยืดหดตัวในคานคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากการดัดงอนี้อยู่ในลักษณะส่วนโค้ง มิใช่การยืดหดในลักษณะเส้นตรง เรียกว่าผลกระทบจาก Strain Gradient ซึ่งทำให้โมดูลัสของการแตกร้าวมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดความลึกของคานทดสอบ

• Splitting Test

การทดสอบนี้ใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน วางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนบนเครื่องทดสอบแรงอัด ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่าศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกร้าวนี้ได้ตามสมการ

$$f_S = \frac{2P}{\pi dL}$$

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

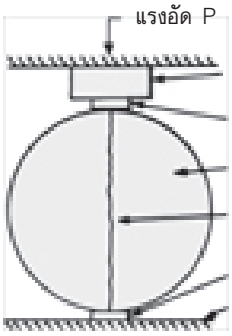
f_S = Splitting Strength

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ซม.)

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (ซม.)

การทดสอบวิธีนี้ให้ค่าสม่ำเสมอดีกว่า 2 วิธีข้างต้น แต่ก็ไม่ได้ค่ากำลังดึงที่แท้จริง เพราะบริเวณปลายทั้ง 2 จะเป็นบริเวณรับแรงอัด (Compression Zone) ค่าที่ได้จะสูงขึ้นกว่าแรงดึงจริงของคอนกรีต ประมาณ 15%



รูปที่ ท.1 *การทดสอบกำลังดึง (Splitting Test) ของคอนกรีต*

ผลการทดสอบทั้ง 3 ให้ค่ากำลังที่แตกต่างกัน โดย Flexural Strength ให้ค่าสูงสุดและ Direct Tensile จะให้ค่าที่ต่ำสุด เนื่องจาก ทั้ง Flexural Strength และ Splitting Test จะเกี่ยวข้องกับ การกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ใช่กำลังดึงที่แท้จริง

• ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังดึง

1) วิธีการทดสอบ
- Flexural Strength ให้ค่าสูงสุด
- Direct Tensile ให้ค่าต่ำสุด

2) มวลรวม
- Direct และ Splitting Test จะกระทบน้อย
- Flexural Strength Test มวลรวมที่เป็นเหลี่ยมมุม จะส่งผลให้ค่าสูงกว่ามวลรวมที่กลม

3) ความชื้น
- Direct และ Splitting Test จะกระทบน้อย
- Flexural Strength Test ทดสอบในขณะก้อนตัวอย่างแห้งจะให้ค่าต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่อยู่ในสภาพเปียกชื้น

• ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงและกำลังอัด

1) อัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัด จะขึ้นอยู่กับระดับของกำลังของคอนกรีต

2) เมื่อกำลังอัดสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่าง กำลังดึงต่อกำลังอัดจะต่ำลง

11.2 กำลังเฉือน (Shear Strength)

การเฉือนเป็นการกระทำของแรงสองแรง ซึ่งมีขนาดเท่ากันและขนานกัน โดยกระทำตรงกันข้ามบนระนาบซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย แรงเฉือนมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดึงและแรงดัดเสมอ การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงเฉือนในคอนกรีต โดยตรงนี้ไม่สะดวก เช่นเดียวกับการทดสอบหาความต้านทาน แรงดึง ทั้งนี้เพราะค่าของแรงดัด แรงกด และแรงดึงในแนวทแยงจะเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง ทำให้ผลการทดลองไม่ถูกต้อง

ปกติ การทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือน กระทำได้โดยการบิด แท่งทดสอบรูปทรงกระบอก พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่าประมาณ 15 ถึง 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต เช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์มากและมีส่วนขนาดคละของวัสดุผสมดีย่อมให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมหยาบ

11.3 แรงยึดเหนี่ยวต่อเหล็กเสริม (Bond Strength)

ความสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงดัด ก็คือความต้านทานต่อการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่หล่ออยู่ภายในเนื้อคอนกรีต แรงต้านทานนี้เกิดจากการยึดติดกันกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว จากความเสียดทานระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีต และจากแรงกดที่ข้อในเหล็กข้ออ้อย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

งานก่อสร้างสมัยใหม่นี้ มักนิยมใช้เหล็กข้ออ้อยกันมาก ขนาดและระยะของข้อต้องเพียงพอที่จะเกิดกำลังยึดเหนี่ยวกับเนื้อคอนกรีต มาตรฐานการออกแบบมักกำหนดค่าแรงยึดเหนี่ยวเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดของคอนกรีต และขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ สารผสมเพิ่ม และอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเพสต์ คอนกรีตที่มีส่วนผสมของซีเมนต์มากจะมีแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มมากขึ้น การใช้สารกักกระจายฟองอากาศไม่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตในสภาวะที่แห้งจะมากกว่าในสภาวะที่ชื้น และแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริมในแนวนอน จะน้อยกว่าในแนวตั้ง เพราะน้ำที่เกิดจากการเยิ้มอาจไปเกาะอยู่ใต้เหล็กเสริมตามแนวนอนได้ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจึงเกิดเป็นรูโพรงใต้เหล็กเสริมนั้นทำให้ลดกำลังยึดเหนี่ยวลง

การทดสอบเพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริม ทำได้โดยการดึงเหล็กเสริมขนาด ϕ 19 มม. ที่หล่ออยู่ในก้อนคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 22.5 x 22.5 x 22.5 ซม. วัดระยะเลื่อนไถลในขณะที่ออกแรงดึงท่อนเหล็กนั้น แล้วนำมาเขียนกราฟระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถล การทดลองกระทำจนกว่าแรงที่ใช้ดึงท่อนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังจุดคลากของเหล็กนั้นหรือเมื่อคอนกรีตเริ่มชำรุดแยกออกจากกัน หรือจนกระทั่งระยะเลื่อนไถลมีค่ามากกว่า 2.5 มม.

11.4 กำลังกระแทก (Impact Strength)

ตัวอย่างคอนกรีตที่ต้องมีคุณสมบัติรับแรงกระแทกได้ดี เช่น คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มตอก ซึ่งต้องมีความสามารถที่จะทนต่อการกระแทกและดูดซับพลังงานได้เป็นอย่างดี

ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังกระแทกกับกำลังอัดขึ้นอยู่กับ

1) ชนิดของมวลรวมหยาบ

- มวลรวมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำและมีค่า Poisson Ratio ต่ำ จะสามารถรับแรงกระแทกได้ดี

2) ความชื้นของคอนกรีต

- คอนกรีตที่ชื้นจะให้กำลังกระแทกต่ำกว่าคอนกรีตที่แห้ง

3) ลักษณะของมวลรวม

- กำลังกระแทกจะสูงเมื่อใช้หินที่เป็นเหลี่ยมมุมและผิวหยาบ
- หินยิ่งมีขนาดเล็ก จะปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังกระแทก

4) ปริมาณปูนซีเมนต์

- เพื่อให้ได้กำลังกระแทกที่เหมาะสม ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ไม่ควรเกิน 400 กก./ลบ.ม.

11.5 การต้านทานการเสียดสี

คุณสมบัตินี้ทดลองโดยการวัดความลึกที่สึกหรอของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการขัดผิว การต้านทานการเสียดสีนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หรือกำลังอัดนั้นเอง

2) การต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของมวลรวมต่อปูนซีเมนต์สูง

3) การต้านทานการเสียดทานจะต่ำมากในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา

4) การต้านทานจะเพิ่มขึ้นถ้าการเยิ้มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

5) การต้านทานจะเพิ่มถ้าเลื่อนเวลาการแต่งผิวหน้าคอนกรีตออกไปเล็กน้อย

6) ประการที่สำคัญสุด คือ การบ่มคอนกรีตอย่างถูกต้องและเพียงพอ จะช่วยเพิ่มการต้านทานการเสียดสีอย่างมาก

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 12
การเปลี่ยนรูป

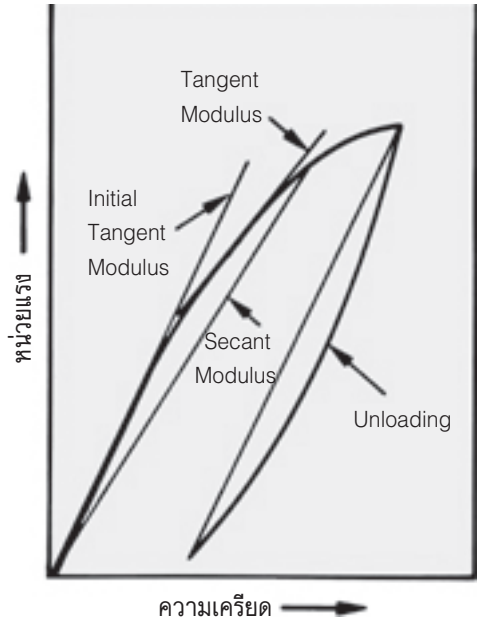
คอนกรีตในสภาพใช้งานอาจมีการเปลี่ยนรูป (Deformation) โดยสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load-Dependent Deformation) อันได้แก่ Elastic Strain และ Creep

2. การเปลี่ยนรูปที่ไม่ขึ้นกับน้ำหนักบรรทุก (Load-Independent Deformation) ได้แก่ Shrinkage และ Thermal Expansion

12.1 ความเครียดยืดหยุ่น (Elastic Strains)

เมื่อใส่แรงลงในคอนกรีตจะเกิดหน่วยการหดตัวหรือความเครียด (Strain) ดังแสดงในรูปที่ 12.1 ซึ่งจะพบว่าคอนกรีตไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่แท้จริง หน่วยแรง (Stress) ไม่ได้แปรผันโดยตรงกับความเครียด ในคอนกรีต



รูปที่ 12.1 *กราฟ stress-strain ของคอนกรีต*

● การวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ชนิดต่าง ๆ ของคอนกรีตมีดังนี้

1. โมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial Tangent Modulus) คือ ค่าความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับโค้งตรงจุดเริ่มดังแสดงในรูปที่ 12.1 ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สุด

2. โมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus) นับเป็นค่าโมดูลัส ที่ใช้งานได้ดี ในทางปฏิบัติ

3. โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) คือ ความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว

● ปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่น (E)

1. อัตราการให้น้ำหนัก

- การให้น้ำหนักที่เร็ว จะส่งผลให้ ค่าโมดูลัสสูงขึ้น

2. ระดับของหน่วยแรง

- Secant Modulus ลดลง เมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้น

3. กำลังของคอนกรีต

- Secant Modulus มีค่ามากขึ้นเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น

4. สภาพของก้อนตัวอย่าง

- ก้อนตัวอย่าง ที่อยู่ในสภาพเปียก จะให้ค่าโมดูลัสที่สูงกว่าตัวอย่างที่อยู่ในสภาพแห้ง

5. คุณสมบัติของมวลรวม

- มวลรวมที่มีค่าโมดูลัสสูง จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสของคอนกรีตสูงขึ้น

- รูปร่างและลักษณะผิว จะมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

- ณ ระดับกำลังอัดที่เท่ากันโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเบา จะมีค่าเพียง 40-50% ของคอนกรีตปกติ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

6. สัดส่วนผสม

- ยิ่งใช้มวลรวมมาก คอนกรีตจะมีค่าโมดูลัสยิ่งสูงขึ้น

7. อายุของก้อนตัวอย่าง

- ยิ่งอายุมากค่ากำลังจะสูงขึ้นค่าโมดูลัสจะสูงขึ้นด้วย

8. อุณหภูมิขณะเริ่มบ่ม

- คอนกรีตที่ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิต่ำในช่วงแรกจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้น
- การบ่มที่อุณหภูมิสูงจะลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

• การคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จะขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและหน่วยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$E_C = W^{1.5} \times 4270 \sqrt{f_c'} \text{ กก./ตร.ซม.}$$

โดย

E_C = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กก./ตร.ซม

W = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตัน/ตร.ซม

f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน กก./ตร.ซม

• Poisson's Ratio (μ)

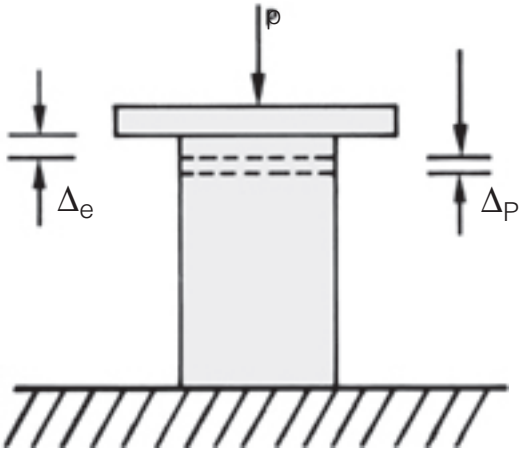
Poisson's คือ อัตราส่วนของ หน่วยการหดตัวด้านข้าง (Lateral Strain) ต่อหน่วยการหดตัวในแนวแกนที่รับน้ำหนัก (Axial Strain) เมื่อมีการให้น้ำหนัก คอนกรีตปกติจะมีค่า 0.15-0.20 คอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงจะมีค่า Poisson's Ratio ต่ำ

12.2 การคืบ (Creep)

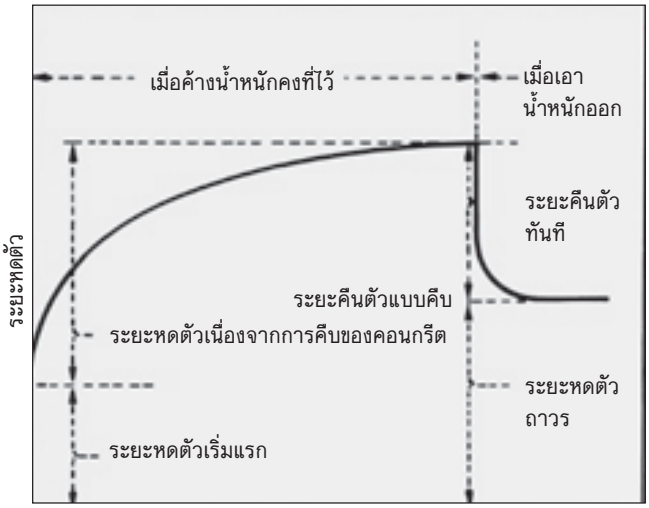
การคืบของคอนกรีต คือ การเปลี่ยนรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักหรือแรงกดที่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน โดยมีข้อสันนิษฐานว่า การคืบของคอนกรีตเกิดจาก การหดตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต การไหลของซีเมนต์เพสต์ (Viscous Flow) การไหลของผลึก (Crystalline Flow) ในวัสดุผสม และจากการซึมของน้ำจาก Gel เมื่อมีน้ำหนักภายนอกกระทำต่อคอนกรีต

พิจารณาก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกรับแรงกด P ตามรูปที่ 12.2 แท่งคอนกรีตจะหดตัวทันที โดยมีระยะหดตัวเริ่มแรก (Elastic Deformation) เป็น Δ_e เมื่อปล่อยให้แรงกด P ค้างเป็นเวลานานจะพบว่าแท่งคอนกรีตจะหดตัวเพิ่มอีกเป็นระยะ Δ_p ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (Creep)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะหดกับเวลาแสดงในรูปที่ 12.3



รูปที่ 12.2 *การคืบของคอนกรีตภายใต้แรงกด P*



รูปที่ 12.3 *ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหดตัวกับเวลา*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปัจจัยที่มีผลต่อการคืบ

1) ชนิดของปูนซีเมนต์

- การคืบจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่พัฒนากำลังอัดช้า

2) วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

- PFA และ GGBS จะช่วยลดการคืบ

3) น้ำยาผสมคอนกรีต

- Air Entraining มีแนวโน้มที่จะเพิ่มการคืบสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังเท่ากัน
- น้ำยาลดน้ำและลดน้ำจำนวนมาก การคืบจะใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป
- น้ำยาเร่งการก่อตัว มีแนวโน้มจะเพิ่มการคืบ

4) ชนิดของมวลรวม

- การคืบเกิดเนื่องจาก ซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นชนิดของมวลรวมมีผลต่อการคืบน้อย
- หินที่มีความแข็งมาก จะก่อให้เกิดการคืบน้อย

5) ปริมาณของมวลรวม

- ยิ่งใช้ปริมาณมวลรวมมาก การคืบจะยิ่งน้อย

6) อัตราส่วนของหน่วยแรงต่อกำลัง

- การคืบจะผันแปรโดยตรงต่ออัตราส่วนนี้ในทุก ๆ อายุ ของคอนกรีต

7) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

- สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่คงที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำลงจะส่งผลให้การคืบลดลง

8) อายุ ณ เวลารับน้ำหนัก

- สำหรับคอนกรีตที่กำหนดให้ การคืบจะลดลง เมื่ออายุของคอนกรีต ณ เวลารับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

9) ขนาดตัวอย่าง

- การเพิ่มขนาด จะก่อให้เกิดการลดลงของการคืบ ณ จุดที่ค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงต่อกำลังคงที่

10) ความชื้น

- ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง จะก่อให้เกิดการคืบที่ลดลง

11) อุณหภูมิ

- อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะก่อให้เกิดการคืบมากขึ้น

12.3 การหดตัว (Shrinkage)

การหดตัว คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีของส่วนผสม การหดตัวของคอนกรีตมี 4 ประเภท โดยมีรายละเอียดดังนี้

• Plastic Shrinkage

สาเหตุ :

การจมตัวลงของส่วนที่เป็นของแข็งในส่วนผสมและการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตสด

เวลาการเกิด :

ก่อนซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

ลักษณะ :

เกิดการแตกที่ผิวหน้าและจะลึกลงไปในเนื้อคอนกรีต โดยทั่วไปจะเกิดในคอนกรีตที่เทเป็นบริเวณกว้าง เช่น พื้น หรือถนนคอนกรีต

การป้องกัน :

1) ลดการสูญเสียน้ำ
2) เปลี่ยนสัดส่วนผสมเพื่อให้เกิดส่วนผสมที่ยึดเกาะกันดี
3) ไม่ควรทำการเขย่าซ้ำ (Revibration)

รูปที่ 12.4 *Plastic Shrinkage Crack*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• Autogenous Shrinkage

สาเหตุ :

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตร นั่นคือ ปริมาตรของสิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าปริมาตรของน้ำกับซีเมนต์ ที่ผสมกัน

เวลาการเกิด :

ในคอนกรีตที่ก่อตัวแล้ว

การป้องกัน :

เปลี่ยนสัดส่วนผสม คอนกรีตยิ่งเหลวมากจะเกิดการหดตัวประเภทนี้มาก

• Carbonation Shrinkage

สาเหตุ :

Free lime หรือคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังสมการ

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

จากปฏิกิริยานี้ จะก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตรของเพสต์และเกิดการหดตัว

การเกิด :

เกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผล :

1) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2) ความพรุนของเพสต์
3) ปริมาณความชื้น จุดที่เหมาะสมที่สุดคือ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ 50-60%

การป้องกัน :

1) ใช้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นมาก
2) เลือกสัดส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ
3) ทำการบ่มคอนกรีตที่ดี

• Drying Shrinkage

สาเหตุ :

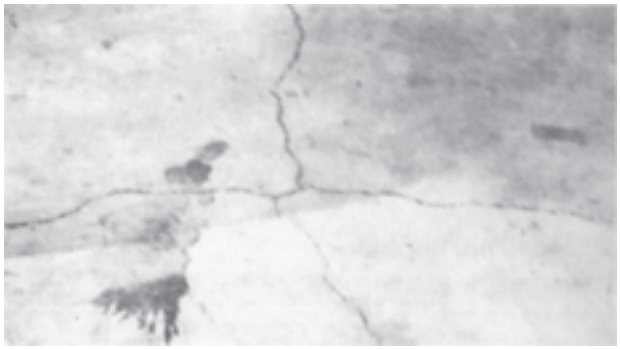
การสูญเสียน้ำทั้งจาก Capillary และจาก Gel Pore

การเกิด :

เกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว อัตราการหดตัวช่วงแรกจะสูงและส่วนใหญ่จะไม่สามารถคืนกลับได้ (Irreversible) แต่อัตราในช่วงหลังจะเกิดน้อยลง และเป็นประเภทที่กลับคืนได้ (Reversible)

การลดความเสี่ยงของการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวทำได้โดย

1) ลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม
2) ทำการบ่มให้เหมาะสมทั้งวิธีการและช่วงเวลา
3) ทำแนวต่อให้เหมาะสม
4) เลือกใช้ ปูนซีเมนต์ประเภท Shrinkage Compensate

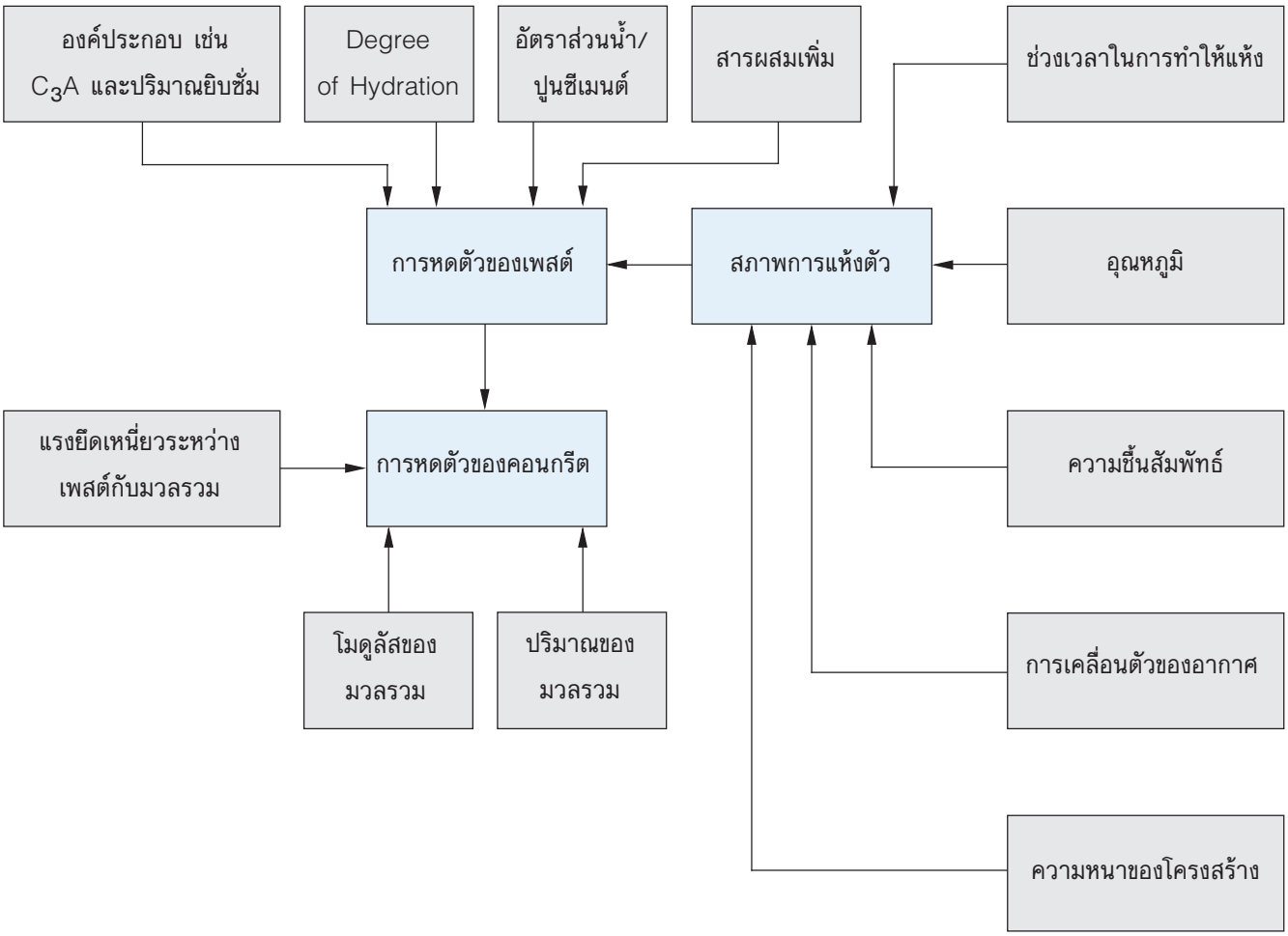


รูปที่ 12.5 *Drying Shrinkage Crack*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแสดงไว้ในรูปที่ 12.6



รูปที่ 12.6 *ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

12.4 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน (Thermal Movement)

คุณสมบัตินี้ นำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ เขื่อน หรือคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูงมากหรือต่ำมาก คุณสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

1) Thermal Conductivity คือ ความสามารถของคอนกรีต ที่จะนำความร้อน

หน่วย : $J/s/m^2$

ปัจจัยที่มีผลกระทบ :

1) ความหนาแน่นของคอนกรีต

2) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ยิ่งมีช่องว่าง (Air Void) มาก คอนกรีตจะนำความร้อนต่ำ เช่น คอนกรีตเบาที่มี Air Void สูง จะมีการนำความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานฉนวนความร้อน

2) Coefficient of Thermal Expansion

คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป

ปัจจัยที่มีผลกระทบ :

1) สัดส่วนผสม

2) ปริมาณความชื้นในคอนกรีต ณ ที่ความชื้น 60% จะมีการขยายตัวสูงสุด

3) คุณภาพและคุณสมบัติของมวลรวม

12.5 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

เราได้กล่าวมาทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ในหัวข้อนี้จะสรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 12.1

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

คุณสมบัติของคอนกรีต	วัตถุองค์ประกอบ			อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	การผสมคอนกรีต			การออกแบบและการก่อสร้าง
	ซีเมนต์	มวลรวม	น้ำยา		การเท	การบ่ม	การแต่งผิวหน้า	
กำลังอัดช่วงแรก	◯	◦	○	◯	◯	◯	○	○
กำลังอัดที่ 28 วัน	○	◦	◦	○	◯	○	○	○
โมดูลัสยืดหยุ่น	○	◯	◦	◯	◯	○	○	○
การหดตัว	◦	◯	○	○	◦	◯	◦	○
แนวโน้มการแตกร้าว	◦	○	○	○	○	◯	○	○
การคืบ	○	○	◦	◯	○	○	○	○
การก่อตัว	◯	○	◯	◯	◦	○	○	○
ความสามารถเทได้	◦	◯	○	○	○	○	○	○
การเยิ้ม	◯	◦	○	◯	◦	○	○	○
การต้านทานแรงเสียดสี	◦	◯	◦	◯	○	○	○	◦
การซึมผ่านของน้ำ	◦	○	○	◯	◯	○	○	○
การต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริม	○	◦	◦	○	○	○	◯	○
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	○	○	◦	○	○	○	◦	◯
รูปร่างและลักษณะผิว	◦	○	◦	◯	◯	○	◯	○
การนำความร้อน	○	◯	○	○	○	○	○	◦

ตารางที่ 12.1 *สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต*

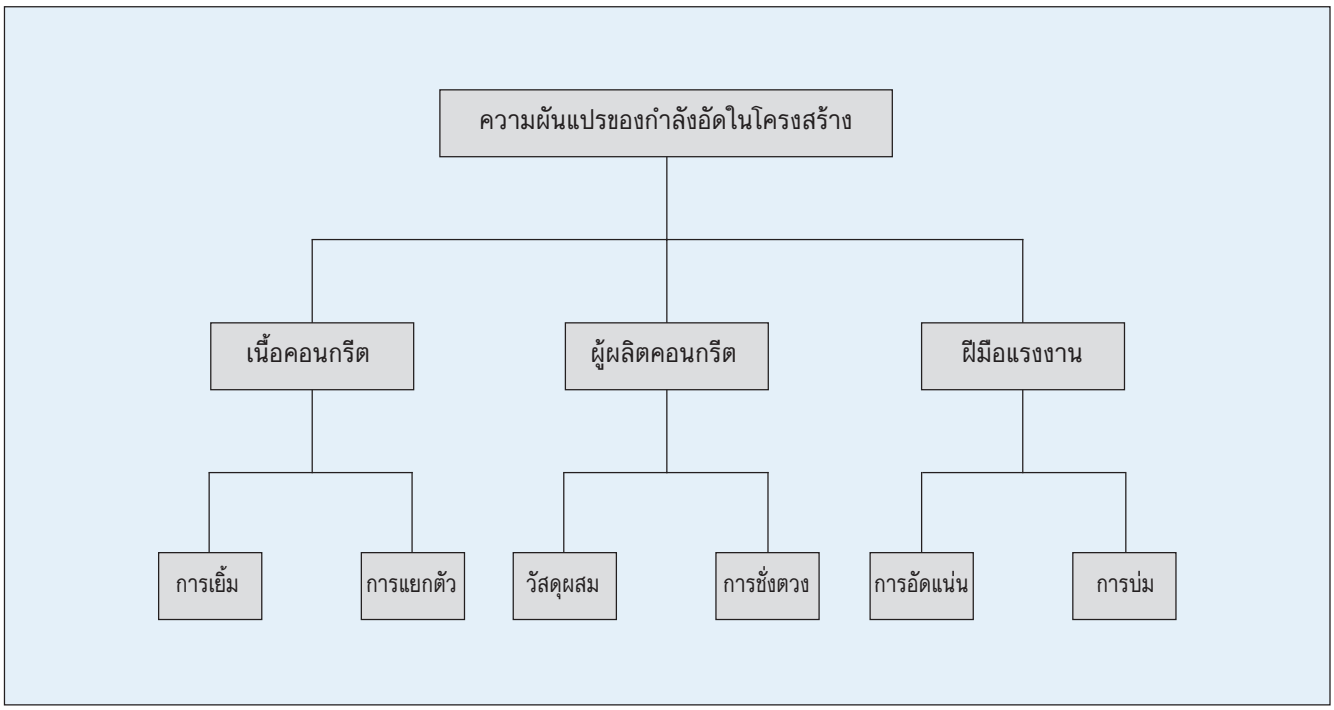
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 13
การผันแปรของกำลังอัดในโครงสร้าง

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคอนกรีต คือ ความสามารถต้านต่อแรงอัดหรือกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความผันแปรตลอดเวลา ถึงแม้ว่าจะนำคอนกรีตชุดเดียวกันที่ผสมเรียบร้อยมาทำก้อนตัวอย่าง และนำมาทดสอบที่อายุเดียวกัน ด้วยวิธีการที่เหมือนกันทั้งหมด จะพบว่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ได้นี้ จะมีค่าแตกต่างกัน ไม่มีผลทดสอบใดที่ได้ค่าเท่ากันพอดีเลย รวมทั้งถ้าเราแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็นส่วนย่อย ๆ กำลังอัดในแต่ละส่วนก็จะมีค่าแตกต่างกันไปด้วย

13.1 สาเหตุความผันแปรของกำลังอัด

ความผันแปรของกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง หรืออาจเป็นการผสมกันของหลาย ๆ สาเหตุ ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนผังรายละเอียดได้ดังรูปที่ 13.1



รูปที่ 13.1 *องค์ประกอบที่ทำให้เกิดความผันแปรของกำลังอัดในโครงสร้าง*

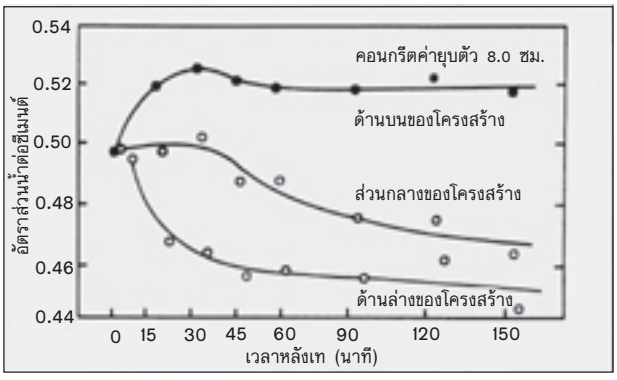
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

13.2 ความผันแปรเนื่องจากเนื้อคอนกรีต

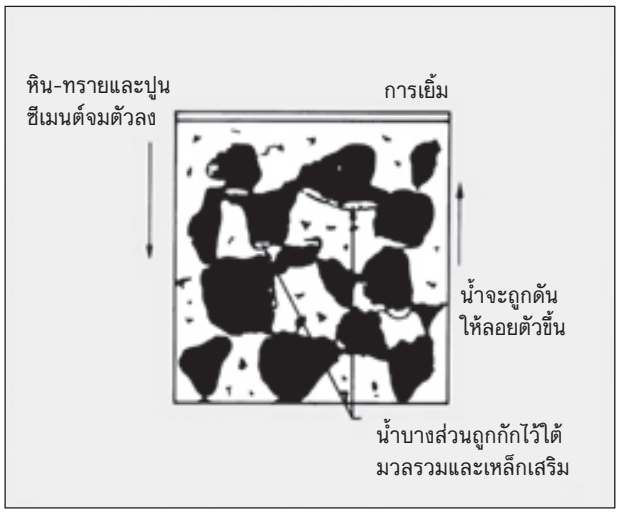
คอนกรีตเป็นวัสดุเนื้อผสมที่เกิดจากการนำปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยามาผสมกัน ในสภาพคอนกรีตสด หินที่อยู่ในส่วนผสมนั้นจะถูกพยุงไม่ให้เกิดการแยกตัวด้วยมอร์ต้า แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากแรงดึงดูดของโลก ไม่เพียงแต่ส่งผลให้หินทรายจมตัวลง แต่รวมไปถึงเม็ดปูนซีเมนต์ด้วย

หิน ทราย และเม็ดปูนซีเมนต์ จะจมตัวลงในเนื้อคอนกรีตสด จนกระทั่งแรงต้านทานการจมตัวมากกว่าน้ำหนักของหินทรายหรือเม็ดปูนซีเมนต์หรือเมื่ออนุภาคของหินทรายจมมาสัมผัสกันจนเป็นเครือข่าย ผลก็คือ น้ำซึ่งเบาที่สุดจะถูกดันขึ้นมาด้านบนเกิดการเยิ้ม (Bleeding) และน้ำบางส่วนจะถูกกักไว้ใต้มวลรวมหรือเหล็กเสริม เมื่อคอนกรีตแข็งตัว บริเวณเหล่านี้จะเกิดเป็นโพรงอากาศ (Air Pocket) และโพรงอากาศจะมากยิ่งขึ้น ถ้าคอนกรีตที่ใช้เกิดการแยกตัว (Segregation) ส่งผลให้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตมีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13.2 และรูปที่ 13.3

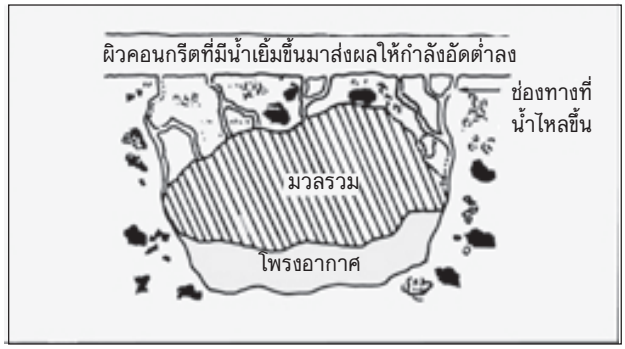
ผลจากการเคลื่อนตัวของน้ำขึ้นสู่ผิวบนนี้ ทำให้เกิดความผันแปรในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของส่วนผสม โดยด้านล่างของโครงสร้างจะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุดและจะสูงสุดที่ส่วนบน ดังแสดงในรูปที่ 13.4 นั่นคือ เกิดความไม่สม่ำเสมอในกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้าง



รูปที่ 13.4 *ความผันแปรของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตลอดช่วงความสูงของโครงสร้าง*



รูปที่ 13.2 *การจมตัวของหินทรายปูนซีเมนต์เป็นผลให้เกิดการเยิ้ม*



รูปที่ 13.3 *โพรงอากาศใต้มวลรวมและช่องทางที่น้ำไหลขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งส่งผลให้กำลังของคอนกรีตผันแปรไป*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

13.3 ความผันแปรเนื่องจากผู้ผลิตคอนกรีต

ความผันแปรเนื่องจากผู้ผลิตคอนกรีตมีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ

1. เนื่องจากวัสดุผสม
2. เนื่องจากการชั่งตวง

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าวัสดุผสมคอนกรีตส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติ ดังนั้นจึงเกิดความผันแปรในคุณสมบัติอยู่ตลอดเวลา เช่น ทรายผสมคอนกรีต จะมีขนาดคละและความละเอียดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่ง, กรรมวิธี, และ ช่วงเวลาที่ดูดขึ้นมาใช้ เป็นต้น นอกจากวัสดุผสมแล้ว คอนกรีตในโครงสร้างอาจผันแปรเนื่องจากการชั่งตวง ซึ่งอาจจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการควบคุมการผลิต รวมทั้งเทคนิคการขนส่ง และการลำเลียงคอนกรีตลงแบบ

ความผันแปรนี้จะไม่มีความสัมพันธ์กับชนิดของโครงสร้าง และโดยทั่วไปความผันแปรนี้จะถูกสมมุติว่ากระจายไปทั่วทั้งโครงสร้าง เป็นการยากที่จะวัดค่านี้ เพราะเราไม่สามารถแยกความผันแปรนี้ออกจากความผันแปรเนื่องจากวิธีการทำงาน ณ หน่วยงาน อันได้แก่การจี้เขย่าและการบ่ม แต่ก็สามารถวัดค่าได้โดยการพิจารณาความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดสอบก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 13.1 *แสดงระดับการควบคุมขบวนการผลิตคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI*

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของก้อนตัวอย่างมากกว่า 30 ตัวอย่าง (กก./ตร.ซม.)	ระดับการควบคุมขบวนการผลิตคอนกรีต
น้อยกว่า 28	ดีเลิศ
28-35	ดีมาก
35-42	ดี
42-49	พอใช้
มากกว่า 49	ใช้ไม่ได้

13.4 ความผันแปรเนื่องจากฝีมือแรงงาน

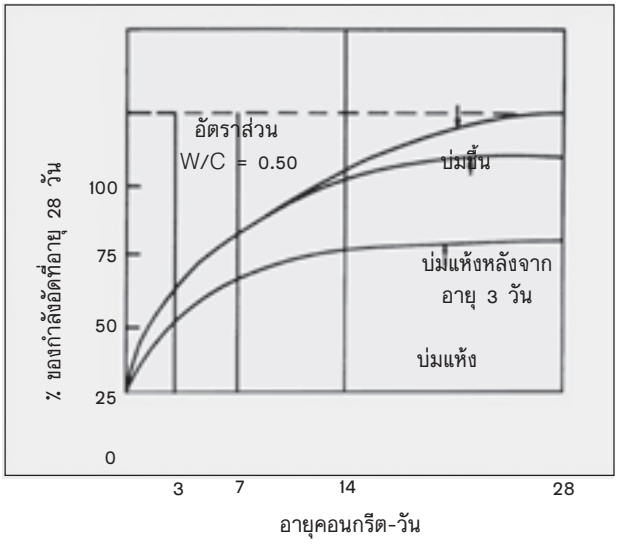
ความผันแปรนี้สืบเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ การจี้เขย่า และการบ่มคอนกรีต

• การจี้เขย่าคอนกรีตเข้าแบบ

วัตถุประสงค์ของการจี้เขย่า เพื่อทำให้คอนกรีตอัดแน่นและลดปริมาณฟองอากาศ แต่การจี้เขย่าคอนกรีตที่ไม่ถูกวิธีหรือบริเวณขอบ มุม ใกล้ ๆ ช่องเปิด หรือ ระหว่างเหล็กเสริมกับผิวคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตในโครงสร้างเกิดความผันแปรรวมทั้งในขณะจี้เขย่า มวลรวมมีแนวโน้มจะจมตัวลงดันน้ำให้ลอยตัวขึ้น ส่วนล่างหรือฐานของโครงสร้างจะถูกอัดแน่น เนื่องจากผลของ Hydrostatic ซึ่งสัมพันธ์กับความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้าง ก่อให้เกิดความผันแปรของกำลังอัด ตั้งแต่ฐานถึงส่วนบนของโครงสร้าง

• การบ่ม

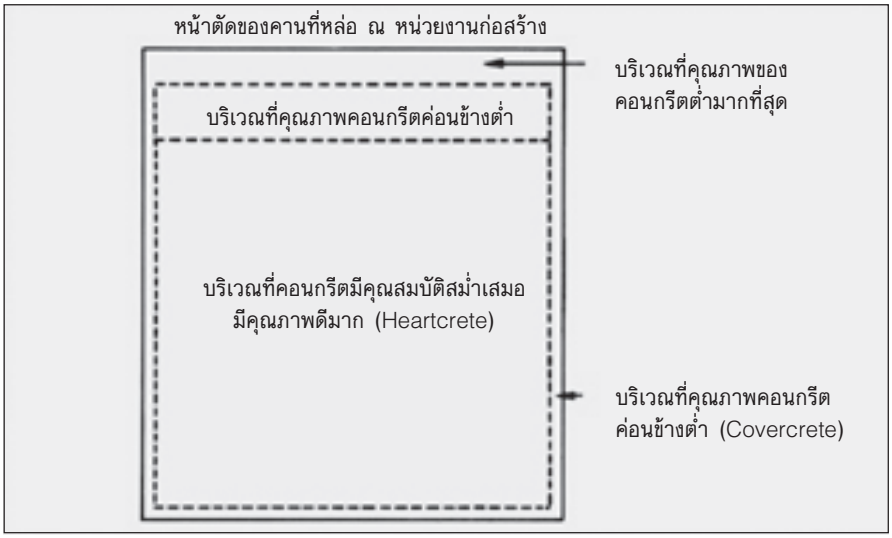
การบ่ม คือการป้องกันน้ำในคอนกรีตไม่ให้ระเหยออกไป เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีปริมาณน้ำเพียงพอ เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นดำเนินไปอย่างสมบูรณ์โดยทั่วไปน้ำและความชื้นจากผิวคอนกรีตจะเริ่มระเหยทันทีทันใด หลังจากการเทคอนกรีต และจะดำเนินต่อไปอีกหลายวัน ถ้าไม่มีการบ่มคอนกรีตที่เพียงพอ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดไม่สมบูรณ์ ผลที่ตามมาคือ การพัฒนากำลังอัดจะไม่ดี ดังแสดงในรูป 13.5



รูปที่ 13.5 *ผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

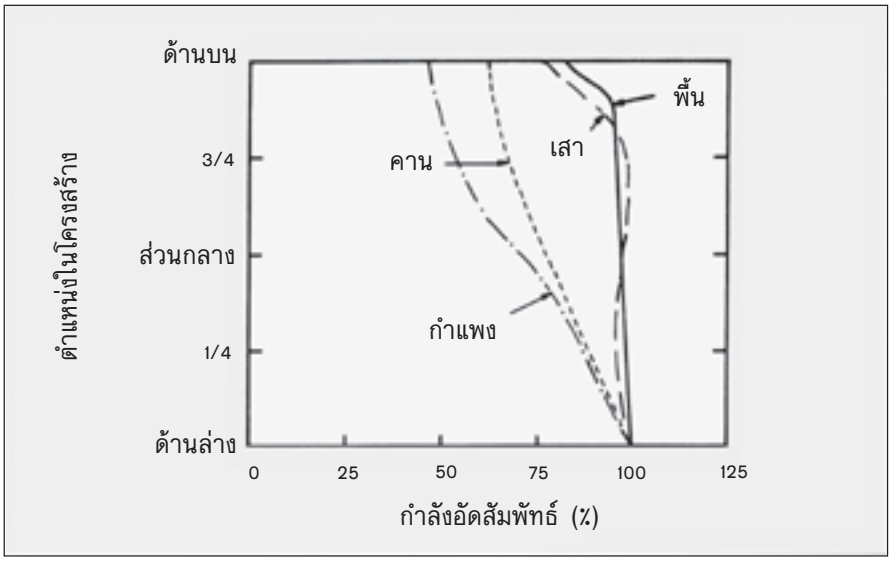
ผลจากการจี้เขย่าและการบ่มคอนกรีตส่งผลให้เกิดความผันแปรของกำลังอัดระหว่างผิวและด้านในของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 13.6



รูปที่ 13.6 *แสดงความผันแปรของคุณภาพคอนกรีต*

13.5 ตัวอย่างแสดงความผันแปรของกำลังอัดในโครงสร้าง

ความผันแปรของกำลังอัดในชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถแสดงออกมาได้ดังรูปที่ 13.7



รูปที่ 13.7 *กำลังสัมพัทธ์ในโครงสร้าง*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

เสา

การจี้เขย่าทำให้คอนกรีตอัดแน่นในเสา เป็นประเด็นหลักที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผันแปรไป คอนกรีตที่ระดับต่ำหรือด้านล่างของเสาจะถูกอัดแน่นด้วยน้ำหนักของคอนกรีตด้านบน น้ำจะถูกผลักขึ้นไปด้านบนทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดในส่วนบนจึงลดลง

กำแพง

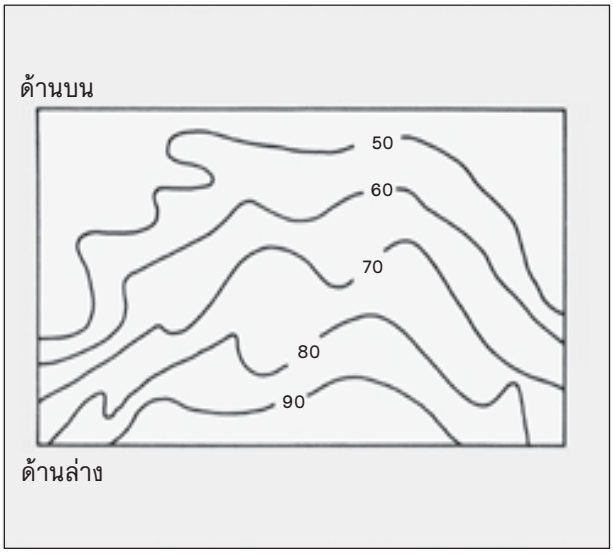
กำลังอัดตลอดความสูงของกำแพงจะมีความแตกต่างกันมากกว่าในโครงสร้างเสา ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาในการเทและจี้เขย่าคอนกรีตเข้าแบบ การบ่มจะมีผลทำให้กำลังอัดตลอดความสูงของโครงสร้างผันแปรไปน้อยทั้งในโครงสร้างเสาและกำแพง

พื้น

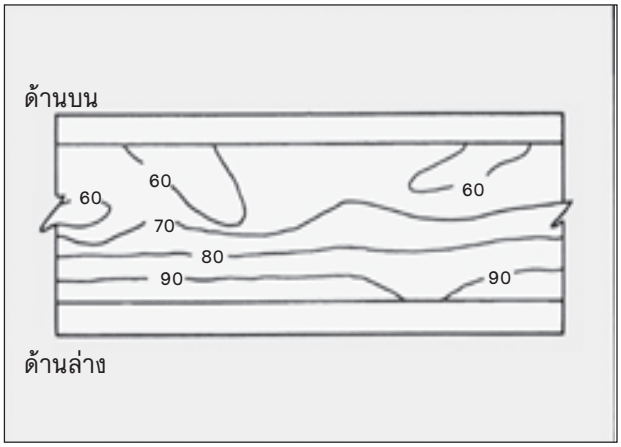
ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกันในพื้น คือ การบ่ม เนื่องจากพื้นเป็นโครงสร้างที่บาง น้ำจะระเหยออกจากพื้นผิวไปโดยเร็ว และการเกิดการเยิ้มทำให้ส่วนบนของพื้นกำลังอัดต่ำกว่าบริเวณอื่น

คาน

กำลังอัดภายในคานผันแปรเกือบเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของคาน กำลังอัดเฉลี่ยด้านบนจะมีค่าประมาณ 60% ของกำลังอัดที่ด้านล่างของคาน ปัจจัยที่ทำให้กำลังอัดแตกต่าง คือ ปัญหาจากการเทและการจี้เขย่าคอนกรีตเข้าแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่คานมีเหล็กเสริมหนาแน่น



รูปที่ 13.8 *เส้นระดับแสดงร้อยละสัมพัทธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างกำแพง*



รูปที่ 13.9 *เส้นระดับแสดงร้อยละสัมพัทธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างคาน*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 14
ความทนทานของคอนกรีต

เมื่อกล่าวถึงคอนกรีต กำลังอัด เป็นคุณสมบัติประการแรกและประการสำคัญที่ผู้ออกแบบ ผู้ควบคุมงานก่อสร้างและผู้รับเหมา คำนึงถึง รวมทั้งข้อกำหนดสำหรับงานก่อสร้างต่าง ๆ ล้วนระบุถึงกำลังอัดคอนกรีตของโครงสร้างที่ออกแบบไว้ แต่คุณสมบัติที่สำคัญมากที่มักจะถูกมองข้ามนั้นคือ ความทนทาน (Durability)

ความทนทานของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่งซึ่งหมายถึง ความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม ทนต่อการทำลายจากสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกหรือการกระทำอื่น ๆ ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น

คอนกรีตที่ทนทานจะต้องคงสภาพได้นานตลอดอายุการใช้งาน สิ่งก่อสร้างคอนกรีตจำนวนมากที่ถูกออกแบบและก่อสร้างโดยไม่คำนึงถึงความทนทาน จึงส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากในปัจจุบัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจำนวนมหาศาลในการซ่อมแซมรวมทั้งอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้างนั้นก็ลดลงด้วย

ต้นเหตุที่ทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน และเกิดความเสียหาย สามารถสรุปได้ 3 ประการใหญ่ ๆ คือ

1) สาเหตุด้านกายภาพ (Physical)
2) สาเหตุด้านเคมี (Chemical)
3) สาเหตุด้านกล (Mechanical)

รายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้จะกล่าวในบทที่ 15

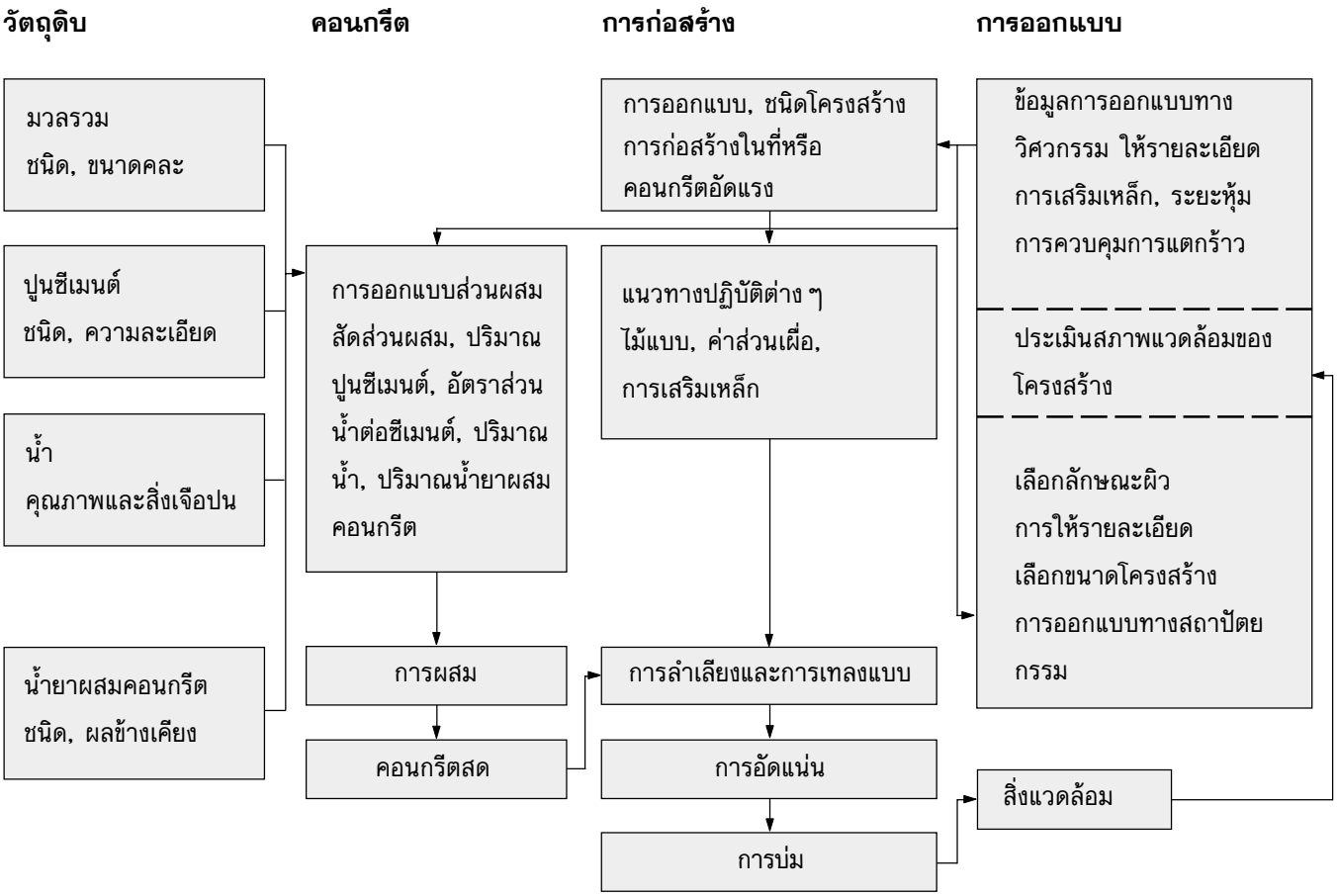
นอกจากตัวคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานแล้ว การที่จะได้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความทนทานจะต้องอาศัยองค์ประกอบอื่น ๆ อีกตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างจนถึงการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) การออกแบบที่ดี
2) ข้อกำหนดที่เหมาะสม
3) การก่อสร้างที่ดี
4) การบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ

ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแผนภาพรูปที่ 14.1 และจะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 16

ในบทนี้ขอกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อความทนทานของคอนกรีตนั่นคือ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต (Permeability) และขบวนการซึมผ่านของน้ำ ความชื้น และอากาศสู่คอนกรีต

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 14.1 *ปัจจัยที่มีผลต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีต*

14.1 ความสามารถซึมผ่านได้ (Permeability)

ความสามารถซึมผ่านของน้ำ คือ ความสะดวกหรือง่ายซึ่งของเหลวหรือก๊าซ สามารถซึมผ่านคอนกรีต คุณสมบัตินี้จะเป็นตัวชี้บ่งว่าคอนกรีตในโครงสร้างนั้น ๆ จะทนทานมากน้อยเพียงใด

ถึงแม้ว่าจะไม่มีการกำหนดวิธีการทดสอบ แต่ความสามารถซึมผ่านของน้ำ สามารถวัดได้โดยใช้น้ำที่มีความดัน ดันผ่านคอนกรีตเมื่อถึงสภาพที่คอนกรีตอิ่มตัวน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตนั้นออกมา ทำการวัดปริมาณน้ำนี้ในช่วงเวลาหนึ่ง รวมทั้งวัดความหนาของคอนกรีต โดยความสามารถซึมผ่านของน้ำจะถูกแสดงออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ดังสมการของ

Darcy

$$\frac{dq}{dt} = \frac{k\Delta hA}{L}$$

$\frac{dq}{dt}$ คือ อัตราการไหลของน้ำ

A คือ ขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง

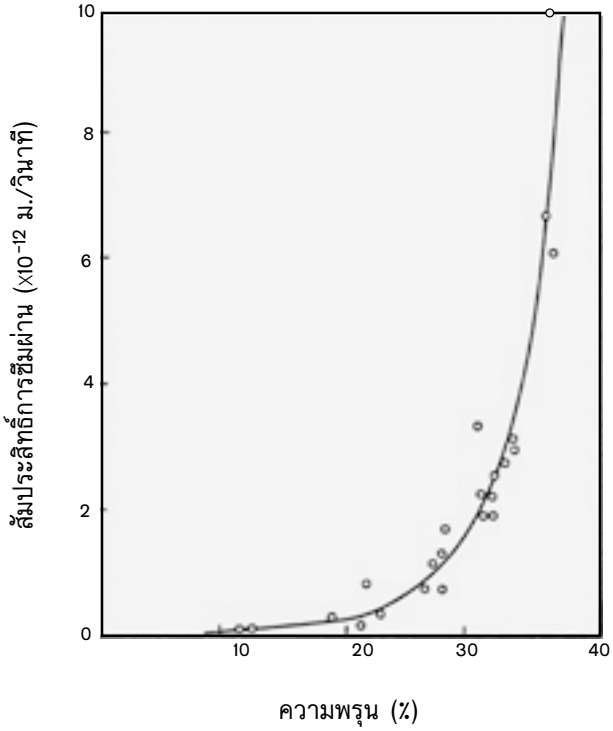
Δh คือ การลดลงของ Hydraulic head

L คือ ความหนาของก้อนตัวอย่าง

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีหน่วยเป็น ม./วินาที

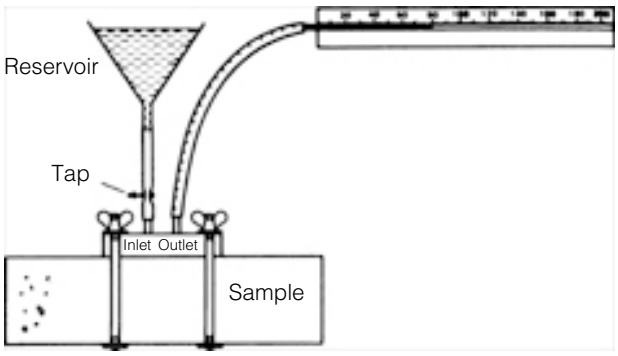
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ในรูปที่ 14.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และความพรุนภายในเนื้อคอนกรีต



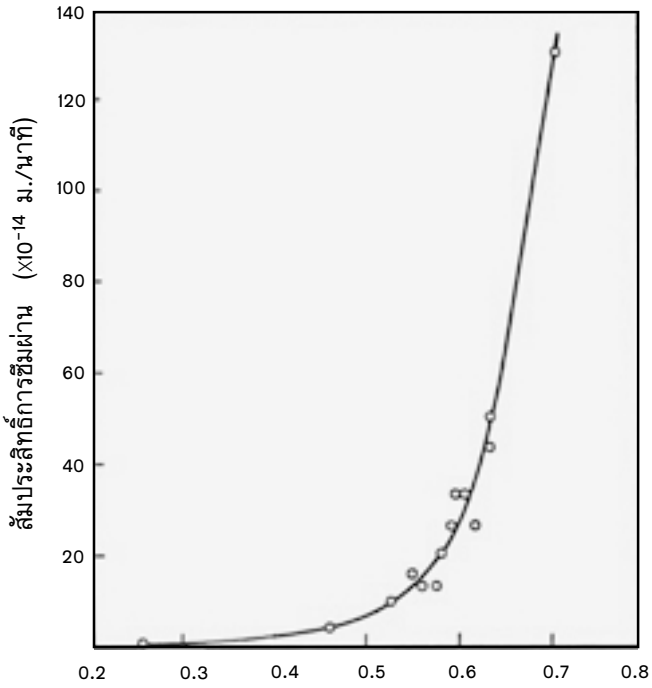
รูปที่ 14.2 *ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับความพรุนของคอนกรีต*

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบมาตรฐานของประเทศอังกฤษ คือ การทดสอบการดูดซึมน้ำของผิวคอนกรีต (Initial Surface Absorption) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำเข้าไปในคอนกรีตต่อหน่วยพื้นที่ภายในเวลาที่กำหนด



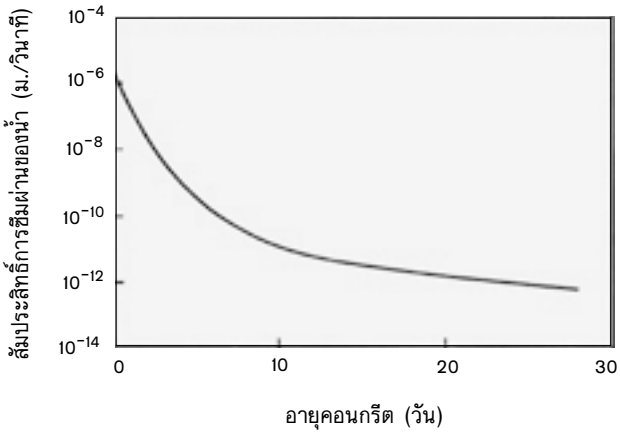
รูปที่ 14.3 *เครื่องทดสอบ การดูดซึมน้ำของผิวคอนกรีต*

สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินทั่ว ๆ ไป ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จะถูกควบคุมโดยความพรุนของซีเมนต์เพสต์โดยความพรุน (Capillary Porosity) จะมากน้อยขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Degree of Hydration) รูปที่ 14.4 แสดงให้เห็นว่า ณ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่กำหนด ความสามารถซึมผ่านได้จะต่ำสำหรับเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ W/C ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งช่องทางไหลของน้ำ (Capillary) จะถูกแบ่งหรือทำให้แยกออกไม่ต่อเนื่องกัน ในส่วนผสมที่กำหนด W/C ให้ความสามารถซึมผ่านจะลดลงถ้าปูนซีเมนต์มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 14.5



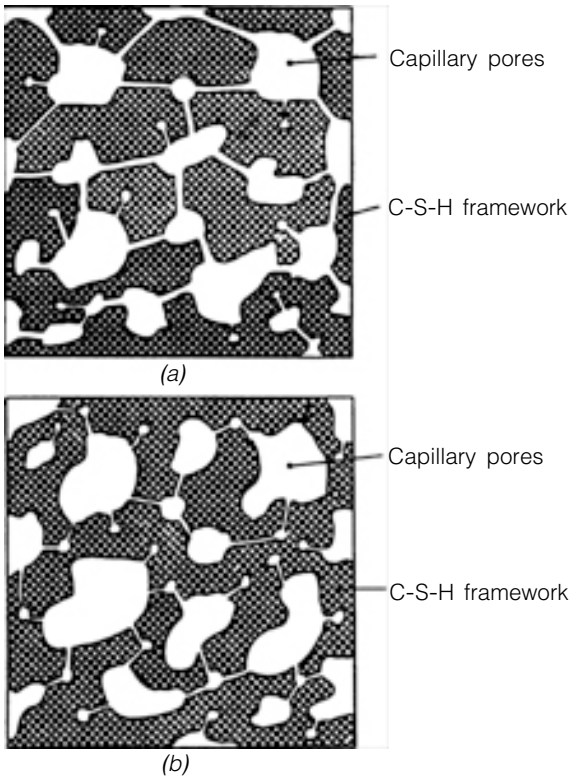
รูปที่ 14.4 *ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 14.5 *ความสามารถซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสมบูรณ์ขึ้น*

การสามารถซึมผ่านของน้ำไม่ใช่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความพรุนของเนื้อคอนกรีต ในรูปที่ 14.6 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตทั้ง 2 มีความพรุนเท่ากัน แต่มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำแตกต่างกัน



รูปที่ 14.6 *คอนกรีตที่มีความพรุนเท่ากัน แต่*
(a) การซึมผ่านของน้ำสูง - เนื่องจาก Capillary Pore เชื่อมต่อกัน
(b) การซึมผ่านของน้ำต่ำ - เนื่องจาก Capillary Pore แยกจากกัน

จะเห็นได้ว่าเฉพาะ Capillary Pore ที่เชื่อมกันจะก่อให้เกิดการซึมผ่านของน้ำสูงในขณะที่ความพรุนเท่ากันดังรูป 14.6

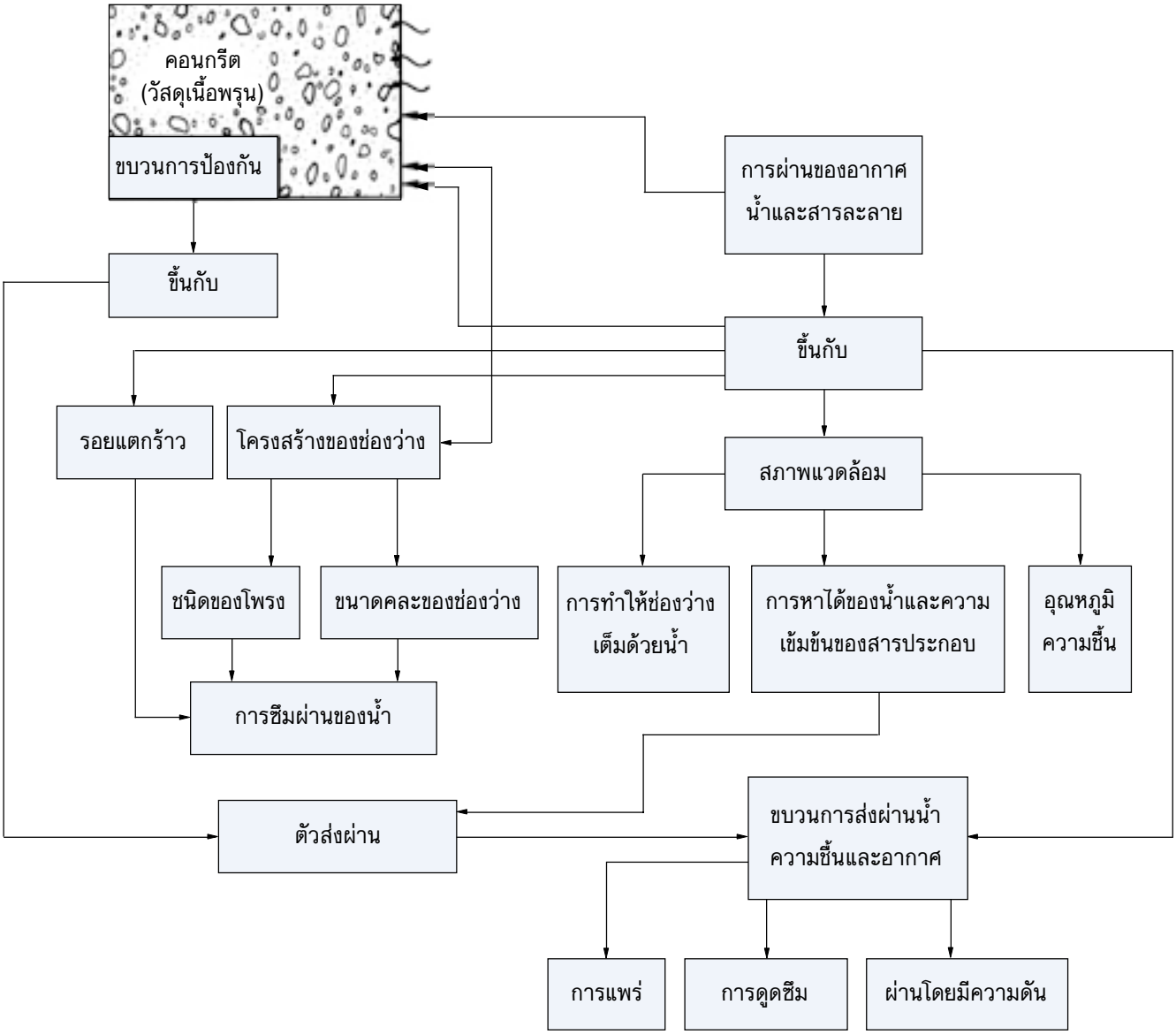
เมื่อพิจารณาในเรื่อง ความทนทาน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้คอนกรีตเกิดความสามารถซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ (Low Permeability) ในเวลาที่เร็วที่สุด นั่นคือ ควรเลือกใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก

นอกจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แล้ว การทำให้คอนกรีตอัดแน่น และการบ่มยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมาก ที่จะทำให้การซึมผ่านของน้ำต่ำ ช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานสูงขึ้น

14.2 ขบวนการซึมผ่านของน้ำ ความชื้น และอากาศ

ขบวนการที่ทำให้คอนกรีตเสียหาย หรือขาดความทนทาน ส่วนใหญ่มาจากการที่น้ำ ความชื้นหรืออากาศซึมผ่านช่องว่างที่ต่อเนื่อง หรือรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยทั้งน้ำและอากาศที่ซึมผ่านนี้จะนำพาสารที่เป็นอันตรายเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เมื่อมีปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหาย ขบวนการซึมผ่านของน้ำ สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 14.7

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 14.7 *ขบวนการซึมผ่านของน้ำ ความชื้น และอากาศ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 15
ความเสียหายของคอนกรีต

คอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ อาจเกิดความเสียหายหรือขาดความทนทาน อันเนื่องจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องไม่เหมาะสม ความเสียหายอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงเวลาหนึ่งและความเสียหายนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุภายใน หรือภายนอกเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 สาเหตุคือ

สาเหตุด้านกายภาพ Physical เช่น ความเสียหายเนื่องจาก ความร้อน น้ำหนักบรรทุกมากเกินไป เป็นต้น

สาเหตุด้านเคมี Chemical เช่น มีการซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเหล็กเสริม

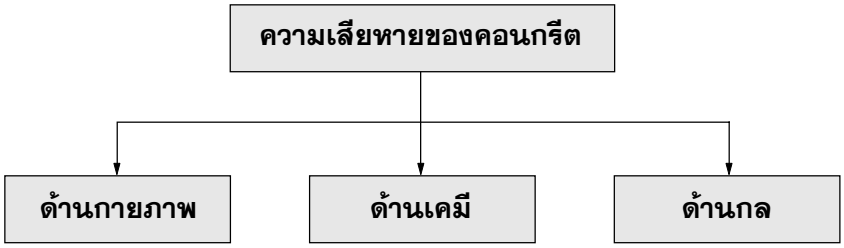
สาเหตุด้านกล Mechanical เช่น การเสียดสีจนเกิดความเสียหาย

ขอบเขตของความเสียหายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฉพาะที่มาเกี่ยวข้องอันได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อมเป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงต้นเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดความเสียหายของคอนกรีต รวมทั้งวิธีการป้องกันที่เหมาะสมเพื่อลดความเสียหาย เพื่อให้สะดวกและง่าย ปัจจัยหรือสาเหตุต่าง ๆ ทั้ง 3 นี้ จะถูกแยกพิจารณา แต่ในทางปฏิบัติคอนกรีตอาจจะถูกกระทบจากปัจจัยเพียงหนึ่งสองหรือทั้งสามก็เป็นได้ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาในทางปฏิบัติ อาจจำเป็นต้องพิจารณาผลโดยรวม

15.1 สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเสียหาย

สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายสามารถจำแนกออกได้ ดังรูป



- ความเสียหายโดยน้ำแข็ง
- ความเสียหายโดยความร้อนและไฟ
- ความเสียหายโดยการเปียกและแห้งสลับกัน
- ความเสียหายโดยน้ำหนักบรรทุก
- ความเสียหายโดยความล้า
- ความเสียหายโดยอุบัติเหตุ

- การกัดกร่อนโดยซัลเฟต
- การกัดกร่อนโดยกรด
- ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับหิน
- น้ำทะเล
- คาร์บอนไดออกไซด์
- การกระทำของแบคทีเรีย
- คลอไรด์
- การกัดกร่อนเหล็กเสริม

- การเสียดสี Abrasion
- Erosion
- Cavitation

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

15.2 สาเหตุด้านกายภาพ (Physical Causes of Deterioration)

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอนกรีตเสียหายด้านกายภาพส่วนใหญ่มาจาก "แรงดึง" (Tensile Stress) ที่กระทำต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว และสุดท้ายจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนโครงสร้างลดลง ในบทนี้จะอธิบายถึงสาเหตุสำคัญ ๆ บางประการเท่านั้น

ความเสียหายโดยน้ำแข็ง

ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะอยู่ในเขตร้อนแต่ในบางกรณีที่ความเย็นจัดหรือน้ำแข็งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตได้ เช่น ในกรณีการก่อสร้างห้องเย็น สำหรับการแช่แข็งสัตว์น้ำเป็นต้น ซึ่งผู้ออกแบบควรจะกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เมื่อน้ำแข็งตัวเป็นน้ำแข็งนั้นปริมาณจะเพิ่มขึ้นประมาณ 9% ถ้าหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจากการขยายตัวน้อยกว่า แรงดึงของคอนกรีต การขยายตัว (Elastic Volume) ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเมื่อไรหน่วยแรงที่เกิดจากการขยายตัวมากกว่าแรงดึงของคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรถาวร และเกิดการแตกร้าว แนวทางแก้ไขก็คือ เพิ่มปริมาณฟองอากาศ (Entrained Air) ขนาด 0.2-0.5 มม. โดยการใส่สารกักกระจายฟองอากาศเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อปริมาตรของน้ำเพิ่มความดันหรือแรงดันจะถูกทำให้ลดน้อยลงโดยน้ำจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในฟองอากาศเหล่านี้ การแตกร้าวจึงไม่เกิดขึ้น

การใส่น้ำยาประเภท Air Entraining นี้โดยทั่วไปจะเพิ่มฟองอากาศเป็น 3-5% ถ้าใส่น้ำยามากเกินไปปริมาณฟองอากาศที่เกิดมากก็จะก่อให้เกิดผลเสีย คือ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงอย่างมาก ทุก ๆ 1% ของฟองอากาศที่เกิน 5% นี้ จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตตกประมาณ 5% นอกจากการเพิ่มฟองอากาศแล้วควรเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพราะแรงดึงของคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังอัด และควรเลือกใช้หินที่มีขนาดเล็ก ที่มีขนาดคละดี หินขนาดใหญ่หรือหินที่มีรูปร่างแบน ๆ ไม่ควรนำมาใช้เพราะจะก่อให้เกิดกะเปาะน้ำใต้หิน

ความเสียหายโดยความร้อนหรือไฟ

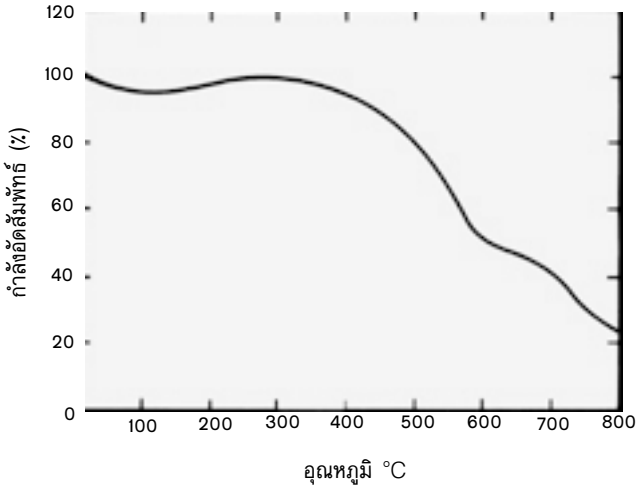
คอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ และมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการต้านทานความร้อนและไฟคือ เมื่อถูกไฟ คอนกรีตจะคงสภาพอยู่ได้อย่างเป็นที่น่าพอใจในช่วงเวลาหนึ่ง แต่เมื่อเวลายาวนานพออุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตจะแตกต่างกันมาก ผลที่เกิด คือ การแตกร้าวและการแตกร่อน (Spalling) และจะเกิดการเสียหายอย่างมากในช่วงเวลาต่อมารวมทั้งกำลังจะสูญเสียด้วย เนื่องจากเกิด Dehydrate ในซีเมนต์เพสต์

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ การขยายตัวนี้จะถูกชดเชยด้วยการหดตัว (Shrinkage) ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำถูกขับออกจากเพสต์ ในช่วงต้นการขยายตัวเนื่องจากความร้อน มากกว่าการหด (Drying Shrinkage) แต่ในช่วงหลังการหดตัวของเพสต์จะมากกว่าการขยายตัว เนื่องจากความร้อนผลคือ เพสต์จะหดตัว แต่ หิน-ทรายจะเริ่มขยายตัว ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ก่อให้เกิดแรงดึง ในคอนกรีต จะเกิดการแตกร้าวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเพสต์กับหิน จะลดน้อยลงดังนี้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงด้วยดังแสดงในรูปที่ 15.1

การ Dehydrate ของเพสต์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 800-900°C แต่บางกรณี การ Dehydrate เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิเพียง 500°C ถ้าคอนกรีตนี้สัมผัสกับอุณหภูมินี้เป็นเวลานาน เมื่อมีการ Dehydrate ไม่เพียงแต่กำลัง แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงด้วย

ผลของอุณหภูมิที่สูงจะกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยเป็นอิสระต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.40-0.65 คอนกรีตที่ใช้ปูนน้อยจะเสียหายน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนมากและถ้าต้องการให้คอนกรีตทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ได้เป็นเวลานาน ผู้ออกแบบควรเลือกใช้ ปูนซีเมนต์ประเภท High Alumina Cement เลือกใช้หินที่มีอัตราการขยายตัวต่ำเมื่อถูกความร้อน และออกแบบให้ระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering) ที่มากพอ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 15.1 *ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของคอนกรีต*

ความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุก

อาจจำแนกออกได้เป็น 3 สาเหตุ คือ

1) การบรรทุกเกินน้ำหนัก (Over Loading)

2) การกระแทก (Impact) จากน้ำหนักบรรทุก หรืออุบัติเหตุ

3) ความล้าจากน้ำหนักบรรทุกหมุนเวียน (Cyclic Loading)

ความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุก โดยทั่วไปจะทำให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าว หรือผิวคอนกรีตเกิดการแตกร่อน สารเคมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น จะเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมก่อให้เกิดความเสียหายมากยิ่งขึ้น

15.3 สาเหตุด้านเคมี (Chemical Causes of Deterioration)

ความเสียหายอันเกิดจากสาเหตุด้านเคมีมีหลายประการและความรุนแรงของแต่ละกรณีจะแตกต่างกัน ขอบเขตความเสียหายจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก คือ สารที่เข้ามาเกี่ยวข้องและคุณภาพของคอนกรีตในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะต้นเหตุที่สำคัญบางประการที่ควรทราบและหาทางป้องกัน

ความเสียหายโดยซัลเฟต

- **ซัลเฟตที่ละลายน้ำเท่านั้นที่จะทำอันตรายต่อคอนกรีต**

โดยธรรมชาติซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำไม่เท่ากัน กล่าวคือ

1) คัลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร

2) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร

3) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร

จะเห็นได้ว่า แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) มีความสามารถละลายน้ำได้มากกว่า $CaSO_4$ ถึง 250 เท่านั้น คือจะทำอันตรายคอนกรีตได้มากกว่าด้วย

- **ลักษณะการสัมผัสของซัลเฟตและคอนกรีต**

การสัมผัสของซัลเฟตกับคอนกรีตแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1) สภาพอยู่นิ่ง (Static) เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟตกับองค์ประกอบทางเคมีในปูนซีเมนต์แล้ว ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดสมดุลย์

2) สภาพเคลื่อนไหว (Flowing) ปฏิกิริยาจะเกิดอยู่ตลอดเวลา เพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาสิ่งที่เกิดจะถูกชะล้างไป และมีซัลเฟตเข้ามาใหม่ตลอดเวลาจะไม่ถึงจุดสมดุลย์ในกรณีนี้เช่น โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน ณ ระดับน้ำ เป็นต้น

- **ขบวนการกัดกร่อนโดยซัลเฟต**

ซัลเฟตจะกัดกร่อนและทำอันตรายต่อเพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะไม่ทำอันตรายต่อมวลรวมโดยปฏิกิริยาจะเกิดกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) และ Calcium Aluminate - Hydrate (CAH) ก่อให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite (Calcium Sulphoaluminate) ก่อให้เกิดการขยายตัวในที่สุด คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว

สมการปฏิกิริยาเคมีของ Na_2SO_4 และ $MgSo_4$ สามารถแสดงได้ดังนี้

- **ความเสียหายเนื่องจาก Na_2SO_4**

1) $Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 \longrightarrow$ ยิปซั่ม + NaOH

$Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต ก่อให้เกิดยิปซั่ม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2) $CAH + Na_2SO_4 \longrightarrow$ Ettringite + NaOH

CAH จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตก่อให้เกิด Ettringite

3) ยิปซั่ม + CAH $\longrightarrow$ Ettringite + $Ca(OH)_2$

ยิปซั่มที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 1 ทำปฏิกิริยากับ CAH ก่อให้เกิด Ettringite เพิ่มเติม

Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O.$

CAH : $3CaO.Al_2O_3.6H_2O.$

ยิปซั่ม : $CaSO_4.2H_2O.$

จากปฏิกิริยา

1) $Ca(OH)_2$ เปลี่ยนเป็น ยิปซั่มปริมาตรเพิ่มขึ้น 2.2 เท่า

2) CAH เปลี่ยนเป็น Ettringite ปริมาตร เพิ่มขึ้น 2.0 เท่า

จะพบว่าปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างมากส่งผลให้เกิดความแตกร้าว

- **ความเสียหายเนื่องจาก $MgSO_4$**

1) $Ca(OH)_2 + MgSO_4 \longrightarrow$ ยิปซั่ม + $Mg(OH)_2$

$Ca(OH)_2$ จากการปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตก่อให้เกิดยิปซั่ม

2) $CAH + MgSO_4 \longrightarrow$ Ettringite + $Mg(OH)_2$

CAH จากปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลฟตก่อให้เกิด Ettringite

3) ยิปซั่ม + CAH $\longrightarrow$ Ettringite + $Ca(OH)_2$

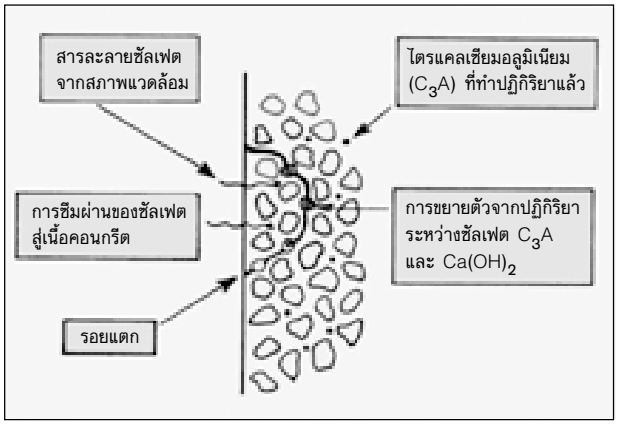
ปฏิกิริยาที่ 1) และ 2) ก่อให้ PH ของสารละลายลดลง ซึ่งส่งผลให้เกิดการไม่อยู่ตัวของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) โดยจะเกิดการสลายตัว

4) $CSH \longrightarrow SiO_2(aq) + Ca(OH)_2$

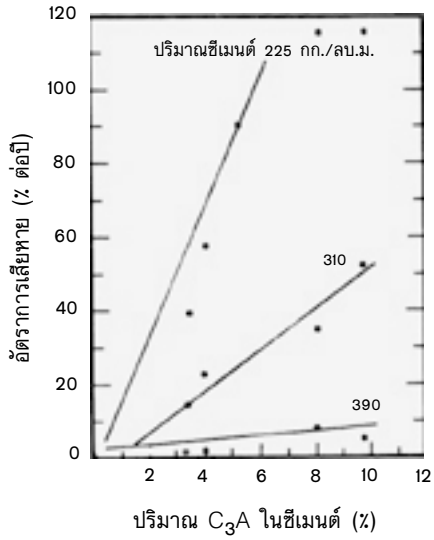
จากสมการที่ 4 จะพบว่า $Ca(OH)_2$ นี้จะทำปฏิกิริยากับ M_gSO_4 ก่อให้เกิดการสลายตัวของ CSH มากขึ้น

5) $SiO_2(aq) + Mg(OH)_2 \longrightarrow$ Magnesium Silicate Hydrate (MSH)

MSH นี้ไม่ใช่ตัวที่จะก่อให้เกิดการประสาน ดังนั้นจะพบว่า M_gSO_4 นี้จะก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงมากกว่า Na_2SO_4



รูปที่ 15.2 *แสดงความเสียหายของคอนกรีตจากซัลเฟต*



รูปที่ 15.3 *ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ C_3A กับอัตราการเสียหายที่ปริมาณซีเมนต์ในช่วงผสมต่าง ๆ*

- **ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน**

การกัดกร่อนของซัลเฟตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) ปริมาณ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในซีเมนต์

2) ปริมาณ ปูนซีเมนต์

ทั้ง 2 ปัจจัยนี้แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 15.3

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า

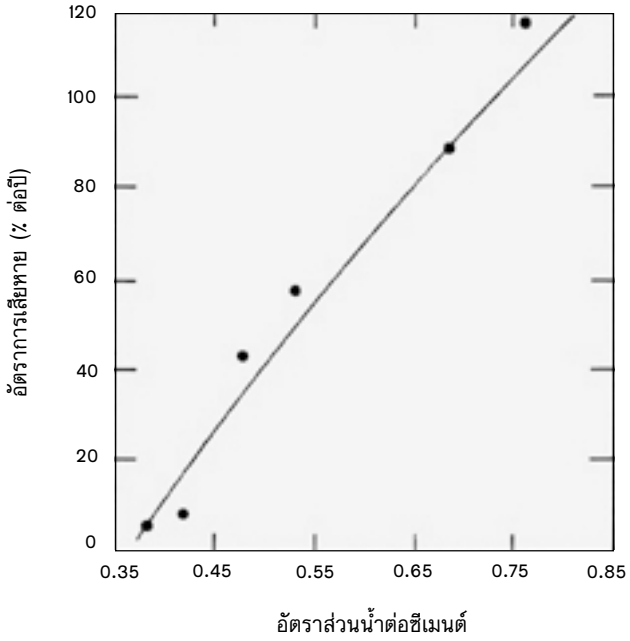
1) อัตราการเสียหาย จะผันแปรโดยตรงกับปริมาณ C_3A ในซีเมนต์ยิ่งมี C_3A มากเท่าใดอัตราการเสียหายจะมากขึ้นเท่านั้น

2) ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณ C_3A ต่ำเท่าใดก็จะไม่มีผลต่อการป้องกันความเสียหายในกรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมต่ำ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

คอนกรีตจะยิ่งมีอัตราเสียหายมาก เมื่อใช้ส่วนผสมที่ดีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง



รูปที่ 15.4 *ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับอัตราการเสียหายจากซัลเฟต*

- **การป้องกันความเสียหาย**

1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต) ซึ่งมีปริมาณ C_3A ไม่มากกว่า 5%

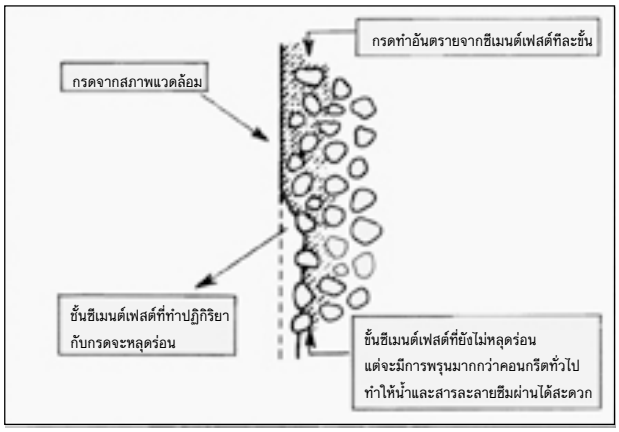
2) ใช้ Pulverized Fuel Ash หรือ Slag ผสมเพื่อ

- ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$
- ทำให้คอนกรีตแน่นลดการซึมผ่านของน้ำ

3) ในกรณีที่โครงสร้างต้องสัมผัสกับซัลเฟตที่รุนแรงอาจต้องใช้วิธีการเคลือบผิวคอนกรีตเพื่อป้องกันโครงสร้าง

ความเสียหายโดยกรดต่าง ๆ

คอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทุกประเภท จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด โดยกรดจะกัดกร่อนซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 15.5 ตามข้อกำหนดถ้าคอนกรีตที่ต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดคือ มี PH 6 หรือต่ำกว่า ผู้ออกแบบควรเลือกกำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ที่ไม่ใช่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เช่น High Alumina ซีเมนต์ หรือ Supersulphate ซีเมนต์ นอกจากนี้ ถ้าสภาพแวดล้อมมี PH ต่ำกว่า 4 ควรป้องกัน คอนกรีตโดยการเคลือบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และจำเป็นต้องเลือกใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมาะสมมีเนื้อแน่นมากโดยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่ควรเกิน 0.50



รูปที่ 15.5 *ความเสียหายของคอนกรีตจากกรด*

การเสียหายจากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับหิน (Alkali Aggregate Reaction)

ปฏิกิริยาระหว่างด่างที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กับแร่ธาตุต่าง ๆ ในเนื้อหินสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. Alkali Carbonate Reaction

ปฏิกิริยานี้จะเกิดกับหินพวก Dolomitic Limestone ที่มีดินเหนียวแทรกตัวอยู่ในเนื้อหินโดยหินประเภทนี้ จะทำปฏิกิริยาที่มีชื่อว่า "Dedolomitization" สลายตัวเป็นผลึกของ Dolomite กับดินเหนียว ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัว หลังจากนี้ดินเหนียวจะทำปฏิกิริยากับความชื้น เกิดการขยายตัวอีกเช่นกัน

2. Alkali Silicate

ชั้นของ Silicate ในเนื้อหิน ทำปฏิกิริยากับด่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและน้ำก่อให้เกิดการขยายตัว

3. Alkali - Silica Reaction

หินที่ประกอบด้วย Silaceous ที่ไวต่อปฏิกิริยา จะทำปฏิกิริยากับน้ำ และ Alkali ก่อให้เกิดการขยายตัว

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

● **สภาพที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยา**

ความเสียหายจากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับหินนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมีสภาพที่เหมาะสมทั้ง 3 ประการพร้อม ๆ กัน คือ

1) มีปริมาณ Alkali เพียงพอ

2) มีองค์ประกอบ Silica ที่ไวต่อปฏิกิริยา

3) มีปริมาณน้ำเพียงพอ

สภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาคือเมื่อมีความชื้นสัมพันธ์ 75% อุณหภูมิ 30-40°C

● **ความเสียหายที่เกิดขึ้น**

ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับหินทั้ง 3 ปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 15.6 กล่าวคือ

1) ผิวคอนกรีตจะแตกเสียหาย ลักษณะจะเป็นการแตกร้าวกระจายทั่วพื้นที่ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) มีน้ำเหนียว ๆ ไหลออกจากผิวคอนกรีต

3) ผิวคอนกรีตจะหลุดร่อน

4) กำลังอัดสูญเสียไป

● **การป้องกันปัญหา**

1) ใช้ Low Alkali ซีเมนต์ ซึ่งมี % Na_2O(aq) = % Na_2O + % 0.658 K_2O ไม่เกิน 0.6%

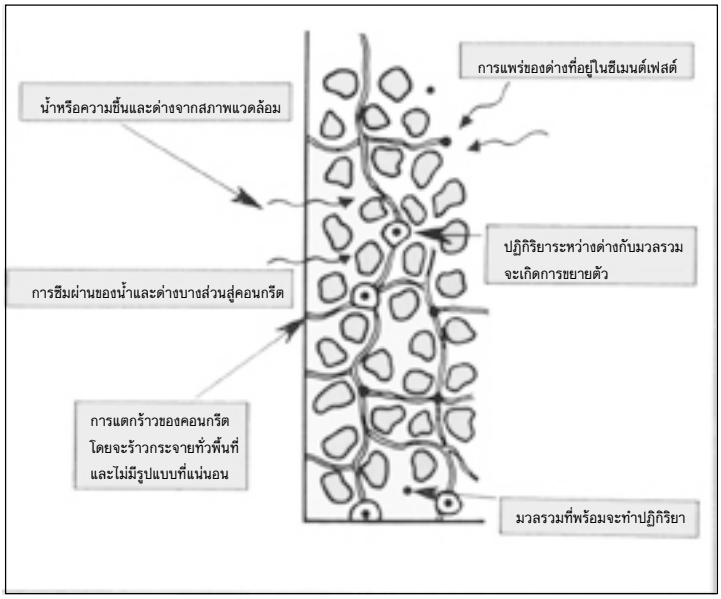
2) ใช้หิน-ทรายที่ไม่เกิดปฏิกิริยา

3) ลดความเสี่ยงจากสภาพแวดล้อม โดยลดความชื้นหรือน้ำที่จะสัมผัสคอนกรีต

4) ใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์บางส่วนเช่น Pulverized Fuel Ash หรือ Slag

ความเสียหายจากน้ำทะเล

ความเสียหายของคอนกรีตในน้ำทะเล เนื่องมาจากซัลเฟตและคลอไรด์ ซัลเฟตโดยเฉพาะอย่างยิ่งแมกนีเซียมซัลเฟตทำอันตรายต่อคอนกรีต ส่วนคลอไรด์จะซึมเข้าทำอันตรายต่อเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตในน้ำทะเลอาจถูกทำให้เสียหาย โดยการก่อผลึก Crystallization ของเกลือภายในเนื้อคอนกรีตในตำแหน่งที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ความเสียหายจะรุนแรงมากในบริเวณเหนือระดับน้ำสูงสุด ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำทะเลเข้าสู่เนื้อคอนกรีตโดย Capillary Action และความเสียหายจะเกิดน้อยในบริเวณระดับน้ำที่อยู่ระหว่างน้ำขึ้น-ลงและจะไม่เกิดความเสียหายเลยในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำตลอดเวลา ถ้าคอนกรีตนั้นมีคุณภาพดีพอ



รูปที่ 15.6 *ความเสียหายของคอนกรีตจากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ความทนทานของคอนกรีตในน้ำทะเลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีต คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45-0.50 รวมทั้งการเทลงแบบและการอัดแน่นทำอย่างดีจะมีความหนาแน่นมาก สามารถต้านทานต่อสภาพน้ำทะเลได้ดี และการเลือกใช้ประเภทของซีเมนต์ที่เหมาะสม ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มที่จะเสียหายมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจากเกลือคลอไรด์จะส่งผลให้เกิดสนิม ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กไว้มีแนวโน้มที่จะแตกร้าวและเหล็กจะถูกทำลายมากยิ่งขึ้น การเพิ่มขึ้นของระยะหุ้มเหล็กเสริมจะเป็นการป้องกันปัญหาได้อีกทางหนึ่งโดยทั่วไประยะหุ้มควรเป็น 60-70 มิลลิเมตรและในบางกรณีใช้ถึง 100 มิลลิเมตร

การกัดกร่อนเหล็กเสริม

การศึกษาเรื่องความทนทานของคอนกรีตนั้น ประเด็นที่สำคัญที่สุดที่จำเป็นต้องกล่าวถึงคือเรื่องการกัดกร่อนเหล็กเสริม

- **การป้องกันเหล็กเสริมโดยคอนกรีต**

การป้องกันเหล็กเสริมคอนกรีตมี 2 ขบวนการคือ

1) การป้องกันทางกล

2) การป้องกันทางเคมี

1) การป้องกันทางกล

คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม จะเป็นตัวป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมทางกลที่ดีโดยป้องกันความชื้น น้ำ และก๊าซต่าง ๆ ซึมผ่านเข้าสู่เหล็กเสริม

การป้องกันจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตโดยเฉพาะส่วนผิวนอก (Covercrete) หรือคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่ รวมทั้งความหนาของระยะหุ้ม

2) การป้องกันทางเคมี

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ ซึ่งมีความเป็นด่างสูง คือมีค่า PH ประมาณ 12.5-13.0 ความเป็นด่างที่สูงมากของ $Ca(OH)_2$ นี้จะก่อให้เกิดฟิล์มบาง ๆ ของเหล็กออกไซด์บนผิวเหล็กเสริม ขบวนการป้องกันนี้เรียกว่า "Passivation"

- **ขบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริม**

การกัดกร่อนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ

1) การกัดกร่อน เนื่องจากความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง

2) การกัดกร่อน เนื่องจากมีเกลือคลอไรด์

1) การกัดกร่อน เนื่องจากความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง

คอนกรีตปกติเป็นวัสดุที่มีความเป็นด่างสูงคือ มีค่า PH 12.5-13.0 ความเป็นด่างนี้จะป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมกัดกร่อน เมื่อความเป็นด่างลดลง อัตราการกัดกร่อนจะมากขึ้นสาเหตุที่ทำให้การเป็นด่างลดลง ได้แก่

1.1 การชะล้าง (Leaching)

การชะล้างเป็นตัวการทำให้ความเป็นด่างในเนื้อคอนกรีตลดลง การชะล้างจะมากหรือน้อยขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

- สภาพของน้ำ น้ำไหลจะชะล้างและก่อให้เกิดความรุนแรงมากกว่าสภาพน้ำนิ่ง ๆ
- อุณหภูมิของน้ำ
- ชนิดของซีเมนต์
- ความหนาแน่นของคอนกรีต
- คุณภาพของคอนกรีตที่ผิว
- รูปร่างและอายุของคอนกรีต

1.2 การทำให้คอนกรีตเกิดความเป็นกลาง (Neutralization)

1.2.1 ทำให้เป็นกลางโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศซึมผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปฏิกิริยานี้เรียกว่า "Carbonation" ดังสมการ $Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$ ปฏิกิริยานี้จะทำให้ความเป็นด่างลดลงจากค่า PH ลดจาก 12.5 เป็น 9.0 หรือน้อยกว่าเมื่อปฏิกิริยา Carbonation เกิดขึ้นจนถึงเหล็กเสริม มันจะทำลายแผ่น Passivation Film ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กและจะก่อให้เกิดการกัดกร่อน

1.1.2 ทำให้เป็นกลางโดยกรดหรือก๊าซอื่น ๆ กรดและก๊าซอื่น ๆ เช่น SO_2 จะลดค่า PH ในเนื้อคอนกรีต จาก 12.5 เป็น 9 หรือต่ำกว่า ส่งผลให้ Passivation Film ถูกทำลาย เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้เช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

แหล่งของคลอไรด์ อาจมาจาก

- **ภายในคอนกรีต** เช่น จากหิน, น้ำยาผสมคอนกรีตโดยเฉพาะน้ำยาเร่งการก่อตัว หรืออาจมาจาก น้ำผสมคอนกรีต

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- **ภายนอกคอนกรีต** เช่น จากน้ำทะเล จากพื้นดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในช่วงที่อากาศหนาวเย็นจัด

เกลือคลอไรด์นี้จะซึมเข้าในเนื้อคอนกรีตและเฉพาะคลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำเท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม โดยทำลาย Passivation Film บางบริเวณ ซึ่งจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

- **ลักษณะของความเสียหาย**
  - **การกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์** จะมีลักษณะดังนี้
    1. ก่อให้เกิดสนิมสีน้ำตาล
    2. จะเกิดบริเวณกว้างและการกัดกร่อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
    3. จะก่อให้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนของผิวคอนกรีต

  - **การกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์** จะมีลักษณะดังนี้
    1. ก่อให้เกิดสนิมสีดำ
    2. จะเกิดในบางบริเวณเท่านั้น
    3. จะไม่แสดงให้เห็นการแตกร้าวหรือหลุดร่อนของผิวคอนกรีต จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาอย่างมากแล้ว
    4. ความเสียหายจะรุนแรง เนื่องจากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง

15.4 ความเสียหายด้านกล (Mechanical Causes of Deterioration)

ในโครงสร้างบางประเภท เช่น พื้น, ถนน, ลานบิน คอนกรีตจะถูกทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการเสียดสี (Abrasion) อยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสียดสีเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องนำมาพิจารณาเช่นเดียวกัน ปัญหาเรื่องการทำให้ผิวคอนกรีตสึกกร่อนโดยของเหลว (Erosion) ในโครงสร้างที่สัมผัสน้ำ (Hydraulic Structure) เช่น เสาสะพาน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อส่วนที่เป็นของแข็งถูกนำมาโดยน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นกรวด, ตะกอนต่าง ๆ ในที่ที่มีน้ำไหลด้วยความเร็ว คอนกรีตอาจจะเกิดความเสียหายอย่างมากโดยเริ่มจากการเป็นรูหรือโพรงและขยายใหญ่ออกไป นอกจากนี้ยังมีอีกกรณีหนึ่งซึ่งแรงดันจากน้ำจะเป็นตัวการที่ทำให้ผิวคอนกรีตเกิดการความเสียหายโดยทำให้เกิดเป็นรูหรือโพรงขึ้น (Cavitation) โดยสรุปผิวคอนกรีตถูกทำให้เสียหายด้านกล จาก 3 ขบวนการ คือ

1. Abrasion
2. Erosion
3. Cavitation

- **ลักษณะความเสียหายของผิวคอนกรีต**

ความเสียหายที่พบเห็นประจำได้แก่

1) ผิวหน้าแตกเป็นฝุ่น
2) ผิวหน้าร่อนเป็นแผ่น
3) ผิวหน้าเป็นโพรง
4) ผิวหน้าพองปูด

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทาน การเสียดสี และวิธีการป้องกัน

ปัจจัย	วิธีการ
1. กำลังของคอนกรีต	1. เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตกำลังอัด 140 กก./ตร.ซม. จะมีอัตราความเสียหายประมาณ 5 เท่าของคอนกรีตกำลังอัด 280 กก./ตร.ซม. ส่วนคอนกรีตที่กำลังอัดมากกว่า 280-420 กก./ตร.ซม. จะมีผลต้านทานการเสียดสีที่ดีมาก
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	2. ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งจะลดการเยิ้ม ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่า W/C ไม่เกิน 0.45-0.50
3. หิน, ทราย	3. เลือกใช้หินทรายที่มีความแข็งแกร่ง และควรเลือกใช้หินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
4. การเทและการแต่งผิวหน้า	4. ต้องจี้เขย่าคอนกรีตให้อัดแน่นอย่างดีในแบบหล่อ รวมทั้งต้องแต่งผิวหน้าให้เหมาะสม ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีที่ผิว และการลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต
5. การบ่ม	5. ต้องบ่มด้วยวิธีการที่เหมาะสมในเวลาที่ยาวนานพอ

ประเด็นที่ 4 และ 5 ถือว่ามีความสำคัญมากที่สุดเพราะเป็นที่ทราบดีอยู่แล้วว่าบริเวณผิวคอนกรีต (Convercrete) โดยเฉพาะผิวด้านบนจะมีความอ่อนแอที่สุดเนื่องจากน้ำที่เยิ้มขึ้นมา

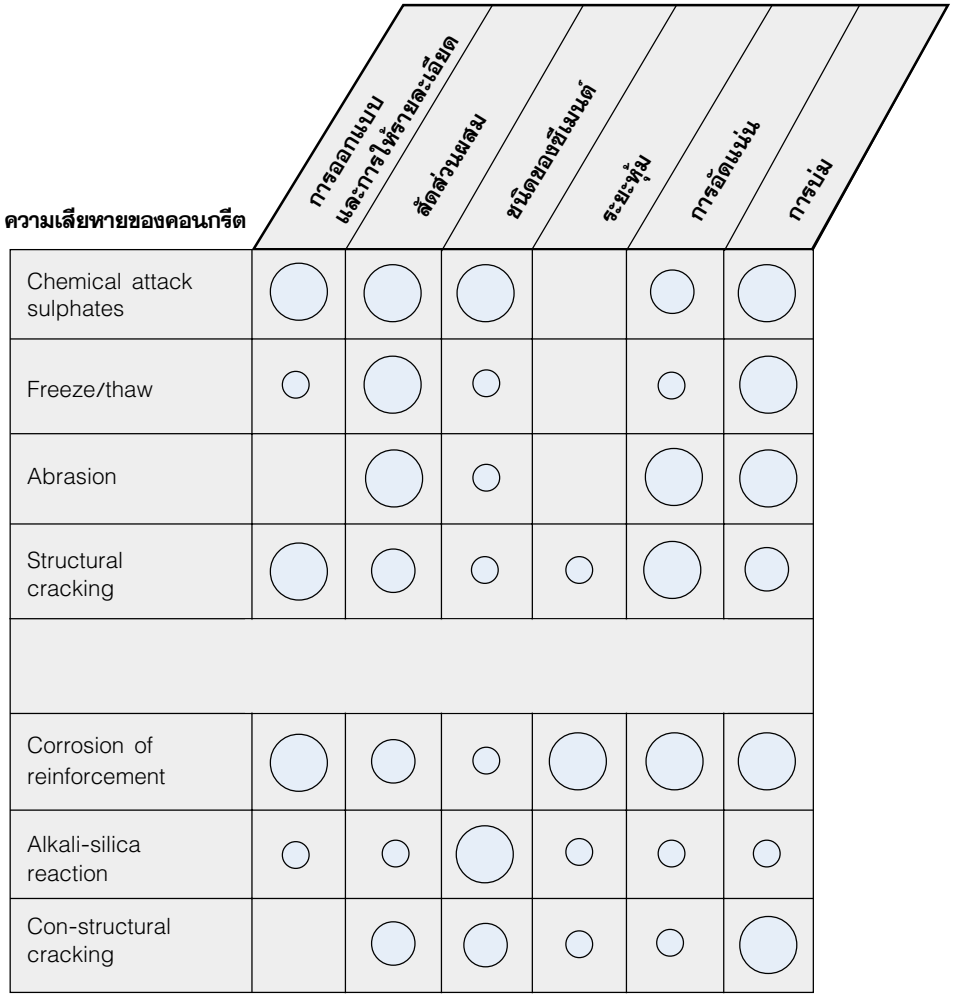
6. ลักษณะผิวคอนกรีต	6. ในกรณีที่มีการเสียดสีอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมาก หรือใช้วัสดุอื่นเคลือบผิว หรือในบางโครงสร้างอาจต้องทำให้ผิวคอนกรีตเรียบมาก ๆ
7. รอยต่อ (Joint)	7. ออกแบบและก่อสร้างรอยต่อให้เหมาะสมเพื่อลดการกระแทกหรือเสียดสี

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

15.5 การลดความเสียหาย

ความเสียหายของคอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ อาจเกิดจากสาเหตุด้านกายภาพ ด้านเคมีและด้านกล ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายดังกล่าวผู้ออกแบบควรพิจารณา สภาพแวดล้อม สภาพการใช้งานของโครงสร้างนั้นอย่างละเอียดก่อนการออกแบบจากนั้นควรเลือกออกแบบและเลือกใช้ข้อกำหนดสำหรับงานคอนกรีตที่เหมาะสมในขั้นการออกแบบ ส่วนในขั้นการก่อสร้างจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมอย่างดี ทั้งขั้นตอน การผสม, การจี้เขย่า, การแต่งผิว และการบ่ม รวมทั้งการบำรุงรักษาและแนวทางป้องกันปัญหาซึ่งเราสามารถสรุปเป็นแผนภาพ และการป้องกันความเสียหายของคอนกรีตจากสาเหตุต่าง ๆ สรุปได้ดังรูปที่ 15.7

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 15.7 *สรุปแนวทางป้องกันปัญหาความเสียหายของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 16
โครงสร้างคอนกรีตที่มีความทนทาน

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมทั้งจะคงความนิยมในอนาคตด้วยเพราะคุณสมบัติที่ดีในหลาย ๆ ประการและคุณสมบัติเด่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ มีความทนทาน ค่าบำรุงรักษาต่ำตลอดอายุการใช้งาน รวมทั้งราคาประหยัดกว่าวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ แต่คุณสมบัติดังกล่าวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อผู้เกี่ยวข้องในการก่อสร้างทุกฝ่ายตั้งแต่เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบ ผู้รับเหมาก่อสร้าง ผู้ควบคุมงาน และผู้ใช้งานโครงสร้างนั้น จะต้องร่วมมือ และมีความเข้าใจต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นอย่างดี

16.1 โครงสร้างคอนกรีตที่ทนทาน

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทนทานได้นั้นต้องประกอบด้วย ขบวนการที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบจนถึงการใช้งาน

โครงสร้างคอนกรีตที่ทนทานต้องประกอบด้วย

1) การออกแบบที่ดี
2) ข้อกำหนดที่เหมาะสม
3) การก่อสร้างที่ดี
4) การบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ

16.2 การออกแบบเพื่อความทนทาน

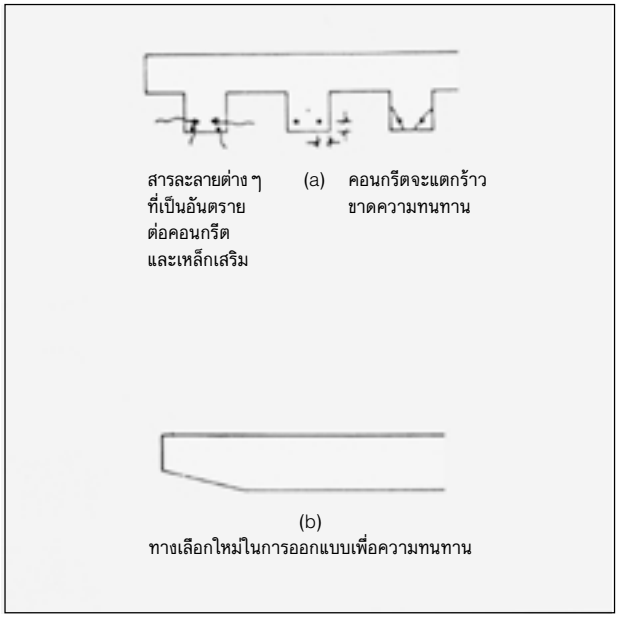
ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง เริ่มตั้งแต่ การกำหนดความต้องการของเจ้าของอาคาร การออกแบบแนวความคิดทางสถาปัตยกรรม (Architectural Concepts) การเลือกรูปแบบโครงสร้างวิศวกรรม (Structural Form) และการพิจารณาเลือกวัสดุที่จะใช้ ในอดีตที่ผ่านมาเมื่อพูดถึงการออกแบบโครงสร้างเพื่อความทนทานทุกฝ่ายจะมุ่งประเด็นไปเพียงเนื้อวัสดุที่จะใช้เช่น เนื้อคอนกรีตเท่านั้น การเลือกรูปแบบของโครงสร้าง การพิจารณาการใช้งานของโครงสร้างรวมถึงการพิจารณาความทนทานในระยะยาวมักจะถูกมองข้ามไป

ปัจจัยที่ผู้ออกแบบอันหมายรวมทั้งสถาปนิกและวิศวกรควรพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบ เพื่อจะให้โครงสร้างมีความทนทาน ได้แก่

1) รูปร่างของโครงสร้าง (Structure Geometry)

รูปร่างของโครงสร้างเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งเพื่อที่จะให้ได้โครงสร้างที่มีความทนทาน โดยผู้ออกแบบควรพิจารณาหรือเลือกออกแบบดังนี้

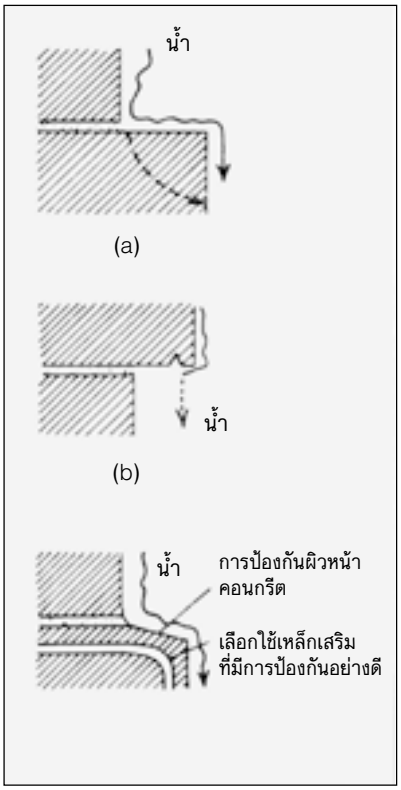
- หลีกเลี่ยงการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่บางหรือโครงสร้างที่ซับซ้อน เพราะการเท และการอัดแน่นคอนกรีตทำได้ยาก



รูปที่ 16.1 *การหลีกเลี่ยงการออกแบบโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- การออกแบบโครงสร้าง ให้มีการระบายน้ำที่ดี เช่นการทำผิวบนของชิ้นส่วนโครงสร้างให้มีความลาดเอียง เป็นต้นรวมทั้งต้องมีการบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง
- ควรออกแบบบริเวณมุมให้เหมาะสม



รูปที่ 16.2 *การออกแบบรูปร่างของโครงสร้างให้มีการระบายน้ำดี รวมทั้งการออกแบบบริเวณมุมให้เหมาะสมจะช่วยให้โครงสร้างคอนกรีตมีความทนทาน (a) ควรหลีกเลี่ยง (b) และ (c) เป็น แนวทางที่ควรปฏิบัติ*

- พิจารณาความสามารถทำงานได้ (Buildability) ในขั้นตอนการออกแบบ
- ลดพื้นที่ผิวของชิ้นส่วนโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำ และลดบริเวณที่น้ำจะขังเพราะน้ำและความชื้นจะนำสารละลายต่าง ๆ ซึมเข้าทำอันตรายต่อเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริม

2) รอยต่อ (Joint)

- ควรออกแบบรอยต่อให้เหมาะสมเพื่อลดการแตกร้าวอันเนื่องจากการหดตัว การขยายตัว และผลจากการแตกต่างอุณหภูมิ หรือการทรุดตัวของโครงสร้าง
- ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบให้น้ำไหลผ่านรอยต่อ
- ตำแหน่งของรอยต่อมีความสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาให้ถูกต้อง

3) การให้รายละเอียด (Detailing)

- ควรระลึกไว้เสมอว่าเส้นในแบบเป็นส่วนที่มีความหนา
- ควรให้รายละเอียดที่ดีเพื่อขจัดปัญหาการแตกร้าวหรือการเป็นรูพรุนของโครงสร้างคอนกรีต
- บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงอย่างทันทีทันใด หรือการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของโครงสร้างก่อให้เกิด Stress Concentration อันส่งผลให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้น การให้รายละเอียดที่ดีจึงจำเป็นอย่างยิ่งควรกำหนดรายละเอียดระยะการหุ้มเหล็กเสริมการหุ้มเหล็กเสริม (Covering) ให้เหมาะสม

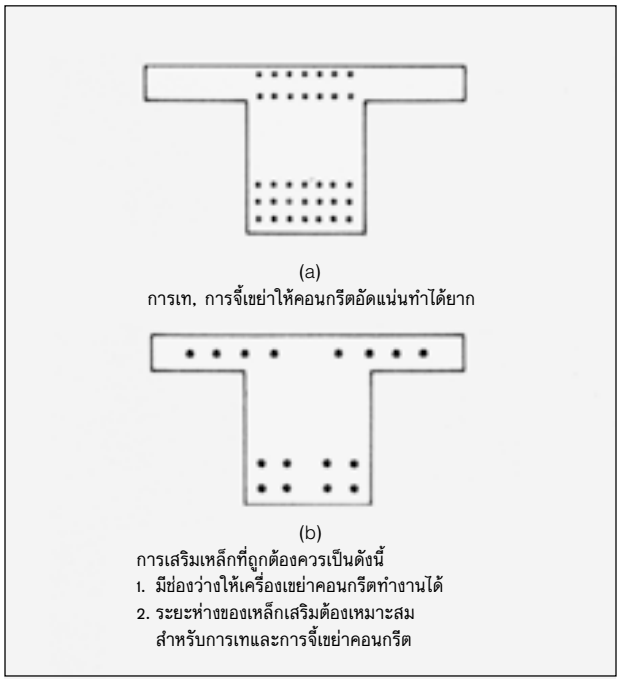
รูปที่ 16.3 *การให้รายละเอียดมีความสำคัญต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

สภาพการใช้งาน	ระยะหุ้มน้อยที่สุด (มม.)		
	คอนกรีตหล่อในที่	คอนกรีตสำเร็จรูป	คอนกรีตอัดแรง
คอนกรีตที่หล่อติดกับดินตลอดเวลา	70	-	70
คอนกรีตที่สัมผัสกับดินหรืออากาศ (ภายนอก)			
กำแพง	40-50	20-40	30
พื้น	40-50	-	30
ชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ	40-50	30-50	40
คอนกรีตที่ไม่สัมผัสกับดินหรืออากาศ (ภายใน)			
พื้น, กำแพง	20-40	15-30	20
คาน, เสา	40	10-40	20-40
โครงสร้างเปลือกบาง	15-20	10-15	10
โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย			
กำแพง, พื้น	50	50	-
ชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ	60	50	-

ตารางที่ 16.1 *ระยะหุ้มน้อยที่สุดตามมาตรฐาน ACI*

- บริเวณจุดรองรับ (Support) จะเกิดหน่วยแรง (Local Spliting Forces) ที่จะก่อให้เกิดการแตกร้าวควรให้รายละเอียดการเสริมเหล็กที่เหมาะสม
- การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมมีอิทธิพลอย่างมากต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- โครงสร้างบางประเภท จำเป็นต้องมีการดูแล และบำรุงรักษาในช่วงอายุการใช้งาน ผู้ออกแบบควรพิจารณาการให้รายละเอียด เพื่อให้การบำรุงรักษาทำได้สะดวก

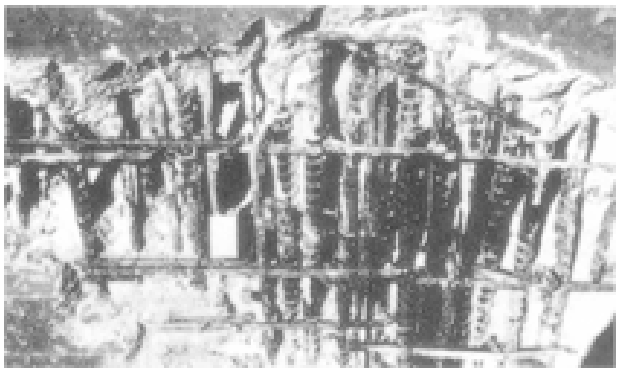


รูปที่ 16.4 *การให้รายละเอียดเหล็กเสริม*

4) เหล็กเสริม (Reinforcement)

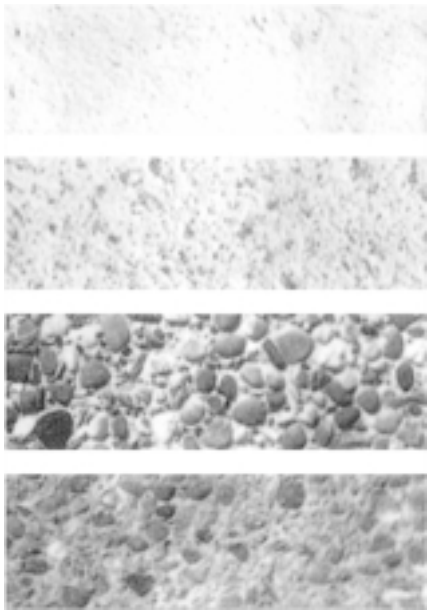
เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในตำแหน่งที่จะเกิดอันตรายจากสภาพแวดล้อมผู้ออกแบบควรเลือกเหล็กเสริมหรือวิธีการป้องกันดังนี้

- ใช้เหล็กเสริมที่มีการเคลือบผิว
- ใช้เหล็กไร้สนิม (Stainless Steel)
- ใช้วิธีป้องกัน เช่น Cathodic Protection



รูปที่ 16.5 *เหล็กเสริมที่หนาแน่นมากทำให้การเทและการอัดแน่นของคอนกรีตทำได้ยาก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 16.6 *ตัวอย่างลักษณะผิวของคอนกรีตแบบต่าง ๆ นอกเหนือจากผิวคอนกรีตที่เรียบโดยการฉาบปูนหรือการใช้คอนกรีตเปลือย*

5) ลักษณะผิว (Surface)

สารเคมี สารละลาย หรือ สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม จะซึมเข้าทำลายโดยผ่านผิวคอนกรีตทั้งสิ้น ดังนั้นผิวคอนกรีตจะเป็นส่วนสำคัญสำหรับความทนทาน ผู้ออกแบบควรจะหาวิธีป้องกันซึ่งอาจเป็นวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

- ฉาบผิวคอนกรีตด้วยมอร์ต้าหรือปูนฉาบ
- เคลือบผิวคอนกรีตด้วยวัสดุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นต้น
- เลือกลักษณะผิวคอนกรีตที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

16.3 ข้อกำหนดเพื่อความทนทาน

ข้อกำหนดหรือ Specification ในที่นี้หมายถึง ข้อกำหนดของวัสดุรวมทั้งข้อกำหนดด้านฝีมือแรงงานด้วย (Workmanship) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อกำหนดสำหรับคอนรกรีตและเหล็กเสริมเพื่อความทนทาน

ความสามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อม ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรงขึ้นอยู่อย่างมากกับคุณภาพของวัสดุอันได้แก่ คอนกรีตและเหล็กเสริมในหัวข้อนี้จะพูดถึงข้อกำหนดสำหรับวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้

1.1 วัสดุผสม

ตัวอย่างข้อกำหนดของวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อความทนทานมีดังนี้

- **วัสดุผสมคอนกรีต** ทุกชนิดต้องเป็นไปตามมาตรฐาน เช่น มอก., ASTM, BS หรือ JIS เป็นต้น
- **ปูนซีเมนต์** ควรเลือกใช้ประเภทของปูนซีเมนต์ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตนั้นถูกนำไปใช้งาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะกับงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 เหมาะกับงานเร่งด่วนหรืองานที่มีเวลาการทำงานจำกัด เช่น บริเวณริมน้ำที่มีน้ำขึ้นน้ำลง ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภท 5 เหมาะกับงานบริเวณที่มีซัลเฟตสูง เช่น โรงงานกำจัดน้ำเสีย
- **หิน-ทราย**

1) ไม่ควรมีสิ่งเจือปน เช่น ดินเหนียว คลอไรด์ ซัลเฟต เกินกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

2) ควรมีความแข็ง การอยู่ตัว ไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์

3) ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต รูปร่าง ลักษณะผิวขนาดคละ ควรจะนำมาพิจารณาเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีการยึดเกาะดี และความสามารถเทได้ดี

4) ไม่ควรใช้หินขนาดใหญ่ หรือ หินที่มีรูปร่างแบน เพราะจะก่อให้เกิดช่องโพรงอากาศใต้เม็ดหิน

- **น้ำ**

1) ไม่ควรมีสารเจือปน เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ความเป็นกรด-ด่าง เกินกว่ามาตรฐาน

2) น้ำที่ดื่มได้โดยทั่วไป จะใช้ผสมคอนกรีตได้ แต่ถ้ามีข้อสงสัย ควรทำการทดสอบก่อนนำมาใช้งาน

- **น้ำยาสมคอนกรีต**

1) ควรใช้ตามข้อกำหนดของทางผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด

2) ควรใช้น้ำยาประเภทลดน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ในคอนกรีตทุกประเภทเพื่อที่จะได้คอนกรีตที่ทนทาน

3) ควรใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำมาก เช่น ในห้องเย็น

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4) ควรมีการทดสอบก่อนการใช้งานเพื่อดูคุณสมบัติของน้ำยาและดูผลข้างเคียง

5)ห้ามใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคลอไรด์ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรง

- **วัสดุผสมอื่น ๆ** เช่น Pulverized Fuel Ash, Microsilica

1) เมื่อมีการใช้วัสดุผสมประเภทนี้ ควรใช้ในปริมาณที่มาตรฐานกำหนดเพื่อที่จะได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นและทนทาน

2) เมื่อใช้วัสดุผสมประเภทนี้ควรทำการบ่มคอนกรีตนานกว่าคอนกรีตทั่วไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างสมบูรณ์

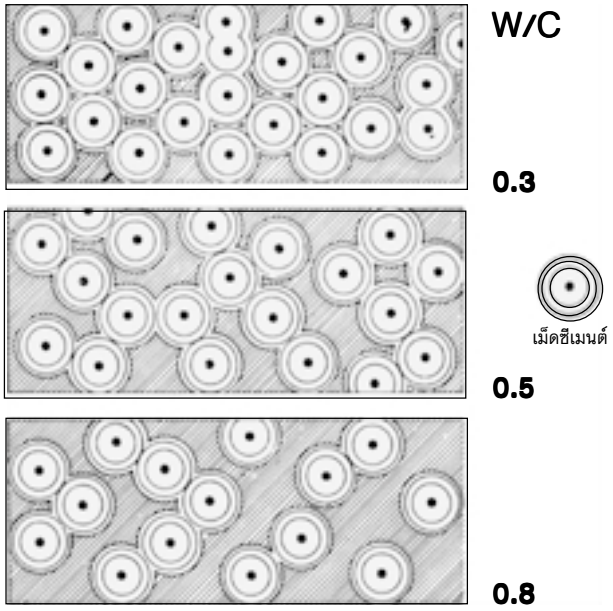
1.2 สัดส่วนผสม

คอนกรีตที่ออกแบบให้มีความทนทานควรใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เพียงพอ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม รวมทั้งควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ตัวอย่างเช่น

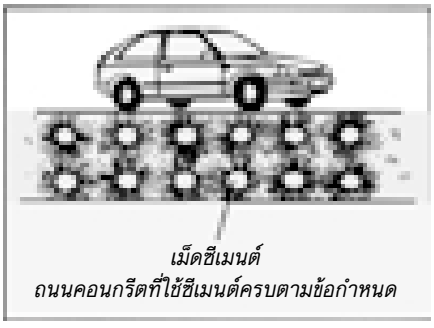
- คอนกรีตที่ต้องการให้มีความทึบน้ำ ควรใช้ W/C ตามข้อกำหนด
- คอนกรีตที่ต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณซัลเฟต ถ้ามีปริมาณซัลเฟตปานกลาง ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 โดย W/C ไม่เกิน 0.50 ปริมาณปูนต่ำสุด 330 กก./ลบ.ม. หรือถ้ามีปริมาณซัลเฟตสูง ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 โดย W/C ไม่เกิน 0.45 ปริมาณปูนต่ำสุด 370 กก./ลบ.ม.

สภาพสัมผัส	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด	กำลังอัดขั้นต่ำ (กก./ตร.ซม.)
คอนกรีตที่ต้องการให้มีคุณสมบัติกันซึม		
a) คอนกรีตสัมผัสน้ำจืด	0.50	250
b) คอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย	0.45	300
คอนกรีตที่ต้องการความทนทานสูง	0.40	330

ตารางที่ 16.2 *ข้อกำหนดสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และกำลังอัดในสภาพการใช้งานต่าง ๆ*



รูปที่ 16.7 *คอนกรีตที่ใช้ปริมาณซีเมนต์สูง จะมีเนื้อแน่น อากาศและของเหลวซึมผ่านได้ยากนั่นคือคอนกรีตจะมีความทนทานสูง*



รูปที่ 16.8 *ตัวอย่างถนนคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์น้อยจะทำให้ความคงทนลดลงอย่างมาก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

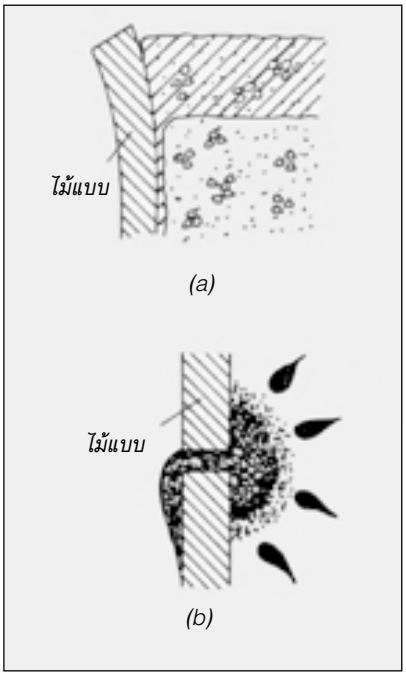
1.3 เหล็กเสริม

- เหล็กเสริม ควรปราศจากสนิมขุมเพื่อขจัดปัญหาการขยายตัวของสนิม อันจะทำให้คอนกรีตแตกร้าวและความทนทานลดลง
- เลือกวิธีการป้องกันเหล็กเสริมให้เหมาะกับสภาพการใช้งาน

2) ข้อกำหนดสำหรับไม้แบบ

ข้อกำหนดสำหรับไม้แบบที่เกี่ยวข้องกับความทนทานของคอนกรีตมีดังนี้

- ไม้แบบต้องแข็งแรงและไม่ดูดซึมน้ำซึ่งอาจทำได้โดยการทาน้ำมันหรือน้ำยาเคลือบแบบที่ไม่เป็นอันตรายต่อผิวคอนกรีต
- รอยต่อต่าง ๆ ของไม้แบบต้องมีการอุดกันการรั่วไหลของน้ำปูนอย่างดี



รูปที่ 16.9 *ลักษณะไม้แบบที่ไม่ดี*

3) ข้อกำหนดสำหรับฝีมือแรงงาน

3.1 การผสมคอนกรีต

- ควรชั่งตวงส่วนผสมคอนกรีตให้ถูกต้องตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้
- การผสมคอนกรีตควรปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น เวลาที่จะใช้ผสม เป็นต้น

3.2 การขนส่ง การเท และการจี้เขย่าคอนกรีต

- คอนกรีตต้องถูกขนส่งโดยไม่ก่อให้เกิดการแยกตัว
- อย่าเทคอนกรีตลงไปที่เหล็กเสริมโดยตรงเพราะจะก่อให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสม
- เมื่อเทคอนกรีตแล้วต้องมีการจี้เขย่าให้คอนกรีตอัดแน่นในแบบอย่างถูกต้อง
- ควรมีเครื่องจี้เขย่าคอนกรีตสำรองไว้ ณ หน่วยงานก่อสร้าง

3.3 การแต่งผิวหน้าคอนกรีต

3.4 การบ่มคอนกรีต

- ควรบ่มคอนกรีตให้ถูกต้องตามวิธีการที่กำหนด
- เวลาการบ่มไม่ควรน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนด
- ผู้ออกแบบ ผู้รับเหมาและผู้ควบคุมงานก่อสร้างพึงระวังไว้ว่า

1) การบ่มที่ดี เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการทำคอนกรีตที่ดี

2) การบ่มที่ไม่ดี หรือไม่บ่มจะไม่มีประโยชน์ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีส่วนผสมที่ดี

3) การบ่มที่ดีไม่สามารถทดแทนคอนกรีตที่คุณภาพไม่ดีได้

3.5 ไม้แบบ

- แบบต่าง ๆ จะต้องมีการค้ำยันในตำแหน่งที่ถูกต้องและต้องมั่นคง
- ต้องปล่อยให้คอนกรีตอยู่ในแบบหล่ออย่างน้อยเท่ากับเวลาที่มาตรฐานกำหนด
- การถอดไม้แบบต้องทำด้วยความระมัดระวังเพราะคอนกรีตยังมีกำลังต่ำอยู่ขณะทำการถอดไม้แบบ

3.6 รอยต่อ

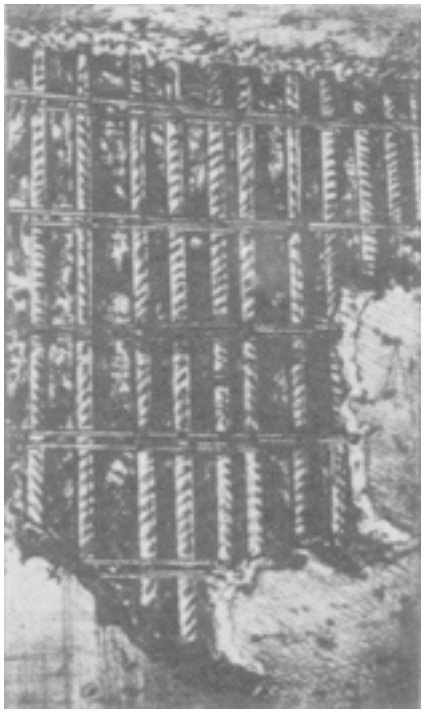
- ตำแหน่งและรายละเอียดของรอยต่อต้องเป็นไปตามที่กำหนด

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

16.4 การก่อสร้างเพื่อความทนทาน

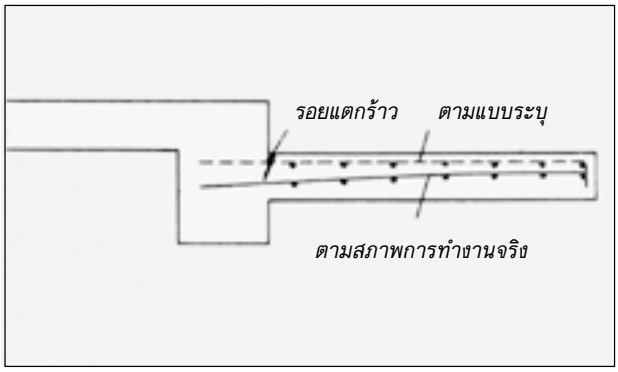
นอกจากข้อกำหนดของงานที่ดีแล้วขั้นตอนการก่อสร้างนับเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดที่จะทำให้ได้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความทนทาน กรณีต่าง ๆ ในด้านการก่อสร้างที่อาจจะส่งผลให้คอนกรีตขาดความทนทาน ได้แก่

- การเทและการอัดแน่นของคอนกรีตทำอย่างไม่ถูกวิธี คอนกรีตจึงเกิดการแยกตัวหรือเกิดโพรงพรุน สิ่งที่ทำอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริมซึ่งผ่านได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 16.10
- ไม้แบบไม่อยู่ในสภาพที่ควรจะใช้งาน เช่น มีรูรั่วหรือมีการดูดซึมน้ำอย่างมาก หรือมีการค้ำยันไม่ถูกต้อง
- ระยะหุ้มไม่ถูกต้อง สิ่งนี้เป็นปัญหาที่พบบ่อยที่สุดสำหรับเรื่องความทนทานของคอนกรีต โดยทั่วไประยะหุ้มที่ปฏิบัติในการก่อสร้างจะน้อยกว่าที่กำหนดในแบบซึ่งทำให้สารละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือสิ่งที่เป็นอันตรายซึมเข้าไปทำอันตรายเหล็กเสริมได้ในเวลาอันรวดเร็ว



รูปที่ 16.10 *การใช้คอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมไม่เหมาะรวมทั้งวิธีการเทและอัดแน่นไม่ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีรูพรุน ความทนทานลดลงอย่างมาก*

- รอยต่อทำไม่ถูกต้องตามรายละเอียดหรือไม่ทำความสะอาดก่อนเทคอนกรีต
- การบ่มมักถูกละเลยทำให้ได้กำลังอัดน้อยกว่าที่ควร เป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การต้านทานการซึมผ่านของน้ำจะต่ำ ทำให้ความทนทานลดลง
- การเสริมเหล็กไม่ถูกตำแหน่งซึ่งอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าว



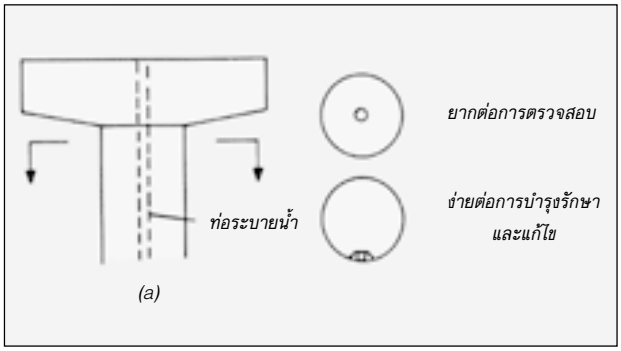
รูปที่ 16.11 *การเสริมเหล็กที่ไม่ถูกต้องก่อให้เกิดการแตกร้าวความทนทานจะลดลง*

16.5 การบำรุงรักษาเพื่อความทนทาน

ปัญหาความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเหมือนกับโรคมะเร็ง ซึ่งอาจจะไม่แสดงอาการออกมาในช่วงแรก จึงไม่ได้รับความสนใจอย่างจริงจังจากวิศวกร จนกระทั่งเมื่อมันแสดงผลเสียอย่างร้ายแรง ซึ่งก็เป็นช่วงที่ยากต่อการแก้ไขเสียแล้ว และในปัจจุบันปัญหานี้ก็ได้ขยายวงออกไปอย่างมาก แนวความคิดใหม่ที่ถูกนำมาประยุกต์เข้ากับวงการก่อสร้างเพื่อยืดอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้างนั่นคือ การทำ "การบำรุงรักษาป้องกัน" (Preventive Maintenance) ซึ่งเริ่มจากขบวนการตรวจสอบ การบำรุงรักษาและการซ่อมแซม โดยมีรายละเอียดดังนี้

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างต้องได้รับการพิจารณาตั้งแต่ขั้นการออกแบบ โดยสิ่งที่สำคัญที่สุดคือการเข้าถึงบริเวณที่จะตรวจสอบ (Accessability) ได้อย่างสะดวก



รูปที่ 16.12 *การให้รายละเอียดตั้งแต่ขั้นการออกแบบที่เหมาะสมจะทำให้การตรวจสอบการบำรุงรักษาเพื่อการแก้ไขทำได้ง่าย*

- ควรมีการตรวจสอบโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอและเป็นระบบ เพื่อดูรอยร้าว หรือสภาพการถูกทำลาย
- ในกรณีชิ้นส่วนโครงสร้างที่ตรวจสอบยาก เช่น เสาเข็ม เจาะ ฐานราก โครงสร้างพวกนี้ควรออกแบบและก่อสร้างด้วยความระมัดระวังและเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง
- ต้องออกแบบเพื่อให้สามารถทดแทน (Replacability) โครงสร้างได้โดยเฉพาะบริเวณที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมอันจะส่งผลให้อายุการใช้งานสั้น เช่น รอยต่อ Bearing หรือทางระบายน้ำ เป็นต้น
- ก่อนทำการแก้ไขหรือซ่อมแซมควรตรวจสอบหาสาเหตุที่แท้จริงก่อน เช่น ถ้าตรวจพบรอยร้าวคงต้องหาสาเหตุรวมทั้งต้องตรวจสอบให้ได้ว่ารอยร้าวนี้จะขยายตัวหรือไม่ขยายตัวต่อไปเพื่อจะได้แก้ไขโดยถูกวิธี
- ควรแก้ไขชิ้นส่วนโครงสร้างที่เกิดความเสียหายทันทีทันใดที่ตรวจพบ
- ควรเลือกวัสดุซ่อมแซมที่เหมาะสม และปฏิบัติตามข้อกำหนดของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด

การออกแบบที่ดี โดยมีข้อกำหนดของวัสดุและแรงงานที่เหมาะสม การก่อสร้างที่ถูกต้องและมีการบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยให้โครงสร้างนั้นมีความทนทาน

จากการสำรวจข้อมูลในต่างประเทศพบว่ามากกว่า 80% ของความผิดพลาดที่ทำให้โครงสร้างขาดความทนทาน มีสาเหตุมาจากขั้นตอนการออกแบบและขั้นตอนการก่อสร้าง ดังนั้นทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจึงควรจะให้ความสนใจ เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสำหรับการใช้งานในปัจจุบันและอนาคต

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 17
การแตกร้าวของคอนกรีต

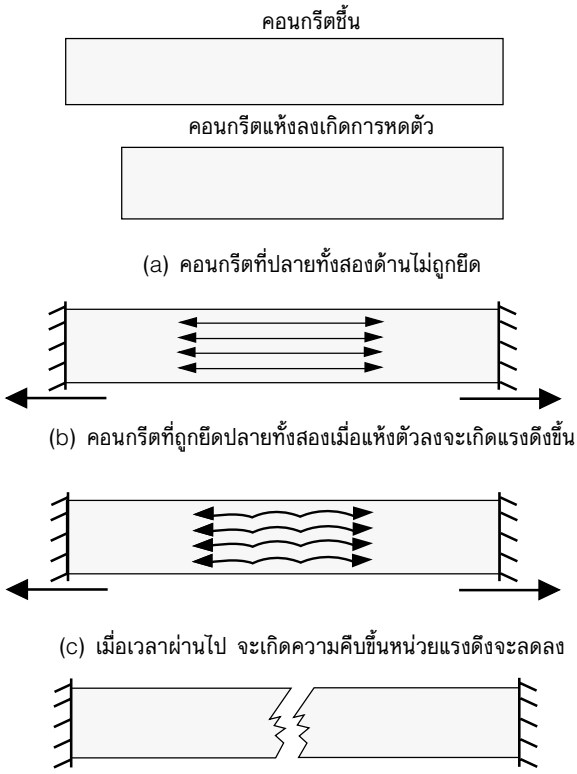
17.1 ขั้นตอนการเกิดการแตกร้าว

การแตกร้าวของคอนกรีตมีขั้นตอนของการเกิดได้อย่างไร เป็นเรื่องที่ควรทราบไว้เพื่อจะได้หาวิธีป้องกันและแก้ไขได้อย่างถูกต้อง และเพื่อแสดงถึงขั้นตอนของการแตกร้าวอย่างชัดเจน เราจะใช้แบบจำลองของแท่งคอนกรีตมาเป็นตัวอย่างในการพิจารณา

เริ่มแรกเรามาพิจารณาแท่งคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวดี ซึ่งยังมีความชื้นอยู่และปลายทั้งสองด้านของแท่งคอนกรีตถูกปล่อยไว้อย่างอิสระ ไม่ยึดติดกับวัตถุอื่นใด รูปที่ 17.1 (a) ต่อมาเมื่อแท่งคอนกรีตแข็งตัว และแห้งลงก็จะเกิดการหดตัวอย่างอิสระโดยไม่ถูกรั้งที่ปลายทั้งสองด้านจึงไม่เกิดหน่วยแรง (Stress) ใด ๆ ในเนื้อคอนกรีต ในสภาวะเช่นนี้ก็จะไม่เกิดการแตกร้าวขึ้น

การแตกร้าวนั้นจะเกิดขึ้นในกรณีที่แท่งคอนกรีตถูกยึดปลายทั้งสองไว้ รูปที่ 17.1 (b) เมื่อคอนกรีตแห้งตัวจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ขึ้นในเนื้อคอนกรีต ลักษณะเช่นนี้เหมือนกับว่าเราปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวและเกิดการหดตัวโดยอิสระ ในขณะเดียวกันเราก็ดึงแท่งคอนกรีตนี้ ให้ยาวออกไปเท่าเดิม แต่เมื่อเวลาผ่านไป คอนกรีตจะเกิดความคืบ (Creep) ขึ้น ซึ่งทำให้หน่วยแรงดึงในคอนกรีตลดลง รูปที่ 17.1 (c) และเมื่อไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ถ้าหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะหมดไป รูปที่ 17.1 (d)

ทั้งสี่ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น เป็นขั้นตอนโดยคร่าว ๆ ของขบวนการการเกิดการแตกร้าวทุกชนิดในคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวขนาดใหญ่หรือเล็ก ๆ ก็ตาม



รูปที่ 17.1 *ภาพจำลองแสดงการแตกร้าวของคอนกรีต*

17.2 หน่วยแรงกับการแตกร้าว

การแตกร้าวเป็นผลเกิดจากการกระทำของหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ซึ่งสามารถแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 17.2 ที่ชี้ให้เห็นถึงการกระทำของหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ดังนี้

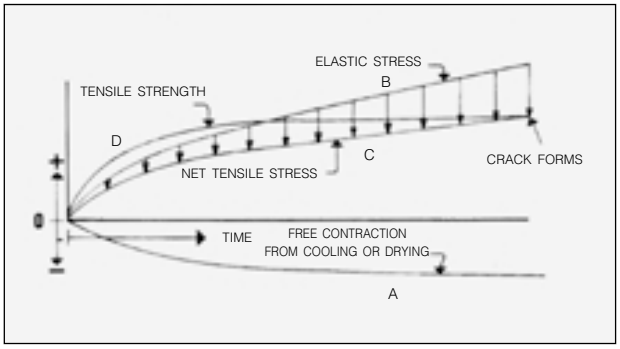
ให้แกนนอนเป็นแกนของเวลาส่วนแกนตั้งจะเป็นแกนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หน่วยแรง (Stress) กำลัง (Strength) และ ความคืบ (Creep) เมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตแห้งและเย็นตัวลงก็จะเกิดการหดตัว ดังเส้นโค้ง A แต่ถ้าปลายทั้งสองของ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

คอนกรีตถูกยึดไว้ ก็จะเกิดหน่วยแรงขึ้นในแท่งคอนกรีต ดังเส้นโค้ง B ขณะเดียวกันความคืบ (Creep) ในคอนกรีตก็จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ซึ่งจะทำให้หน่วยแรงดึงในคอนกรีตลดลง ดังเส้นโค้ง C เป็นผลให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งแทนด้วยเส้นโค้ง D เมื่อไรก็ตามที่หน่วยแรงดึง C มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต คอนกรีตก็จะแตก แต่ถ้าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึง การแตกร้าวก็จะไม่เกิดขึ้น

จากที่กล่าวมาพอจะสรุปได้ว่า การแตกร้าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้

- การหดตัวของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตแห้งและเย็นลง
- คอนกรีตถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้อิสระ
- ความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elasticity)
- ความคืบของคอนกรีต (Creep)
- กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength)



รูปที่ 17.2 *กราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงสุทธิที่เกิดขึ้นและกำลังรับแรงของคอนกรีต*

17.3 สาเหตุของการแตกร้าว

- **Structural Crack**

อาจมาจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ

1) การแตกร้าวเนื่องจากการออกแบบไม่ถูกต้อง เช่น การคำนวณออกแบบ หรือการให้รายละเอียดการเสริมเหล็กไม่ถูกต้อง

2) การแตกร้าว เนื่องจากการใช้วัสดุก่อสร้างไม่มีคุณภาพ เช่น ใช้หินผุ หินมีดินปน ทรายสกปรก น้ำสกปรก หรือ ทำการผสมคอนกรีตไม่ได้สัดส่วนที่ถูกต้อง รวมทั้งการใช้เหล็กเสริมที่เป็นสนิมมาก

3) การแตกร้าวเนื่องจากการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน เช่น การผสม การขนส่ง การเทลงแบบ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ การถอดค้ำยันก่อนกำหนด ขาดการบ่มที่ดีพอ หรือ แบบหล่อคอนกรีตโก่งงอ

- **Non Structural Crack**

อาจมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1) การหดตัวของคอนกรีต

2) การทรุดตัวของคอนกรีต

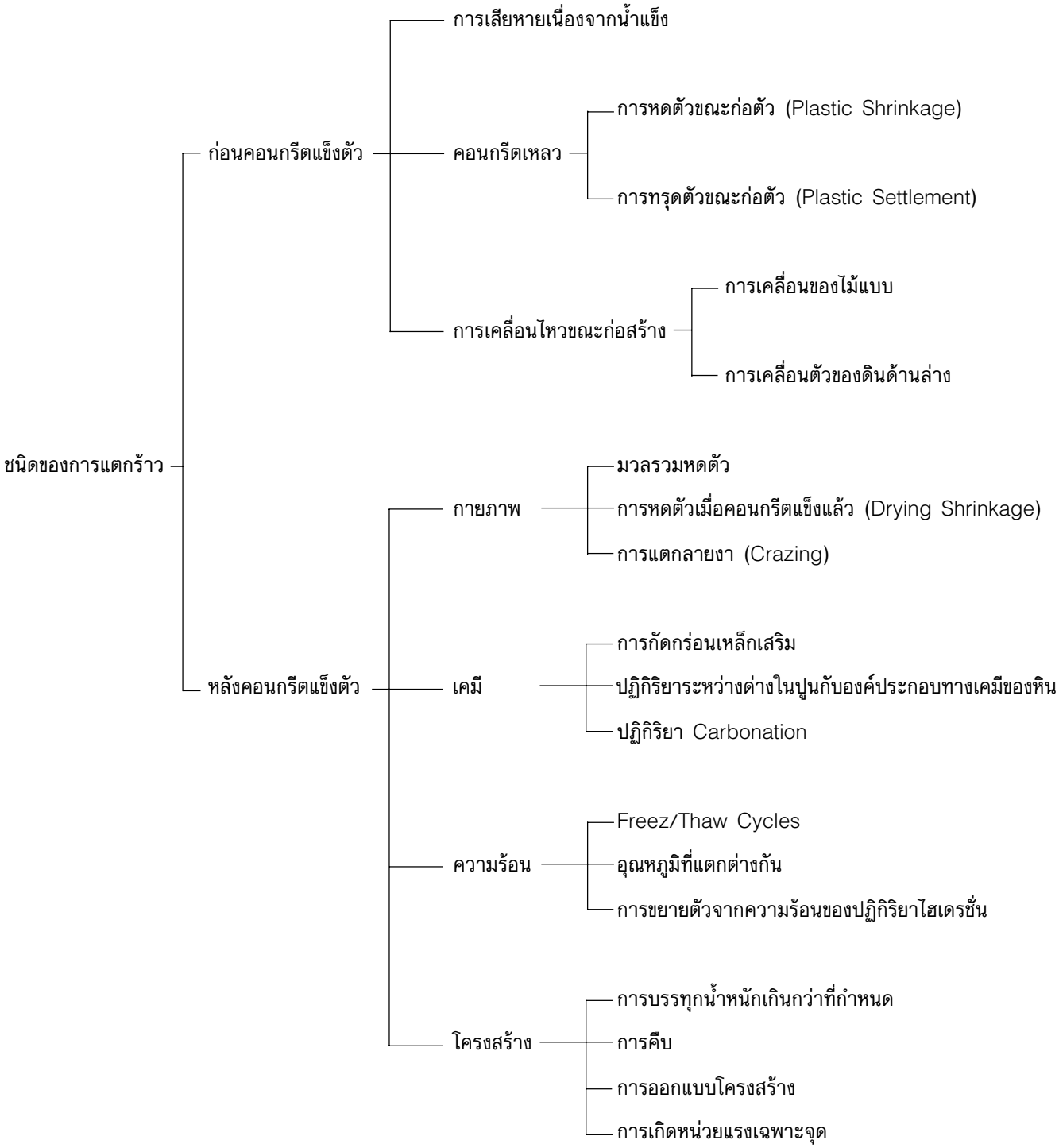
3) ความร้อน

4) อื่น ๆ

ซึ่งการแตกร้าวพวกนี้สามารถจำแนกตามเวลาที่เกิดได้เป็นการแตกร้าวก่อนคอนกรีตแข็งตัว และการแตกร้าวหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยสรุปได้ดังรูปที่ 17.3

และตัวอย่างการแตกร้าวทั้ง Structural และ Non Structural Crack แสดงไว้ในรูปที่ 17.4

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



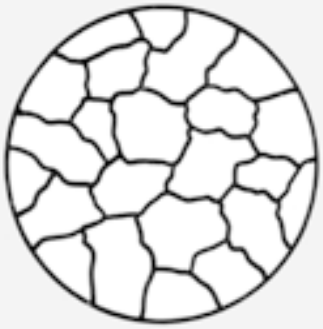
รูปที่ 17.3 *ชนิดของการแตกร้าวประเภท Non Structural Crack*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

1. รอยแตกร้าวที่เกิดจากแบบโป่ง งอ หรือเคลื่อนที่เนื่องจากไม้ขยายตัว ตาปูหรือเครื่องยึดเหนี่ยวหลุด แบบไม่แข็งแรงพอ ฯลฯ รอยร้าวเหล่านี้ไม่แสดงแบบที่ชี้บอกลักษณะที่แน่นอน

2. รอยแตกร้าวที่เกิดจากพื้นดินข้างล่างไม่แข็งแรงพอ ยุบตัวลงทำให้คอนกรีตเคลื่อนทรุดลงขณะที่กำลังจะแข็งตัว นี้ก็เป็นอีกแบบหนึ่งที่ไม่แสดงแบบที่ชี้ลักษณะของรอยแตกร้าวที่แน่นอน

3. รอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นเหนือเหล็กเสริมคอนกรีต เมื่อคอนกรีตทรุดตัวลงบนเหล็ก จะป้องกันได้โดยใช้คอนกรีตที่มีการยุบตัวน้อย และทำให้พื้นข้างล่างแข็งแรงพอ



4. รอยแตกร้าวลายงาเกิดได้เนื่องจากการบ่มที่ไม่เพียงพอ หรือเกิดจากการใส่ซีเมนต์มากเกินไป หรือเกิดจากการพองตัวของทรายหรือซีเมนต์ที่เผาไม่สุก

5. รอยแตกร้าวจากการหดตัวที่เกิดในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัว เนื่องจากคอนกรีตเสียน้ำไปอย่างรวดเร็ว จากการระเหยไปในอากาศหรือถูกพื้นดินแห้งข้างล่างดูดน้ำไป

6. รอยแตกร้าวที่เกิดจากสนิมของ เหล็กเสริมคอนกรีตขยายตัว จะป้องกันได้โดยใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมแน่นดี และมีคอนกรีตหุ้มเหล็กอย่างพอเพียง เพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปทำให้เหล็กเป็นสนิม

รูปที่ 17.4 *การแตกร้าวด้วยสาเหตุต่าง ๆ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

17.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกร้าว

ปัจจัยต่าง ๆที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตสามารถสรุปได้ดังนี้

1) วัตถุดิบและสัดส่วนการผสมคอนกรีต อันได้แก่ วัสดุมวลรวม ปูนซีเมนต์ น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีต

- **วัสดุมวลรวม** ได้แก่ หิน ทราย แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ, รูปร่างลักษณะของผิวและส่วนคละของวัสดุมวลรวม มีผลต่อการออกแบบส่วนผสม, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, Drying Shrinkage, Stiffness, Creep และความแข็งแรงของคอนกรีต เช่น หินและทรายที่มีดินเหนียวปนอยู่ด้วย ดินเหนียวจะหดตัวมากกว่าปูนซีเมนต์จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว

- **ปูนซีเมนต์** โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มากหรือเป็นปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณซิลิก้าสูงหรือมีความละเอียดสูง เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 3 มีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวได้มาก

- **น้ำ** เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการผสมคอนกรีตเพราะถ้าใช้ปริมาณน้ำมากเกินความจำเป็น ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวได้มาก และยังทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงด้วย

- **น้ำยาผสมคอนกรีต** น้ำยาบางชนิดอาจมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้ เช่น น้ำยาเร่งการแข็งตัว แต่น้ำยาบางชนิดก็ช่วยลดการแตกร้าวได้เช่น น้ำยาหน่วงการก่อตัว

2) การเทคอนกรีต (Placing) อัตราการเทและสภาพการทำงานมีผลต่อการแตกร้าวอย่างแน่นอน ซึ่งมักเป็นผลมาจากการเยิ้มของคอนกรีต (Bleeding) น้ำที่ไหลเยิ้มขึ้นมาที่ส่วนบนของคอนกรีต จะทำให้เกิดช่องว่างใต้หิน โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ลึก ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวภายในได้ รวมทั้งการแยกตัวของคอนกรีต อุณหภูมิภายนอก การทรุดตัวไม่เท่ากันของพื้นล่างหรือส่วนที่เป็นแบบรองรับคอนกรีต ก็สามารถทำให้เกิดการแตกร้าวได้เช่นกัน

3) สภาพการทำงาน นับเป็นปัจจัยภายนอกที่เข้ามาเกี่ยวข้องในขณะทำงาน

- **อุณหภูมิ (Temperature)** ปกติอัตราการรับกำลังได้ของคอนกรีตจะแปรตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามอิทธิพลที่สำคัญของอุณหภูมิที่มีต่อคอนกรีตคือ เมื่อคอนกรีตเย็นตัวลง จะหดตัว โดยเฉพาะงานคอนกรีตในอากาศร้อน และงานคอนกรีตปริมาณมาก ๆ (Mass Concrete) พื้นคอนกรีตที่หล่อขณะอากาศเย็นจะเกิดการแตกร้าวน้อยกว่าหล่อขณะอากาศร้อน ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับงานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างอื่น ๆ ด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ การเทคอนกรีตปริมาณมาก ๆ จึงมักเทในเวลากลางคืน

- **การสัมผัสกับสภาพรอบข้าง (Exposure)** ลักษณะอากาศที่คอนกรีตสัมผัสมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกร้าวของคอนกรีต อุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันมากในช่วงวัน เป็นผลทำให้เกิดการรั้งภายในของคอนกรีตอย่างมาก (Internal Restraint) เพราะการยืดหดตัวของผิว และส่วนที่อยู่ภายในจะไม่เท่ากันทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้

4) การบ่มคอนกรีต (Curing) ความชื้นในคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญมาก ไม่ว่าก่อนหรือหลังการบ่ม สำหรับงานพื้น ถ้าคอนกรีตแห้งเร็วเกินไป อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าคอนกรีต อาจจะเร็วกว่าอัตราการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้น ผิวหน้าของคอนกรีตจะเกิดการหดตัว ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น การป้องกันสามารถทำได้โดยทำให้แบบหล่อชุ่มน้ำ หลีกเลี่ยงการเทคอนกรีตในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง บ่มคอนกรีตในทันทีที่ทำได้ พยายามป้องกันลมและแสงแดดขณะเทคอนกรีต เพื่อไม่ให้น้ำในคอนกรีตระเหยเร็วเกินไป

5) การยึดรั้งตัว (Restraint) คอนกรีตที่ถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ไม่ว่าจะเป็นการยึดรั้งจากฐานรากหรือโครงสร้างใกล้เคียงก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้ การเกิดรอยแตกในแนวดิ่งที่ฐานกำแพงของอาคารถือเป็นเรื่องปกติ ถ้ารอยแตกนั้นไม่ขยายต่อถึงด้านบน ดังนั้นจึงมักพบว่า กำแพงหรือพื้นยาวที่ไม่มีการตัด Joint มักจะเกิดรอยแตกขึ้นเป็นช่วง ๆ ได้ ส่วนกำแพงที่หล่อติดเป็นชิ้นเดียวกันกับโครงสร้าง มีโอกาสที่จะแตกร้าวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ การยึดรั้งก็มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการทรุดไม่เท่ากันของโครงสร้าง

โดยทั่วไป คอนกรีตที่ถูกยึดรั้งไม่ให้หดตัวสูงจะเกิดรอยแตกขึ้นมา แต่รอยแตกเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นรอยแคบ ๆ การ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

เสริมกำแพงหรือพื้นด้วยเหล็กปริมาณมาก ๆ ทำให้เกิดรอยแตกลักษณะนี้มากกว่าการเสริมเหล็กปริมาณน้อย หรือที่มักเรียกว่าเหล็กเสริมอุณหภูมิ (Temperature Reinforcement) แต่เมื่อรวมความกว้างของรอยแตกแล้วทั้ง 2 กรณี จะมีความกว้างเท่า ๆ กัน ทำนองเดียวกัน เหล็กที่รับแรงดึงสูง (High-Yield-Point) ทำให้เกิดรอยแตกกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าเหล็กก่อสร้างทั่วไป (Structural-Grade-Steel) รอยแตกแคบ ๆ มักไม่ก่อให้เกิดปัญหาเพราะสังเกตได้ยากและฝนมีโอกาสซึมผ่านค่อนข้างน้อย

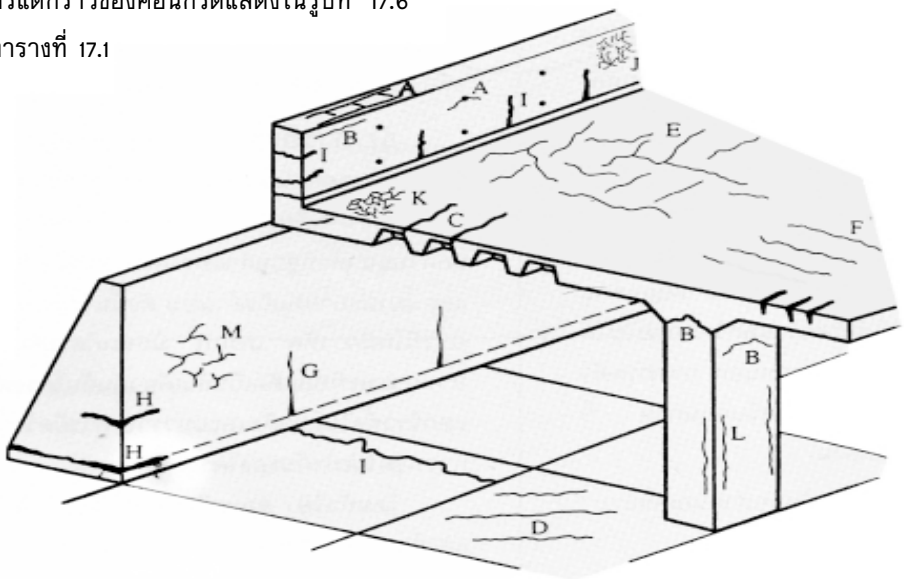
คอนกรีตที่เกิดการยึดรั้งภายในอาจเกิดขึ้นได้ถ้าเป็นโครงสร้างเดียวกัน แต่ใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างกันเช่นใช้ปูนซีเมนต์ไม่เท่ากัน หรือมีสัดส่วนของหิน-ทราย ที่ต่างกัน

จากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดเห็นได้ว่าสาเหตุการแตกร้าวของคอนกรีตนั้นมีมากมาย ซึ่งมักจะไม่ได้เกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่มักจะเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุพร้อมกัน

รูปที่ 17.5 *รอยแตกร้าวที่เกิดจากการระเหยอย่างรวดเร็วของน้ำ*

17.5 ตัวอย่างการแตกร้าวของคอนกรีต

ตัวอย่างการแตกร้าวของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 17.6 และสาเหตุแสดงในตารางที่ 17.1



รูปที่ 17.6 *ตัวอย่างแสดงการแตกร้าวในตำแหน่งต่าง ๆ*

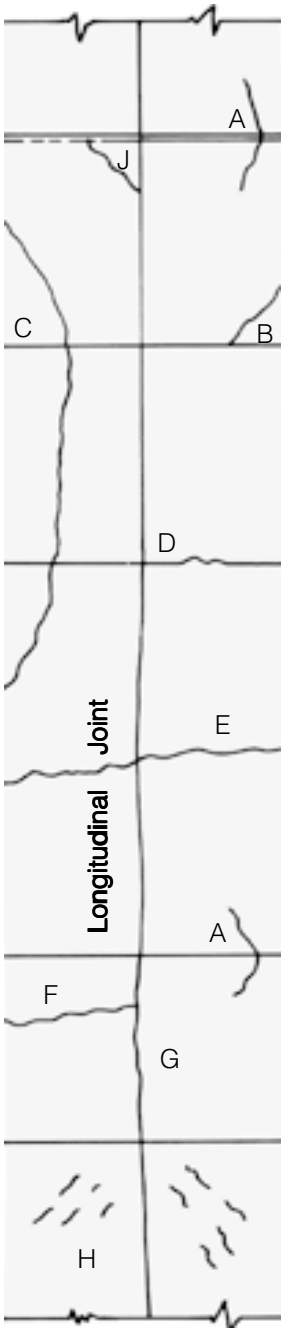
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ชนิดของการแตกร้าว	ตำแหน่ง	บริเวณที่พบบ่อยๆ	สาเหตุหลัก	สาเหตุรอง	แนวทางแก้ไข	เวลาที่เกิด
Plastic Settlement	A	โครงสร้างลึกๆ	น้ำส่วนเกิน	แห้งเร็วไป	ลด bleeding	10 นาที-3 ชม.
	B	ด้านบนของเสา	เช่น			
	C	Trough and Waffle Slabs	Bleeding			
Plastic Shrinkage	D	ถนนและพื้น	แห้งอย่างรวดเร็ว	การ Bleeding เกิดช้า	ปรับปรุงวิธีการบ่มช่วงต้นๆ	30 นาที-6 ชม.
	E	พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก				
	F	พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	แห้งเร็วและเหล็กอยู่ใกล้ผิวคอนกรีต			
Early Themal Contraction	G	กำแพงหนาๆ	ความร้อนมากเกินไป	การลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว	ลดความร้อนหรือป้องกันความร้อนสูญไป	1-2 วันถึง 3 อาทิตย์
	H	พื้นหนาๆ	อุณหภูมิแตกต่างกันมาก			
Long - term Drying	I	พื้นและกำแพงบาง ๆ	แนวต่อไม่ดี	การหดตัวมาก บ่มไม่ดี	ลดน้ำ ปรับปรุงวิธีบ่ม	หลายสัปดาห์หรือหลายเดือน
Crazing	J	Fair Faced Concrete	ไม้แบบไม่เหมาะสม	ใช้ปูนมากไป		1-7 วัน แต่บางทีช้ากว่านี้
	K	พื้น	ปาดแต่งหน้ามากเกินไป	บ่มไม่ดี	ปรับปรุงวิธีการบ่มและการแต่งผิว	
Corrosion of Reinforcement	L	เสาและคาน	ระยะหุ้มน้อย	คอนกรีตคุณภาพต่ำ	ขจัดต้นเหตุ	มากกว่า 2 ปี
	M	คอนกรีตสำเร็จรูป	มีเกลือคลอไรด์มากไป			
Alkali Aggregate Reaction	N	ที่เปียกชื้น	ใช้หินที่ทำปฏิกิริยาหรือใช้ปูนที่เป็นด่างมากไป		ขจัดต้นเหตุ	มากกว่า 5 ปี

ตารางที่ 17.1 *การแตกร้าวของคอนกรีต*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

17.6 การแตกร้าวของถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 17.6 *การแตกร้าวของถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก*

(A) Crowfoot Crack รอยแตกแบบนี้อาจจะเกิดในแนวยาวขนานกับแนวถนนหรือเกิดในแนวที่ทำมุมกับ Expansion Joint สาเหตุเกิดจากสารที่ใช้อุดใน Expansion Joint เกิดการขยายตัวออกไปทางขอบของถนน หรือเกิดจากการที่มีน้ำหรือสารอื่นซึมผ่านเข้าไปใน Expansion Joint หรือ Contraction Joint

(B) Corner Break รอยแตกนี้ส่วนมากจะมีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ซึ่งมีความยาวด้านไม่น้อยกว่า 45 ซม. สาเหตุเกิดจากพื้นถนนรับแรงกระแทกมากเกินไป

(C) Diagonal Crack รอยแตกแบบนี้จะเกิดในแนวทะแยงของถนน สาเหตุเกิดจากความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเดิม (Subgrade) ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเดิม

(D) Spalls รอยแตกแบบนี้สามารถเกิดได้กับรอยต่อถนนทุกประเภทหรือรอยต่อที่เกิดจากการพบกันของรอยต่อ 2 รอยต่อ สาเหตุเกิดจากการเลือกใช้, ออกแบบ Contraction Joint ไม่เหมาะสมหรือเกิดจากการซึมของน้ำหรือสารอื่น ๆ ที่ส่วนบนรอยต่อ

(E) Transverse Crack รอยแตกแบบนี้จะเกิดในแนวขวางตัดถนน สาเหตุเกิดจากการไม่ได้ทำ Contraction Joint บนพื้นถนนหรือระยะห่างของ Contraction Joint ยาวเกินไปจนทำให้เกิดรอยแตก

(F) Transverse Crack รอยแตกนี้จะเกิดในแนวขวางถนนที่ระยะ 120-150 ซม. ห่างจากรอยต่อ สาเหตุเกิดจากการที่ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเดิมลดลงเนื่องจากดินเดิมถูกน้ำพาออกมาทางช่องที่น้ำสามารถซึมลงไปได้ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น (ปรากฏการณ์ Pumping) ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเดิมจึงลดลง ทำให้เกิดรอยแตกขึ้น

(G) Longitudinal Crack รอยแตกแบบนี้จะเกิดในแนวยาวของถนน สาเหตุเกิดจากการไม่ได้ทำรอยต่อ บริเวณกลางถนนที่มีความกว้างของถนนมาก ๆ

(H) Plastic-Shrinkage Crack รอยแตกแบบนี้จะมีลักษณะแตกร้าวลายงาเต็มไปหมด เป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กสาเหตุเกิดจากการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วของคอนกรีตสดเพราะการบ่มในระยะแรกไม่พอเพียง, การระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วที่ผิวคอนกรีต, หรือการที่ดินเดิม หินทรายที่ใช้ผสมคอนกรีตแห้ง และดูดน้ำอย่างรวดเร็ว

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 18
การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

18.1 หลักการในการออกแบบส่วนผสม

เป้าหมายหลักของการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตหรือการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต มีด้วยกัน 2 ประการคือ

1) เพื่อเลือกวัสดุผสมคอนกรีตที่เหมาะสมอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีต ให้เป็นไปตามข้อกำหนดและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2) คำนวณหาสัดส่วนผสมของวัสดุผสมนี้ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามข้อกำหนดและการใช้งานทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ในราคาที่เหมาะสมที่สุด

เพื่อให้บรรลุเป้าหมายข้างต้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ต่อไปนี้

- การหาได้ของวัสดุผสมคอนกรีต
- การผันแปรในคุณสมบัติของวัสดุผสม
- ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับธรรมชาติของวัสดุผสม
- การผันแปรของคุณสมบัติที่ต้องการในสภาพการใช้งาน

18.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบ

การออกแบบและเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะกับงานก่อสร้างนั้นที่จะต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆซึ่งอาจกระทบต่อการเลือกใช้คอนกรีตประเภทนั้น ๆ โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 ประการคือ

1. ปัจจัยด้านเทคนิค
2. ปัจจัยด้านราคา

ปัจจัยด้านเทคนิค

วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาปัจจัยด้านเทคนิคซึ่งแบ่งตามสภาพของคอนกรีตได้เป็น 2 ประการคือ

1. สภาพที่คอนกรีตยังเหลวอยู่

ปัจจัยที่ต้องพิจารณา 2 ประการ คือ

- ความสามารถเทได้
- การอยู่ตัว

โดยผู้ออกแบบควรเลือกคอนกรีตสดที่มีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มีความเหลวเพียงพอต่อการใช้งาน คือ คอนกรีตสามารถไหลลื่นเข้าไปเต็มทุก ๆ ส่วนของแบบหล่อ
2. ต้องไม่แยกตัวระหว่างการขนย้ายหรือการเท
3. ต้องสามารถอัดตัวแน่นในแบบหล่อได้อย่างดี

วิธีการใช้วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ใช้กันแพร่หลาย คือ การวัดค่ายุบตัว ตัวอย่างค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปในประเทศไทย แสดงในตารางที่ 18.1

งานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว (ซม.)
โครงสร้างทั่วไป	7.5 ± 2.5
เสาหรือผนังบาง	10.0 ± 2.5
งานที่เทด้วยคอนกรีตปั๊ม	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่	มากกว่า 15.0
โครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15.0

ตารางที่ 18.1 *ค่าการยุบตัวที่เหมาะกับงานประเภทต่าง ๆ*

สำหรับปัจจัยด้านการอยู่ตัว หมายถึง คอนกรีตจะคงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตตลอดการใช้งาน โดยไม่เกิดการแยกตัวและไม่เกิดการเยิ้ม ในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการวัดการอยู่ตัว โดยทั่วไปจะใช้การสังเกตเป็นหลัก

2.สภาพที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาที่สำคัญ 2 ประการคือ

- กำลัง
- ความทนทาน

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญรองลงมาอีก 2 ประการ คือ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- การเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก
- การเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก

โดยทั่วไป กำลังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและคุณภาพของคอนกรีตก็จะพิจารณาจากกำลังอัด ในหลาย ๆ กรณี คุณสมบัติอื่น ๆ อาจมีความสำคัญมากกว่า เช่น คอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่ต้องป้องกันน้ำ หรือถังเก็บน้ำ จำเป็นต้องมีคุณสมบัติสำคัญ คือ มีการซึมผ่านของน้ำและอากาศต่ำ และมีการหดตัวต่ำ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังอัดจะส่งผลให้เกิดการหดตัวมาก ซึ่งมีผลเสียอย่างมากต่อคุณสมบัติด้านความทนทาน และการซึมผ่านของน้ำ

ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับคุณสมบัติของคอนกรีตจะแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ชนิดของโครงสร้าง และสภาพแวดล้อมขณะใช้งาน ในหลาย ๆ กรณี ข้อกำหนดจะเกี่ยวข้องกับ

1. กำลังอัดต่ำสุดที่ยอมรับได้ โดยทั่วไปใช้เป็นข้อกำหนดหลักในงานคอนกรีต
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด เพื่อความทนทานของโครงสร้าง
3. ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำสุด เพื่อความทนทานของโครงสร้าง
4. ปริมาณปูนซีเมนต์สูงสุด เพื่อลดการแตกร้าวในโครงสร้างขนาดใหญ่
5. ความหนาแน่นต่ำสุด เพื่องานก่อสร้างบางประเภท เช่น เขื่อนหรือโครงสร้างป้องกันรังสีต่าง ๆ

แต่ยังมีข้อกำหนดซึ่งระบุคุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีตที่ต้องการ เช่น

1) กำหนดให้ได้กำลังอัดในเวลารวดเร็ว ใช้สำหรับงานซ่อมแซม, งานถอดไม้แบบเร็ว หรืองานคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น

2) กำหนดให้สามารถทนทานซัลเฟตได้ดี

3) กำหนดให้มีความเหลวมาก หรือป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี เป็นต้น คอนกรีตที่มีข้อกำหนดต่าง ๆ เหล่านี้จะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในเรื่องคอนกรีตพิเศษ

ปัจจัยด้านราคา

นอกจากปัจจัยด้านเทคนิคแล้วผู้ออกแบบจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาปัจจัยด้านราคาด้วยซึ่งไม่ใช่ค่าเฉพาะวัสดุแต่รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับกองเก็บวัตถุดิบ การชั่งตวง การผสม การลำเลียง ค่าใช้จ่ายในการเท และทำให้คอนกรีตแน่น รวมไปถึงค่าควบคุมงานคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุ

- **วัสดุองค์ประกอบ**

คอนกรีตประกอบด้วย หิน ทราย ซีเมนต์ น้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต หรืออาจมีวัสดุเพิ่มมีช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับราคาที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงได้แก่

– การหาได้ของวัสดุพื้นฐาน

ผู้ออกแบบจำเป็นต้องศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุพื้นฐานในภูมิภาคนั้น ๆ ว่าหาได้หรือไม่ เพราะถ้าจำเป็นต้องหาแหล่งอื่น ค่าใช้จ่ายโดยรวมอาจจะสูงมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ออกแบบต้องการออกแบบฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้คอนกรีตที่มีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำ แต่ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทความร้อนต่ำ (ประเภท 4) ผู้ออกแบบจะต้องดัดแปลงส่วนผสมคอนกรีต เช่น ใช้น้ำยาผสมคอนกรีต หรือในบางภูมิภาคของประเทศไทยสามารถหากรวดได้ง่ายและราคาถูกกว่าหินย่อย ดังนั้น อาจกำหนดให้ใช้กรวดแทนหินย่อยได้ โดยคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น กำลังอัด ความสามารถเทได้ ต้องได้ตามข้อกำหนดของงาน เป็นต้น

– การผันแปรของคุณภาพวัสดุ

วัตถุดิบที่มีความผันแปรของคุณภาพมาก เมื่อนำมาใช้ผสมเป็นคอนกรีต จะก่อให้เกิดต้นทุนการควบคุมที่สูง เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามข้อกำหนด

- **สัดส่วนผสม**

วัสดุพื้นฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะส่งต่อราคาของคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

– ลักษณะทั่วไปของวัสดุผสม

วัสดุผสมที่ลักษณะแตกต่างกัน จะส่งผลต่อสัดส่วนเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตตามต้องการ เช่น หินที่มีรูปร่างกลมมนจะใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าหินที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมหรือที่มีลักษณะแบน หรือทรายที่มีความละเอียดจะใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าทรายหยาบ เมื่อต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่า ๆ กัน นั่นคือ ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมจะแตกต่างกัน ราคาคอนกรีตก็จะแตกต่างกันด้วย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- ชนิดของโครงสร้าง

โครงสร้างคอนกรีตที่มีความสำคัญมาก ๆ เช่น เขื่อนหรือผนังห้องปฏิกรณ์ปรมาณู การออกแบบจำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีส่วนเผื่อ มากกว่าคอนกรีตโครงสร้างทั่ว ๆ ไปหรือโครงสร้างคอนกรีตสำหรับบ่อบำบัดน้ำเสีย ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณและชนิดของซีเมนต์ที่แตกต่างจากโครงสร้างทั่ว ๆ ไป เพื่อให้ได้ความทนทานที่สูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อราคาคอนกรีต เป็นต้น

2. วิธีการทำงาน

ขบวนการลำเลียงวัตถุดิบ วิธีการผสม การลำเลียงคอนกรีตสู่สถานที่เทรวมถึงการทำให้คอนกรีตอัดแน่น ล้วนแต่กระทบต้นทุนของคอนกรีต ที่ผู้ออกแบบต้องนำมาพิจารณา

3. การควบคุมงานคอนกรีต

ต้นทุนการควบคุมงานคอนกรีตนี้ รวมตั้งแต่ต้นทุนการควบคุมคุณภาพคอนกรีต ณ หน่วยงานก่อสร้าง จนเริ่มใช้งานโครงสร้างนั้น

18.3 ความสัมพันธ์ที่มีประโยชน์ในการออกแบบ

1. กำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

สำหรับวัสดุผสมคอนกรีตที่กำหนดให้ ค่ากำลังอัดจะมี ความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ตาม Ablam's Law ดังนี้

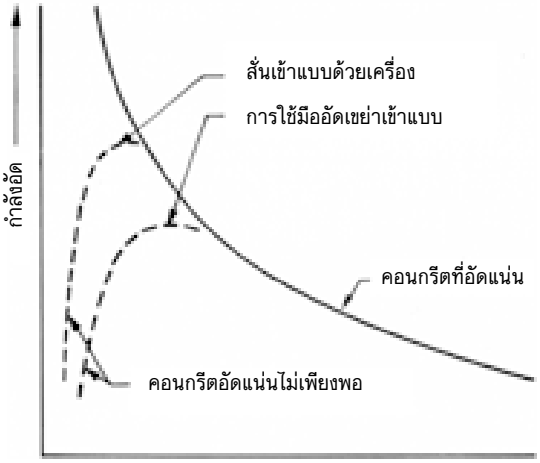
$$f_{cm} = \frac{A}{B^{1.5w/c}}$$

f_{cm} คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ณ อายุที่กำหนด

A คือ ค่าคงที่

B คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของซีเมนต์ และค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก

ตามสมการนี้ จะพบว่า กำลังอัดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ค่าความสัมพันธ์นี้ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 18.1



รูปที่ 18.1 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์*

2) คุณสมบัติของมวลรวมกับปริมาณน้ำ

คุณสมบัติของมวลรวมที่มีผลต่อปริมาณน้ำ และความสามารถเทได้ของคอนกรีตมีดังนี้

- รูปร่างและลักษณะผิว
- ขนาดและส่วนคละ
  - ขนาดคละของมวลรวม
  - ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม
  - อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ
- ปริมาณความชื้น
  - การดูดซึมของน้ำและความชื้นที่ผิว
  - การเพิ่มขึ้นของปริมาตรของทราย
- ความถ่วงจำเพาะ
- หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดและส่วนคละของมวลรวม

3) ความสามารถเทได้และปริมาณน้ำ

ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณน้ำในส่วนผสม กล่าวคือ ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่ความสัมพันธ์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เมื่อคุณสมบัติของวัสดุผสมเปลี่ยนแปลงไปรวมทั้งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใช้วัสดุผสมพิเศษอื่น ๆ ด้วย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

การวัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตมีหลายวิธี ผู้ออกแบบควรกำหนดวิธีที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 18.2

ประเภทของคอนกรีต	วิธีการวัดค่าความสามารถเทได้
1) คอนกรีตแข็งหรือกระด้างมาก 2) คอนกรีตทั่ว ๆ ไป 3) คอนกรีตเหลวมาก	• วัดโดยหาค่าเวลา Vebe (Vebe Test) • วัดค่ายุบตัว(Slump Test) • วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่กระจายออก (Flow Test)

ตารางที่ 18.2 *วิธีการวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีต*

4) ต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งาน

เป้าหมายที่สำคัญที่สุดของการหาสัดส่วนผสมคอนกรีต ก็เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามข้อกำหนดและการใช้งาน ในราคาที่ถูกที่สุด

โดยทั่วไปข้อกำหนดของงานคอนกรีต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

- **การกำหนดคุณสมบัติทั่ว ๆ ไป**
  - ค่ายุบตัวมาตรฐาน
  - ค่ากำลังอัดทั่ว ๆ ไป
  - ความทนทานทั่ว ๆ ไป

การที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ทำได้โดยกำหนดสัดส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำที่สุด และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงสุด เป็นต้น

- **การกำหนดคุณสมบัติพิเศษ**
  - มีความสามารถเทได้สูงมาก ๆ
  - เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นไม่สูงมาก
  - กำลังอัดสูง หรือกำลังอัดสูงในเวลารวดเร็ว
  - ความทนทานพิเศษต่าง ๆ เช่น ทนต่อซัลเฟต เป็นต้น

คอนกรีตพวกนี้อาจจำเป็นต้องใช้วัสดุพิเศษประเภทอื่น ๆ เป็นส่วนผสมด้วยเช่น

ปูนซีเมนต์และวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เช่น ปูนปอร์ตแลนด์ประเภท 3, ปูนปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟต (ประเภท 5), PFA, GGBS, และ MS

สารผสมเพิ่ม เช่น สารเร่งหรือหน่วงการก่อตัว, สารลดน้ำหรือสารลดน้ำจำนวนมาก, สารกักกระจายฟองอากาศ

มวลรวมพิเศษ เช่น มวลรวมหนัก, มวลรวมเบา, มวลรวมที่มีการหดตัวน้อยมาก

18.4 ประเภทของสัดส่วนผสมคอนกรีต

1) สัดส่วนผสมโดยปริมาตร

ผู้ออกแบบจะกำหนดอัตราส่วนโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์, ทราย, หิน เช่น 1:2:4 คือใช้ปูน 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน และหิน 4 ส่วนโดยปริมาตร วิธีการนี้เหมาะสำหรับงานก่อสร้าง ขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น

2) Prescribed Mix

วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างหรือผู้รับเหมาจะกำหนดสัดส่วนผสมสำหรับโครงการก่อสร้างหนึ่ง ๆ รวมทั้งรับผิดชอบว่าสัดส่วนผสมนี้ จะสามารถผลิตเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

3) Designed Mix

ผู้ผลิตคอนกรีต เช่น ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จะเป็นผู้กำหนดสัดส่วนผสมเพื่อให้ตรงกับความต้องการตามข้อกำหนด รวมทั้งต้องรับผิดชอบต่อสัดส่วนผสมนี้ว่าเป็นไปตามความต้องการ

4) สัดส่วนผสมมาตรฐาน (Standard Mix)

ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ผลิตและเก็บรวบรวมคุณสมบัติของคอนกรีตมาเป็นเวลานาน จนได้ข้อมูลมากำหนดเป็นสัดส่วนผสมมาตรฐาน

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

18.5 มาตรฐานการออกแบบคอนกรีต

ดังที่ได้ทราบแล้วว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีความผันแปรเนื่องจากองค์ประกอบอื่น ๆ มากมาย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต จะต้องทำการทดสอบหาคุณสมบัติ ในห้องปฏิบัติการ เก็บรวมรวมข้อมูล นำข้อมูลมาวิเคราะห์และใช้หลักวิชาสถิติมาช่วยในการออกแบบ โดยจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดสูงกว่าที่ข้อกำหนดของงานกำหนดไว้ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_{cr} = fc' + ks$$

f_{cr} คือ Target Mean Strength หรือกำลังอัดเฉลี่ยที่ผู้ผลิตคอนกรีตต้องผลิต

fc' คือ กำลังอัดที่กำหนดไว้ในแบบ

ks คือ ส่วนเผื่อ ซึ่งประกอบด้วยค่า

k คือ ค่าคงที่

s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่าหรือ มากกว่า

ค่า k ในสมการนี้ได้มาจากหลักวิชาสถิติในเรื่องเกี่ยวกับการแจกแจงความถี่มาตรฐาน โดยค่า k จะเพิ่มขึ้นถ้าต้องการให้กำลังอัดต่ำกว่าที่ต้องการลดลง ดังแสดงค่าในตารางที่ 18.3

ค่าร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่า fc′	ค่า k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.960
2	2.054
1	2.326
0	3.000

ตารางที่ 18.3 *ค่าคงที่ k และร้อยละของกำลังอัดที่ต่ำกว่า fc'*

ตัวอย่างการออกแบบ ถ้าในข้อกำหนดให้ใช้คอนกรีตกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (fc') 240 กก./ตร.ซม. โดยคอนกรีตที่ผลิตทั่วไปมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) 40 กก./ตร.ซม ผู้ผลิตต้องผลิตคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดดังนี้

ค่าร้อยละของกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ต่ำกว่า fc	ส่วนเผื่อ ks (กก./ตร.ซม)	กำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องผลิต (กก./ตร.ซม)
20	0.842x40 = 34	240+34 = 274
10	1.282x40 = 51	240+51 = 291
5	1.645x40 = 66	240+66 = 306
2.5	1.960x40 = 78	240+78 = 318
2	2.054x40 = 82	240+82 = 322
1	2.326x40 = 93	240+93 = 333
0	3.000x40 = 120	240+120 = 360

จากตาราง จะพบว่า ถ้ากำหนดให้ค่าร้อยละของกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ผลิตต่ำกว่า fc' น้อยลงเรื่อย ๆ ผู้ผลิตต้องออกแบบให้มี "ส่วนเผื่อ" เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ตามมาตรฐานทั่วไป ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมคอนกรีต ผู้ผลิตจะต้องออกแบบให้โอกาสที่กำลังอัดเฉลี่ยต่ำกว่ากำลังอัดที่ออกแบบไม่เกิน 5% ในตัวอย่างนี้ผู้ผลิตต้องผลิตคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 306 กก./ตร.ซม.

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำเป็นต้องหาจากก้อนตัวอย่างอย่างน้อย 30 ตัวอย่าง จึงจะให้ความเชื่อถือทางสถิติได้พอเพียง แต่หากการทดสอบน้อยกว่าจำนวนนี้ ก็อนุโลมได้โดยต้องใช้ตัวคูณตามที่กำหนดในตารางที่ 18.4

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

จำนวนตัวอย่าง	ตัวคูณสำหรับค่าเบี่ยงเบนตามมาตรฐาน
น้อยกว่า 15	ใช้ตารางที่ 18.5
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 หรือมากกว่า	1.00

ตารางที่ 18.4 *ตัวคูณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อจำนวนตัวอย่างน้อยกว่า 30 ค่า*

ในกรณีที่ไม่มีผลการทดลองด้านกำลังอัด หรือมีผลน้อยกว่า 15 ค่า กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องผลิตจะต้องสูงกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (fc') เป็นจำนวนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 18.5

ค่ากำลังอัดที่กำหนด fc	กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม
น้อยกว่า 210	70
210-350	85
350 หรือมากกว่า	100

ตารางที่ 18.5 *ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัด*

18.6 การผันแปรของกำลังอัด

ตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีต ค่าส่วนเผื่อจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด หรือค่าผันแปรของกำลังอัด นั่นเอง

การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต แบ่งได้เป็น 2 ประเด็นคือ

1) การผันแปรเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต

2) การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ

ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 18.6

การผันแปรในสมบัติของคอนกรีต (ผันแปรในขบวนการผลิต)	การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ (ผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ)
การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	วิธีการสุ่มตัวอย่างไม่เหมาะสม
- ควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมไม่ดีพอ	วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่แน่นอน
- ความชื้นในหินและทรายมีการเปลี่ยนแปลงมาก การผันแปรในปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม	- ปริมาณการกระทุ้ง - การเคลื่อนย้ายตัวอย่าง
- ส่วนขนาดคละของหินและทราย	- การดูแลตัวอย่างคอนกรีตสด
- วัสดุผสมมีสมบัติไม่สม่ำเสมอ	การเปลี่ยนแปลงจากการบ่ม
การผันแปรในคุณภาพและอัตราส่วนผสมของวัสดุ	- อุณหภูมิ - ความชื้น
- หิน, ทราย	วิธีดำเนินการทดสอบไม่ดี
- ซีเมนต์	- การหล่อฝา - การทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 18.6 *สรุปสาเหตุของการผันแปรของกำลังอัด*

18.7 การออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร

สำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะกำหนดสัดส่วนผสมโดยปริมาตร เช่น 1:2:4 อัตราส่วนที่กล่าวถึงนี้ คือ ใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร การที่จะแปลงส่วนผสมโดยปริมาตรดังกล่าวให้เป็นส่วนผสมโดยน้ำหนักสามารถทำได้ดังนี้

● ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

1) หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ = 1,400 กก./ลบ.ม.

2) หน่วยน้ำหนักของหินทราย = 1,450 กก./ลบ.ม.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• การคำนวณ

ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร = $\frac{50}{1400}$ = 0.036 ลบ.ม.

ทราย 2 ส่วน มีปริมาตร = 0.036 x 2 = 0.072 ลบ.ม.

น้ำหนักทราย = 0.072 x 1450 = 104 กก.

หิน 4 ส่วน มีปริมาตร = 0.036 x 4 = 0.144 ลบ.ม.

น้ำหนักหิน = 0.144 x 1450 = 209 กก.

ปริมาณน้ำที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับปูน 1 ถุง เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวประมาณ 10 ซม. เท่ากับ 30 ลิตร

น้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดเมื่อใช้ปูน 1 ถุง = 50 + 104 + 209 + 30 = 393 กก.

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต 1 ลบ.ม. = 2,400 กก.

ต้องใช้ปริมาณปูน = $\frac{2,400}{393}$ = 6.1 ถุง = 305 กก./ลบ.ม.

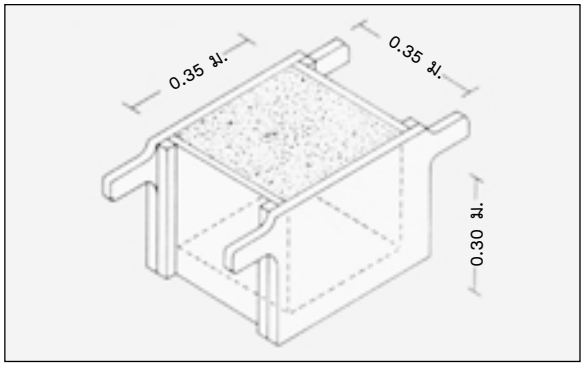
• สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม.

ปูนซีเมนต์	= 305 กก./ลบ.ม.
ทราย	= 635 กก./ลบ.ม.
หิน	= 1,275กก./ลบ.ม.
น้ำ	= 185 กก./ลบ.ม.

ค่ายุบตัว ประมาณ 10 ซม.

• ข้อเสนอแนะ

1) ถ้าผสมคอนกรีตโดยปริมาตร เพื่อให้ได้ปริมาตรที่แน่นอนและสม่ำเสมอ ควรจัดทำกะบะไม้มาตรฐาน สำหรับตวงส่วนผสม โดยกำหนดให้กะบะไม้นี้มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรซีเมนต์ 1 ถุง หรือ 50 กก. ซึ่งกะบะไม้นี้จะมีขนาดกว้าง 0.35 ม. ยาว 0.35 ม. สูง 0.30 ม. ดังแสดงในรูปที่ 18.2



รูปที่ 18.2 *กะบะไม้มาตรฐานใช้ในการตวงปริมาตร หิน ทราย*

2) ในการกำหนดสัดส่วนผสมโดยปริมาตรนี้ไม่ได้กำหนดปริมาณน้ำ ซึ่งอาจมีการใช้น้ำในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

3) ในประเทศไทยมีปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างทั่ว ๆ ไปอยู่ 2 ประเภทคือ ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 การกำหนดสัดส่วนผสมโดยวิธีนี้ควรจะบ่งชี้ไปในแบบด้วยว่าจะใช้ปูนซีเมนต์ชนิดใด เพราะปูนซีเมนต์ทั้ง 2 นี้ ให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันมาก

18.8 การออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา

ในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดา (Normal Weight Concrete) ตามมาตรฐานของอเมริกานี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ กล่าวคือ

• ปูนซีเมนต์

- ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 แต่สามารถใช้ค่า 3.15 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

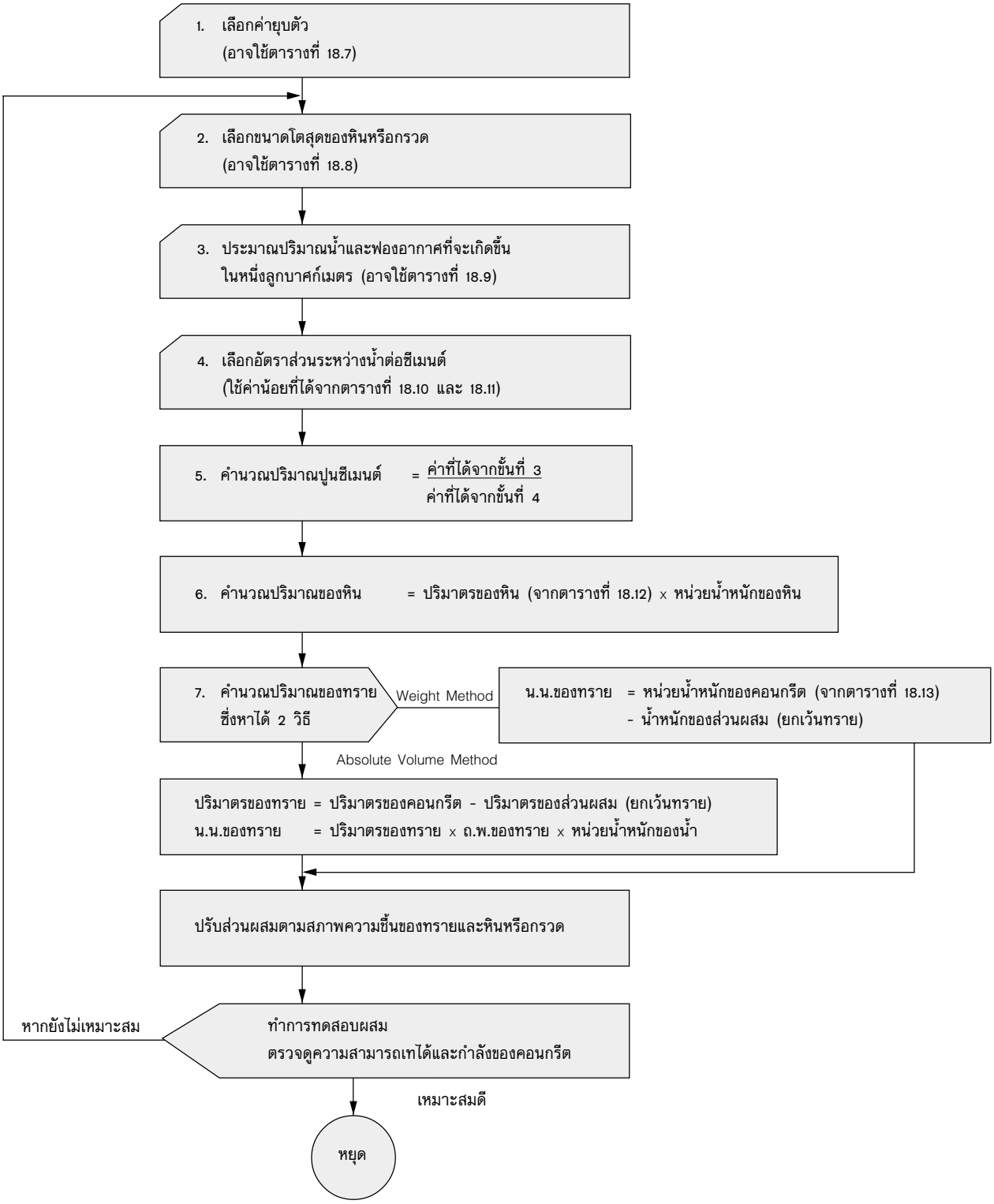
• มวลรวม

- ขนาดคละ ควรมีส่วนคละตามมาตรฐาน ASTM C 33
- ความถ่วงจำเพาะ
  ทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128
  หิน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 127
- ความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 70 และ ASTM C 566
- ความละเอียดของทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 125
- หน่วยน้ำหนักของมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 29

เมื่อทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว จึงหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามขั้นตอนที่แสดงในแผนภาพรูปที่ 18.3

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 18.3 *แผนภาพออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา*



© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตารางที่ 18.7 *ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ*

ประเภทของงาน	ค่าความยุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

ตารางที่ 18.8 *ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ*

ขนาดความหนาของโครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คาน ผนัง และเสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีตรับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0-15.0	1/2-3/4	12.5-20	3/4	20	3/4-1	20-25	3/4-1 1/2	20-40
15.0-30.0	3/4-1 1/2	20-40	1 1/2	40	1 1/2	40	1 1/2-3	40-75
30.0-75.0	1 1/2-3	40-75	3	75	1 1/2-3	40-70	3	75
มากกว่า 75.0	1 1/2-3	40-75	6	150	1 1/2-3	40-75	3-6	75-150

ตารางที่ 18.9 *ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ*

ค่าความยุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม.^{3} สำหรับวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ							
	3/8" (10 มม.)	1/2" (12.5 มม.)	3/4" (20 มม.)	1" (25 มม.)	1 1/2" (40 มม.)	2" (50 มม.)	3" (75 มม.)	6" (150 มม.)
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Non Air Entraining Concrete)								
3-5	205	200	185	180	160	155	145	125
8-10	225	215	200	195	175	170	160	140
15-18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Concrete)								
3-5	180	175	165	160	145	140	135	120
8-10	200	190	180	175	160	155	150	135
15-18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ 18.10 *อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง*

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลา หรือมีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำสลับกันบ่อย ๆ (เฉพาะคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำทะเล หรือสัมผัสกับซัลเฟต
โครงสร้างบาง ๆ ที่มีเหล็กหุ้ม บางกว่า 3 ซม.	0.45	0.40 *
โครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมด	0.50	0.45 *

* ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต อาจเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นี้ได้อีก 0.05

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตารางที่ 18.11 *ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต*

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ใช้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน ϕ 15x30 ซม. ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20%

ตารางที่ 18.12 *ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต*

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ กัน			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8" (10 มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2" (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4" (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1" (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2" (40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2" (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3" (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6" (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

หมายเหตุ ค่าที่กำหนดให้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 18.13 *หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ*

ขนาดโตสุดของหิน	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ลบ.เมตร)	
	คอนกรีตที่ไม่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตที่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ
3/8" (10 มม.)	2285	2190
1/2" (12.5 มม.)	2315	2235
3/4" (20 มม.)	2355	2280
1" (25 มม.)	2375	2315
1 1/2" (40 มม.)	2420	2355
2" (50 มม.)	2445	2375
3" (75 มม.)	2465	2400
6" (150 มม.)	2505	2435

ตัวอย่างการหาสัดส่วนผสมความมาตรฐานอเมริกา

จงหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับงานเทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยต้องการกำลังอัดประลัยเฉลี่ย (fc') ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 250 โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และค่า s = 30 กก./ตร.ซม. กำหนดให้ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 20 มม. (3/4") มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% และมีหน่วยน้ำหนัก (แห้งและอัดแน่น) เป็น 1,600 กก./ลูกบาศก์-เมตร มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80

วิธีทำ ทำตามลำดับขั้นดังนี้

1. กำลังที่ต้องผลิต = (fc') + ks

= 250 + (1.645 x 30) = 300

2. จากข้อมูลในตารางที่ 18.7 และแนวทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไปเห็นว่าควรใช้ค่าความยุบตัว 8-10 ซม.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

3. ข้อกำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 20 มม.

4. จากตารางที่ 18.9 เมื่อขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเป็น 20 มม. ค่าความยุบตัว 8-10 ซม. ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศจะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ = 200 ลิตร/ลบ.เมตรของคอนกรีต

5. จากตารางที่ 18.11 สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลัง 300 กก./ตร.ซม. จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ต้องใช้ = 0.55

6. ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ = $\frac{200}{0.55}$ = 364 กก.

7. หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ จากตารางที่ 18.12 เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของวัสดุผสมละเอียดเท่ากับ 2.80 และขนาดโตสุดของวัสดุหยาบเป็น 20 มม. จะได้ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่น = 0.62 ลบ.เมตร/ลบ.เมตรของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหิน = 1,600 กก./ลบ.เมตร

ดังนั้นน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบใช้ = 0.62 x 1,600 = 992 กก./ลบ.เมตร ของคอนกรีต

8. หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม :

ปริมาตรของน้ำ = $\frac{200}{1,000}$ = 0.200 ม.^{3}

ปริมาตรของซีเมนต์ = $\frac{364}{3.15 \times 1,000}$ = 0.116 ม.^{3}

ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ = $\frac{992}{2.70 \times 1,000}$ = 0.367 ม.^{3}

ปริมาตรของฟองอากาศ = 0.02x1.0 = 0.020 ม.^{3}

ดังนั้น ปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดยกเว้นทราย = 0.703 ม.^{3}

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ = 1-0.703 = 0.297 ม.^{3}

น้ำหนักของทรายแห้ง = 0.297x2.60x1,000 = 772 กก.

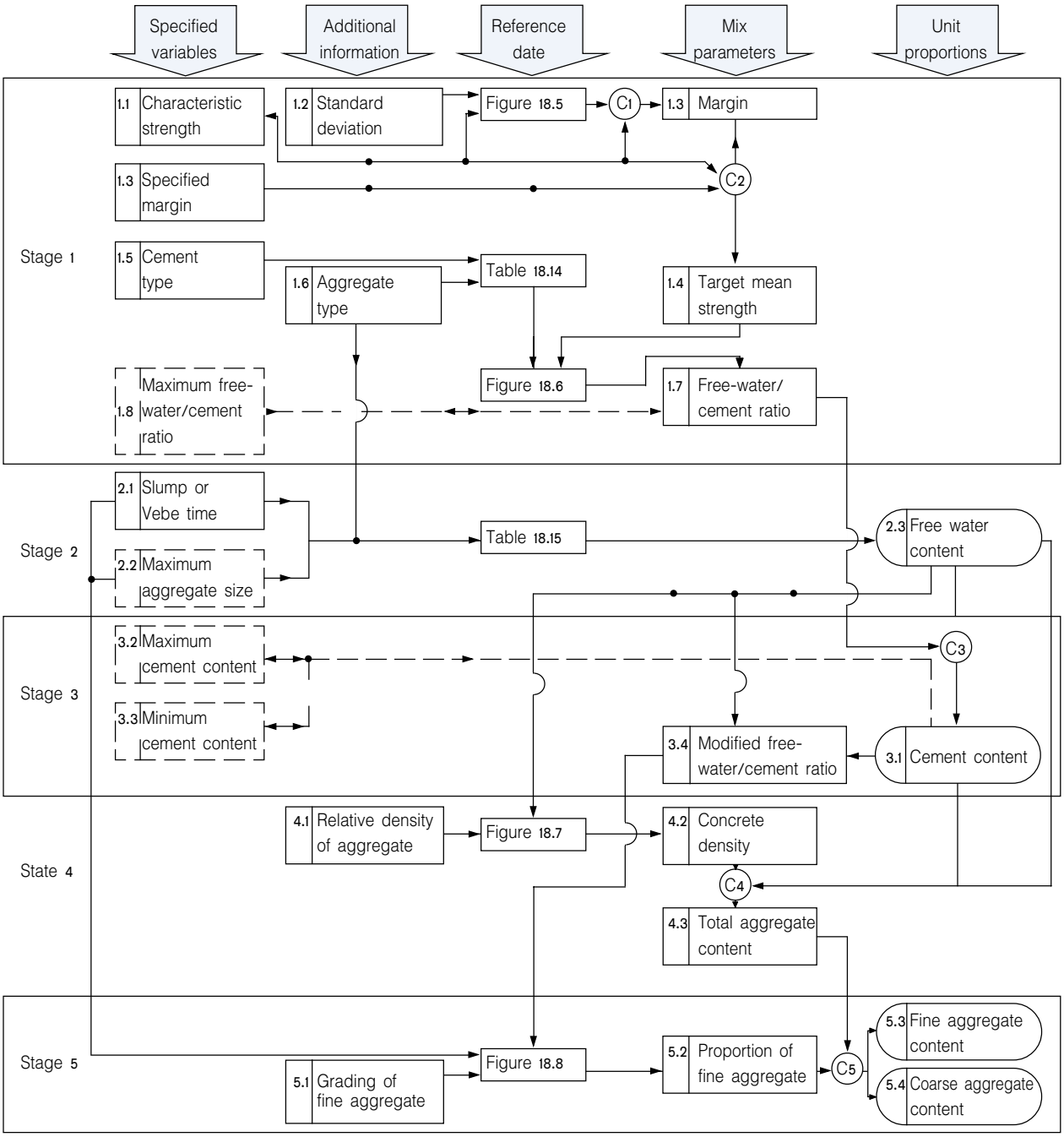
ฉะนั้น คอนกรีต 1 ลบ.เมตร ต้องใช้

ซีเมนต์	364	กก.
น้ำ	200	กก.
วัสดุผสมหยาบ	992	กก.
วัสดุผสมละเอียด	772	กก.
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2,328	กก.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

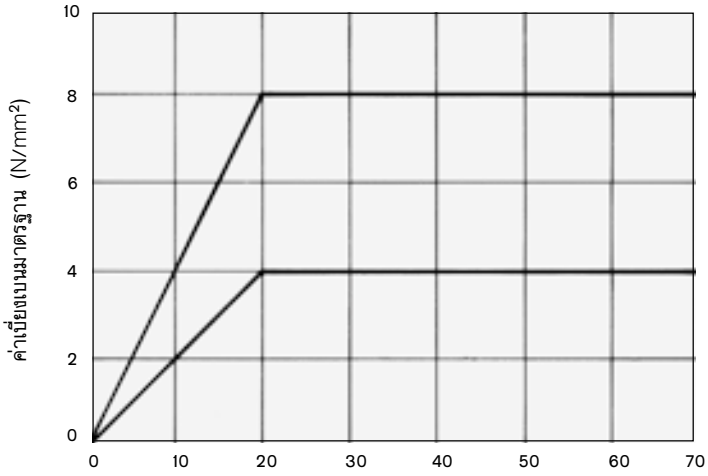
18.9 การออกแบบตามมาตรฐานอังกฤษ

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานอังกฤษ จะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังแสดงในแผนภาพ โดยต้องอาศัยข้อมูลจากกราฟและตาราง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ตารางที่ 18.4 *แผนภาพการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมารตรฐานอังกฤษ*

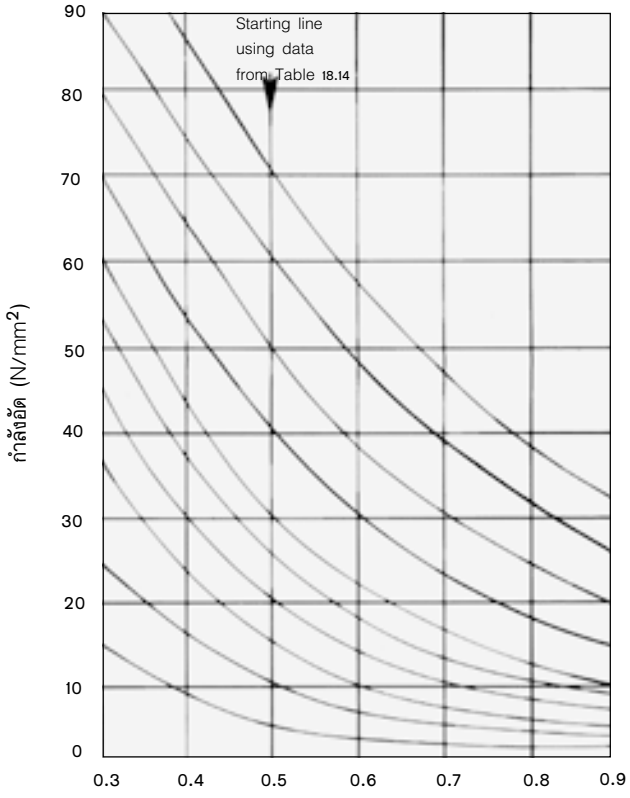
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



A ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่น้อยกว่า 20 ค่า

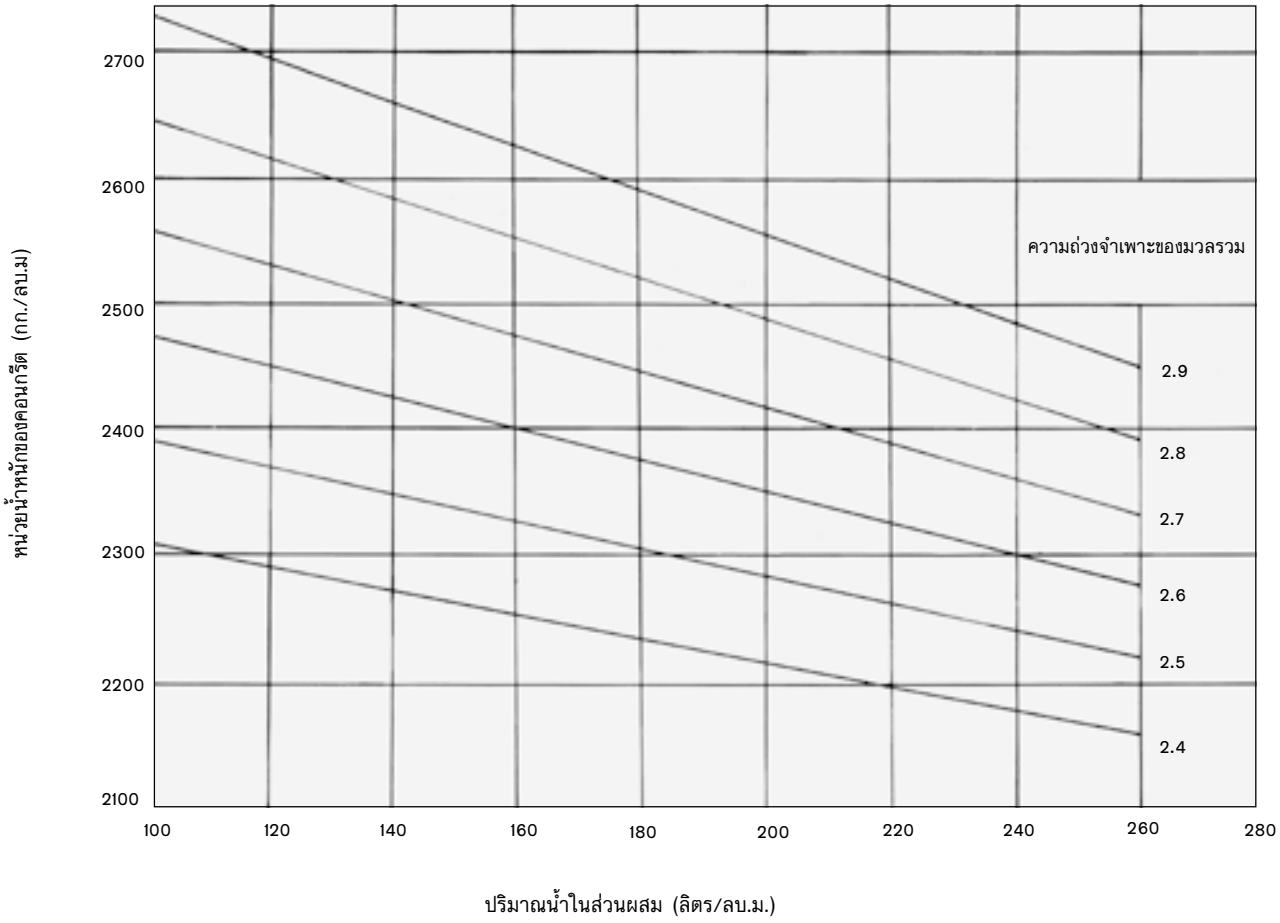
B ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่ 20 ค่า หรือมากกว่า

รูปที่ 18.5 *ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและกำลังอัดที่ออกแบบ (fc')*

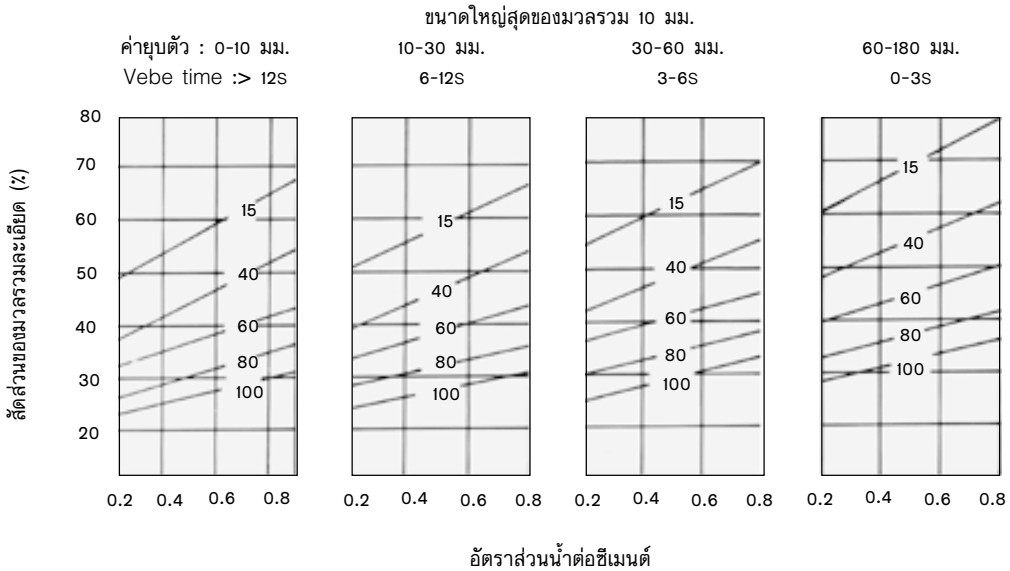


รูปที่ 18.6 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

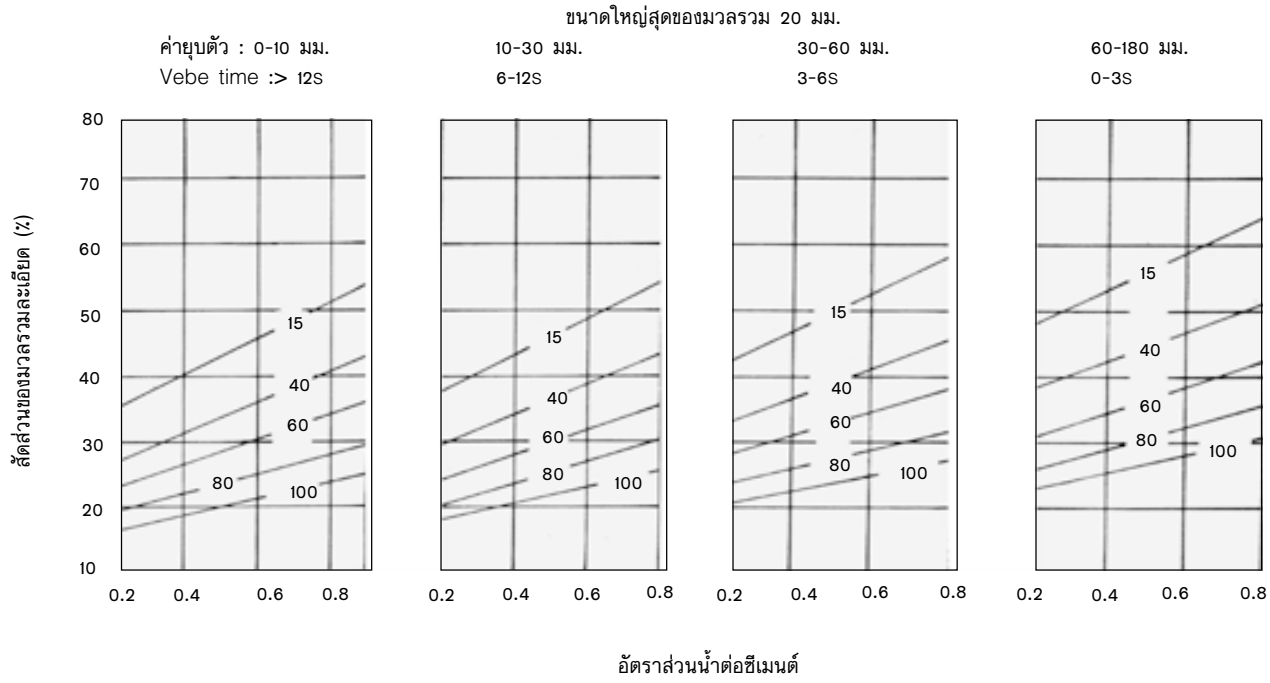


รูปที่ 18.7 *ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่อัดแน่น*

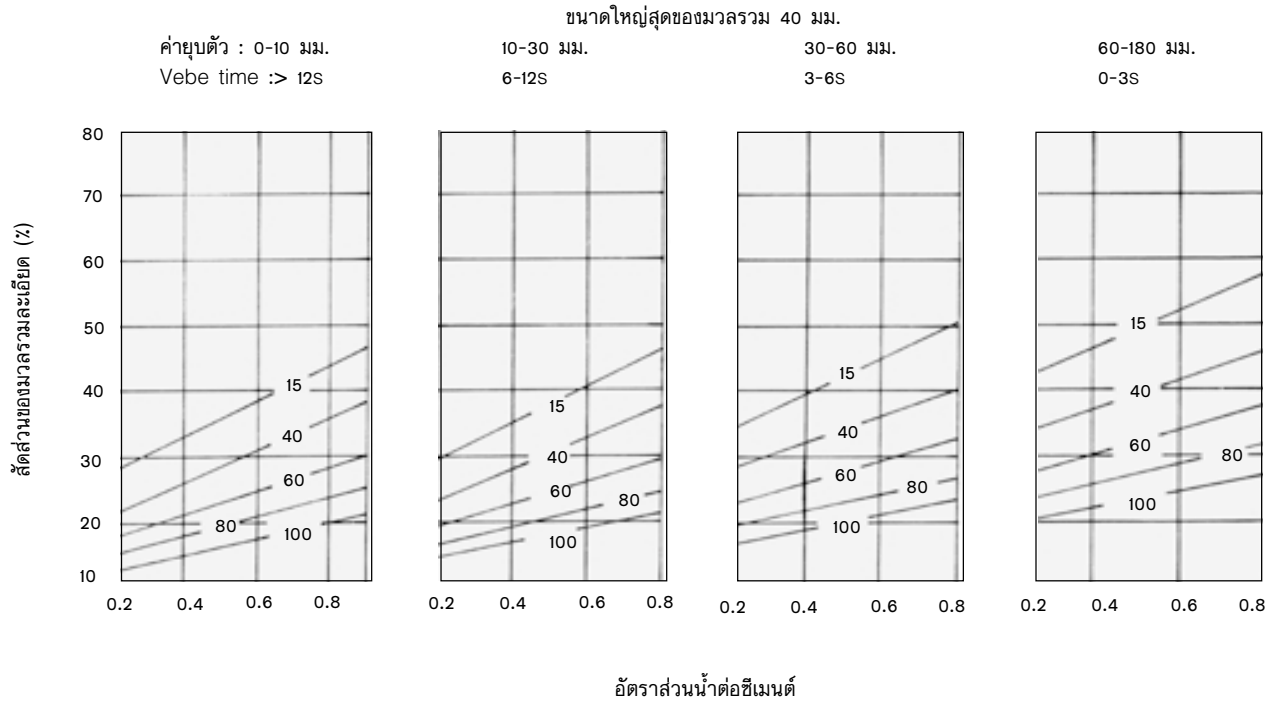


รูปที่ 18.8 *สัดส่วนมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ควรใช้*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 18.8 *(ต่อ)*



รูปที่ 18.8 *(ต่อ)*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ชนิดของซีเมนต์	ชนิดของหิน	กำลังอัด (N/mm^2)			
		อายุวัน			
		3	7	28	91
ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หรือประเภท 5	กรวด	22	30	42	49
	หินย่อย	27	36	49	56
ปอร์ตแลนด์ประเภท 3	กรวด	29	37	48	54
	หินย่อย	34	43	55	61

1 N/mm^2 = 10.19 ksc

ตารางที่ 18.14 *ค่ากำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่มีค่า w/c = 0.50*

ค่ายุบตัว (มม.)		0-10	10-30	30-60	60-180
เวลาวีบี (วินาที)		> 12	6-12	3-6	0-3
ขนาดใหญ่สุด (มม.)	ชนิดของหิน	ปริมาณน้ำ (ลิตร)			
10	กรวด	150	180	205	225
	หินย่อย	180	205	230	250
20	กรวด	135	160	180	195
	หินย่อย	170	190	210	225
40	กรวด	115	140	160	175
	หินย่อย	155	175	190	205

ตารางที่ 18.15 *ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ตามต้องการ*

หมายเหตุ

เมื่อใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่แตกต่างกัน

ปริมาณน้ำ = 2/3 wf + 1/3 wc

wf คือ ปริมาณน้ำสำหรับมวลรวมละเอียดชนิดต่าง ๆ

wc คือ ปริมาณน้ำสำหรับมวลรวมหยาบชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่างการหาสัดส่วนผสมตามมาตรฐานอังกฤษ

จงหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับงานเทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยต้องการกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 40 N/mm^2 กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่ายุบตัว 100 มม. ใช้หินย่อยขนาดใหญ่สุด 20 มม. ทรายแม่น้ำ ค่าความถ่วงจำเพาะของหินและทราย = 2.65 ทรายผ่านตะแกรง No 30 หรือ 600 μm 50% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า 4 N/mm^2

การหาสัดส่วนผสมโดยวิธีนี้ทำได้โดยสามารถกรอกข้อมูลในแบบฟอร์มมาตรฐาน 5 ขั้นตอน ดังนี้

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

Stage	Item		Reference or calculation	Values
1	1.1	Characteristic strength	Specified	40 N/mm² at 28 days; Proportion defective 5 %
	1.2	Standard deviation	Fig 18.5	– N/mm² or no data – N/mm²
	1.3	Margin	C1	(k = 1.645) 1.645 x 4.0 = 6.6 N/mm²
			or	
			Specified	– N/mm²
	1.4	Target mean strength	C2	40 + 6.6 = 46.6 N/mm²
	1.5	Cement type	Specified	OPC/SRPC/RHPC
	1.6	Aggregate type: coarse		Crushed/uncrushed
		Aggregate type: fine		Crushed/uncrushed
	1.7	Free-water/cement ratio	Table 18.14 Fig 18.6	0.52
	1.8	*Maximum free-water/cement ratio*	*Specified*	– – Use the lower value: 0.52
2	2.1	Slump or Vebe time	Specified	Slump 100 mm or Vebe Time – s
	2.2	Maximum aggregate size	Specified	
	2.3	Free-water content	Table 18.15	(2/3 x 195) + (1/3 x 225): 205 kg/m³
3	3.1	Cement content	C3	205 ÷ 0.52 = 395 kgm³
	3.2	*Maximum cement content*	*Specified*	– kg/m³
	3.3	*Minimum cement content*	*Specified*	– kg/m³
				use 3.1 if ≤ 3.2 use 3.3 if > 3.1: 395 kgm³
	3.4	Modified free-water/cement ratio		–
4	4.1	Relative density of aggregate (SSD)		2.65 know/assumed
	4.2	Concrete density	Fig 18.7	2,375 kgm³
	4.3	Total aggregate content	C4	2,375 – 395 – 205 = 1,775 kgm³
5	5.1	Grading of fine aggregate	Percentage passing 600 μm sieve	50 %
	5.2	Proportion of fine aggregate	Fig 18.8	40 %
	5.3	Fine aggregate content	C5	1,775 x 0.40 = 710 kg/m³
	5.4	Coarse aggregate content	C5	1,775 – 710 = 1,065 kg/m³

Quantities	Cement (kg)	Water (kg or L)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg) 10 mm	20 mm	40 mm
Per m³ (ใช้ค่าละเอียดถึง 5 กก.)	395	205	710		1,065	
Per trail max of ____ m³						

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

วิธีหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะใช้ค่าจากตารางที่ 18.14 และรูปที่ 18.6 โดยมีวิธีการหาดังนี้

1) ดูข้อกำหนดว่าให้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทใด

2) ดูข้อกำหนดว่าให้ใช้มวลรวมหยาบประเภทใด

3) ดูข้อกำหนดว่าต้องการกำลังที่อายุกี่วัน

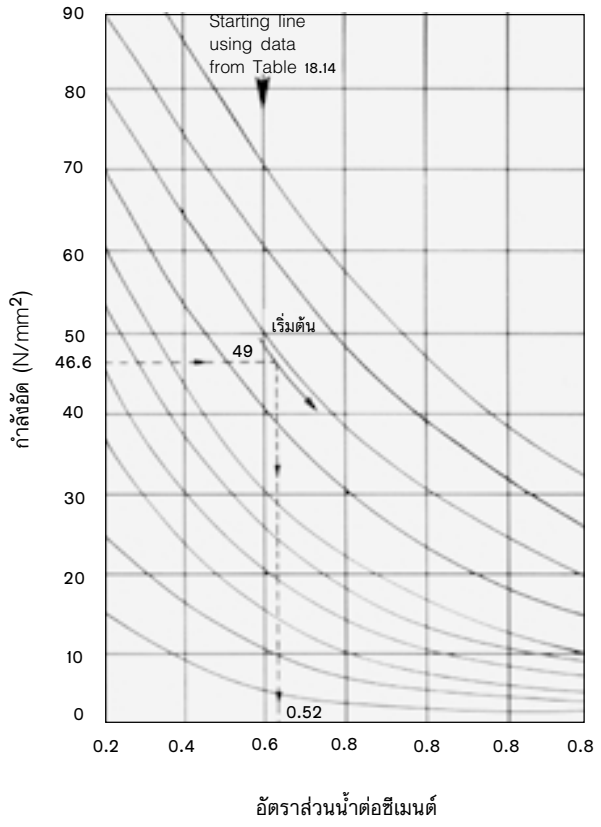
ในที่นี้กำหนดให้ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้หินย่อย ต้องการกำลังที่ 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดจากตารางที่ 18.14 เท่ากับ 49 N/mm^2 จากนั้นใช้กราฟรูปที่ 18.6 หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต้องการโดยมีวิธีการทำดังนี้

1) เริ่มที่เส้น W/C = 0.50 กำหนดตำแหน่งของกำลังอัดที่ได้ จากตารางที่ 18.14 ในที่นี้คือ 49

2) ลากเส้นขนานกับเส้นกราฟที่อยู่ใกล้ที่สุด ในรูปที่ 18.6 ไปตัดกับเส้นกำลังอัดที่ต้องการซึ่งลากขนานกับแกนนอน

3) ณ จุดตัดลากเส้นขนาดแกนตั้งมาตัดแกนนอน จะได้ค่า W/C

ในที่นี้ได้ค่า W/C เท่ากับ 0.52 โดยได้แสดงการหาไว้ในรูปด้านล่าง



รูปที่ 18.9 *กราฟแสดงการหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์*

18.10 การออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสำหรับประเทศไทย

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสำหรับประเทศไทยนี้ เป็นวิธีการออกแบบที่นำมาตรฐานการออกแบบของประเทศอเมริกา และของประเทศอังกฤษ มาประยุกต์ให้เข้ากับสภาพของวัตถุดิบที่มีใช้ในประเทศไทย คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในประเทศไทยได้ถูกทดสอบและเก็บรวบรวมหาค่าเฉลี่ยดังค่าในตารางที่18.16

วัตถุดิบ	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Sp.gr.)	ค่าการดูดซึม (%)
ปูนซีเมนต์	3.15	-
หินย่อย	2.70	0.50
ทรายแม่น้ำ	2.65	0.70

ตารางที่ 18.16 *ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ปริมาณน้ำและค่ายุบตัว

ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวมาตรฐานเมื่อใช้หินย่อยและทรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) แสดงไว้ในตารางที่ 18.17

ค่ายุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต	
	หินย่อยขนาด 1 – # 4	หินย่อยขนาด 3/4 – #4
7.5 ± 2.5	180	190
10.0 ± 2.5	190	200
12.5 ± 2.5	200	210

ตารางที่ 18.17 *ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ*

• ปริมาณส่วนละเอียด

จากการประยุกต์การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานต่าง ๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อใช้หินย่อย และทรายแม่น้ำ เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในประเทศไทย ปริมาณส่วนละเอียดอันได้แก่ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณทรายที่เหมาะสมที่จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ ไม่แยกตัว และได้กำลังอัดตามต้องการ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 18.18

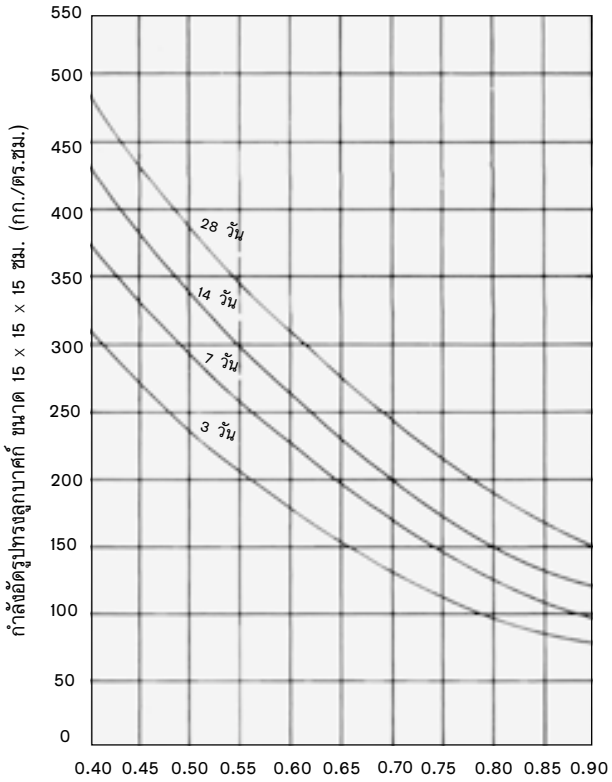
ขนาดหิน	ปริมาตรปูนซีเมนต์ + ปริมาตรทราย
1"-#4	38% โดยปริมาตร หรือ 380 ลิตร
3/4"-#4	40% โดยปริมาตร หรือ 400 ลิตร

ตารางที่ 18.18 *ปริมาณส่วนละเอียดเมื่อใช้หินขนาดใหญ่สุดแตกต่างกัน*

สำหรับงานพิเศษบางประเภทเช่น งานคอนกรีตเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่มีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. นั้น ในการออกแบบอาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณส่วนละเอียดขึ้นไปเป็น 42-45% โดยปริมาตรเพื่อป้องกันปัญหาการแยกตัวของคอนกรีต

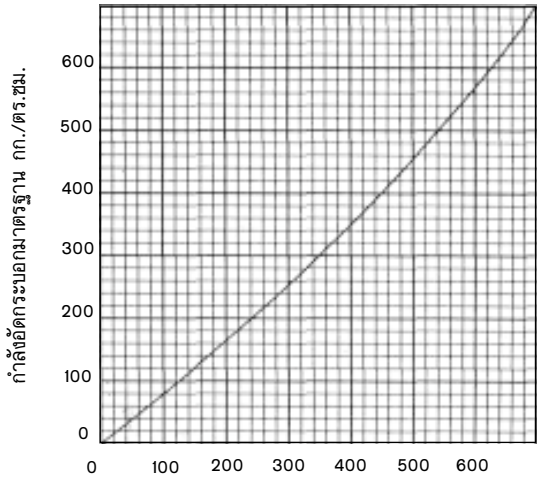
• อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีต เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ความสัมพันธ์ดังกล่าว สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผลิตใช้ในประเทศไทย แสดงในกราฟรูปที่ 18.9



รูปที่ 18.9 *อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัดคอนกรีต*

ถ้าต้องการใช้กำลังอัดรูปทรงกระบอกในการออกแบบมาตรฐาน วสท.ได้กำหนดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดทั้ง 2 รูปทรงไว้ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 18.10



รูปที่ 18.10 *การแปลงกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

• ผลของน้ำยาต่อการออกแบบส่วนผสม

น้ำยาผสมคอนกรีตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. ลดน้ำในส่วนผสม
2. ยืดเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทลดน้ำนี้ เมื่อผสมเข้าไปในส่วนผสมจะส่งผลให้ลดปริมาณน้ำได้ 5-10% ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 18.19

ค่ายุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต เมื่อใส่น้ำยาประเภทน้ำ	
	หินย่อยขนาด 1 –# 4	หินย่อยขนาด 3/4 –#4
7.5 ± 2.5	170	180
10.0 ± 2.5	180	190
12.5 ± 2.5	190	200

ตารางที่ 18.19 *ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการเมื่อใส่น้ำยาประเภทลดน้ำ*

นอกจากนี้ในปัจจุบันยังนิยมใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก หรือน้ำยา Superplasticizer ซึ่งสามารถลดน้ำได้ 15-30% ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะใช้เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวมาตรฐานจะลดลงไปด้วย

• ขั้นตอนในการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ (1)

รวบรวมความต้องการของผู้ออกแบบหรือผู้รับเหมา เช่น
- กำลังอัด
- ค่ายุบตัว
- ขนาดใหญ่สุดของหินที่จะใช้
- ใส่น้ำยาผสมคอนกรีตหรือไม่

ขั้นตอนที่ (2)

1) หาปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ
2) หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดตามต้องการ จากกราฟอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และค่ากำลังอัด รูปที่ 18.9
3) หาค่าน้ำหนักซีเมนต์ = ปริมาณน้ำ/ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ขั้นตอนที่ (3)

$$\text{ปริมาตรซีเมนต์} = \frac{\text{น้ำหนักปูนซีเมนต์}}{\text{ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์}}$$

ขั้นตอนที่ (4)

ปริมาตรทราย = (380 หรือ 400)-ปริมาตรปูนซีเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ (5)

น้ำหนักทราย = ปริมาตรทราย x ความถ่วงจำเพาะของทราย

ขั้นตอนที่ (6)

ปริมาตรหิน = 1000* -ปริมาตรซีเมนต์-ปริมาตรน้ำ** - ปริมาตรทราย

ขั้นตอนที่ (7)

น้ำหนักหิน = ปริมาตรหิน x ความถ่วงจำเพาะของหิน

ขั้นตอนที่ (8)

หาปริมาตรน้ำยาที่ใช้

* คอนกรีต 1 ลบ.ม. มีปริมาตร 1,000 ลิตร

** ปริมาตรน้ำ = น้ำหนักน้ำ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ตัวอย่างการออกแบบคอนกรีต

ถ้าผู้ออกแบบต้องการใช้คอนกรีตที่กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 240 กก./ตร.ซม. โดยต้องมีส่วนเผื่อ (margin) 60 กก./ตร.ซม. โครงสร้างพื้นอาคาร โดยมีข้อกำหนดอื่น ๆ ดังนี้

ค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม. ใช้หินขนาด 3/4"-#4 และใส่น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทลดน้ำและยืดเวลาการแข็งตัว

การออกแบบจะทำดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) รวบรวมความต้องการของลูกค้า

1. กำลังอัดที่ออกแบบ 240 กก./ตร.ซม. และกำลังอัดที่ต้องผลิตคือ 240+60 = 300 กก./ตร.ซม.
2. ค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม.
3. ขนาดหิน 3/4"-#4
4. ใส่น้ำยาลดน้ำและยืดเวลาการแข็งตัว

ขั้นตอนที่ (2) ปริมาณน้ำที่ใช้และน้ำหนักซีเมนต์

- หาปริมาณน้ำจากตารางที่ 18.19 ค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม.ใช้หิน 3/4"-#4 ใส่น้ำยาผสมคอนกรีต
  ปริมาณน้ำที่จะใช้ 180 ลิตร/ลบ.ซม. คอนกรีต
- หาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จากกราฟรูปที่ 18.9 ซึ่งได้ค่า W/C = 0.61
- น้ำหนักซีเมนต์ 180/0.61 = 295 กก.

ขั้นตอนที่ (3) หาปริมาตรซีเมนต์

ปริมาตรซีเมนต์ = น้ำหนักซีเมนต์/ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์
= 295/3.15
= 94 ลิตร

ขั้นตอนที่ (4) หาปริมาตรทราย

เนื่องจากที่ใช้ขนาด 3/4" - # 4
ปริมาตรซีเมนต์+ปริมาตรทราย = 40% หรือ 400 ลิตร
ปริมาตรทราย = 400-94 (ค่านี้ได้จากขั้นตอนที่ (3))
= 306 ลิตร

ขั้นตอนที่ (5) หาน้ำหนักทราย

น้ำหนักทราย = ปริมาตรทรายxความถ่วงจำเพาะของทราย
= 305x2.65
= 811 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ (6) หาปริมาตรหิน

ปริมาตรหิน = 1,000-ปริมาตรซีเมนต์-ปริมาตรน้ำ-ปริมาตรทราย
= 1,000-94-180-306
= 420 ลิตร

ขั้นตอนที่ (7) หาน้ำหนักของหิน

น้ำหนักของหิน = ปริมาตรหินxความถ่วงจำเพาะของหิน
= 420 x2.70
= 1,134 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ (8) หาปริมาณน้ำยาที่ใช้ (สมมติว่าปริมาณน้ำยาที่ผู้ผลิตแนะนำคือ 250 ซีซี./100 กก.ซีเมนต์)

ปริมาณน้ำยาที่ใช้ = น้ำหนักซีเมนต์ x ปริมาณที่ใช้

$$= 295 \times \frac{250}{100}$$

= 737 ซีซี.

ในการหาสัดส่วนผสมความละเอียดของส่วนผสมควรเป็นดังนี้

ซีเมนต์	ละเอียดถึง	5	กก.
น้ำ	ละเอียดถึง	5	ลิตร
หินและกรวด	ละเอียดถึง	5	กก.
น้ำยาผสมคอนกรีต	ละเอียดถึง	50	ซีซี.

(ยกเว้นน้ำยาเพิ่มฟองอากาศ)

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. คอนกรีตเป็นดังนี้

ซีเมนต์	295	กก.
น้ำ	180	ลิตร
ทราย	810	กก.
หิน	1,135	กก.
น้ำยาผสมคอนกรีต	750	ซีซี.

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

18.11 การปรับส่วนผสมคอนกรีตเนื่องจากหินทรายไม่อยู่ในสภาพที่ออกแบบ

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต น้ำหนักของหินทรายที่ได้นั้นคือ น้ำหนักของหินทรายที่อยู่ในสภาพที่อิ่มตัวผิวแห้ง แต่สภาพหินทรายที่ใช้โดยทั่วไปไม่ได้อยู่ในสภาพที่ออกแบบ ทำให้ต้องมีการปรับส่วนผสมให้ถูกต้อง

- **สภาพหินทราย**

หินทรายโดยทั่วไปจะมีอยู่ 4 สภาพดังนี้

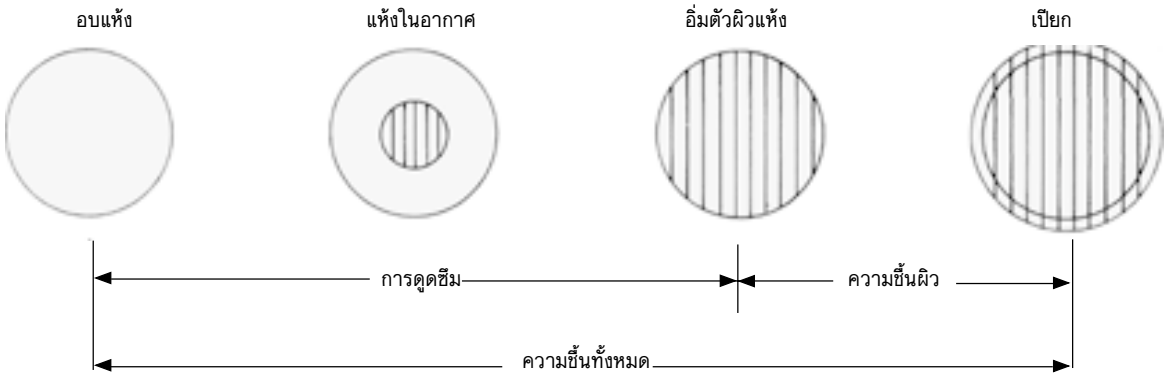
1) อบแห้ง (Oven Dry)

2) แห้งในอากาศ (Air Dry)

3) อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)

4) เปียก (Wet)

ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 18.11



รูปที่ 18.11 *สภาพความชื้นของมวลรวม*

ค่าการดูดซึมของหินย่อยและทรายแม่น้ำที่ใช้อยู่ทั่วไปในประเทศไทย

หิน การดูดซึม 0.5%

ทราย การดูดซึม 0.7%

และสภาพหินทรายทั่ว ๆ ไปจะเป็นดังนี้

- ทราย อยู่ในสภาพเปียกทั่ว ๆ ไปมีความชื้นทั้งหมดอยู่ระหว่าง 2-8%

- หิน อยู่ในสภาพแห้งในอากาศ

- **ตัวอย่างการปรับส่วนผสมคอนกรีต**

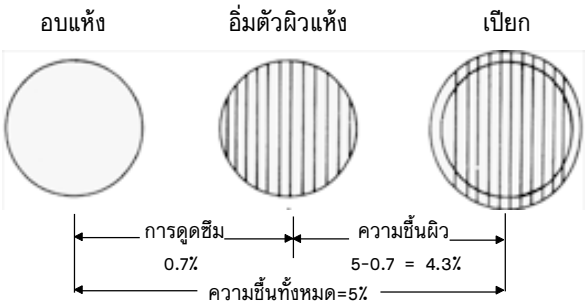
ถ้าสัดส่วนผสมของคอนกรีตเป็นดังนี้

ปูนซีเมนต์	295	กก.
น้ำ	180	ลิตร
ทราย	810	กก.
หิน	1,135	กก.
น้ำยา	750	ซีซี
ค่ายุบตัว	7.5 ± 2.5	ซม.

กำหนดให้

ทรายมีความชื้น 5% การดูดซึม 0.7%

หินอยู่ในสภาพ อิ่มตัวผิวแห้ง การดูดซึม 0.5%



© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

นั่นคือน้ำหนักทราย 100 กก. มีน้ำมากไป

= 4.3 กก.

นั่นคือน้ำหนักทราย 810 กก. มีน้ำมากไป

$$= \frac{4.3 \times 810}{100}$$

= 34.8 กก.

∴ จะต้องชั่งทรายเพิ่มขึ้นเป็น

= 810+34.8 = 844.8 กก.

เนื่องจากหินอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งจึงไม่ต้องปรับความชื้น ดังนั้นจะต้องใส่น้ำในส่วนผสมทั้งสิ้น

= 180-34.8 ลิตร

= 145.2 ลิตร

อัตราส่วนผสมที่ต้องชั่ง

ซีเมนต์	395	กก.
น้ำ	145	ลิตร
ทราย	845	กก.
หิน	1,135	กก.
น้ำยา	750	ซีซี

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

บทที่ 19
การควบคุมคุณภาพคอนกรีต

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตมีบทบาทสำคัญมากต่อวงการก่อสร้าง กระบวนการควบคุมคุณภาพคอนกรีตไม่ใช้เพียงการทดสอบค่ายุบตัว และการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเท่านั้นแต่รวมไปถึงการคัดเลือกวัตถุดิบและสัดส่วนผสม การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ การควบคุมเครื่องจักรและอุปกรณ์ การควบคุมขบวนการผลิต การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการควบคุมคุณภาพ คือ ต้องการให้เกิดความมั่นใจว่าคอนกรีตที่ผลิต มีคุณภาพสูงตามที่มาตรฐานงานกำหนด

19.1 ความแตกต่างของคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ

การควบคุมคุณภาพ จำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับขบวนการผลิตสินค้าวัสดุก่อสร้างทุกชนิดแต่เนื่องจากคอนกรีตมีคุณลักษณะพิเศษต่าง ๆ ที่แตกต่างออกไปจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ที่ต้องให้ความใส่ใจอย่างมาก กล่าวคือ

1) คอนกรีตยังไม่ใช่วัสดุสำเร็จ ณ เวลาที่เทลงแบบเพราะขณะนั้นคอนกรีตยังอยู่ในสภาพที่เหลวแต่การใช้งานจริงใช้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

2) คุณภาพและความสม่ำเสมอของคอนกรีต ผันแปรค่อนข้างมาก เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ทั้งที่สามารถควบคุมได้และที่ยากต่อการควบคุม

3) คุณภาพของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะถูกกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ในหลายขั้นตอนตั้งแต่

- การเลือกและการผันแปรของส่วนผสม
- คุณสมบัติของวัสดุผสม
- สัดส่วนผสม
- การสม่ำเสมอในการผสม
- การขนส่งและการเทลงแบบ

4) การรับรองกำลังอัด จะรับรองหลังจากที่เทคอนกรีตนั้นไปแล้ว 3, 7, 14 หรือ 28 วัน ซึ่งแตกต่างจากเหล็ก ไม้ หรือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ซึ่งสามารถทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ก่อนนำไปใช้งาน

5) ในขณะที่สินค้าอื่น ๆ พยายามที่จะทำสินค้าให้เป็นมาตรฐาน แต่อุตสาหกรรมคอนกรีต จำเป็นต้องดัดแปลง ปรับปรุงสัดส่วนผสมเพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้างแต่ละโครงการและจำเป็นต้องใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด

19.2 การควบคุมคุณภาพ

• คำนิยาม

การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) หมายถึง กิจกรรมและกลวิธีการปฏิบัติเพื่อสนองความต้องการด้านคุณภาพ

การประกันคุณภาพ (Quality Assurance) หมายถึง การปฏิบัติการทั้งหมดตามระบบและแผนที่วางไว้ ที่ให้ได้มาซึ่งความเชื่อมั่นว่าผลิตภัณฑ์หรือ บริการนั้นเป็นไปตามคุณภาพที่ต้องการ

จากคำนิยามจะพบว่าการควบคุมคุณภาพเป็นเพียงส่วนหนึ่ง ของการประกันคุณภาพซึ่งทุก ๆ ฝ่ายในวงการก่อสร้างมีความเห็นพร้องกันว่า คอนกรีตที่มีคุณภาพ จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีความเห็นแตกต่างกันในเรื่องของ "ระดับของคุณภาพ"

• ระดับของคุณภาพ

เป้าหมายที่ทุกฝ่ายในวงการก่อสร้างต้องการคือ

1) ให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมากที่สุด

2) หลีกเลี่ยงให้เกิดคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมน้อยที่สุด

3) ให้ราคาโดยรวมต่ำที่สุด

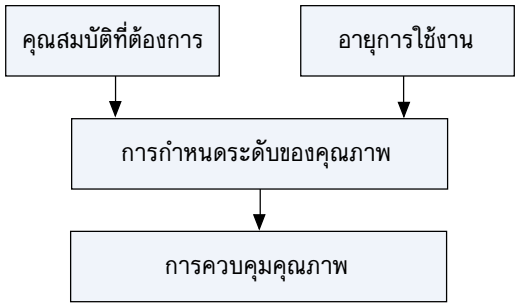
เราใช้ระบบการควบคุมคุณภาพและการประกันคุณภาพเพื่อให้เกิดความน่าจะเป็นสูงสุดที่ได้คุณสมบัติ หรือคุณภาพตาม

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ต้องการ จะเป็นการสูญเสียอย่างมากถ้าผู้ออกแบบกำหนดให้ใช้คอนกรีตที่มีระดับของคุณภาพสูงมากเกินความจำเป็น เพราะจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้นโดยไม่มีความจำเป็น

• อายุการใช้งานของโครงสร้าง

คุณสมบัติที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในเรื่องคุณภาพของคอนกรีต คือ ความทนทานตลอดจนอายุการใช้งาน โครงสร้างต่างกันจะมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 วัน 1 สัปดาห์ เช่น ในงานทางด้านการทหาร จนถึงอายุการใช้งานที่นาน เช่น เขื่อน, สะพาน ดังนั้นนอกจากคุณสมบัติที่ต้องการแล้ว ผู้ออกแบบต้องกำหนดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้นด้วยสรุปองค์ประกอบของการควบคุมคุณภาพแสดงด้วยรูปที่ 19.1



รูปที่ 19.1 *องค์ประกอบของการควบคุมคุณภาพคอนกรีต*

วิศวกรผู้ออกแบบไม่ควรกำหนดคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด แต่ควรมองหาคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีเพียงพอ สำหรับการใช้งาน ในราคาที่ต่ำที่สุด

19.3 กระบวนการควบคุมคุณภาพ

กระบวนการควบคุมคุณภาพ ที่สมบูรณ์นั้น จะต้องประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ 4 ขั้นตอน คือ

1) การตรวจสอบ

2) การบันทึก

3) การวิเคราะห์ผล

4) การติดตามแก้ไข

สำหรับการควบคุมคุณภาพคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วนดังนี้

1) การควบคุมวัตถุดิบ

- ปูนซีเมนต์
- หิน-ทราย
- น้ำ
- น้ำยาผสมคอนกรีต
- วัสดุทดแทนซีเมนต์

2) การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

- พิจารณาศึกษา ทบทวน ข้อกำหนด
- การทบทวน ปรับปรุง เปลี่ยนแปลง ข้อกำหนดให้เหมาะสม
- พัฒนาและเลือกสัดส่วนผสม
- การเสนอส่วนผสมเพื่ออนุมัติใช้งาน
- การประชุมหารือก่อนการเทคอนกรีต
- การรวบรวมข้อมูลลักษณะเฉพาะของคอนกรีต

3) การควบคุม ณ โรงงานคอนกรีต หรือ ณ หน่วยงานผลิต

- การสุ่มตรวจสอบวัตถุดิบที่เข้าโรงงาน
- การกองเก็บวัตถุดิบ เช่น การป้องกันสิ่งสกปรกเจือปน, การระบายน้ำของมวลรวม
- การชั่ง ตวงส่วนผสม เช่น ระบบชั่งและระบบเคลื่อนย้ายวัตถุดิบที่เชื่อถือได้, การตรวจสอบ (Calibrated) เครื่องชั่งและอุปกรณ์ตวงน้ำยา (Dispenser)
- ความถูกต้องในการชั่งตวง
- เครื่องผสมคอนกรีต เช่น สภาพใบผสม, กำลังของเครื่องผสม
- การควบคุมการจัดส่ง
- การบำรุงรักษาเครื่องจักรและกระบวนการผลิต

4) การควบคุมคอนกรีต

- การสุ่มตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบ
- การทดสอบคอนกรีตสด
- การสังเกต ณ หน่วยงานก่อสร้าง
- รายงานข้อมูลเทคนิคต่าง ๆ ในสนาม
- รายงานของพนักงานจัดส่ง
- การเปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ
- การจัดทำผลการทดสอบ

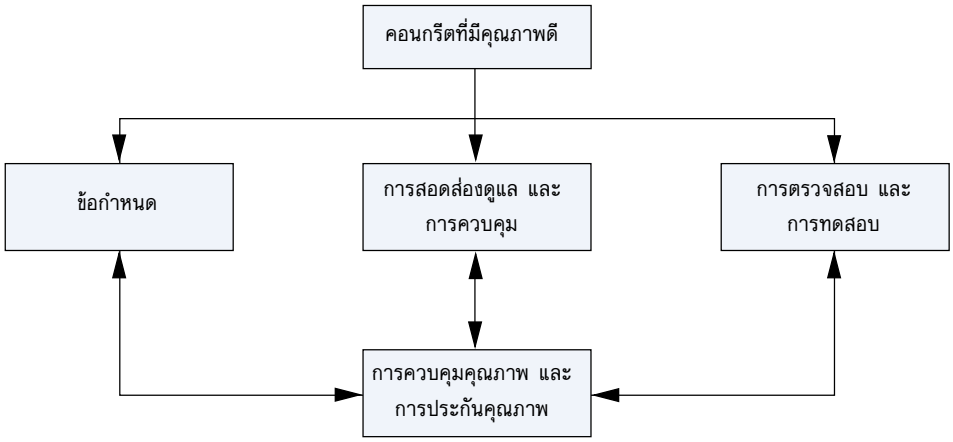
5) การบริการลูกค้า

- การตรวจสอบข้อร้องเรียนของลูกค้า

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

- การวิเคราะห์ข้อผิดพลาด
- เสนอแนะทางแก้ไขปัญหาและหาทางป้องกัน
- ป้อนข้อมูลส่งกลับไปที่หน่วยงานผลิต

การควบคุมคุณภาพ ที่กล่าวมานี้ เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่จะก่อให้เกิดคอนกรีตที่มีคุณภาพดี ดังแสดงในรูป



รูปที่ 19.2 *ปัจจัยที่มีผลทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี*

19.4 การทดสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพ

การทดสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพคอนกรีต แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- การทดสอบเบื้องต้น
- การทดสอบอื่น ๆ

• การทดสอบเบื้องต้น

1. การทดสอบมวลรวม

- ความชื้นมวลรวม
- ส่วนคละ
- ความสกปรก
- ปริมาณ Silt, Clay, และฝุ่น
- ความถ่วงจำเพาะ
- การดูดซึม
- ความแบน
- ความยาว

2. การทดสอบคอนกรีต

- ค่ายุบตัว
- ปริมาณฟองอากาศ
- หน่วยน้ำหนัก
- อุณหภูมิ
- กำลังอัด

• การทดสอบอื่น ๆ

1. การทดสอบปูนซีเมนต์

- กำลังอัดของมอร์ต้า
- เวลาก่อตัว
- Loss on Ignition

2. การทดสอบน้ำยาผสมคอนกรีต

- ความถ่วงจำเพาะ
- ปริมาณของแข็งในน้ำยา
- ประสิทธิภาพการลดน้ำ

3. การทดสอบคอนกรีต

- การทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ
- เวลาการก่อตัว
- กำลัง
- การเจาะคอนกรีตในโครงสร้างเพื่อทดสอบ

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 19.3 *งานเจาะคอนกรีตในโครงสร้างเพื่อทดสอบ*

19.5 การควบคุมคุณภาพ ณ หน่วยงานก่อสร้าง

วัตถุประสงค์สำคัญของการควบคุมคุณภาพคอนกรีต ณ หน่วยงานก่อสร้าง ก็เพื่อตรวจสอบคอนกรีตว่าเป็นตามข้อกำหนดของงานก่อสร้างนั้น ๆ หรือไม่ สำหรับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปในประเทศไทย จะมีข้อกำหนดของงานคอนกรีต ซึ่งส่วนใหญ่จะกำหนดให้ทำการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. การทดสอบค่ายุบตัว
2. การทดสอบกำลังอัด

ในปัจจุบันเวลาก่อสร้างมีจำกัด ผู้รับเหมาะ ส่วนใหญ่จะเปลี่ยนจากการผสมคอนกรีตที่หน่วยงานก่อสร้าง มาเป็นการใช้คอนกรีตผสมเสร็จที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด กล่าวคือในขณะที่เป็นคอนกรีตสด ต้องได้ค่ายุบตัวตามต้องการ และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วต้องได้กำลังอัด ตามข้อกำหนด ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้ คือ เมื่อรถผสมคอนกรีตมาถึงหน่วยงานก่อสร้างจะสุ่มคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบค่ายุบตัว เมื่อค่ายุบตัวที่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนด ก็จะนำคอนกรีตไปเทในส่วนของโครงสร้างโดยที่ยังไม่ทราบว่าคอนกรีตนี้มีค่ากำลังอัดเท่าใด นำคอนกรีตที่เหลืออยู่ในรถเข็นมาทำตัวอย่าง ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงแกะแบบออก นำก้อนตัวอย่างไปบ่มโดยการแช่น้ำและทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ผลกำลังจะรับรองที่อายุคอนกรีต 28 วัน

การสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบค่ายุบตัวจะทำเมื่อผู้ควบคุมงานสงสัยว่า คอนกรีตนั้นจะมีค่ายุบตัวไม่ได้ตามข้อกำหนด ส่วนการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำก้อนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐานทั่วไปกำหนดให้สุ่มเก็บตัวอย่าง 1 ชุด ต่อคอนกรีตที่เททุก ๆ 50 ลูกบาศก์เมตร ตัวอย่าง 1 ชุด ประกอบด้วยก้อนตัวอย่าง 3 ก้อน จะนำไปทดสอบที่อายุ 7 วัน 1 ก้อน และ 28 วัน 2 ก้อน

รูปที่ 19.4 *การทำก้อนตัวอย่างเพื่อควบคุมคุณภาพ*

19.6 ค่ายอมรับสำหรับคุณภาพคอนกรีต

เมื่อมีการทดสอบแล้ว จำเป็นต้องมีข้อกำหนดการยอมรับได้ของคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณปูนซีเมนต์สูงสุดและต่ำสุด

- ไม่ควรน้อยกว่า 95% ของค่าต่ำสุดที่กำหนด
- ไม่ควรมากกว่า 105% ของค่าสูงสุดที่กำหนด

2. ความสามารถเทได้

- ค่ายุบตัว ± 25 มิลลิเมตร หรือ ± 1/3 ของค่าที่กำหนด

3. ปริมาณฟองอากาศ

- ± 1.5% ของค่าที่กำหนด
- ค่าเฉลี่ยของ 4 ค่าที่วัดติดกัน จะต้องอยู่ภายใน ± 1% ของค่าที่กำหนด

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

4. อุณหภูมิ ณ หน่วยงานก่อสร้าง

- ต้องไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดเกิน 2°C
- ต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดเกิน 2°C

5. ความหนาแน่น ณ หน่วยงานก่อสร้าง

- วัดความละเอียดถึง 10 กก./ลบ.เมตร
- ไม่น้อยกว่า 95% ของค่าต่ำสุดที่กำหนด
- ไม่เกินกว่า 105% ของค่าสูงสุดที่กำหนด

6. กำลังอัด

เมื่อทดสอบกำลังอัดแล้วต้องดำเนินการประเมินผลโดยทำตามมาตรฐาน ACI 318 หรือตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ซึ่งมีวิธีการประเมินดังนี้

ค่ากำลังอัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

1) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัด จากการทดสอบ 3 ครั้ง ติดต่อกันมากกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (fc′)

2) ค่ากำลังอัดแต่ละครั้งต่ำกว่ากำลังอัดที่ต้องการ(fc′) ได้ไม่เกิน 30 กก./ตร.ซม.

หรืออาจจะประเมินตามข้อกำหนดของงาน ซึ่งโดยทั่วไปกำลังอัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์กำหนดต้องเข้ากฎเกณฑ์ดังนี้

1) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดในแต่ละชุดต้องมีค่า ไม่น้อยกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (fc′)

2) ค่ากำลังอัดแต่ละก้อนต้องไม่น้อยกว่า 80 หรือ 85% ของค่ากำลังอัดที่กำหนด

7. กำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะ

ในกรณีที่จะต้องเจาะคอนกรีตในโครงมาทดสอบ การประเมินผลตาม ACI มีดังนี้

1) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจะต้องได้ค่าไม่น้อยกว่า 85% ของกำลังอัดที่กำหนด (fc′)

2) ค่ากำลังอัดของตัวอย่างแต่ละก้อนต้องไม่น้อยกว่า 75% ของกำลังอัดที่กำหนด (fc′)

19.7 การปฏิบัติเมื่อคุณภาพไม่ได้ตามมาตรฐาน

- ถ้าส่วนคละของมวลรวมไม่เป็นไปตามมาตรฐาน อาจต้องปรับสัดส่วนผสมของมวลรวมให้เหมาะสม

- ถ้าทรายมีสารอินทรีย์ปนอยู่มากจนทำให้สีของสารละลาย NaOH เกินมาตรฐานควรยกเลิกการใช้ทรายนั้น เพราะอาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

- ถ้าหินมีสิ่งเจือปน เช่น ดิน ฝุ่นหิน มากเกินข้อกำหนด ควรทำการล้างหินก่อนนำมาใช้งาน

- ถ้าค่ายุบตัวของคอนกรีตที่จัดส่งไป ณ หน่วยงานก่อสร้างไม่เป็นไปตามข้อกำหนดคือมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป ควรทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ถ้ายังไม่เป็นไปตามข้อกำหนดอีก ขอให้ผู้ควบคุมงานใช้ดุลยพินิจในการตัดสินใจว่าควรใช้คอนกรีตนั้น ๆ หรือไม่ ถ้าใช้ควรทำการสุ่มเก็บตัวอย่างไว้ทดสอบกำลังอัดด้วย

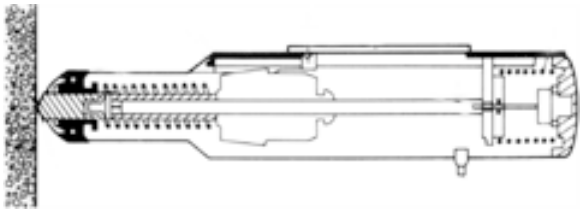
- ถ้ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตต่ำกว่าค่ากำลังอัดที่ออกแบบ (fc′)

กรณีที่ 1) ถ้าข้อมูลที่ต่ำนั้น เป็นข้อมูลที่อยู่นอกกลุ่ม (Off-data) ควรตัดข้อมูลนั้นทิ้ง เช่น กำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ของ 3 ตัวอย่างชุดเดียวกันได้ค่า 305, 312, และ 238 กก./ตร.ซม. ควรใช้ค่ากำลังอัด 305 และ 312 มาหาค่าเฉลี่ยก้อนตัวอย่างที่ได้กำลังอัด 238 กก./ตร.ซม. อาจมีข้อบกพร่องระหว่างการทำ หรือการขนส่ง หรือระหว่างกระบวนการทดสอบ ซึ่งควรสืบหาสาเหตุด้วย

กรณีที่ 2) ถ้ากำลังอัดเฉลี่ยได้ค่าต่ำกว่าค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ อาจจำเป็นที่จะต้องทดสอบคอนกรีตในโครงสร้างนั้นโดยวิธีการต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้

- การยิงด้วย Schmidt Hammer
- การเจาะคอนกรีตเพื่อทดสอบ
- การทดสอบให้โครงสร้างรับน้ำหนักจริง

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 19.5 *การทดสอบโดยยิงด้วย Schmidt Hammer*

19.8 การใช้สถิติในการควบคุมคุณภาพ

ผู้ผลิตคอนกรีต จะใช้วิชาสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่สุ่มเก็บและบ่มตามวิธีมาตรฐานและนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มาทำการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ดีขึ้น

• ความรู้พื้นฐานทางด้านสถิติ

ค่าฟังก์ชั่นต่าง ๆที่ควรทราบเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1) ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เป็นค่าเฉลี่ยกำลังอัดของตัวอย่างก้อนปูน

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \ldots X_n}{n}$$

โดย $X_1, X_2, X_3 \ldots X_n$ เป็นค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างก้อนปูน และ n เป็นจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

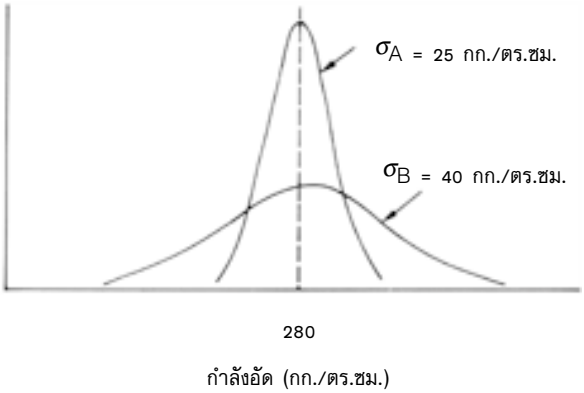
2) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายของตัวอย่างก้อนปูนจากค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1-\bar{X})^2+(X_2-\bar{X})^2+\ldots(X_n-\bar{X})^2}{n-1}}$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้ จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบรวมของเส้นโค้งการแจกแจงความถี่แบบปกติ ซึ่งทำให้ทราบถึงระดับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตได้

- ในกรณีที่มีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตดีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะน้อย นั่นคือกำลังอัดของตัวอย่างก้อนปูน ส่วนใหญ่ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย ทำให้เส้นโค้งการแจกแจงความถี่แบบปกติโด่งขึ้นและแคบลง ดังแสดงในรูปที่ (σ_A)

- ในกรณีที่การควบคุมคุณภาพของคอนกรีตไม่ดี ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามาก ค่ากำลังอัดของตัวอย่างก้อนปูนก็จะกระจายออกจากค่าเฉลี่ยมาก ทำให้เส้นโค้งเตี้ยลงและแบนออก ดังแสดงในรูปที่ (σ_B)



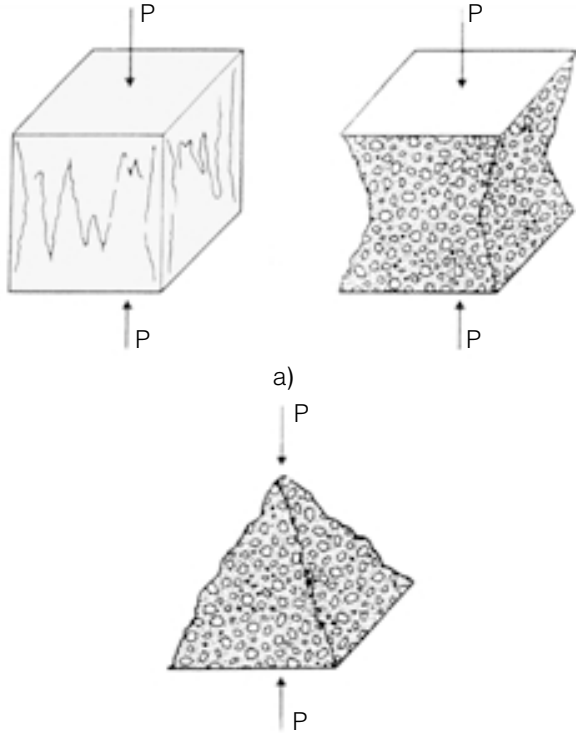
รูปที่ 19.6 *เส้นโค้งการแจกแจงความถี่*

• การเก็บข้อมูล

ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่หาได้นั้นจะถูกต้องมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลที่เก็บโดยวิธีการสุ่มจะเป็นตัวแทนที่แท้จริง นอกจากนี้จำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกด้วย โดยมาตรฐานทั่ว ๆ ไป กำหนดว่า จำนวนข้อมูลที่จะถือว่าน่าเชื่อถือได้ต้องมาจากกำลังของก้อนตัวอย่างคอนกรีตไม่น้อยกว่า 30 ค่า

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

เมื่อทำการทดสอบกำลังของก้อนตัวอย่าง นอกจากค่ากำลังอัดที่ได้แล้ว ผู้ทดสอบควรทำการบันทึกรูปลักษณะ การแตกของก้อนตัวอย่างไว้สำหรับวิเคราะห์ด้วย



การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

a) ไม่ระเบิด b) ระเบิด

การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก

a) Splitting c) Combine b) Shear (Cone)

รูปที่ 19.7 *ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก*

19.9 แผนภาพการควบคุมคุณภาพ

แผนภาพการควบคุมคุณภาพนี้ มีการใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมคุณภาพคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเรื่องกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง ทั้งนี้เพราะแผนภาพนี้จะแสดงให้เห็นทุกขณะว่า กำลังคอนกรีตมีการผันแปรมากน้อยเท่าใด

โดยทั่วไป แผนภาพที่ใช้ในงานควบคุมคุณภาพ กำลังอัดคอนกรีต มีอยู่ 2 แผนภาพดังนี้

1) แผนภาพแสดงกำลังอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง

2) แผนภาพแสดงกำลังอัดเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อกัน

แผนภาพต่าง ๆ ได้จากตารางข้อมูลที่เก็บข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 19.1 และตัวอย่างแสดงในตารางที่ 19.2

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

การวิเคราะห์กำลังอัดคอนกรีต

ส่วนผสม .....

โรงงาน .....

เลขที่	วันที่หล่อ	กำลังอัดที่อายุ 7 วัน (กก./ตร.ซม.)					กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)				
		X_1	X_2	X_3	$\bar{X}$	XMOV	X_1	X_2	X_3	$\bar{X}$	XMOV
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
จำนวนก้อนตัวอย่าง กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.) ค่าสูงสุด (กก./ตร.ซม.) ค่าต่ำสุด (กก./ตร.ซม.)							จำนวนก้อนตัวอย่าง กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.) ค่าสูงสุด (กก./ตร.ซม.) ค่าต่ำสุด (กก./ตร.ซม.)					

ตารางที่ 19.1 *ตารางการเก็บข้อมูลด้านกำลังอัด*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

การวิเคราะห์กำลังอัดคอนกรีต

ส่วนผสม กำลังอัด 450 กก./ตร.ซม.

โรงงาน พหลโยธิน

เลขที่	วันที่หล่อ	กำลังอัดที่อายุ 7 วัน (กก./ตร.ซม.)					กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)				
		X1	X2	X3	$\bar{X}$	XMOV	X1	X2	X3	$\bar{X}$	XMOV
1	1/6	411	361	390	387		467	548	523	513	
2		409	378	446	411		478	484	516	493	
3		389	448	382	406		532	546	501	526	
4		407	452	450	436		552	519	480	517	
5	3/6	381	418	425	408	410	546	527	516	530	516
6		406	397	376	393	411	505	471	529	502	513
7		415	394	421	410	411	514	501	554	523	520
8		420	428	430	426	415	482	527	475	495	513
9	4/6	424	431	425	427	413	477	519	528	508	511
10		426	424	408	419	415	546	526	531	534	512
11		406	419	423	416	420	514	498	485	499	512
12		361	404	430	398	417	493	521	513	509	509
13	7/6	413	387	406	402	412	465	514	473	484	507
14		409	418	396	408	409	517	462	509	496	504
15		399	415	405	406	406	494	481	511	495	497
16		402	425	414	414	406	526	496	531	518	500
17		408	397	428	411	408	496	526	505	509	500
18		399	392	385	392	406	523	497	514	511	506
19	9/6	427	415	412	418	408	482	492	501	492	505
20		405	436	425	422	411	504	490	503	499	506
21		415	404	423	414	411	514	492	487	498	502
22		419	395	427	414	412	498	483	526	502	500
23		410	434	424	423	418	532	516	505	518	502
24		418	395	419	411	417	517	532	529	526	509
25		414	426	398	413	415	527	529	471	509	511
26	10/6	425	415	432	424	417	514	491	523	509	513
27		429	436	428	431	420	509	495	516	507	514
28		416	419	430	422	420	483	467	541	497	510
29		415	428	422	422	422	527	504	478	503	505
30	11/6	417	427	424	423	424	471	521	508	500	503
31		429	403	424	419	423	526	505	513	515	504
32		408	421	425	418	421	479	501	517	499	503
33	12/6	433	417	396	415	419	485	514	509	503	504
34		399	429	426	418	419	505	519	527	517	507
35		403	418	423	415	417	498	525	513	512	509
36		422	419	437	426	418	496	511	514	507	508
37		409	424	421	418	418	509	516	524	516	511
38	15/6	417	414	398	410	417	516	529	493	513	513
39		422	414	429	422	418	524	512	495	510	512
40		426	419	437	427	421	510	521	523	518	513

จำนวนก้อนตัวอย่าง		120	จำนวนก้อนตัวอย่าง		120
กำลังอัดเฉลี่ย	(กก./ตร.ซม.)	415	กำลังอัดเฉลี่ย	(กก./ตร.ซม.)	508
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	(กก./ตร.ซม.)	16	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	(กก./ตร.ซม.)	20
ค่าสูงสุด	(กก./ตร.ซม.)	452	ค่าสูงสุด	(กก./ตร.ซม.)	554
ค่าต่ำสุด	(กก./ตร.ซม.)	361	ค่าต่ำสุด	(กก./ตร.ซม.)	462

ตารางที่ 19.1 *ตารางการเก็บข้อมูลด้านกำลังอัด*

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ช่องที่ 1 คือ วันที่หล่อก้อนตัวอย่าง

ช่องที่ 2-4 คือ ค่ากำลังอัดก้อนตัวอย่างที่อายุ 7 วัน

ช่องที่ 5 คือ ค่าเฉลี่ยกำลังอัดก้อนตัวอย่างที่อายุ 7 วัน (เฉลี่ยจากช่องที่ 2-4)

ช่องที่ 6 คือ ค่ากำลังอัดก้อนตัวอย่างเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อกันที่อายุ 7 วัน

ช่องที่ 7-9 คือ ค่ากำลังอัดก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน

ช่องที่ 10 คือ ค่าเฉลี่ยกำลังก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (เฉลี่ยจากช่องที่ 7-9)

ช่องที่ 11 คือ ค่ากำลังอัดก้อนตัวอย่างเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อกันที่อายุ 28 วัน

• แผนภาพกำลังอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง

แผนภาพนี้ได้จากการนำข้อมูลในช่องที่ 5 และช่องที่ 10 มาเขียนกราฟ โดยให้

- แกนนอนแสดงจำนวนก้อนตัวอย่าง
- แกนตั้งแสดงกำลังอัด หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.

ตัวอย่างการเขียนแผนภาพแสดงในรูปที่ 19.8

• แผนภาพกำลังอัดเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อกัน

แผนภาพนี้ได้จากการนำข้อมูลในช่องที่ 6 และช่องที่ 11 มาเขียนกราฟ โดยให้

- แกนนอนแสดงจำนวนก้อนตัวอย่าง
- แกนตั้งแสดงกำลังอัด หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.

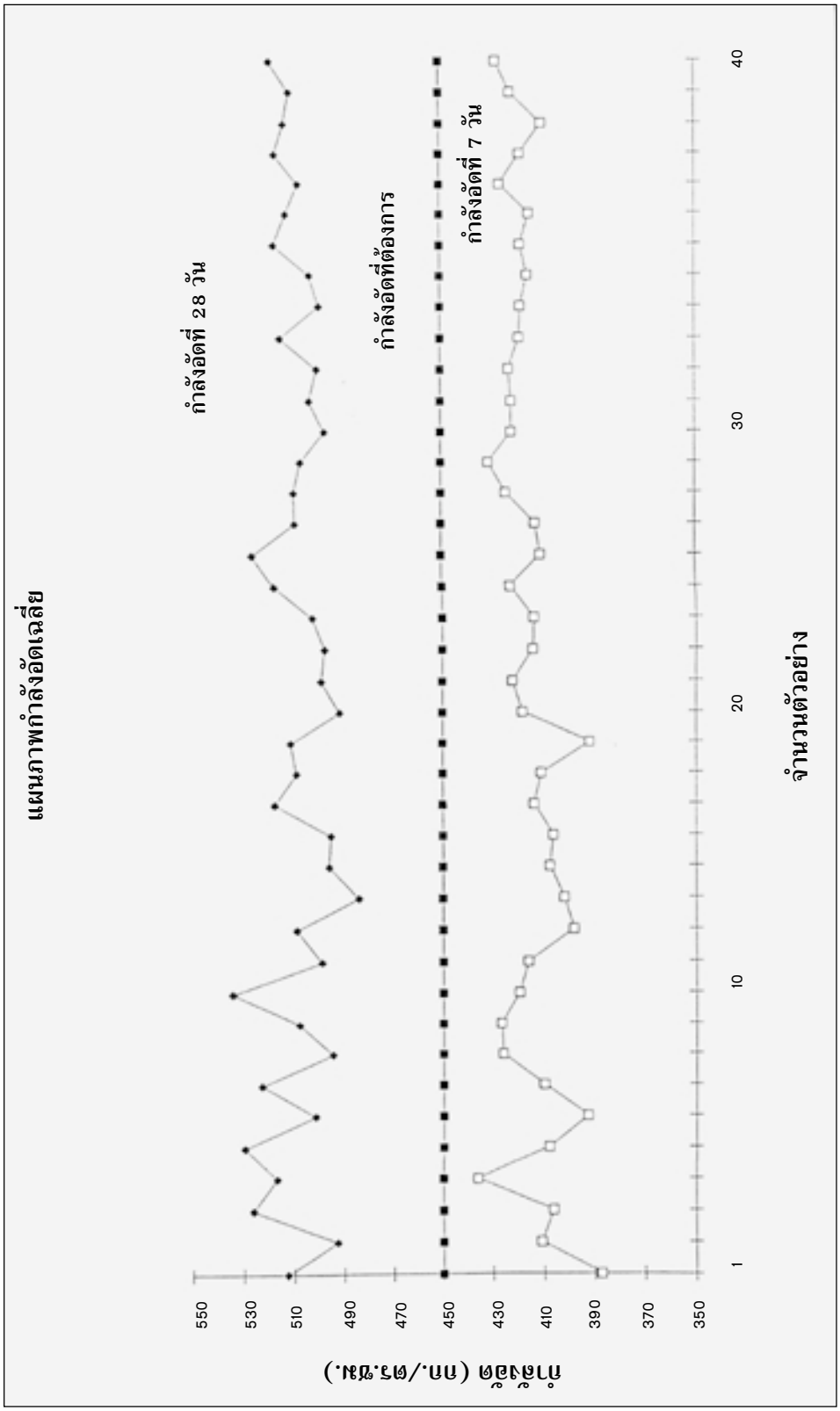
ตัวอย่างในการเขียนแผนภาพ แสดงในรูปที่ 19.9

• การประเมินผลจากแผนภาพ

เมื่อได้แผนภาพแล้ว ก็จะนำมาทำการวิเคราะห์ และประเมินผล ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้แผนภาพกำลังอัดเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อกัน มาทำการวิเคราะห์และประเมินผล โดยดูแนวโน้มของเส้นในแผนภาพ

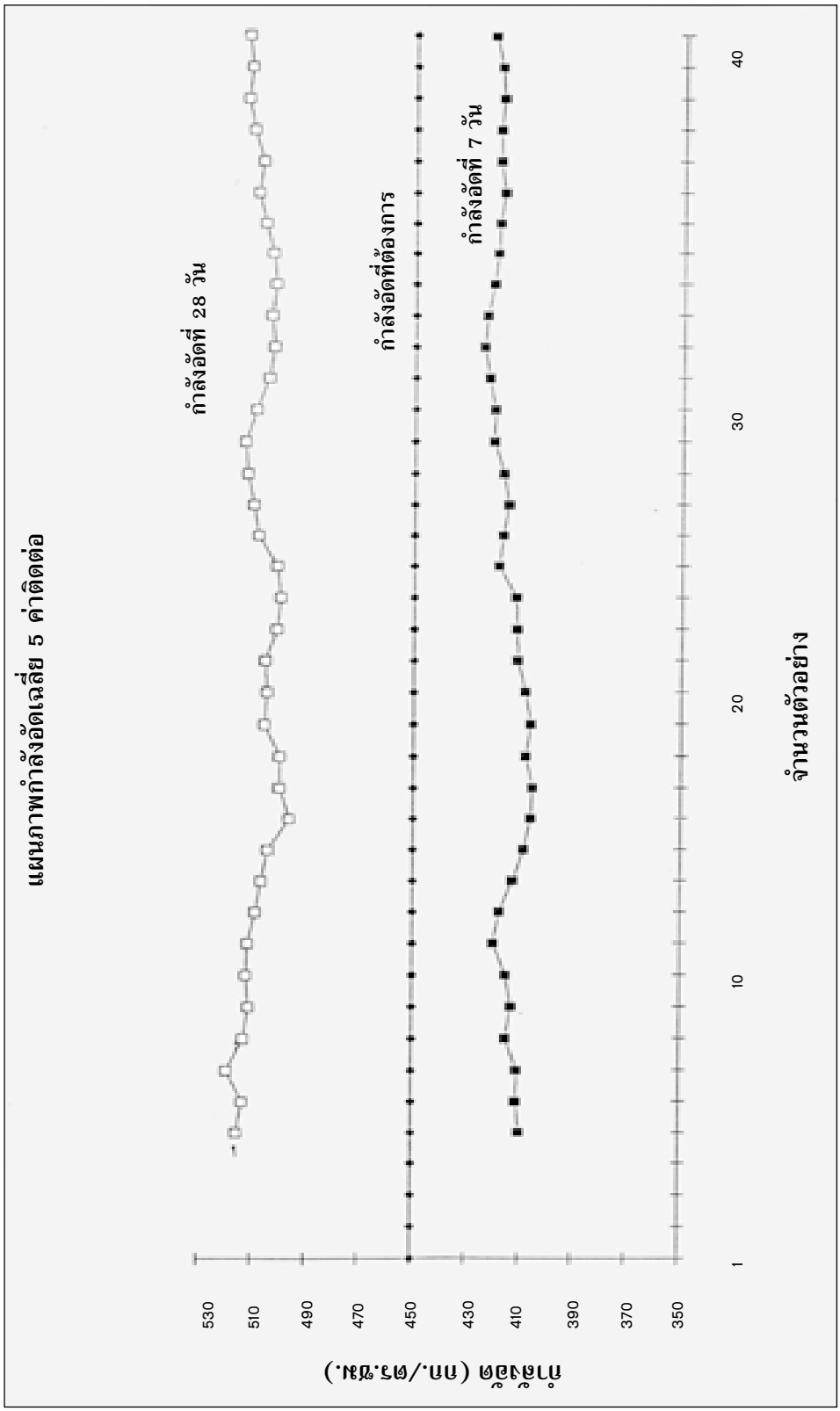
- ถ้าเส้นที่ได้มีค่าความลาดเอียงขึ้น (↗) แสดงว่าแนวโน้มกำลังอัดสูงขึ้นจากเดิม
- ถ้าเส้นที่ได้มีค่าความลาดเอียงลง (↘) แสดงว่าแนวโน้มกำลังอัดลดลงจากเดิม
- ถ้าเส้นที่ได้มีค่าความลาดเอียงเป็นศูนย์ (→) แสดงว่าแนวโน้มกำลังอัดคงที่

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 19.8 แผนภาพกำลังอัดเฉลี่ย

© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 9.8 แผนภาพกำลังอัดเฉลี่ย 5 ค่าติดต่อ

คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด

1516 ถนนประชาราษฎร์ 1 บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-5000