STANDARD METHODS FOR TESTING AGGREGATE AND CONCRETE

คู่มือการทดสอบ หิน ทราย และคอนกรีต

CPAC

คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค

บทที่ 1
การผลิตหิน สำหรับผสมคอนกรีต
(Coarse Aggregate Production)

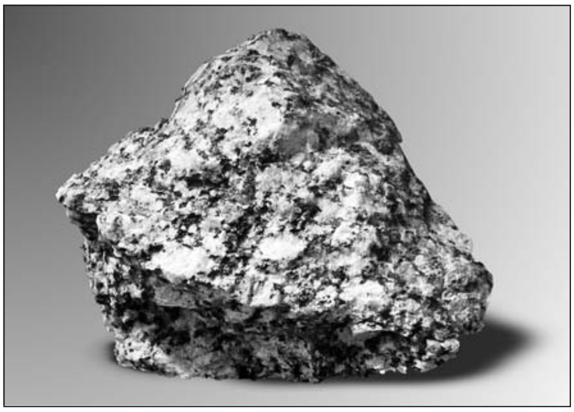
ชนิดและแหล่งหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต

หินที่สามารถนำมาผสมคอนกรีต จะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีการนำหินชนิดต่างๆ มาใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่

1. หินตะกอนหรือหินชั้น (Sedimentary Rock) ที่นิยมใช้ได้แก่ หินปูน (Limestone) ซึ่งเกิดจากการทับถมตัวของซากสัตว์ทะเล เป็นหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตมากที่สุดในประเทศ เนื่องจากมีแหล่งหินอยู่มากเกือบทั่วไปในประเทศ โดยมีแหล่งผลิตที่สำคัญอยู่แถบจังหวัดสระบุรี ราชบุรี ชลบุรี กำแพงเพชร ลำปาง เลย และนครศรีธรรมราช มีค่าความแข็งแรงประมาณ 55-105 กก./ลบ.ซม. และมีค่าต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) อยู่ระหว่าง 20%-37%

รูปที่ 1 *หินปูน*

2. หินอัคนี (Igneous Rock) มีความแข็งแกร่งกว่าหินปูนแต่ไม่มีผู้ผลิตมากนัก เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตและค่าสึกหรอสูง มักจะผลิตในท้องที่ที่ไม่สามารถหาแหล่งหินปูนได้ หินอัคนีที่มีการผลิตในประเทศ ได้แก่ **หินแกรนิต** มีแหล่งผลิตอยู่ที่จังหวัดชลบุรี ระยอง ตาก ปราจีนบุรี สงขลา และสุราษฎร์ธานี **หินแอนดีไซต์** มีแหล่งผลิตแถบจังหวัดสระบุรี เพชรบุรี และสระแก้ว **หินบะซอลต์** มีแหล่งผลิตแถบจังหวัดสุรินทร์ บุรีรัมย์ และศรีษะเกษ โดยทั่วไปหินอัคนี มีความแข็งแรงประมาณ 60-190 กก./ลบ.ซม. และมีค่าต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) อยู่ระหว่าง 10%-30%



รูปที่ 2 *หินแกรนิต*

รูปที่ 3 *หินแอนดีไซต์*

3. กรวด (Gravel) เกิดจากการผุพังของหินอัคนีที่พบอยู่ทั่วไปตามแม่น้ำลำธาร สามารถนำมาผสมคอนกรีตได้ดีเท่าหินชนิดอื่น โดยนำมาร่อนให้มีขนาดและส่วนคละตามมาตรฐาน ในประเทศไทยยังไม่นิยมใช้กรวดในการผสมคอนกรีตมากนัก

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

ขั้นตอนการผลิตหิน

ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนได้แก่

1. การผลิตหินใหญ่

ในปัจจุบันการผลิตหินใหญ่ จะต้องได้รับประทานบัตรเหมืองแร่ชนิดหินก่อสร้าง จากกรมทรัพยากรธรณี โดยทั่วไปการผลิตหินใหญ่มีรูปแบบการผลิต หรือแผนผังการทำเหมือง 4 วิธี คือ

1.1. การผลิตข้างเขา (Side Hill Quarry) เป็นรูปแบบการผลิตที่พบเห็นได้ทั่วไป นิยมใช้ในสมัยก่อน โดยเริ่มจากการระเบิดหินที่บริเวณเชิงเขาไล่ขึ้นไปจนเป็นหน้าผาสูง จากนั้นต้องใช้แรงงานคนปีนป่ายขึ้นไประเบิดหินบนหน้าผาให้ทะลายลงมา รูปแบบนี้ในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากต้องเสี่ยงอันตรายมาก ไม่สามารถควบคุมคุณภาพของหินได้ตามต้องการและไม่สามารถผลิตหินได้ในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังเป็นการทำลายทัศนียภาพแวดล้อมอีกด้วย

รูปที่ 4 *การผลิตจากข้างเขา (Side Hill Quarry)*

1.2. การผลิตจากยอดเขา (Top Down Quarry) เริ่มจากการตัดถนนเพื่อลำเลียงเครื่องจักรกลหนักขึ้นสู่ยอดเขา แล้วระเบิดหินจากยอดเขาลงมาเป็นขั้นบันได (Bench) วิธีการผลิตรูปแบบนี้สามารถขยายกำลังผลิตในปริมาณมาก และคัดเลือกคุณภาพหินได้ตามต้องการ ขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของขั้นบันได

รูปที่ 5 *การผลิตจากยอดเขา (Top Down Quarry)*

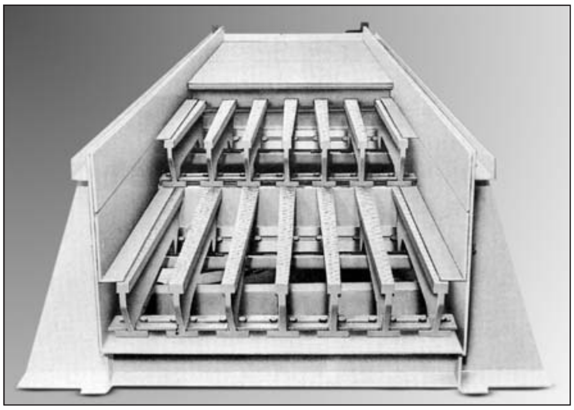
1.3. การผลิตจากบ่อ (Open Pit Quarry) เป็นรูปแบบบ่อ สำหรับผลิตหินที่อยู่ลึกจากพื้นดินลงไป เริ่มจากการเปิดหน้าดินแล้วระเบิดหินลึกลงไปใต้ดินเป็นชั้นๆ แบบขั้นบันได เพื่อความสะดวกในการลำเลียงหิน และป้องกันการพังทะลายของผนังบ่อ

รูปที่ 6 *การผลิตจากบ่อ (Open Pit Quarry)*

1.4. การผลิตจากบ่อบนยอดเขา (Semi Open Pit Quarry) เป็นการผลิตจากยอดเขาเหมือนรูปแบบที่สอง แต่จะระเบิดหินตรงกลางเขาเป็นรูปบ่อลงไป โดยไม่มีการทำลายบริเวณข้างเขา เพื่อช่วยอนุรักษ์ทัศนียภาพแวดล้อมและป้องกันมลภาวะ รูปแบบนี้บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย เป็นผู้ริเริ่มนำมาใช้ในประเทศไทย ผู้ผลิตหินรายย่อยไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากมีต้นทุนสูงและต้องมีพื้นที่ประทานบัตรมากพอ

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

รูปที่ 7 การผลิตจากบ่อบนยอดเขา (Semi Open Pit Quarry)



รูปที่ 8 ตะแกรงคัดดิน (Grizzly Bar)

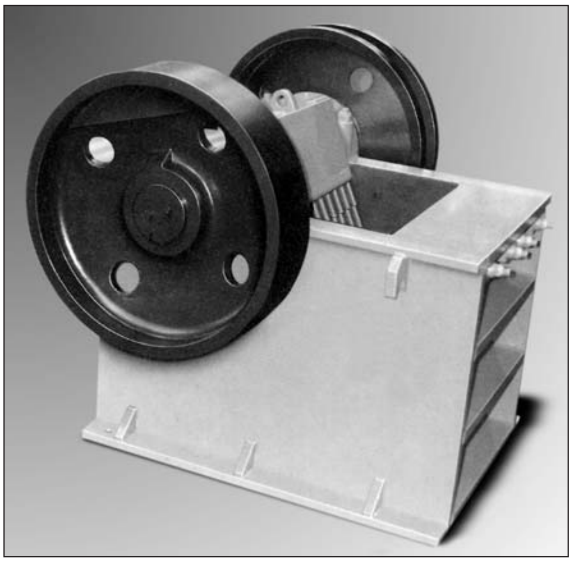
การระเบิดหิน เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการผลิตหินใหญ่ที่ทำโดยใช้เครื่องเจาะ เจาะรูเข้าไปในเนื้อหิน โดยมีขนาดรูตั้งแต่ 1 1/2″ - 12″ แล้วแต่ขนาดเครื่องเจาะ จากนั้นก็จะบรรจุวัตถุระเบิดได้แก่ เชื้อปะทุ ดินระเบิดแรงสูง และปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรท ซึ่งเป็นสารช่วยขยายกำลังระเบิดลงไปเพื่อระเบิดหินออกมา การเลือกขนาด จำนวน และระยะห่างของรูเจาะ มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณหินที่ต้องการระเบิด และขนาดของก้อนหินใหญ่ที่ต้องการ และจะต้องเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้แต่ละครั้ง

2. การย่อยหิน

การย่อยหิน หรือ การโม่หิน มีวัตถุประสงค์เพื่อย่อยและคัดขนาดให้มีขนาดและส่วนคละตามมาตรฐานที่กำหนด ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

2.1. การคัดดิน หินใหญ่ที่ลำเลียงมาจากเหมืองหิน ปกติจะมีเศษดินปะปนมาค่อนข้างมาก จะต้องนำร่อนผ่านตะแกรงคัดดิน (Grizzly Bar) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก ก่อนที่จะนำเข้าเครื่องย่อยตะแกรงคัดดินนี้จะมีช่องเปิดกว้างประมาณ 4″-6″ เพื่อให้เศษดินหลุดลอดออกไป

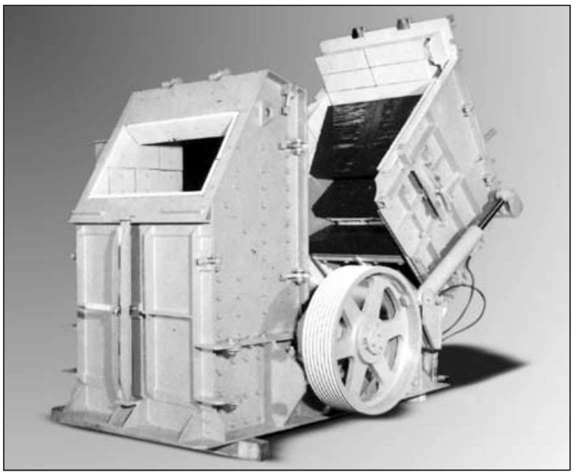
2.2. การย่อยหินขั้นที่ 1 (Primary Stage) เป็นการย่อยหินก้อนใหญ่ ให้เหลือขนาดประมาณ 600-900 มม. เพื่อความสะดวกในการย่อยขั้นต่อไป เครื่องย่อยหินขั้นที่ 1 (Primary Crusher) โดยทั่วไปจะใช้เครื่องแบบ Jaw Crusher หรือ Impact Crusher แต่ Impact Crusher ไม่เป็นที่นิยมใช้กัน เนื่องจากทำให้เกิดฝุ่นจากการย่อยหินค่อนข้างมาก



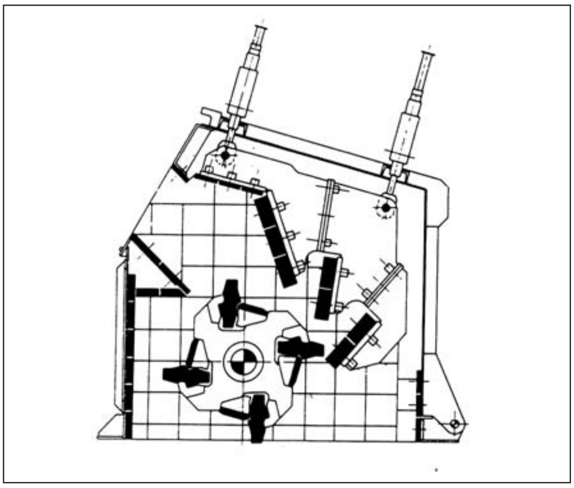
รูปที่ 9 Jaw Crusher

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

รูปที่ 10 ภาพตัดภายใน Jaw Crusher

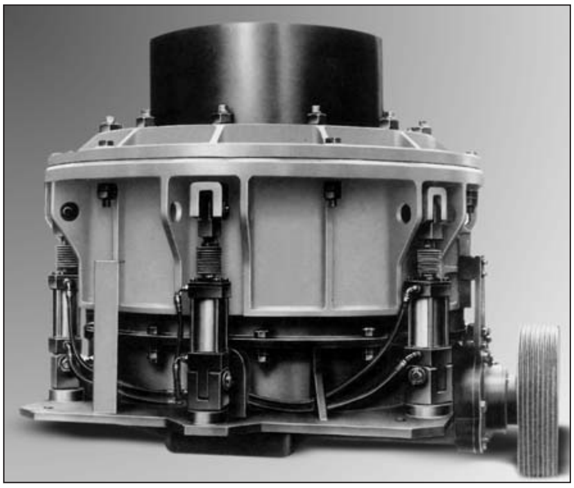


รูปที่ 11 Impact Crusher

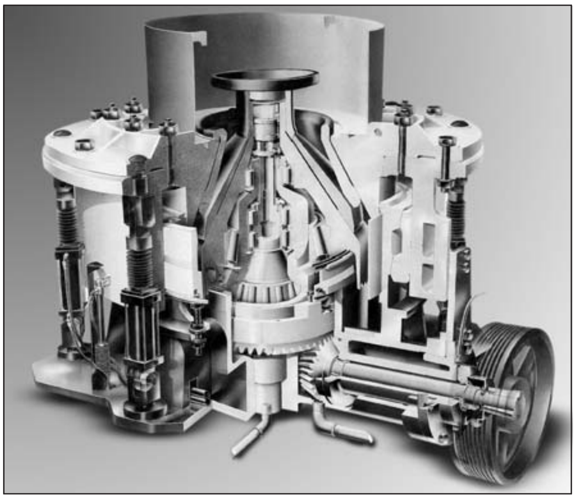


รูปที่ 12 ภาพตัดภายใน Impact Crusher

2.3. การย่อยหินขั้นที่ 2 (Secondary Stage) เป็นการย่อยหินในลำดับถัดไป โดยย่อยหินจากการโม่ขั้นที่ 1 ให้มีขนาดเล็กลง โดยให้มีขนาดใหญ่ได้ไม่เกินขนาดใหญ่สุดที่ต้องการ โดยปกติหินที่ได้จากการโม่ขั้นนี้ จะมีขนาดลดหลั่นไป จาก 50 มม. จนถึง หินฝุ่น เครื่องย่อยหินขั้นที่ 2 (Secondary Crusher) มีใช้กันอยู่หลายแบบ เช่น Jaw Crusher, Impact Crusher หรือ Cone Crusher โดยที่ Cone Crusher จะเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการผลิตดีกว่าแบบอื่น



รูปที่ 13 Cone Crusher



รูปที่ 14 ภาพตัดภายใน Cone Crusher

2.4. การย่อยหินขั้นที่ 3 (Tertiary Stage) โดยปกติการย่อยหินในขั้นที่ 2 จะสามารถลดขนาดหินลงได้ตามความต้องการ แต่สำหรับโรงโม่ที่ต้องการกำลังผลิตมากจำเป็นต้องมีการย่อยในขั้นที่ 3 อีกส่วนหนึ่ง

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

เนื่องจากการย่อยในขั้นที่ 2 จะมีหินที่มีขนาดใหญ่เกินความต้องการ อยู่ประมาณ 20%-30% หากไม่มีการย่อยในขั้นที่ 3 จะต้องนำหินส่วนที่เกินกลับเข้าเครื่องย่อยขั้นที่ 2 ซ้ำอีกครั้ง ซึ่งจะทำให้กำลังผลิตลดลง เครื่องย่อยหินขั้นที่ 3 (Tertiary Crusher) มีแบบที่ใช้กันอยู่เหมือนกับขั้นที่ 2 แต่มีขนาดเล็กกว่า สำหรับขั้นตอนนี้หากใช้ Impact Crusher จะได้หินรูปร่างเหลี่ยมกลมกว่าเครื่องย่อยชนิดอื่น

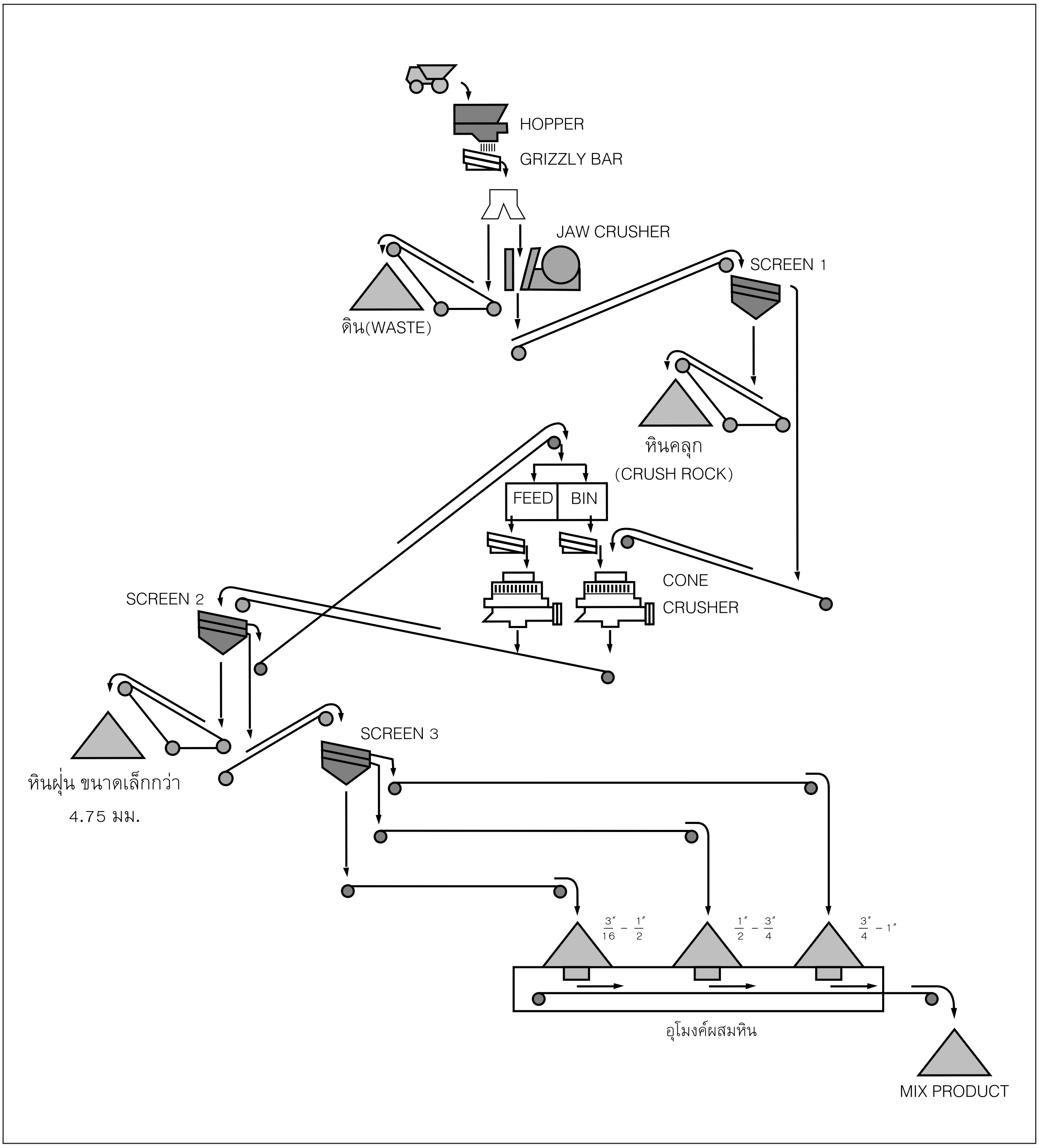
2.5. การคัดแยกหิน (Screening) เป็นหัวใจของการย่อยหิน เนื่องจากหินจากเครื่องย่อยจะมีขนาดก้อนต่างๆ ปะปนกันอยู่ ต้องทำการคัดแยกออกจากกันด้วยตะแกรงร่อนหิน (Vibrating Screen) ซึ่งจะเป็นชุดตะแกรงวางเรียงซ้อนกันอยู่ 3-4 ชั้น โดยทั่วไปจะวางตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 1″ 3/4″ 1/2″ 3/8″ และ 3/16″ เรียงกันตามลำดับจากบนมาล่าง

2.6. การผสมหิน (Blending) โรงโม่ส่วนใหญ่เมื่อคัดแยกหินออกจากตะแกรง จะใช้สายพานลำเลียงหินออกมากองแยกเป็นกองๆ ตามขนาดตะแกรงชั้นต่างๆ แล้วขายลูกค้าเป็นหิน ที่เรียกว่า Single Size เนื่องจากหินแต่ละกองจะมีขนาดตายตัวไม่มีขนาดอื่นปนในการนำหินมาผสมคอนกรีตจำเป็นต้องนำหินขนาดต่างๆ เหล่านี้มาผสมกัน ให้ได้ส่วนคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 ด้วยวิธีการต่างๆ กัน ได้แก่

- **ใช้รถตักผสม** โดยผสมตามสัดส่วนที่คำนวณไว้ วิธีนี้หินที่ผสมได้จะมีส่วนคละไม่ค่อยสม่ำเสมอ
- **ผสมที่รางชู้ต (Chute)** โดยการปรับปรุงบริเวณชู้ตหินที่ออกมาจากตะแกรงร่อน ให้หินขนาดต่างๆ มารวมตัวกันก่อนขึ้นสายพานลำเลียงไปลงกอง วิธีนี้จะผสมหินได้สม่ำเสมอกว่าวิธีแรก แต่ไม่สามารถปรับส่วนคละได้เที่ยงตรงเท่าที่ควร
- **ใช้อุโมงค์ผสมหิน** เป็นวิธีผสมหินที่ดีที่สุด โดยการนำหินที่ได้จากตะแกรงร่อน มากองแยกแบบ Single Size บนอุโมงค์ที่มีสายพานลำเลียงอยู่ข้างใต้ แล้วใช้คอมพิวเตอร์คำนวณการเปิดประตูระบายหินใต้กองแต่ละกองลงสู่สายพานด้านล่าง ตามสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วลำเลียงไปโรยผสมกันในยุ้งเก็บหินก่อนจำหน่าย

2.7. การควบคุมคุณภาพ โรงโม่หินส่วนมากจะไม่มีระบบควบคุมคุณภาพนอกจากจะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นวันต่อวัน โดยทั่วไปการควบคุมความสกปรกของหินทำได้โดยการคัดเลือกหินใหญ่ให้สะอาดมีดินปนน้อยที่สุด และเปิดตะแกรงคัดดินให้เหมาะสม การควบคุมปริมาณฝุ่นหินทำได้โดยปรับเปลี่ยนขนาดของตะแกรงคัดฝุ่นให้เหมาะสมกับฤดูกาล การควบคุมส่วนคละทำได้โดยหมั่นตรวจสอบความสึกหรอของตะแกรง และฟันโม่ (Liner) รวมถึงการปรับระยะห่างของปากโม่ให้เหมาะสมอย่างสม่ำเสมอ การควบคุมรูปร่างของก้อนหินค่อนข้างทำได้ยาก หากแหล่งหินและเครื่องจักรไม่เหมาะสม แต่อาจทำได้โดยเลือกบริเวณที่จะผลิตหินใหญ่ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ไม่วางเรียงกันเป็นชั้น (Laminated) จนเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังต้องควบคุมการป้อนหินเข้าให้เต็มโม่อยู่ตลอดเวลา

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



***รูปที่ 15** กระบวนการย่อย และการผสมหิน*

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

บทที่ 2
การผลิตทราย สำหรับผสมคอนกรีต
(Fine Aggregate Production)

ทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด คือ

1. ทรายแม่น้ำ

เป็นทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อยๆ ตกตะกอนสะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายละเอียดนั้นจะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ

อนึ่ง หากจะนำทรายแม่น้ำขึ้นมาใช้ จะต้องได้รับอนุญาตจากกรมที่ดินก่อน

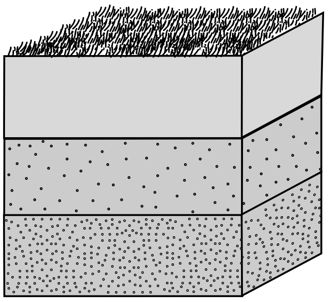
การนำทรายขึ้นจากท้องน้ำจะใช้เรือดูดดูดทรายขึ้นมาตามท่อแล้วทิ้งทรายลงบนตะแกรงของเรืออีกลำ ตะแกรงจะทำหน้าที่ร่อนแยกกรวดที่มีขนาดใหญ่ออกก่อนที่จะดูดทรายขึ้นบนเรืออีกลำ

เมื่อทรายเต็มเรือก็จะใช้เรืออีกลำลากเรือบรรทุกทรายไปยังท่าทราย ทรายที่ได้จะยังไม่สะอาดนัก เนื่องจากมีสารอินทรีย์ เศษตะกอนของดินโคลนปะปนอยู่ โดยทั่วไปจะต้องมีการล้างทรายอีกครั้ง คือเมื่อเรือบรรทุกทรายมาถึงท่าทรายจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณใกล้ท่าโดยการเปิดท้องเรือให้ทรายไหลลงแม่น้ำ แต่ถ้าเรือที่ลำเลียงทรายเปิดท้องเรือไม่ได้ ก็จะใช้สายพานลำเลียงทรายทิ้งลงในแม่น้ำ จากนั้นจะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมาทำวิธีการเดียวกันกับการดูดทรายขึ้นจากท้องน้ำครั้งแรก แตกต่างกันที่ตะแกรงที่ใช้จะสามารถแยกได้ทั้งทรายหยาบและทรายละเอียด ทรายที่ได้จัดเป็นทรายที่สะอาด เพราะผ่านการชะล้างถึง 2 ครั้ง

ขั้นต่อไป คือการลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock โดยใช้สายพานลำเลียงจากเรือไปเก็บไว้ในยุ้งจนเต็ม เมื่อยุ้งเต็มก็จะลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock ต่อไป ทรายที่เก็บไว้ในยุ้ง สามารถลำเลียงลงรถบรรทุกได้โดยสะดวก เพียงเปิดปากยุ้งให้ทรายไหลลงในรถบรรทุกเอง ส่วนทรายที่กอง Stock อยู่หากจะนำไปใช้ จะใช้รถตักขนทรายใส่รถบรรทุกอีกครั้ง

2. ทรายบก

ทรายบกเป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอนที่ทับถมกัน ของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดินโดยมีซากพืช ซากสัตว์ทับถมกันบริเวณผิวหน้าซึ่งเราเรียกกันว่าหน้าดิน มีความหนาประมาณ 2-10 ม.



รูปที่ 1 *ภาพตัดชั้นดิน*

การสำรวจแหล่งทราย

การสำรวจค้นหาแหล่งทรายโดยทั่วๆ ไปนั้นอาจจะสรุปได้เป็น 3 วิธีดังนี้

1. วิธีการแบบดั้งเดิม (Traditional Survey)

เป็นวิธีการที่ไม่ได้ใช้ความรู้ทางวิชาการหรือเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการสำรวจ แต่ใช้การคาดเดาจากแหล่งที่มาต่างๆ คือ

- พื้นที่ใกล้เคียงมีลักษณะเป็นแหล่งทราย
- การขุดเจาะบ่อบาดาลของชาวบ้าน

วิธีการสำรวจแบบนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำมาก แต่แหล่งทรายที่พบอาจจะมีคุณภาพต่ำ หรือมีปริมาณทรายน้อย

2. วิธีการทางธรณีวิทยา (Geological Survey)

เป็นวิธีการที่นำความรู้วิชาการทางด้านธรณีวิทยาในส่วนของการศึกษาสภาพภูมิประเทศ และโครง

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

สร้างของเปลือกโลกมาพิจารณาถึงสภาพพื้นที่บริเวณต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีทรายอยู่ใต้พื้นดินบริเวณนั้น และเมื่อแน่ใจว่ามีแหล่งทรายอยู่ใต้พื้นดินบริเวณดังกล่าวก็จะทำการเจาะสำรวจชั้นทรายเพื่อตรวจสอบปริมาณ และคุณภาพของแหล่งทรายนั้น ต่อไป วิธีการสำรวจแบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าวิธีแรกแต่โอกาสที่จะค้นพบแหล่งทรายที่มีปริมาณและคุณภาพตามที่ต้องการก็มีสูงเช่นกัน

3. วิธีการจากดาวเทียม (Satellite survey)

เป็นวิธีการสมัยใหม่ที่นำเทคโนโลยีระดับสูงเข้ามาช่วยในการสำรวจ โดยดาวเทียมที่ใช้สำรวจนั้นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์พิเศษที่มีความสามารถในการค้นหาแหล่งทราย รวมถึงปริมาณและคุณภาพของแหล่งทรายนั้นได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ วิธีการสำรวจแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ผู้สำรวจจะต้องเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นกับปริมาณและคุณภาพทรายที่จะนำมาใช้ประโยชน์ว่าจะคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์หรือไม่ อย่างไรก็ตามในอนาคตอันใกล้นี้ วิธีการสำรวจดังกล่าวจะเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น เพราะเทคโนโลยีใหม่ๆ กำลังเข้ามามีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน

กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีการผลิตทรายจากแหล่งทรายบกอาจแบ่งตามการผลิตได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

1. การผลิตทรายตามวิธีการดั้งเดิม

เป็นกรรมวิธีการผลิตทรายที่ทำกันมานานเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “ทรายชาวบ้าน” การลงทุนไม่สูงมาก และทรายที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ กระบวนการผลิตทรายจะเริ่มจากการเปิดหน้าดินก่อนด้วยรถตักดิน จากนั้นจะขุดดินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดินจนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ แล้วนำเรือมาดูด หรือใช้รถตักทรายขึ้นมาผ่านตะแกรงเพื่อแยกกรวดออก แล้วนำทรายไปกองไว้เพื่อนำไปใช้ต่อไป

หมายเหตุ *สำหรับผู้ผลิตบางรายอาจจะใช้ตะแกรงที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้แยกขนาดของทราย เป็นทรายหยาบ และทรายละเอียด อย่างไรก็ตามการผลิตทรายด้วยวิธีนี้ก็ไม่สามารถแยกขนาดคละของทรายตามที่ต้องการได้ และทรายที่ผลิตได้จะไม่สะอาดเท่าที่ควร เนื่องจากมีการเจือปนของสารอินทรีย์ที่ติดมากับทราย*

รูปที่ 2 *การผลิตทรายตามวิธีการดั้งเดิมโดยใช้ตะแกรงแยกขนาดทราย*

2. การใช้เครื่องจักรในการผลิตทราย

เป็นกรรมวิธีการผลิตทรายที่ทันสมัยใช้เครื่องจักรในการทำความสะอาด และแยกขนาดคละของทรายให้ตรงตามความต้องการ จึงได้ทรายที่มีคุณภาพสูง (คำว่าคุณภาพของทรายหมายถึง ขนาดคละของทรายได้ตรงตามข้อกำหนด และไม่มีสารเจือปนเช่นดิน หรือสารอินทรีย์อื่นๆ) สำหรับกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการเปิดหน้าดินก่อนด้วยรถตักดิน จากนั้นจะขุดลึกลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน จนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ แล้วนำเรือมาดูดทรายผ่านตามท่อเข้าที่เครื่องจักรเพื่อให้เครื่องจักรทำความสะอาด และคัดแยกทรายตามขนาดคละต่อไป

เครื่องจักรที่ได้ในการผลิตทรายอาจ แบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้ (สังเกตขั้นตอนการทำงานจากรูปที่ 14 Flow Diagram)

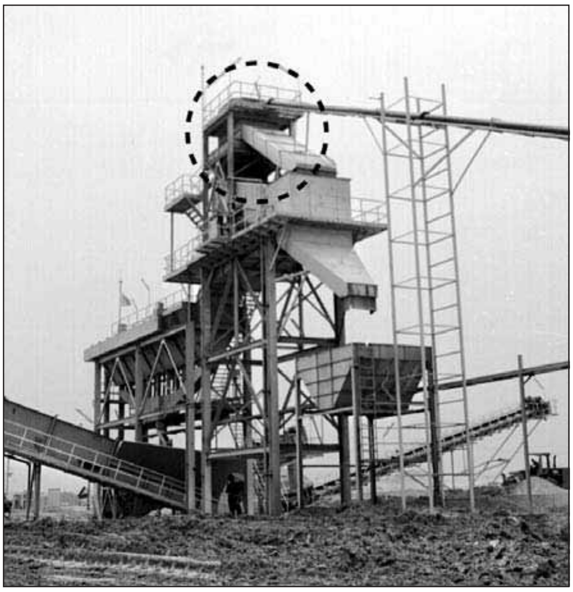
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

2.1. **เรือดูดทราย** ทำหน้าที่ดูดทรายจากบ่อทรายเพื่อส่งมาเข้า Feedbox

รูปที่ 3 *เรือดูดทรายที่มี Capacity ในการดูดถึง 250 ตัน/ชม.*

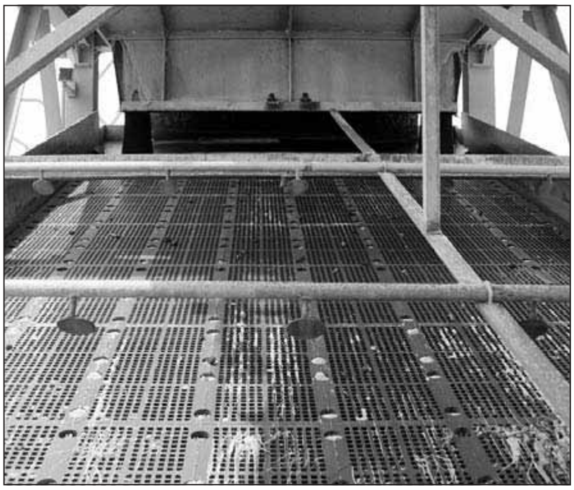
รูปที่ 4 *ท่อส่งลำเลียงทรายจากเรือเข้าสู่ Feedbox*

2.2. **Feedbox** เป็นจุดแรกที่รับทรายจากท่อส่งลำเลียงทราย ทำหน้าที่คัดก้อนหินและรากไม้ที่อาจจะรบกวนการทำงานของตะแกรง โดยตำแหน่งของ Feedbox ในรูปอยู่จุดบนสุดของเครื่องจักร



รูปที่ 5 *Feedbox*

2.3. **ตะแกรงร่อน (Screen)** ทำหน้าที่คัดเลือกทรายที่มีขนาดใหญ่เกินไปเพื่อนำไปทิ้ง ส่วนที่ผ่านตะแกรงจะถูกส่งไปยัง Classifying Tank ต่อไป



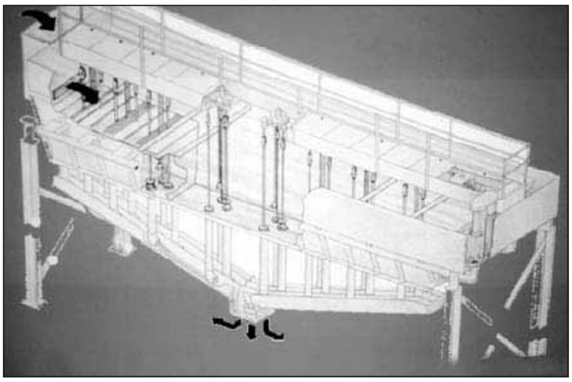
รูปที่ 6 *ตะแกรงร่อนทราย*

2.4. **Classifying Tank** จะรับทรายจากตะแกรงเพื่อทำหน้าที่

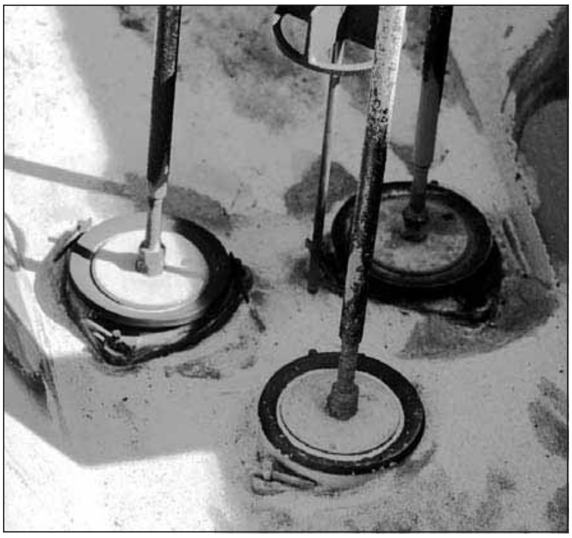
- คัดแยกขนาดคละของทราย โดยอาศัยหลักการพัดพาของทรายที่ปนไปกับน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนเร็วกว่าทรายขนาดเล็ก ดังนั้นการกระจายตัวของทรายภายใน Tank จะเป็นดังนี้คือ ทรายหยาบจะตกอยู่บริเวณตอนต้นของ Tank สำหรับทรายละเอียดจะอยู่บริเวณส่วนปลายของ Tank ภายใน Classifying Tank ประกอบด้วย 11 Station เรียงลำดับจาก Station ที่ 1 ซึ่งทรายที่ตกตะกอนนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือหยาบที่สุด ไปจนถึง Station ที่ 11 ซึ่งทรายที่ตกตะกอนนั้นจะมีขนาดเล็กหรือละเอียดที่สุดแต่ละ Station จะมีวาล์ว เปิด-ปิด เพื่อทำหน้าที่ผสมทรายในแต่ละขนาดให้ได้ขนาดคละตามต้องการ โดยระยะเวลาการเปิด-ปิดของแต่ละวาล์วจะรับคำสั่งมาจากระบบควบคุม PLC (Programmable Logic Control)
- ทำความสะอาดทราย โดยการคัดแยกฝุ่น หรือทรายที่ละเอียดมากเพื่อนำไปทิ้ง โดยใช้หลักการที่ว่าฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กจะพัดพาไปพร้อมกับน้ำที่ล้นจาก Classifying Tank

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

รูปที่ 7 Classifying Tank



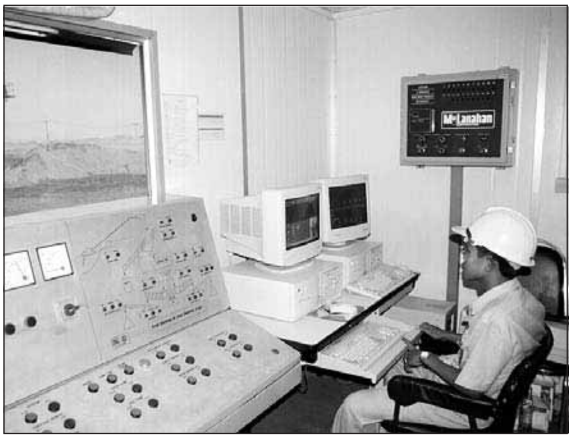
รูปที่ 8 ภายใน Classifying Tank



รูปที่ 9 วาล์วเปิด-ปิดในแต่ละ Station

2.5. ระบบควบคุม PLC (Programmable Logic Control) ทำหน้าที่

- เป็นตัวรับข้อมูลขนาดคละของทรายตามที่ผู้ผลิตต้องการ
- คำนวณอัตราส่วนผสมของปริมาณทรายในแต่ละ Station เพื่อนำมาผสมกันให้ได้ขนาดคละตามที่ต้องการ
- ควบคุมการเปิด-ปิด ของวาล์วใน Classifying Tank โดยการนำอัตราส่วนที่คำนวณได้ มาแปลงเป็นเวลาที่ใช้ในการเปิดวาล์วในแต่ละ Station

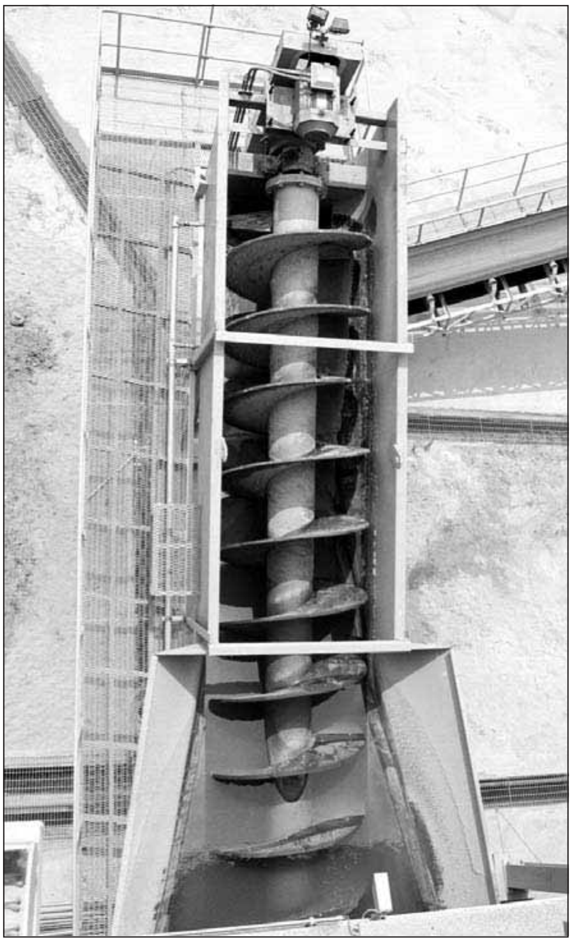


รูปที่ 10 ห้องควบคุมคุณภาพการผลิตและระบบควบคุม PLC

2.6. Screw Washer ทำหน้าที่รับทรายจาก Classifying Tank เพื่อทำความสะอาดทรายอีกครั้งหนึ่ง และดึงน้ำออกจากทราย (Dewatering) ซึ่งสามารถลดความชื้นของทรายให้ต่ำกว่า 20% ได้

รูปที่ 11 Screw Washer

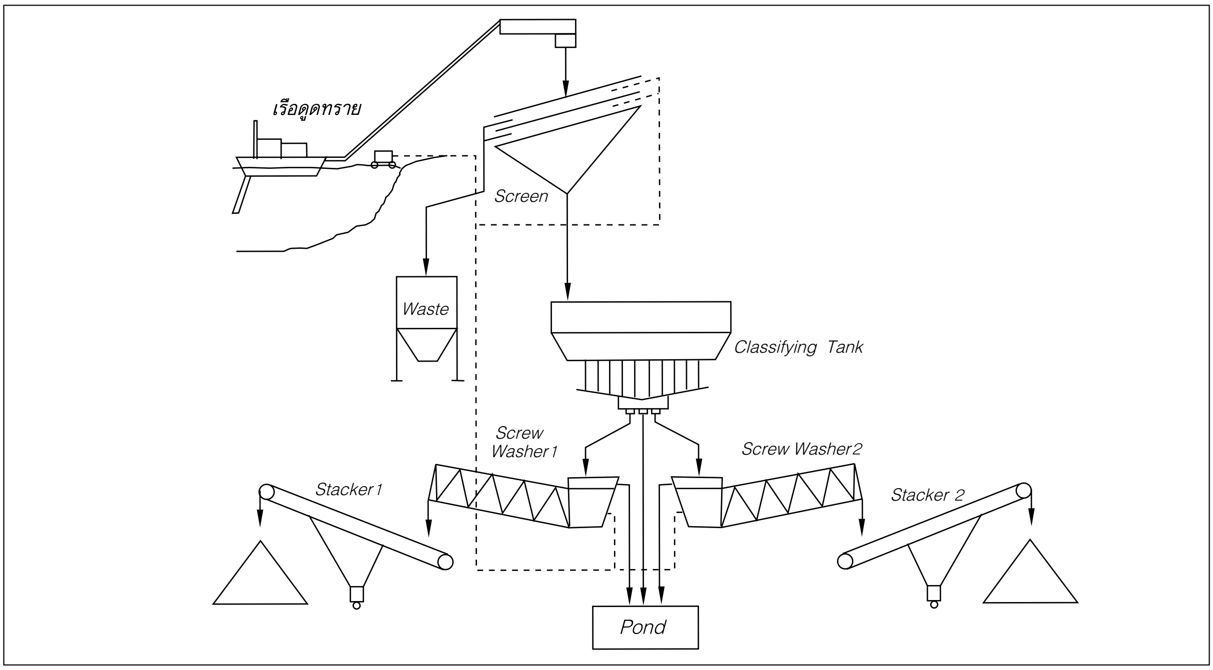
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.



รูปที่ 12 อีกมุมหนึ่งของ Screw Washer

2.7. สายพานลำเลียงทราย (Belt Stacker) ทำหน้าที่รับทรายจาก Screw Washer เพื่อนำไปกองไว้ให้แห้งและเพื่อตักไปใช้งานต่อไป

รูปที่ 13 *Belt Stacker*



รูปที่ 14 *Flow Diagram ของ โรงงานผลิตทราย*

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

รูปที่ 15 *โรงงานผลิตทราย*

หมายเหตุ *สำหรับโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงจะใช้ Belt Conveyor อีกชุดหนึ่ง เพื่อลำเลียงทรายจากกองไปไว้ที่ยุ้งทราย แล้วนำรถขนส่งทรายมารองรับทรายจากยุ้ง ดังรูปที่ 16 เพื่อลดกระบวนการตักทรายโดยรถตัก เป็นการประหยัดเวลาและแรงงาน อีกทั้งยังทำให้มีพื้นที่เพื่อเก็บ Stock ทรายมากขึ้นอีกด้วย*

รูปที่ 16 *ยุ้งทราย*

จะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตทรายทั้งสองวิธีนั้นต่างก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ในการผลิตทรายโดยวิธีดั้งเดิมนั้นมีข้อดีคือการลงทุนต่ำ กระบวนการไม่ซับซ้อน ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนและราคาทรายต่ำ แต่ไม่สามารถควบคุมคุณภาพทรายได้ตามที่ต้องการ ในทางกลับกันการใช้เครื่องจักรในการผลิตทรายจะมีการลงทุนสูง กระบวนการซับซ้อนจึงทำให้ต้นทุนและราคาของทรายสูงขึ้น แต่ก็สามารถควบคุมคุณภาพทรายให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ดังนั้นเครื่องจักรผลิตทรายนี้จึงไม่ได้ผลิตเพียงแต่ทรายที่ใช้ผสมคอนกรีตเท่านั้น แต่ยังสามารถผลิตทรายชั้นคุณภาพใดๆ ก็ได้ ตามความต้องการของผู้ผลิตเช่น ทรายสำหรับทำกระเบื้อง หรือทรายสำหรับทำกระจก เป็นต้น ซึ่งวิธีการผลิตทรายแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้

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

บทที่ 3
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และความชื้นผิวของมวลรวม
(Specific Gravity, Absorption and Surface Moisture of Aggregate)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การดูดซึมน้ำ (Absorption) และความชื้นผิว (Surface Moisture) ของมวลรวม ค่าความถ่วงจำเพาะมีประโยชน์ในการหาปริมาณส่วนผสมของหินทรายในคอนกรีต ส่วนค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นผิวของมวลรวมใช้สำหรับปรับแก้ปริมาณของหินทรายและน้ำเมื่อความชื้นของหินทรายเปลี่ยนไป

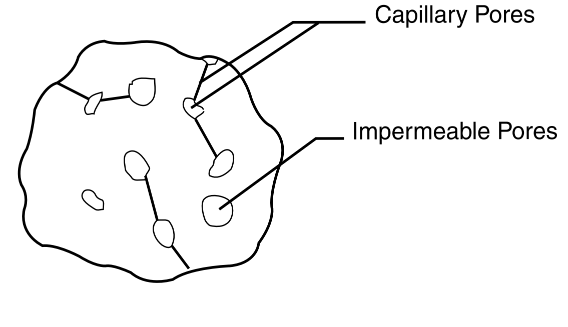
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

หมายถึงอัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

ค่าความถ่วงจำเพาะของหินทรายขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของมวลรวมและปริมาณช่องว่างของมวลรวม โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 2.4-3.0 ความถ่วงจำเพาะแบ่งออกเป็นหลายประเภท ดังนี้

1.1. ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (Absolute Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง**น้ำหนักแห้งที่ชั่งในอากาศ**ของมวลรวม เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวมโดย**ไม่รวมช่องว่าง**ในมวลรวม ทั้งที่เป็นช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ (Capillary pores) และชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นในการหาค่าดังกล่าวจึงต้องทำการบดวัสดุให้ละเอียดก่อน เพื่อป้องกันการนำช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) มาคิด แต่การหาโดยวิธีดังกล่าว มีความละเอียดเกินไปในงานคอนกรีต ดังนั้นในงานคอนกรีตทั่วไปจะถือว่าช่องว่างในมวลรวมชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) นั้นถือเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม โดยช่องว่างในมวลรวมที่จะกล่าวต่อไปสำหรับการทดสอบนี้ คือ ช่องว่างชนิดที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores)



***รูปที่ 1** ภาพตัดภายในมวลรวมแสดงช่องว่างชนิดน้ำซึมผ่านได้และชนิดน้ำซึมผ่านไม่ได้*

1.2. ความถ่วงจำเพาะแท้จริง (Apparent Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง**น้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศ** เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวมโดย**ไม่รวมช่องว่าง**ในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

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

น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง
น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวมที่ไม่รวมช่องว่างในมวลรวม

1.3. ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง (Bulk Specific Gravity-Oven Dry) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง**น้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศ**เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศ ที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวม**โดยรวม**ส่วนที่เป็นเนื้อแข็งและช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง
น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวม + ช่องว่างในมวลรวม

1.4. ความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity-Saturated Surface Dry) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง**น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ**ของมวลรวม **กับน้ำหนักของน้ำภายในช่องว่าง**ที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากันณอุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง + น้ำหนักน้ำในช่องว่าง
น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวม + ช่องว่างในมวลรวม

การคำนวณค่าต่างๆ ในงานคอนกรีตโดยปกตินั้นถือว่ามวลรวมนั้นอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) เนื่องจากน้ำที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างในมวลรวมนั้นไม่ได้มีส่วนในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เหมือนน้ำที่อยู่ที่ผิว (Free Water) ดังนั้นจึงถือว่าน้ำดังกล่าวนั้นเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม

ตัวอย่างที่1 การใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

กำลังอัดทรงลูกบาศก์ที่ต้องการ 240 ksc.

กำลังอัดทรงลูกบาศก์ที่ออกแบบ 240+60 = 300 ksc. (ส่วนเผื่อ 60 ksc.)

ค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม.

ขนาดหิน 3/4" - #4

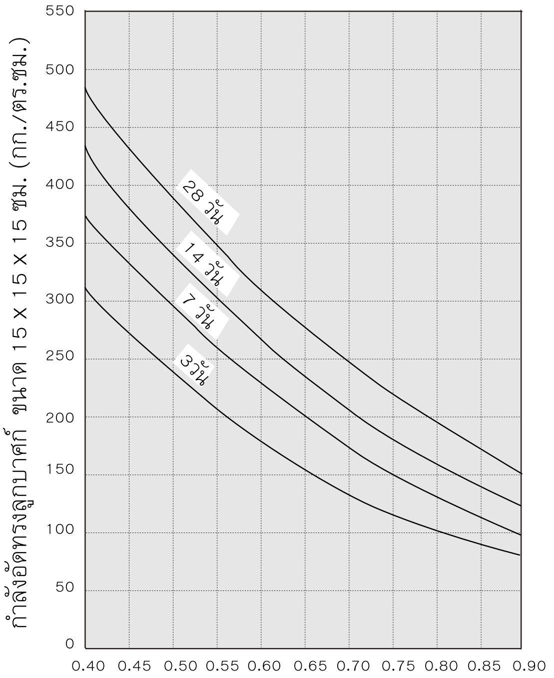
ใช้น้ำยาลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัว 300 cc./100 กก.ซีเมนต์

โดยคุณสมบัติของมวลรวม คือ

ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ = 3.15

ค่าความถ่วงจำเพาะของหิน = 2.70

ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย = 2.65



รูปที่ 2 *อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัดคอนกรีต*

จากรูปที่ 2 กำลังอัด 300 ksc. จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) = 0.61

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

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ

ค่ายุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. คอนกรีตเมื่อใส่น้ำยาประเภทลดน้ำ	
	หินย่อยขนาด 1"-#4	หินย่อยขนาด $\frac{3}{4}$"-#4
7.5 ± 2.5	165	175
10.0 ± 2.5	175	185
12.5 ± 2.5	180	190

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนละเอียดเมื่อใช้หินขนาดใหญ่สุดต่างกันเมื่อใช้น้ำยา

ขนาดหิน	ปริมาณปูนซีเมนต์+ปริมาณทราย
1" - #4	38% โดยปริมาตร หรือ 380 ลิตร
$\frac{3}{4}$" - #4	40% โดยปริมาตร หรือ 400 ลิตร

จากตารางที่ 1 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. เพื่อให้ค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม.
เมื่อใช้หิน 3/4" - #4 = 175 ลิตร
ปริมาตรซีเมนต์ที่ต้องใช้ = 175/0.61 = 287 กก.

จากตารางที่ 2 เมื่อใช้หินขนาด 3/4" - #4
ปริมาตรซีเมนต์ + ปริมาตรทราย = 400 ลิตร
ปริมาตรทราย = 400 - 91 = 309 ลิตร

ปริมาตรหิน = 1,000 - ปริมาตรซีเมนต์ - ปริมาตรน้ำ - ปริมาตรทราย
= 1,000 - 91 - 175 - 309 (1 ลบ.ม.คอนกรีตมีปริมาตร 1,000 ลิตร)
= 425 ลิตร

สรุป ใน 1 ลบ.ม.คอนกรีตประกอบด้วย

ซีเมนต์	91 X 3.15	=	286.6	กก.	~	290 กก.
ทราย	309 X **2.65**	=	818.8	กก.	~	820 กก.
หิน	425 X **2.70**	=	1,147.5	กก.	~	1,150 กก.
น้ำ		=	175.0	ลิตร	~	170 กก.
น้ำยา	300/100 X 290	=	870.0	cc.		

หมายเหตุ

ซีเมนต์ หิน และทราย	*ชั่งละเอียดถึง*	*5*	*กก.*
น้ำยาผสมคอนกรีต	*ชั่งละเอียดถึง*	*50*	*cc.*
น้ำ	*ชั่งละเอียดถึง*	*5*	*ลิตร*

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

2. ค่าความชื้นทั้งหมด (Moisture)

คือปริมาณน้ำทั้งหมดในมวลรวมทั้งที่อยู่ในช่องว่าง (Capillary pores) และน้ำที่ผิวของมวลรวม (Free Water) โดยคำนวณจากผลรวมระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม (Absorption) และค่าความชื้นที่ผิวของมวลรวม (Surface Moisture) โดยแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำทั้งหมดต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง (Oven-Dry)

สภาพความชื้นแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ

2.1. สภาพอบแห้ง (Oven-Dry) คือสภาพที่ความชื้นในมวลรวมทั้งหมด ถูกขับออกด้วยความร้อนจากเตาอบจนมวลรวมมีน้ำหนักคงที่

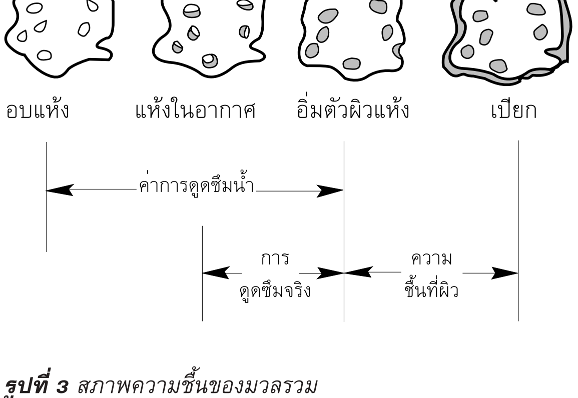
2.2. สภาพแห้งในอากาศ (Air-Dry, AD) คือสภาพที่มวลรวมผิวแห้งแต่มีน้ำในช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores) บางส่วน

2.3. สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) คือ สภาพที่มวลรวมผิวแห้งแต่มีน้ำเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores)

2.4. สภาพเปียก (Wet, W) คือ สภาพที่มวลรวมผิวเปียกและมีน้ำเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores)

3. ค่าการดูดซึมน้ำ (Absorption)

คือ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมน้ำเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores) ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม (Free Water) แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในช่องว่างต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง



รูปที่ 3 สภาพความชื้นของมวลรวม

สภาพของหินย่อยและทรายแม่น้ำที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทยจะมีคุณสมบัติดังนี้ คือ หินปูนมีค่าการดูดซึม 0.5% มีสภาพแห้งในอากาศ คือ มีน้ำบางส่วนในช่องว่าง (Capillary pores) ทรายมีค่าการดูดซึม 0.7% มีสภาพเปียก และมีความชื้นอยู่ระหว่าง 2-8%

4. ค่าความชื้นที่ผิว (Surface Moisture)

หาได้จากค่าความชื้นทั้งหมด (Moisture) หักออกด้วยค่าการดูดซึม (Absorption) แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ผิวของมวลรวม (Free Water) ต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)

การหาความชื้นที่ผิวหาได้ 3 วิธีคือ

4.1. วิธีหาความชื้นที่ผิวโดยตรง ทำโดยการชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่าง แล้วผึ่งลมให้แห้งจนอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) จากนั้นนำมาทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง น้ำหนักที่หายไปคือค่าความชื้นผิวของมวลรวม

4.2. วิธีหาความชื้นที่ผิวโดยวิธีอบแห้ง ทำโดยการชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่าง แล้วอบจนมวลรวมอยู่ในสภาพอบแห้ง (Oven-Dry) จากนั้นนำออกมาทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง น้ำหนักที่หายไปเป็นค่าความชื้นทั้งหมด การหาความชื้นที่ผิวทำได้โดยนำค่าความชื้นทั้งหมดหักออกด้วยค่าการดูดซึม วิธีนี้เหมาะสำหรับมวลรวมที่ดูแล้วรู้สึกว่าไม่มีความชื้นที่ผิวและต้องทราบค่าการดูดซึม (Absorption) ของมวลรวม

4.3. วิธีหาความชื้นที่ผิวโดยการชั่งในอากาศและการชั่งในน้ำ วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก สามารถทำได้ทั้งในห้องทดสอบและในสนาม โดยที่ไม่ต้องมีตู้อบ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องรู้ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่อิ่มตัวผิวแห้งเสียก่อน โดยรายละเอียดของวิธีการหาความชื้นผิววิธีนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อการทดสอบต่อไป

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะใช้สมมุติฐานที่ว่า มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับสภาพจริงของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจากการออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพจริงของวัตถุดิบ ทั้งนี้ถ้าไม่ทำการปรับปริมาณน้ำจะส่งผล

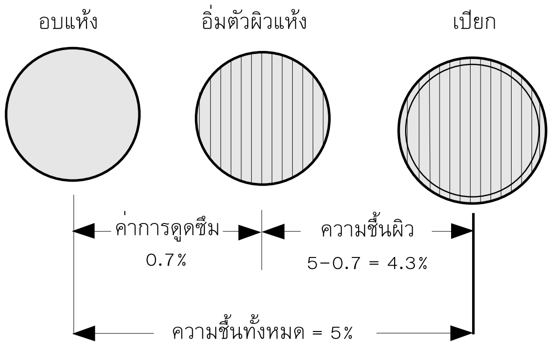
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

ต่อความสามารถเทได้ (Workability) และกำลังของคอนกรีต (Compressive Strength) โดยที่ถ้ามวลรวมนั้นมีค่าความชื้นทั้งหมดเกินค่าการดูดซึม เมื่อนำมาผสมคอนกรีตก็จะเป็นการเพิ่มน้ำให้ส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมเหลวไป หรือถ้ามวลรวมนั้นมีความชื้นทั้งหมดน้อยกว่าค่าการดูดซึม มวลรวมจะดูดน้ำเข้าไปในขณะผสมทำให้ส่วนผสมแห้งไป

ตัวอย่างที่ 2 การใช้ค่าความชื้นทั้งหมด ค่าการดูดซึมและค่าความชื้นผิว ในการปรับส่วนผสมจากการออกแบบกำหนดให้ค่าน้ำหนักมวลรวมก่อนการปรับส่วนผสม ตามตัวอย่างที่ 1

ทราย ที่ใช้ผลิตจริงมีค่าความชื้นทั้งหมด 5% ค่าการดูดซึม 0.7%

หิน ที่ใช้ผลิตจริงอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าความชื้นทั้งหมด 0.5% ค่าการดูดซึม 0.5%



นั่นคือ น้ำหนักทราย 100 กก. จะมีน้ำมากไป 4.3 กก. ดังนั้น น้ำหนักทราย 820 กก. จะมีน้ำมากไป

$$\frac{4.3 \times 820}{100} = 35.26 \text{ กก.}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องชั่งทรายเพิ่ม 820 + 35.26 = 855 กก.

หมายเหตุ *ปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นอีก 35.26 กก. นั้นก็ยังอยู่ในสภาพที่มีความชื้นเกินอยู่แต่ถือว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่มากจึงไม่นำมาคำนวณ*

เนื่องจากหินอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งตามที่ออกแบบอยู่แล้ว จึงไม่ต้องปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้น เพราะฉะนั้นจะต้องลดน้ำส่วนเกินออกไปโดยเหลือน้ำในส่วนผสม 175-35.26 = 139.7 ลิตร

ดังนั้นอัตราส่วนผสมใหม่หลังจากการปรับความชื้นคือ

ซีเมนต์	290	กก.	หิน	1,150	กก.
น้ำ	140	กก.	ทราย	855	กก.

น้ำยาลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Type D) 870 cc.

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 128

Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทรายที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัมหรือ 0.1% ของน้ำหนักทรายที่ใช้ทดสอบโดยใช้ค่าที่ละเอียดเป็นเกณฑ์
2. ขวดทดลองรูปชมพู่ (Volumetric Flask) ขนาดความจุ 500 ลบ.ซม. มีความแม่นยำในการวัดผิดผลาดไม่เกิน 0.1 ลบ.ซม.
3. กรวยตัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 40 ± 3 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ฐาน 90 ± 3 มม. สูง 75 ± 3 มม. และความหนาอย่างน้อย 0.8 มม.
4. เหล็กกระทุ้ง (Tamper) ที่มีขนาดน้ำหนัก 340 ± 15 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 3 มม.
5. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
6. เทอร์โมมิเตอร์
7. ถาดแสตนเลส

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

รูปที่ 4 *อุปกรณ์หาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ*

การเตรียมตัวอย่าง

1. ใช้ทรายตัวอย่างประมาณ 1,000 กรัม อบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ และปล่อยให้อุณหภูมิของตัวอย่างเย็นลง
2. นำทรายไปแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชม. แล้วค่อยๆ รินน้ำออกจากภาชนะบรรจุตัวอย่าง โดยระวังไม่ให้ส่วนละเอียดไหลออกไปกับน้ำ
3. นำทรายมาผึ่งให้ความร้อนและคลุกเคล้าทรายโดยสม่ำเสมอ จนกระทั่งใกล้ถึงจุดอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ซึ่งทดสอบสภาพจุดอิ่มตัวผิวแห้งได้ โดยวางกรวยด้านเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใหญ่บนพื้นที่ผิวเรียบและไม่ดูดซับน้ำ ใส่ทรายที่เตรียมไว้ในกรวยให้ล้น ใช้มือที่จับยอดกรวยป้องทรายไว้ไม่ให้หล่นออกนอกยอดกรวย ปล่อยเหล็กตำลงบนทรายที่ยอดกรวย 25 ครั้ง โดยแต่ละครั้งให้เหล็กตำสูงจากระดับผิวทรายครั้งล่าสุด 5 มม. และปล่อยให้เหล็กตำตกอย่างอิสระตามแรงดึงดูดของโลก จากนั้นปาดให้พอดีระดับปากกรวย นำทรายที่หล่นรอบฐานกรวยออกให้หมด ยกกรวยขึ้นตรงๆ ถ้าทรายยังเปียกอยู่ทรายจะยังคงเป็นรูปกรวยไม่เกิดการทะลาย เมื่อใดที่ทรายเริ่มเกิดการพังทะลายลงแสดงว่าทรายนั้นเข้าสู่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งแล้ว

รูปที่ 5 *ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งและสภาพเปียก*

วิธีทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักทรายตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งประมาณ 500 ± 10 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักทราย S
2. เททรายลงในขวดทดลองรูปชมพู่ (Volumetric Flask) ใช้น้ำฉีดล้างทรายที่ภาชนะลงไปให้หมดจากนั้นเติมน้ำเพิ่มถึงระดับประมาณ 90% ของปริมาตรขวดทดลอง
3. ไล่ฟองอากาศภายในให้หมด โดยอาศัยการหมุนคว่ำและเขย่า
4. ใช้น้ำฉีดล้างทรายที่คอขวดด้านในแล้วเติมน้ำจนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ นำไปชั่งน้ำหนักบันทึกเป็นค่า C
5. เททรายออกจากขวดใส่ภาชนะนำเข้าตู้อบ อบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1/2-1 1/2 ชม.
6. นำทรายมาชั่งน้ำหนักจะได้ค่า A
7. เติมน้ำใส่ขวดเปล่าจนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ชั่งน้ำหนักจะได้ค่า B

รูปที่ 6 *การเติมน้ำในขวดทดลองจนถึงระดับที่กำหนด*

การคำนวณ

ค่าตัวอย่าง S = 500 กรัม
C = 960 กรัม
A = 490 กรัม
B = 657 กรัม

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

1. Bulk Specific Gravity (สภาพแห้ง)

$$= \frac{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อทราย+Void ในทราย}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{(น้ำหนักขวด+น้ำ) + (น้ำหนักทราย SSD) - (น้ำหนักขวด + ทราย + น้ำเต็มขวด)}}$$

$$= \frac{A}{B+S-C} = \frac{490}{657+500-960} = 2.49$$

2. Bulk Specific Gravity (อิ่มตัวผิวแห้ง)

$$= \frac{\text{น้ำหนักทราย SSD}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อทราย+Void ในทราย}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักทราย SSD}}{\text{(น้ำหนักขวด+น้ำ) + (น้ำหนักทราย SSD) - (น้ำหนักขวด + ทราย + น้ำเต็มขวด)}}$$

$$= \frac{S}{B+S-C} = \frac{500}{657+500-960} = 2.54$$

น้ำหนักทราย SSD = น้ำหนักทรายแห้ง + น้ำหนักน้ำใน Void

3. Apparent Specific Gravity

$$= \frac{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อทรายโดยไม่รวม Void ในทราย}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{(น้ำหนักขวด+น้ำ) + (น้ำหนักทรายอบแห้ง) - (น้ำหนักขวด+น้ำ+ทรายเต็มขวด)}}$$

$$= \frac{A}{B+A-C} = \frac{490}{657+490-960} = 2.62$$

4. เปอร์เซ็นต์การดูดซึม (Absorption %)

$$= \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่อยู่ใน Void ของทราย}}{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักทราย SSD-น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{(S-A)}{A} \times 100 = \frac{500-490}{490} \times 100 = 2.04$$

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

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและค่าการดูดซึม

Determination	No. 1	No. 2
Weight of Glass Graduate, G (g)	152.9	154.0
Weight of Glass Graduate + Water, B (g)	657.0	656.5
Weight of Saturated Surface-Dry Sand, S (g)	500.0	500.0
Weight of Water + Sand + Glass Graduate, C (g)	960.0	960.2
Weight of Oven-Dry Sand, A (g)	490.0	489.5
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.49	2.49
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.54	2.54
Apparent Specific Gravity	2.62	2.62
Absorption (%)	2.04	2.15
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.49	
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.55	
Average Apparent Specific Gravity	2.63	
Average Absorption (%)	2.10	

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 127

Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งหินที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.5 กรัมหรือ 0.1% ของน้ำหนักหินที่ใช้ทดสอบโดยใช้ค่าที่ละเอียดเป็นเกณฑ์
2. ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ
3. ถังใส่น้ำ
4. ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.)
5. เทอร์โมมิเตอร์ ความละเอียดในการอ่าน 0.1 องศาเซลเซียส

รูปที่ 7 อุปกรณ์หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและการดูดซึมน้ำ

การเตรียมตัวอย่าง

1. จัดหาตัวอย่างหินให้ได้ปริมาณตามต้องการตามข้อที่ 5
2. นำหินมาร่อนบนตะแกรงเบอร์ 4 ทิ้งส่วนที่ผ่านตะแกรงไป
3. ล้างสิ่งสกปรกหรือสารอื่นๆ ที่เคลือบผิวให้สะอาด

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

4. อบมวลรวมให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ณ อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งมวลรวมให้เย็นจนมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส

5. ชั่งน้ำหนักให้ได้ตามข้อกำหนดต่อไปนี้

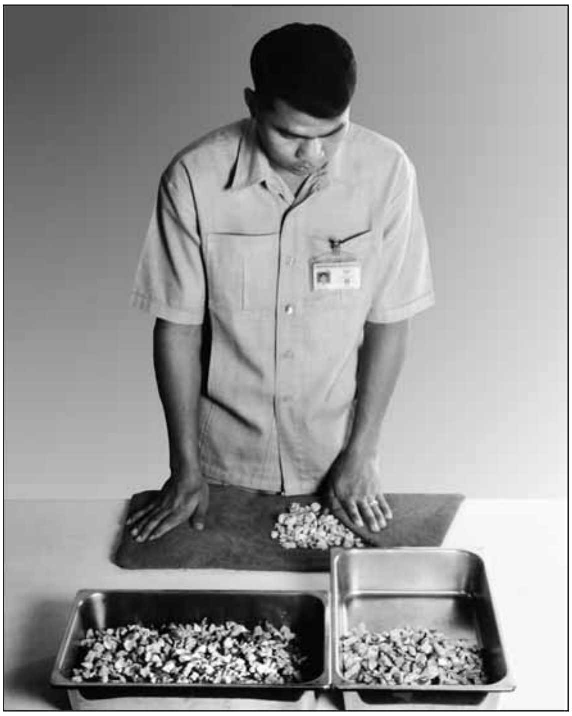
ตารางที่ 4 ปริมาณหินที่น้อยสุดตามขนาดหิน

ขนาดตัวอย่างใหญ่สุด มม. (นิ้ว)	น้ำหนักของตัวอย่างอย่างน้อยที่ใช้ทดสอบ (กก.)
12.5 ($\frac{1}{2}$) หรือเล็กกว่า	2
19.0 ($\frac{3}{4}$)	3
25.0 (1)	4
37.0(1 $\frac{1}{2}$)	5

6. แช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ± 4 ชั่วโมง

วิธีทดสอบ

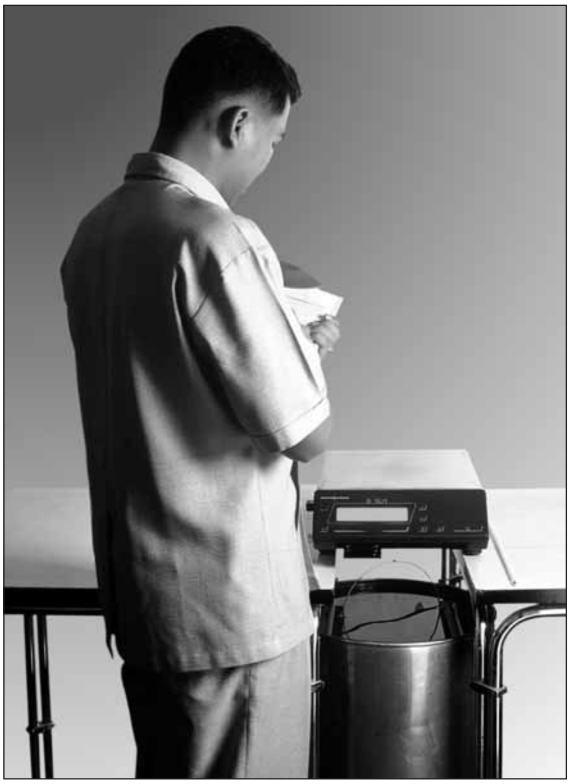
1. เทน้ำทิ้งผ่านตะแกรงเบอร์ 16 หรือเล็กกว่าและเช็ดน้ำที่เคลือบผิวตัวอย่างด้วยผ้าให้แห้งจนอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) นำมาชั่งน้ำหนักจะได้ค่า B



รูปที่ 8 *การเช็ดหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัว*

2. ชั่งน้ำหนักตะกร้าในน้ำ และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบรวมตะกร้าในน้ำ โดยรักษาให้น้ำมีอุณหภูมิ 23 ± 1.7 องศาเซลเซียส ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองคือน้ำหนักตัวอย่างทดสอบสภาพอิ่มตัวชั่งในน้ำ C

3. อบหินจนน้ำหนักคงที่ ณ อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นลงมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำหินมาชั่งน้ำหนักแห้ง A



รูปที่ 9 *การชั่งหินในน้ำ*

การคำนวณ

ค่าตัวอย่าง B = 336.7 กรัม

C = (น้ำหนักตะกร้าและหินที่ชั่งในน้ำ) - (น้ำหนักตะกร้าเปล่าชั่งในน้ำ)

= 387.6 - 173.0 กรัม

= 214.6 กรัม

A = 335.8 กรัม

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

1. Bulk Specific Gravity (สภาพแห้ง)

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับหิน + Void ในหิน}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ – น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{A}{B - C} = \frac{335.8}{336.7 - 214.6} = 2.75$$

2. Bulk Specific Gravity (อิ่มตัวผิวแห้ง)

$$= \frac{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับหิน + Void ในหิน}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ – น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{B}{B - C} = \frac{336.7}{336.7 - 214.6} = 2.76$$

3. Apparent Specific Gravity

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับเนื้อหินไม่รวม Void ในหิน}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง – น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{A}{A - C} = \frac{335.8}{335.8 - 214.6} = 2.77$$

4. เปอร์เซ็นต์การดูดซึม (Absorption ,%)

$$= \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่อยู่ใน Void ของหิน}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ – น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{(B - A)}{A} \times 100 = \frac{336.7 - 335.8}{335.8} \times 100 = 0.27$$

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

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและค่าการดูดซึม

Determination	No. 1	No. 2
Weight of SSD Sample, B (g)	336.7	332.1
Weight of Container (Basket) in Water (g)	173.0	173.0
Weight of Container + Sample in Water (g)	387.6	384.7
Weight of Sample in Water, C (g)	214.6	211.7
Weight of Oven-Dry Sample in Air, A (g)	335.8	331.3
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.75	2.75
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.76	2.76
Apparent Specific Gravity	2.76	2.77
Absorption (%)	0.27	0.24
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.75	
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.76	
Average Apparent Specific Gravity	2.77	
Average Absorption (%)	0.26	

การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่ผิว

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 70

Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งซึ่งอ่านได้ละเอียดถึง 0.5 กรัม
2. ขวดทดลองที่มีปริมาตร 500 มก.

วิธีทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างปริมาณไม่น้อยกว่า 200 กรัม นำมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่า W_1

2. เติมน้ำลงในขวดทดลองเปล่าให้ถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกค่า W_2

3. เติมตัวอย่างลงในขวดทดลองเปล่าแล้วเติมน้ำจนท่วมตัวอย่างทำการเขย่าขวดทดลองเพื่อไล่ฟองอากาศ

4. เติมน้ำจนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกค่า W_3

5. ปริมาณน้ำซึ่งตัวอย่างแทนที่ มีค่าเท่ากับ

$$W = W_1 + W_2 - W_3$$

น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายที่มีความชื้น
= (น้ำหนักทรายที่มีความชื้นที่ผิว) + (น้ำหนักน้ำ) - น้ำหนัก(น้ำ+ทราย)

ค่าตัวอย่าง
W_1 = 200.0 กรัม
W_2 = 660.0 กรัม
W_3 = 772.2 กรัม
W = 200 + 660 - 772.2
= 87.8 กรัม

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

6. คำนวณหาความชื้นผิวโดยอ้างอิงจากสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)

P_s = $\dfrac{\text{น้ำหนักน้ำที่ผิว (Free Water)}}{\text{น้ำหนักทรายที่สภาพ SSD}}$ x 100

= $\dfrac{W - V_d}{W_1 - W}$ x 100

= $\dfrac{87.80 - 78.43}{200 - 87.80}$ X 100 = 8.35 %

โดย $V_d = \dfrac{W_1}{SPGR_{SSD}}$

= $\dfrac{200}{2.55}$ = 78.43 (ค่าจากตารางที่ 3)

7. คำนวณหาค่าความชื้นที่ผิวโดยอ้างอิงจากสภาพอบแห้ง (Oven-Dry)

$P_d = P_s \left(1 + \dfrac{P_a}{100}\right)$

$= 8.35 \left(1 + \dfrac{2.10}{100}\right) = 8.52\ \%$

P_s = ค่าการดูดซึมของทราย

= 2.10 % (ค่าจากตารางที่ 3)

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการหาค่าความชื้นที่ผิวของมวลรวมละเอียด

Determination	No. 1	No. 2
Weight of Sample, W_1 (g)	200.0	200.0
Weight of Container + Water, W_2 (g)	660.0	660.0
Weight of Container, Water and Sample, W_3 (g)	772.2	770.5
Weight of Water Displaced by the Sample, W (g)	87.8	89.5
Percentage of Surface Moisture (SSD)	8.35	10.02
Percentage of Surface Moisture (Oven-Dry)	8.52	10.23
Average Percentage of Surface Moisture (SSD)	9.19	
Average Percentage of Surface Moisture (Oven-Dry)	9.34	

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

บทที่ 4
การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) และช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids)

บทนำ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างในมวลรวม ค่าหน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) ใช้สำหรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นค่าปริมาตรหรือค่าปริมาตรเป็นค่าน้ำหนัก เมื่อใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร และมีความสัมพันธ์ในการหาปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

หน่วยน้ำหนักเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงว่าในหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลรวมจะมีน้ำหนักเท่าใด โดยหน่วยน้ำหนักแบ่งออกเป็น

1.1. หน่วยน้ำหนักสมบูรณ์ (Absolute Unit Weight) เป็นค่าน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยไม่รวมช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids) สามารถหาได้โดยการคำนวณจากสูตรดังนี้

Absolute Unit Weight = Specific Gravity (SSD) x Unit Weight ของน้ำ

1.2. หน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) เป็นค่าน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยรวมช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids) สามารถหาได้จากการทดสอบตาม ASTM C 29 ทำโดยการใส่มวลรวมในถังเหล็กทรงกระบอก ชั่งน้ำหนักคำนวนหาปริมาตรถัง แล้วคำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักมวลรวมกับปริมาตรของถัง

ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตรนั้นเป็นค่าหน่วยน้ำหนักแบบ Bulk Unit Weight ทั้งนี้เพราะในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถทำให้มวลรวมอัดแน่นในเนื้อคอนกรีตจนไม่มีช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ (Voids)

ตัวอย่างที่ 1 การใช้ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ในการออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร

งานก่อสร้างขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะกำหนดสัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1 : 2 : 4 คือ

ใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณที่ได้จากการทดสอบ

หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์
= 1,235 กก./ลบ.ม.

หน่วยน้ำหนักของหินขนาด (3/4″- # 4)
= **1,574** กก./ลบ.ม.

หน่วยน้ำหนักของทราย
= **1,666** กก./ลบ.ม.

การคำนวณ

ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร	= 50/1,235
	= 0.04 ลบ.ม.
เพราะฉะนั้น ทราย 2 ส่วน	= 2 x 0.04
	= 0.08 ลบ.ม.
คิดเป็นน้ำหนักทราย	= 0.08 x **1,666**
	= 133.3 กก.
หิน 4 ส่วน	= 4 x 0.04
	= 0.16 ลบ.ม.
คิดเป็นน้ำหนักหิน	= 0.16 x **1,574**
	= 251.8 กก.

ปริมาณน้ำที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับปูน 1 ถุงเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวประมาณ 10 ซม.เท่ากับ 30 ลิตร (จากการทดลอง) ดังนั้นในการผสมคอนกรีตด้วยโม่เล็กเพื่อให้ได้ส่วนผสม 1 : 2 : 4 โดยปริมาตรจะต้องใช้

ปูน 1 ถุง	50	กก.	หิน	251	กก.
ทราย	133	กก.	น้ำ	30	ลิตร

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

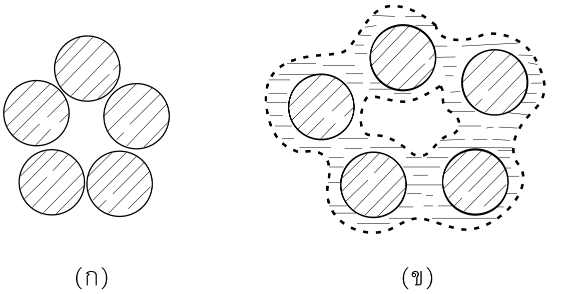
ค่าหน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) ขึ้นอยู่กับ **ความสามารถในการอัดแน่น (Compactability)** ของมวลรวมที่ถูกอัดลงในถังและ**ปริมาณความชื้น**

• **ความสามารถในการอัดแน่น** ดังกล่าวขึ้นอยู่กับ

1. ขนาดคละของมวลรวม (Gradation)
2. รูปร่างของมวลรวม (Shape)

ทั้งนี้เพราะมวลรวมที่มีขนาดคละดี มวลรวมขนาดเล็กจะแทรกอยู่ระหว่างมวลรวมขนาดใหญ่ ทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดเล็ก ส่วนรูปร่างของมวลรวมนั้นจะมีผลอย่างมากต่อความสามารถที่มวลรวมจะถูกอัดให้อยู่รวมกัน

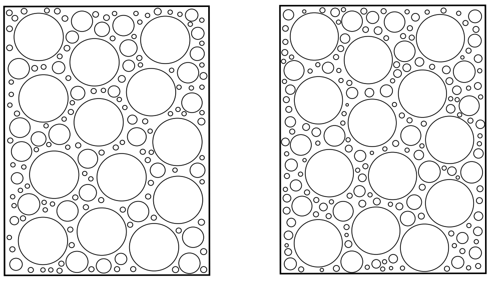
• **ปริมาณความชื้น** เช่น ในกรณีทรายละเอียดที่มีความชื้นค่าหน่วยน้ำหนักอาจจะลดลงถึง 25% อันเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำที่ผิวของทรายจะผลักดันให้อนุภาคของทรายห่างออกจากกัน ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาตรทรายที่เท่ากัน น้ำหนักของทรายที่มีความชื้นจะน้อยกว่าน้ำหนักทรายปกติ ซึ่งจะมีผลให้การหาหน่วยน้ำหนักและการหาส่วนผสมคอนกรีตด้วยการตวงปริมาตรมีโอกาสผิดพลาด ดังนั้นการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมควรทำในสภาพอบแห้ง (Oven-Dry)



รูปที่ 1 *ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเมื่อทรายมีความชื้น*

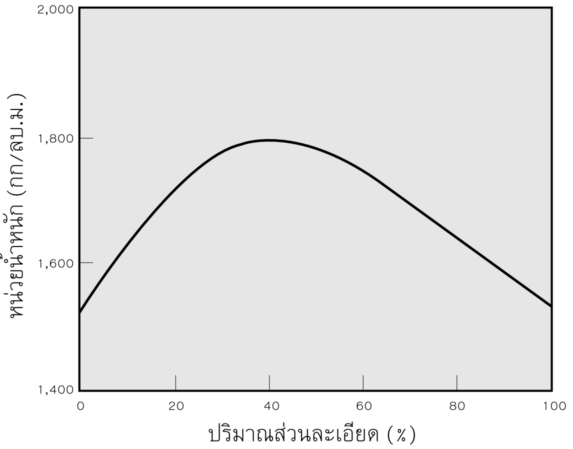
2. ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids)

เป็นค่าที่แสดงถึงว่ามีอากาศปนแทรกอยู่ระหว่างมวลรวมเท่าใด โดยทั้งนี้ไม่รวมช่องว่างภายในของมวลรวม (pores in aggregate) และยังบอกถึงอัตราการอัดแน่นของวัสดุผสมว่าแน่นเพียงใด นั่นคือ มวลรวมชนิดเดียวกัน (มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากัน) ถ้ามวลรวมมีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่า แสดงว่ามวลรวมนั้น มีช่องว่างระหว่างมวลรวมที่น้อยกว่า และการลดช่องว่างระหว่างมวลรวมสามารถทำได้โดยการเลือกใช้มวลรวมที่มีขนาดคละไล่เรียงกัน ซึ่งจะทำให้ช่วยลดปริมาณซีเมนต์เพลสท์



รูปที่ 2 *การเรียงตัวของขนาดคละต่างๆ กัน*

จากการทดลองผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยอัตราส่วนต่างๆ และทำการหาหน่วยน้ำหนัก พบว่า หน่วยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณส่วนละเอียด 34%-40% โดยน้ำหนัก ณ จุดดังกล่าวมวลรวมจะมีความแน่นสูงสุด (ช่องว่างระหว่างมวลรวมน้อยสุด) ดังนั้นเราจึงควรใช้สัดส่วนของส่วนละเอียดในช่วงดังกล่าว เพราะจะใช้ซีเมนต์เพลสท์น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสดด้วย



รูปที่ 3 *ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณส่วนละเอียด*

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

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวม

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 29

Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.05 กก. ของน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

2. เหล็กตำลักษณะเป็นท่อนเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8″ (16 มม.) ยาว 24″ (600 มม.)

3. ถังเหล็กทรงกระบอก มีขนาดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

4. เหล็กปาด ช้อนตัก เทอร์โมมิเตอร์

ตารางที่ 1 ขนาดของถังเหล็กทรงกระบอก

ความจุ (ลิตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มม.)	ความสูงภายใน (มม.)	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (มม.)
3	155 (6″)	160 (6.1″)	12.5 ($\frac{1}{2}$")
10	205 (8″)	308 (11.5″)	25.0 (1″)
15	255 (10″)	295 (11.0″)	40.0 ($\frac{11}{2}$")
30	355 (14″)	305 (11.2″)	100.0 (4″)

รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างในมวลรวม

การคำนวณปริมาตรถัง

1. ชั่งน้ำหนักถังเปล่า (ค่าตัวอย่าง T = 2.75 กก.)

2. เติมน้ำให้เต็มถังจนล้น ไล่ฟองอากาศในน้ำให้หมด ชั่งน้ำหนักถังที่บรรจุน้ำเต็มถัง (ค่าตัวอย่างน้ำหนักถัง + น้ำ = 5.4 กก.)

3. คำนวณหาน้ำหนักของน้ำที่บรรจุในถัง (ควรละเอียดถึง ± 0.05 กก.) ซึ่งน้ำหนักของน้ำในถังมีค่าเท่ากับน้ำหนักถังที่บรรจุน้ำเต็มหักออกด้วยน้ำหนักถังเปล่า (ค่าตัวอย่าง น้ำหนักน้ำ = 5.40-2.75 = 2.65 กก.)

4. วัดอุณหภูมิของน้ำในถัง เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของน้ำจากตารางที่ 2 ถ้าอุณหภูมิไม่ตรงตามข้อมูลที่แสดงในตารางให้เทียบตามสัดส่วนได้

5. สูตรการคำนวณหาปริมาตรของถัง

$$\text{ปริมาตรถัง} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในถัง}}{\text{หน่วยน้ำหนักของน้ำ}}$$

$$= \frac{2.65}{998} = 2.65 \times 10^{-3} \text{ ลบ.ม.}$$

(ค่าตัวอย่างหน่วยน้ำหนักของน้ำ = 998 กก./ลบ.ม)

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

ตารางที่ 2 หน่วยน้ำหนักของน้ำ

อุณหภูมิ		ปอนด์/ลบ.ฟุต	กก./ลบ.เมตร
องศาฟาเรนไฮต์	องศาเซนเซียส		
60.0	15.6	62.366	999.01
65.0	18.3	62.336	998.54
70.0	21.1	62.301	997.97
(73.4)	(23.0)	(62.274)	(997.54)
75.0	23.9	62.261	997.32
80.0	26.7	62.216	996.59
85.0	29.4	62.166	995.83

วิธีทดสอบ

การหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมโดยการกระทุ้ง (Rodding Procedure) ใช้กับหินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1 1/2″ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวอย่างที่จะทดสอบมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักถังเปล่า แล้วบันทึกค่าน้ำหนักไว้

2. ใส่ตัวอย่างทดสอบลงในถังประมาณ 1/3 ของความจุ เกลี่ยให้ได้ระดับแล้วตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง โดยตำให้ทั่วทั้งผิวหน้า เติมตัวอย่างทดสอบวัดให้ได้ปริมาณ 1/3 ของความจุ เกลี่ยให้ได้ระดับแล้วตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง โดยตำให้ทั่วทั้งผิวหน้า เติมตัวอย่างทดสอบวัดให้ได้ปริมาณ 2/3 ของความจุถัง ตำอีก 25 ครั้ง จากนั้นเติมตัวอย่างทดสอบให้เต็มจนล้นถัง ตำอีก 25 ครั้ง ใช้เหล็กปาดให้เรียบเสมอขอบถัง

ข้อควรระวัง

ในการตำชั้นแรกไม่ควรให้เหล็กตำกระทบก้นถัง สำหรับการตำชั้นที่สองและการตำชั้นที่สามใช้แรงพอประมาณ โดยใช้เหล็กตำให้ทะลุถึงชั้นถัดไปเท่านั้น

รูปที่ 5 *การหาปริมาตรถัง*

รูปที่ 6 *การปาดผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบเสมอขอบถัง*

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

3. ชั่งน้ำหนักถังพร้อมตัวอย่างทดสอบ (ค่าตัวอย่าง G = 7.20 กก.) ซึ่งควรชั่งได้ละเอียดถึง 0.1% หักน้ำหนักที่ชั่งได้ด้วยน้ำหนักถังเปล่า จะได้น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ

การคำนวณ

ค่าตัวอย่าง

น้ำหนักถัง T = 2.75 กก.

น้ำหนักตัวอย่าง+ถัง G = 7.20 กก.

น้ำหนักตัวอย่าง G–T = 7.20 – 2.75

= 4.45 กก.

ค่าปริมาตรถัง V = 2.65×10^{-3} ลบ.ม.

ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของหิน A = 0.26 %

หน่วยน้ำหนักอัดแน่น (Oven–Dry)

$$M = \frac{\text{น้ำหนักมวลรวม}}{\text{ปริมาตรถัง}}$$

$$= \frac{G - T}{V} = \frac{7.20 - 2.75}{2.65 \times 10^{-3}}$$

= 1,679.25 กก./ลบ.ม.

หน่วยน้ำหนักที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

$$M_{ssd} = M\left(1 + \frac{A}{100}\right)$$

$$= 1{,}679.25\left(1 + \frac{0.26}{100}\right)$$

= 1,683.62 กก./ลบ.ม.

เปอร์เซ็นต์ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม

$$\%\ Voids = \frac{(S \times W) - M}{S \times W} \times 100$$

$$= \frac{(2.76 \times 998) - 1{,}679.25}{2.76 \times 998} \times 100$$

= 39.04 %

S = ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (ค่าตัวอย่างจากการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ = 2.76)

W = ความหนาแน่นของน้ำ (ค่าตัวอย่าง = 988 กก./ลบ.ม.)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการหาค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม

	No. 1	No. 2
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.75	2.75
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.40	5.40
Weight of Water (kg)	2.65	2.65
Volume of Measuring Cylinder, V (m3)	$2.65X10^{-3}$	$2.65X10^{3}$
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	7.20	7.15
Weight of Sample Alone (kg)	4.45	4.40
Unit Weight of Sample, M (kg/m^3)	1,679.25	1,660.38
Unit Weight of Sample at SSD, M_{ssd} (kg/m^3)	1,683.62	1,664.70
Bulk Specific Gravity (Oven–Dry)	2.76	2.76
Percentage of Voids (%)	39.04	39.72
Average Unit Weight of Sample (kg/m^3)	1,674.16	
Average Percentage of Voids (%)	39.38	

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

บทที่ 5
การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวม ค่าโมดูลัสความละเอียด และขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม (Seive Analysis, Fineness Modulus and Maximum Size of Aggregate)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดคละของมวลรวม (Gradation) ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) และขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม (Nominal Maximum Size of Aggregate) โดยคุณสมบัติดังกล่าวใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสม

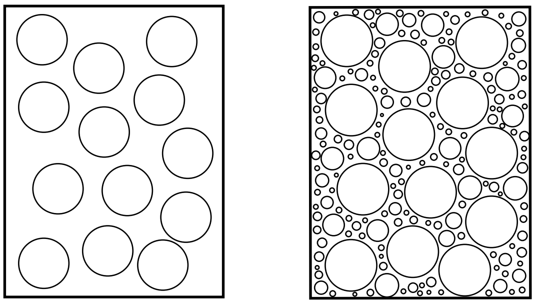
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.ขนาดคละ (Gradation)

ขนาดคละ (Gradation) คือการกระจายของขนาดต่างๆ ของอนุภาค ขนาดคละของมวลรวมนับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพสท์ที่ต้องการนำไปห่อหุ้มมวลรวม

1.1. ผลของขนาดคละต่อคุณสมบัติของคอนกรีตคือ

- **ปริมาณซีเมนต์เพสท์** คอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมดี มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมรวมกันแล้วมวลรวมที่ขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ดังรูปที่ 1 การที่มวลรวมมีขนาดคละที่ดีดังกล่าว จะส่งผลให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีปริมาณน้อยลง ปริมาณซีเมนต์เพสท์ที่ใช้เพื่อยึดมวลรวมและอุดช่องว่างจึงลดลง ทำให้ลดปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้



***รูปที่ 1** การเรียงตัวของขนาดคละที่ต่างกัน*

- **ความสามารถเทได้ (Workability)** คอนกรีตที่ใช้มวลรวมซึ่งมีขนาดคละดี จะมีปริมาณซีเมนต์เพสท์ที่เหลือจากการเติมช่องว่างในมวลรวมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดคละเดียว (Single Size) หรือขนาดคละขาดช่วง (Gap Grade) ดังนั้นปริมาณซีเมนต์เพสท์ดังกล่าวจะทำหน้าที่หล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้ความสามารถเทได้เพิ่มขึ้น
- **การแยกตัว (Segregation)** โดยปกติการแยกตัวของคอนกรีตมี 2 ชนิด คือ การแยกตัวของมอร์ต้าออกจากเนื้อคอนกรีตในคอนกรีตปกติทั่วไปที่ได้รับการจี้เขย่ามากเกินไป (Overvibration) ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ การเยิ้ม (Bleeding) โดยมีลักษณะ คือ จะมีการจมลงของมวลรวม (องค์ประกอบที่หนักกว่า) ซึ่งจะดันให้น้ำบางส่วน (ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เบาที่สุดของส่วนผสม) ลอยตัวขึ้นมาบนผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่สามารถของส่วนผสมที่จะกักน้ำที่แผ่กระจายอยู่เอาไว้ขณะที่มวลรวมที่หนักกว่าน้ำจมลง

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

1.2. การวิเคราะห์ขนาดคละของวัสดุผสมด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

เพื่อควบคุมตรวจสอบให้ขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามที่กำหนดไว้รวมทั้งใช้เพื่อหาอัตราส่วนผสมของมวลรวมขนาดต่างๆ เพื่อให้ได้ขนาดคละที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ทำโดยการเก็บตัวอย่างมาปริมาณหนึ่งมาร่อนบนตะแกรงขนาดต่างๆ ซึ่งวางเรียงกันตามขนาดช่องว่างของตะแกรงจากขนาดใหญ่สุดอยู่ข้างบนจนถึงขนาดเล็กสุด โดยใช้การเขย่าชุดตะแกรงดังกล่าว ผลที่ได้นำมาใส่ตารางตามตัวอย่างในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย

น้ำหนักที่ค้าง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

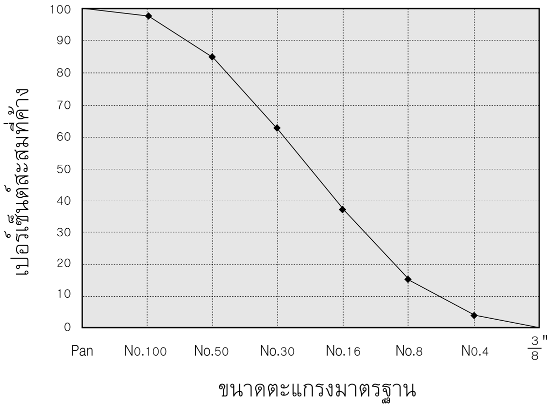
เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสม คือ ค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม คือ ค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของวัสดุที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ขนาดคละ

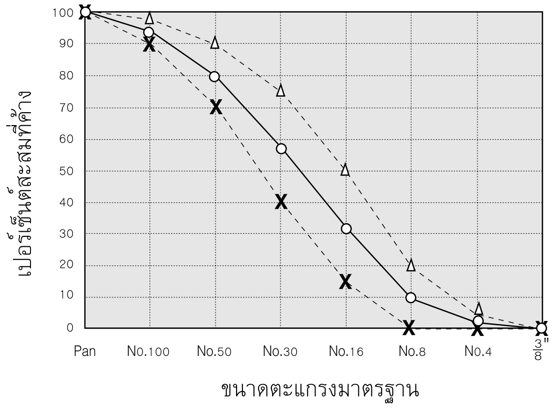
ขนาดตะแกรง	น้ำหนักที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม
#4	61.52	4	4	96
#8	169.18	11	15	85
#16	338.50	22	37	63
#30	384.50	25	62	38
#50	353.74	23	85	15
#100	199.94	13	98	2
ถาดรอง	30.76	2	-	-
รวม	1,538.00	100	301	-

ผลทดสอบที่ได้สามารถนำมาเขียนแผนภูมิขนาดคละของมวลรวม ดังรูปที่ 2 และคำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียดต่อไป



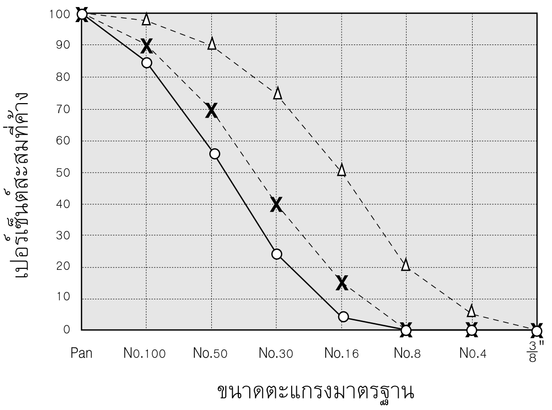
***รูปที่ 2** แผนภูมิขนาดคละของมวลรวม*

แผนภูมิขนาดคละ (Gradation Curves) คือ การนำผลการวิเคราะห์ขนาดคละมาเขียนแผนภูมิคละ ซึ่งสามารถช่วยในการเปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมว่าสอดคล้องหรือไม่กับมาตรฐานที่กำหนดได้อย่างรวดเร็ว



***รูปที่ 3** ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละได้ตามกำหนด*

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



รูปที่ 4 *ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละไม่ได้ตามกำหนด*

ข้อแนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดคละ

สำหรับทราย ปริมาณอนุภาคละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 มีผลต่อความสามารถเทได้ การแต่งผิวหน้าและการเยิ้มของคอนกรีตสด (Bleeding) นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กยังช่วยให้คอนกรีตเกาะรวมตัวกันได้ดี ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของอนุภาคละเอียดคือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 อย่างน้อย 15% และเบอร์ 100 อย่างน้อย 5% แต่ต้องไม่ให้มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% เพราะอนุภาคขนาดเล็กนี้มัก ประกอบด้วยดินเหนียว ซึ่งมีผลคือจะต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นในการผสมทำให้ปริมาตรของคอนกรีตมีอัตรา การเปลี่ยนแปลงสูง (เกิดการหดตัว)

สำหรับหิน งานก่อสร้างทั่วไปในประเทศไทยพบว่าหินที่ใช้ผสมคอนกรีตมักเป็นหินเพียงขนาดเดียว (Single size) เช่น หิน 1 หรือ หิน 2 ซึ่งไม่ได้มีขนาดคละที่ถูกต้องตามทฤษฎีสำหรับงานคอนกรีต ดังนั้นจึงมีข้อแนะนำในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสำหรับประเทศไทย คือ เมื่อใช้หินย่อยและทรายแม่น้ำที่เป็นวัตถุดิบหลักในประเทศไทยนั้น ปริมาณส่วนละเอียด ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณทรายที่เหมาะสมที่จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ไม่แยกตัวหรือเกิดการเยิ้มมากและได้กำลังอัดตามต้องการ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนละเอียดเมื่อใช้หินขนาดใหญ่สุดต่างกัน

ขนาดหิน	ปริมาณปูนซีเมนต์+ปริมาณทราย
1″ - #4	38% โดยปริมาตร หรือ 380 ลิตร
$\frac{3}{4}$" - #4	40% โดยปริมาตร หรือ 400 ลิตร

สำหรับงานพิเศษบางประเภทเช่น งานคอนกรีตเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่มีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. นั้นในการออกแบบอาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณส่วนละเอียดขึ้นไปเป็น 42%-45% โดยปริมาตรเพื่อป้องกันปัญหาการแยกตัว

2. ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)

ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus F.M.) คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยที่

F.M. = (1/100) (ผลบวกของเปอร์เซ็นต์สะสมของมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน)

F.M. = (1/100) (4+15+37+62+85+98) = 3.01

ค่าโมดูลัสความละเอียด เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย เป็นตัวบ่งบอกว่าลักษณะทรายนั้นหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดไม่สามารถใช้บอกขนาดคละของมวลรวมได้ แต่สามารถใช้ควบคุมความสม่ำเสมอของมวลรวมที่ผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทรายที่มี F.M. สูง คือทรายที่มีความหยาบมาก เช่น ทรายที่มี F.M. = 3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทรายที่มี F.M. = 2.3

เนื่องจากทรายที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่าๆ กัน ดังนั้นทรายที่เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีต ควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดในช่วง 2.30-3.20 นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความละเอียดยังบอกถึงขนาดโดยส่วนใหญ่ของมวลรวมว่าค้างอยู่บนตะแกรงลำดับที่เท่าใดโดยเริ่มนับจากตะแกรงเบอร์ 100 ตัวอย่างเช่น ค่า F.M. = 3 หมายถึงมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงลำดับที่ 3 (เบอร์ 30) นับจากตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 เป็นขนาดเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่ของมวลรวมซึ่งหาได้จากการคิดที่ว่า ถาดรองเป็นตะแกรงลำดับที่ 0 ตะแกรงเบอร์ 100 เป็นตะแกรงลำดับที่ 1 จนถึง ตะแกรงเบอร์ 4 เป็นตะแกรงลำดับที่ 6 ตามลำดับ ต่อจากนั้นทำการหา F.M. จากค่าเฉลี่ย

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

ถ่วงน้ำหนักของขนาดตะแกรงและเปอร์เซ็นต์ที่ค้าง เช่น

F.M. = (1/100)[(0x2)+(1x13)+(2x23)
+(3x25)+(4x22)+(5x11)+(6x4)] = 3.01

ค่าโมดูลัสความละเอียดนอกจากใช้บอกถึงความละเอียดของมวลรวมแล้วยังมีประโยชน์ในการนำไปใช้หาอัตราส่วนผสมของมวลรวม (Combined Aggregate) แต่ละชนิดอีกด้วย ซึ่งทำได้โดยการทดลองหาอัตราส่วนผสมของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด เพื่อให้ได้ขนาดคละของมวลรวมผสมอยู่ในขอบเขตที่กำหนดดังตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1 การหาอัตราส่วนผสมของมวลรวม (Combined Aggregate) ของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีค่า F.M. = 7.30 และ 3.01 ตามลำดับ เพื่อให้ได้มวลรวมผสมที่มีขนาดคละอยู่ในขอบเขตตามตารางที่ 3 และมีค่า F.M. = 5.62

ตารางที่ 3 ขนาดคละที่ต้องการ

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างบนตะแกรง	
	ค่าเฉลี่ย ขนาดคละที่ต้องการ	ขนาดคละ ที่ต้องการ
$1\frac{1}{2}$"	2.0	0-4
$\frac{3}{4}$"	26.0	20-32
$\frac{3}{8}$"	48.5	43-54
#4	60.0	55-65
#8	69.0	64-74
#16	77.5	73-82
#30	84.5	80-89
#50	95.0	92-98
#100	99.0	98-100
	F.M.=5.62	

• ทดลองเลือกอัตราส่วนผสมเช่น 0.35 สำหรับทราย และ 0.65 สำหรับหิน

จะได้ F.M. รวม = (0.35x3.01)+(0.65x7.3) = 5.79

• เนื่องจาก F.M. ยังไม่ได้ตามต้องการ ทำการเลือกอัตราส่วนผสมใหม่คือ 0.4 สำหรับทรายและ 0.6 สำหรับหิน

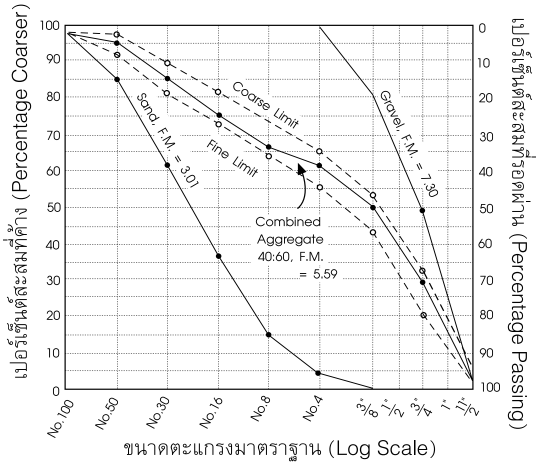
จะได้ F.M.รวม = (0.40x3.01)+(0.60x7.3) = 5.59 ~ 5.62 ถือว่าใช้ได้

ต่อจากนั้นทำการเลือกมวลรวมจากแต่ละตะแกรงตามค่าอัตราส่วนที่ทดลอง คำนวณมวลรวมผสม จะได้ขนาดคละตามต้องการ ต่อจากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนแผนภูมิคละ

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

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมมวลรวม

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างบนตะแกรง						
	ทราย (X)		หิน (Y)		มวลรวมผสม	ค่าเฉลี่ย ขนาดคละที่ต้องการ	ขนาดคละที่ต้องการ
	X	0.4X	Y	0.6Y	0.4X+0.6Y		
$1\frac{1}{2}$"	-	-	0	0	0	2.0	0-4
$\frac{3}{4}$"	-	-	49	29.4	29.4	26.0	20-32
$\frac{3}{8}$"	-	-	81	48.6	48.6	48.5	43-54
#4	4	1.6	100	60.0	61.6	60.0	55-65
#8	15	6.0	100	60.0	66.6	69.0	64-74
#16	37	14.8	100	60.0	74.8	77.5	73-82
#30	62	24.8	100	60.0	84.8	84.5	80-89
#50	85	34.0	100	60.0	94.0	95.0	92-98
#100	98	39.2	100	60.0	99.2	99.0	98-100
				F.M.=	5.59	5.62	



รูปที่ 5 แผนภูมิขนาดคละของมวลรวม

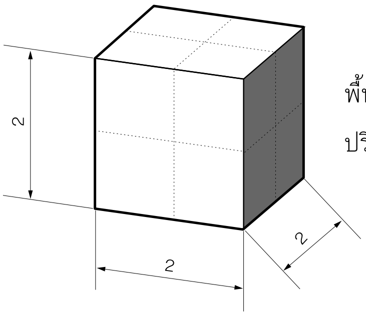
อัตราส่วนที่คำนวณได้นี้ ควรนำไปทดลองผสมจริง ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องปรับอัตราส่วนผสมอีกตามความเหมาะสม

3. ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสท์ที่ต้องการ และขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือมวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กเมื่อมีน้ำหนักมวลรวมเท่ากัน

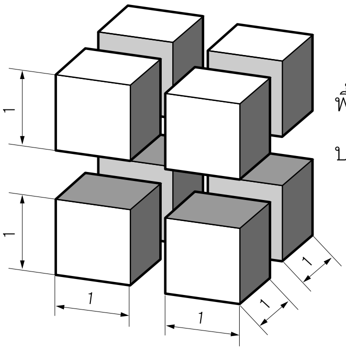
ตัวอย่างที่ 2 สมมุติหินมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด 2x2x2 ซม. มีปริมาตร 8 ลบ.ซ.ม. และพื้นที่ผิว 6x2x2 = 24 ตร.ซม. แต่ถ้าหินก้อนนี้ถูกแบ่งออกเป็นทรงลูกบาศก์ 8 ก้อนเท่าๆ กัน ปริมาตรยังเท่าเดิมคือ 8 ลบ.ซม. แต่พื้นที่ผิวจะเพิ่มเป็น 8x6x1 = 48 ตร.ซม.

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



พื้นที่ผิว = 24 ตร.ซม.

ปริมาตร = 8 ลบ.ซม.



พื้นที่ผิว = 48 ตร.ซม.

ปริมาตร = 8 ลบ.ซม.

ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ เพื่อเคลือบผิวมวลรวมน้อยกว่าเพื่อให้มีความสามารถเทได้เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 5 หรือถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่ากัน กำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเพราะสามารถลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั่นเอง

ตารางที่ 5 ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ

ค่ายุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.	
	หินย่อยขนาด 1"-#4	หินย่อยขนาด $\frac{3}{4}$"-#4
7.5 ± 2.5	180	190
10.0 ± 2.5	190	200
12.5 ± 2.5	200	210

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมโดยการดูผลค่าเปอร์เซ็นต์ที่ค้างว่าตะแกรงใด มีค่าเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ขนาด เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมดังแสดงในตัวอย่าง

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักค้าง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง
1	12	-
$\frac{3}{4}$"	1,384	7
$\frac{1}{2}$"	8,031	41
$\frac{3}{8}$"	8,676	43
#4	573	3
#8	609	3
ถาดรอง	513	3
รวมน้ำหนัก	19,798	100

พิจารณาจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าตะแกรงร่อนขนาดใหญ่ที่สุดที่มีหินค้างบนตะแกรงเกิน 15% คือ ตะแกรงขนาด 1/2" ตระแกรงร่อนที่ขนาดใหญ่กว่า 1 ชั้น คือ ตะแกรงขนาด 3/4" ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของหินนี้ คือ 3/4"

ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบควรตัดสินใจเลือกขนาดใหญ่สุดของมวลรวมโดยคำนึงถึง

1. ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม ต้องมีขนาดไม่เกิน 1/5 ของส่วนที่แคบที่สุดของแบบหล่อ ไม่เกิน 3/4 ของระยะแคบสุดระหว่างเหล็กเสริมกับแบบหล่อ และไม่เกิน 1/3 ของความหนาของพื้น
2. สำหรับกรณีใช้ปั๊ม ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมต้องไม่เกิน 1/5 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคอนกรีตปั๊ม
3. สำหรับกรณีคอนกรีตกำลังอัดสูง การวิบัติของคอนกรีต (Failure) จะเกิดที่มวลรวม แทนที่จะเกิดที่ซีเมนต์เพสท์เหมือนคอนกรีตกำลังอัดทั่วไป เพราะว่าในมวลรวมขนาดใหญ่นั้นมีโอกาสที่จะมีรอยร้าวขนาดเล็กอยู่ (Microcracks) ดังนั้นมวลรวมควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง

ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปควรมีขนาดไม่เกิน 40 มม. และควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง

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

การทดสอบหาขนาดคละและขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมที่ใช้

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C136

Standard Test Method for Seive Analysis of Fine and Coarse Aggregates

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทรายที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม หรือ 0.1% ของน้ำหนักทรายที่ใช้ทดสอบโดยใช้ค่าที่ละเอียดกว่าเป็นเกณฑ์

2. เครื่องชั่งหินที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.5 กรัม หรือ 0.1% ของน้ำหนักหินที่ใช้ทดสอบโดยใช้ค่าที่ละเอียดกว่าเป็นเกณฑ์

3. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

4. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Mechanical Seive Shaker) ต้องมีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งหรือในแนวราบและดิ่งปนกัน เพื่อที่จะให้อนุภาคกระแทกและกลิ้งไปมาบนผิวตะแกรงอย่างทั่วถึง

5. ตะแกรงร่อนมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM C 33

ตารางที่ 6 แสดงขนาดตะแกรงที่ใช้ในการหาขนาดคละของทราย

ขนาดตะแกรง
9.50 มม. ($\frac{3}{8}$")
4.75 มม. (#4)
2.36 มม. (#8)
1.18 มม. (#16)
600 m (#30)
300 m (#50)
150 m (#100)

***รูปที่ 6** เครื่องเขย่าทราย*

วิธีทดสอบทราย

1. จัดหาตัวอย่างทรายที่ต้องการทดสอบให้ได้ปริมาณตามต้องการ โดยเผื่อให้น้ำหนักทรายหลังอบแห้งเป็นไปตามที่กำหนดในข้อ 3 (ประมาณ 300 กรัม)

หมายเหตุ *ในกรณีที่ต้องการหาปริมาณฝุ่นในทรายต้องนำตัวอย่างทรายไปทดสอบหาปริมาณฝุ่นด้วยการล้างก่อนการทดสอบขนาดคละ แล้วบันทึกค่าปริมาณฝุ่นไว้*

2. นำตัวอย่างทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

3. ชั่งน้ำหนักทรายหลังอบแห้งให้ได้ประมาณ 300 กรัม

4. นำตะแกรงขนาด 3/8" เบอร์ 4 เบอร์ 8 เบอร์ 16 เบอร์ 30 เบอร์ 50 และเบอร์ 100 มาวางซ้อนกันเป็นชุดบนเครื่องเขย่า โดยเรียงให้ตะแกรงขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ชั้นบน

5. เททรายลงบนตะแกรงขนาด 3/8" ซึ่งอยู่ชั้นบนสุด ปิดฝาให้แน่นแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าทราย เขย่าจนทรายที่ค้างบนตะแกรงไม่ผ่านไปยังตะแกรงชั้นถัดไป

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

6. ชั่งน้ำหนักทรายที่ค้างบนแต่ละตะแกรง และทำการเปรียบเทียบน้ำหนักรวมทั้งหมดของทรายหลังการร่อนกับน้ำหนักทรายแห้งเริ่มแรกก่อนการร่อน ถ้าหากพบว่ามีค่าแตกต่างมากกว่า 0.3% ของน้ำหนักทรายแห้งก่อนร่อน แสดงว่ามีทรายหายไปขณะทำการทดสอบซึ่งอาจเกิดจากความผิดผลาดในการชั่งหรือการทดสอบ ดังนั้นไม่ควรนำผลการทดสอบมาพิจารณา

7. คำนวณหา

- เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสมบนตระแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสมบนตระแกรงแต่ละขนาด

โดยใช้น้ำหนักแห้งก่อนการทดสอบเป็นฐานในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆ

หมายเหตุ *ถ้าใช้ทรายที่ผ่านการทดสอบหาปริมาณฝุ่นด้วยการล้างมาทดสอบหาขนาดคละต่อ การคำนวณขนาดคละให้ใช้น้ำหนักรวมของตัวอย่างแห้งก่อนการทดสอบล้างฝุ่นเป็นฐานในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆ และรวมน้ำหนักปริมาณฝุ่นที่ได้จากการล้างเข้าไปในถาดรองด้วย*

8. คำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) ได้จากการรวมค่าเปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสมแต่ละขนาด หารด้วย 100 โดยคำนวณตามขนาดตะแกรงดังนี้ เบอร์ 100 เบอร์ 50 เบอร์ 30 เบอร์ 16 เบอร์ 8 เบอร์ 4 3/8" และ 1 1/2"

ตัวอย่างที่ 2 การหาขนาดคละของทรายและค่า Fineness Modulus

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม	ข้อกำหนด
3/8"	0	0	0	100	100
#4	10	2	2	98	95-100
#8	68	10	12	88	80-100
#16	124	19	31	69	50-85
#30	132	20	51	49	25-60
#50	212	32	83	17	10-30
#100	96	15	98	2	2-10
ถาดรอง	16	2	100	0	
รวม	658	F.M.=	2.77		

หมายเหตุ *ข้อกำหนดจาก ASTM C 33-78*

การคำนวณ

ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.)=เปอร์เซ็นต์ค่าสะสมของทรายที่ค้างบนตะแกรง เบอร์ 100 และหยาบกว่าหารด้วย 100

จากตาราง F.M. = (0+2+12+31+51+83+98)/100

F.M. = 2.77

รูปที่ 7 *เครื่องเขย่าหิน*

วิธีทดสอบหิน

1. จัดหาตัวอย่างหินที่ต้องการทดสอบให้ได้ปริมาณตามต้องการ โดยเผื่อให้น้ำหนักหินหลังอบแห้งเป็นตามที่กำหนดในข้อ 3

หมายเหตุ *ในกรณีที่ต้องการหาปริมาณฝุ่นในหิน การเตรียมตัวอย่างทดสอบต้องพิจารณาหลักเกณฑ์ดังนี้*

- *มวลรวมที่มีขนาดใหญ่สุด 12.5 มม. (1/2") หรือเล็กกว่าให้ใช้ตัวอย่างเดียวกันในการทดสอบปริมาณฝุ่น และหาขนาดคละโดยเริ่มจากการทดสอบปริมาณฝุ่นในหินด้วยการล้างก่อน*
- *มวลรวมที่มีขนาดใหญ่สุดมากกว่า 12.5 มม. (1/2") อาจใช้คนละตัวอย่างในการทดสอบได้*

ทั้งนี้เพราะการคำนวณขนาดคละของมวลรวมขนาดใหญ่สุดเล็กกว่า 1/2" จะได้รับผลกระทบจากปริมาณฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญเพราะ

- ปริมาณตัวอย่างหินขนาดดังกล่าวค่อนข้างน้อยเช่น มวลรวมที่มีขนาด 1/2" ใช้ 2 กก. แต่มวลรวมขนาด 3/4" ใช้ 5 กก. ปริมาณฝุ่นจึงส่งผลต่อน้ำหนักมวลรวมในแต่ละตะแกรงได้มาก

- มวลรวมขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก จึงมีปริมาณฝุ่นที่เคลือบผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่

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

2. นำตัวอย่างทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่

3. ชั่งน้ำหนักหินหลังอบแห้งให้ได้น้ำหนักดังตาราง โดยขึ้นกับขนาดใหญ่สุดของหิน

ตัวอย่างขนาดใหญ่สุด มม. (นิ้ว)	**น้ำหนักของตัวอย่างที่จะใช้ตามขนาดหิน (กก.)**
9.5 ($\frac{3}{8}$")	1
12.5 ($\frac{1}{2}$")	2
19.0 ($\frac{3}{4}$")	5
25.0 (1)	10
37.5 (1$\frac{1}{2}$")	15
50.0 (2)	20
63.0 (2$\frac{1}{2}$")	35
75.0 (3)	60
90.0 (3$\frac{1}{2}$")	100

4. เรียงขนาดตะแกรงโดยขึ้นอยู่กับขนาดมวลรวมใหญ่สุดดังตารางที่ 7 ถ้าต้องการคำนวณค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ต้องเพิ่มตะแกรงมาตรฐานเข้าไปจนถึงขนาดเบอร์ 100

5. นำหินใส่ในเครื่องเขย่า เขย่าจนหินที่ค้างบนตะแกรงไม่ผ่านไปยังตะแกรงชั้นถัดไป

6. ชั่งน้ำหนักหินที่ค้างบนแต่ละตะแกรง แล้วทำการเปรียบเทียบน้ำหนักรวมทั้งหมดของหินหลังการร่อนกับหินก่อนการร่อน ถ้าหากพบว่ามีค่าแตกต่างมากกว่า 0.3% แสดงว่าหินหายไปขณะทำการทดสอบ ซึ่งอาจเกิดความผิดผลาดจากการชั่งหรือการทดสอบ ดังนั้นไม่ควรนำผลการทดสอบมาพิจารณา

7. คำนวณหา
- เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสมบนตระแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสมบนตระแกรงแต่ละขนาด

โดยใช้หินก่อนการทดสอบเป็นฐานในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆ

หมายเหตุ *ถ้าใช้หินที่ผ่านการทดสอบหาปริมาณฝุ่นด้วยการล้างมาทดสอบหาขนาดคละต่อ การคำนวณขนาดคละให้ใช้น้ำหนักรวมของตัวอย่างแห้งก่อนการทดสอบล้างฝุ่นเป็นฐานในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆ และรวมน้ำหนักปริมาณฝุ่นที่ได้จากการล้างเข้าไปในถาดรองด้วย*

8. คำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เช่นเดียวกับทราย

9. คำนวณหาค่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (Maximum Size of Aggregate) โดยการดูค่าเปอร์เซ็นต์ที่ค้าง ว่าตะแกรงอันใดมีค่าเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ชั้น เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมนั้น

ตัวอย่างที่3 การหาขนาดคละของหินและค่า Fineness Modulus

ขนาดตะแกรง	**น้ำหนักที่ค้าง**	**เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง**	**เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสม**
1"	0	0	0
$\frac{3}{4}$"	231.0	4.31	4.31
$\frac{1}{2}$"	2,655.5	49.50	53.81
$\frac{3}{8}$"	1,386.5	25.85	79.66
#4	971.9	18.12	97.78
#8	34.9	0.65	98.43
#16	0	0	98.43
#30	0	0	98.43
#50	0	0	98.43
#100	0	0	98.43
ถาดรอง	84.4	1.57	100.00
รวม	5,364.2	F.M.=	7.28

การคำนวณ

ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) = ค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของหินที่ค้างบนตะแกรง เบอร์ 100 และหยาบกว่าหารด้วย 100

F.M. = (0+4.31+53.81+79.66+97.78+98.43 +98.43 +98.43+98.43+98.43)/100

F.M. = 7.28

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

ตารางที่ 7 ขนาดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการหาขนาดคละของหิน

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม	น้ำหนักมวลรวม (กรัม) ตามขนาดของมวลรวมหยาบ												
	100 มม. (4″)	90 มม. (3 1/2″)	75 มม. (3″)	63 มม. (2 1/2″)	50 มม. (2″)	37.5 มม. (1 1/2″)	25 มม. (1″)	19 มม. (3/4″)	12 มม. (1/2″)	9.5 มม. (3/8″)	4.75 มม. (#4)	2.36 มม. (#8)	1.18 มม. (#16)
90-37.5 มม. (3 1/2″ - 1 1/2″)	●	●	—	●	—	●	—	●	—	—	—	—	—
63-37.5 มม. (2 1/2″ - 1 1/2″)	—	—	●	●	●	●	—	●	—	—	—	—	—
50-25 มม. (2″-1″)	—	—	—	●	●	●	●	—	●	—	—	—	—
50-47.5 มม. (2″-#4)	—	—	—	●	●	—	●	—	●	—	●	—	—
37.5-19 มม. (1 1/2″ - 3/4″)	—	—	—	—	●	●	●	●	—	●	—	—	—
37.5-4.75 มม. (1 1/2″ -# 4)	—	—	—	—	●	●	—	●	—	●	●	—	—
25-12.5 มม. (1″- 1/2″)	—	—	—	—	—	●	●	●	●	●	—	—	—
25-9.5 มม. (1″- 3/8″)	—	—	—	—	—	●	●	●	●	●	●	—	—
25-47.5 มม. (1″- # 4)	—	—	—	—	—	●	●	▲	●	▲	●	●	—
19.-9.5 มม. (3/4″ - 3/8″)	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●	●	—	—
19-47.5 มม. (3/4″ - # 4)	—	—	—	—	—	—	●	●	▲	●	●	●	—
12.5-4.75 มม. (1/2″ - # 6)	—	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●	●	—
9.5-2.36 มม. (3/8″ - # 8)	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●	●

● = มีใช้ — = ไม่มีใช้ ▲ = จะใช้หรือไม่ก็ได้

จากการวิเคราะห์จะเห็นว่าตะแกรงร่อนขนาดใหญ่ที่สุดที่มีหินค้างบนตะแกรงเกิน 15% คือตะแกรงขนาด 1/2″ ตระแกรงร่อนที่ขนาดใหญ่กว่า 1 ชั้นคือ ตะแกรงขนาด 3/4″ ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของหินนี้คือ 3/4″

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

บทที่ 6
การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลีส (Abrasion Test by Los Angeles Machine)

บทนำ

การทดสอบนี้เพื่อศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลีส ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงคุณภาพของหินในการต้านทานการสึกกร่อน และการกระแทก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตนอกจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างอาคาร เช่น เสา คาน กำแพงรับแรงเฉือน (Shear wall) และเสาเข็มแล้ว ยังนำไปใช้ในงานถนน ลานจอดรถ พื้นโรงงาน พื้นสนามบินอีกด้วย

ผิวหน้าของคอนกรีต นอกจากทำหน้าที่รับน้ำหนักจากล้อยานพาหนะ เพื่อถ่ายลงสู่พื้นทางแล้วยังต้องมีความสามารถรับแรงเสียดสีและแรงกระแทกจากล้อยานพาหนะที่กระทำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นความสามารถของหินในการต้านทานการสึกกร่อนจึงเป็นค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานสูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน

การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลีสทำได้จาก การวัดค่าความสึกกร่อนที่เกิดขึ้นกับมวลรวม จากการกระแทกและการเสียดสีกับลูกเหล็กกลม ซึ่งมีขนาดตามที่กำหนดและมีจำนวนขึ้นอยู่กับขนาดคละของตัวอย่างทดสอบ ในขณะที่ถังหมุนรอบตัวเองจะมีแผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกับผนังของถัง จะพาตัวอย่างทดสอบและลูกเหล็กกลมขึ้นไปพร้อมๆ กัน เมื่อตัวอย่างทดสอบกับลูกเหล็กกลมอยู่สูงขึ้นจะตกลงมากระแทกกับผนังด้านตรงข้ามในถังเหล็ก กระบวนการนี้จะทำซ้ำกันไปเรื่อยๆ จนครบจำนวนรอบที่กำหนด จากนั้นจึงนำตัวอย่างทดสอบออกจากถัง แล้วนำมาแยกขนาดด้วยตะแกรงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การสึกกร่อน

จากมาตรฐาน ASTM C 33 หินที่ใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องรับแรงเสียดทานมากเช่น งานถนน เมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่องลอสแองเจลีสแล้วจะต้องมีส่วนที่สึกกร่อนไปไม่เกิน 35% ของน้ำหนักเดิม จึงเหมาะสมกับการนำมาผสมเพื่อทำคอนกรีต

ถ้ามวลรวมหยาบมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ต่ำแล้ว ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีคุณสมบัติในการรับแรงเสียดสีและแรงกระแทกตามความต้องการนั้น จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียดซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ โดยจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองมากขึ้น

นอกจากความต้านทานการสึกกร่อนของหินที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตแล้วยังมีปัจจัยสำคัญอื่นๆ ที่ควรพิจารณาดังนี้คือ

1. กำลังอัดของคอนกรีต

การเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเสียดสีสามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัด 140 กก./ตร.ซม. ทรงลูกบาศก์จะมีอัตราเสียหายประมาณ 5 เท่า ของคอนกรีตที่มีกำลังอัด 280 กก./ตร.ซม. ทรงลูกบาศก์ ส่วนคอนกรีตที่กำลังอัดระหว่าง 280-420 กก./ตร.ซม. ทรงลูกบาศก์ จะมีความต้านทานการเสียดสีที่ดีมาก

2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

บริเวณผิวคอนกรีตด้านบนที่มีการเยิ้มจะมีความอ่อนแอที่สุด ดังนั้นการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่ให้เกิน 0.45-0.50 จะช่วยลดการเยิ้มและเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต

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

3. หินและทราย

นอกจากการเลือกใช้หินและทรายที่มีความแข็งแกร่งแล้ว ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนได้โดยการเลือกใช้หินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

4. การเทและการแต่งผิวหน้า

ควรจี้เขย่าคอนกรีตให้แน่นอย่างสม่ำเสมอในแบบหล่อรวมทั้งต้องแต่งผิวหน้าให้เหมาะสม ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณภาพที่ผิวดี และช่วยลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต

5. การบ่ม

ควรบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการที่เหมาะสมและมีระยะเวลาการบ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่สมบูรณ์ที่สุด

6. ลักษณะผิวคอนกรีต

ในกรณีที่มีการเสียดสีอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมาก หรือใช้วัสดุอื่นเคลือบผิวหรือในบางโครงสร้างอาจจะต้องทำให้ผิวคอนกรีตเรียบมากๆ

7. รอยต่อ (Joint)

ควรออกแบบและก่อสร้างรอยต่อให้เหมาะสมเพื่อลดการกระแทก

การทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบโดยเครื่องลอสแองเจลีส

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 131

Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in The Los Angeles Machine

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบลอสแองเจลีส
2. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (แสดงไว้ในตารางที่ 1)
3. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1% ของน้ำหนักมวลรวมที่ใช้ทดสอบ
4. ลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46.8 มม. มีน้ำหนักลูกละ 390-445 กรัม

รูปที่ 1 เครื่องทดสอบลอสแองเจลีส

วิธีทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างทดสอบ โดยนำมวลรวมหยาบมาล้างและอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำมาร่อนแยกขนาดคละด้วยตะแกรงมาตรฐาน จากนั้นรวมหินขนาดต่างๆ ใหม่อีกครั้งตามเกรดที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 ถ้ามวลรวมมีช่วงของขนาดคละกว้าง ให้เลือกใช้เกรดของตารางที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

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

ตารางที่ 1 ขนาดของตัวอย่างทดสอบ

ขนาดตะแกรงร่อน		น้ำหนักมวลรวม (กรัม) ตามขนาดของมวลรวมหยาบ			
ผ่าน (มม.)	ค้าง (มม.)	A	B	C	D
37.50 ($1\frac{1}{2}$")	25.00 (1")	1,250 ± 25	-	-	-
25.00 (1")	19.00 ($\frac{3}{4}$")	1,250 ± 25	-	-	-
19.00 ($\frac{3}{4}$")	12.50 ($\frac{1}{2}$")	1,250 ± 10	2,500 ± 10	-	-
12.50 ($\frac{1}{2}$")	9.50 ($\frac{3}{8}$")	1,250 ± 10	2,500 ± 10	-	-
9.50 ($\frac{3}{8}$")	6.30 ($\frac{1}{4}$")	-	-	2,500 ± 10	-
6.30 ($\frac{1}{4}$")	4.75 (#4)	-	-	2,500 ± 10	-
4.75 (#4)	2.36 (#8)	-	-	-	5,000 ± 10
รวม		5,000 ± 10	5,000 ± 10	5,000 ± 10	5,000 ± 10

2. ใส่ตัวอย่างทดสอบในเครื่องทดสอบลอสแองเจลีส แล้วใส่จำนวนลูกเหล็กให้สอดคล้องตามขนาดของมวลรวมหยาบ (Grade) ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนลูกเหล็กตามขนาดของมวลรวม (Grade)

ขนาดมวลรวมหยาบ	จำนวนลูกเหล็ก (ลูก)	น้ำหนักลูกเหล็ก (กรัม)
A	12	5,000 ± 25
B	11	4,584 ± 25
C	8	3,330 ± 10
D	6	2,500 ± 10

3. เปิดเครื่องทดสอบลอสแองเจลีสซึ่งหมุนด้วยอัตรา 30-33 รอบ/นาที ตั้งเครื่องให้หมุน 500 รอบ

4. หลังจากเครื่องหยุด นำตัวอย่างทดสอบออกมาแยกอย่างคร่าวๆ ด้วยตะแกรงใหญ่กว่าเบอร์ 12

5. นำส่วนที่ผ่านตะแกรงมาร่อนด้วยตะแกรงเบอร์12

6. นำตัวอย่างทดสอบส่วนที่ใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 12 มาล้างและอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนัก B

รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดก่อนทดสอบ (มีค่าประมาณ 5,000 ± 10 กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างภายหลังการทดสอบที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 12

ค่าตัวอย่าง

A = 5,000.9 กรัม

B = 3,583.3 กรัม

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{(5{,}000.9 - 3{,}583.3)}{5{,}000.9} \times 100$$

$$= 28.35\ \%$$

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

บทที่ 7
การทดสอบหาดัชนีความแบน (FLAKINESS) และดัชนีความยาวของหิน (ELONGATION)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาดัชนีความแบน (Flakiness Index) และดัชนีความยาวของหิน (Elongation Index) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาลักษณะรูปร่างของหินดังกล่าวว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุผสมทำคอนกรีตหรือไม่ ทั้งนี้เพราะรูปร่างของหินมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดโดยตรง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวม

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนและยาวจะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเทได้ (Workability) เดียวกัน ซึ่งตามมาตรฐานอังกฤษ BS 812 Part 1 1975 ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและลักษณะมวลรวมไว้ดังนี้

1.1. กลม (Rounded) ลักษณะผิวของมวลรวมเกลี้ยงไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากการเสียดสีกันเอง เช่น กรวดทรายจากแม่น้ำ หรือชายทะเล มวลรวมที่มีลักษณะก้อนกลมจะช่วยให้ทำงานง่ายและประหยัด เพราะต้องการปูนซีเมนต์และน้ำในส่วนผสมน้อยกว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่า

1.2. บิดเบี้ยว (Irregular) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติ หรือถูกเสียดสีมาบ้างและมีเหลี่ยมมน เช่น กรวดทรายที่ได้จากบ่อหินเหล็กไฟ ที่ได้จากพื้นดินหรือขุดขึ้นมา

1.3. เหลี่ยม (Angular) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่เรียบมาบรรจบกันและเห็นได้ชัด เช่น หินย่อยจากเครื่องโม่ทุกแบบ หินที่ตกตามไหล่เขา

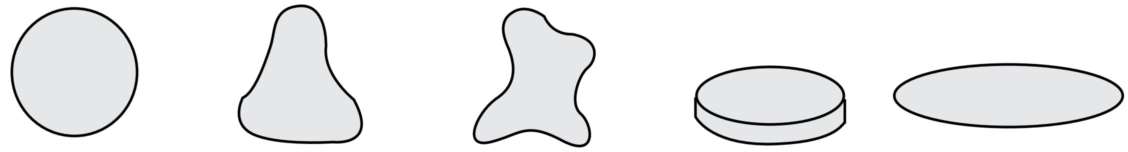
1.4. แบน (Flat or Flaky) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความหนาน้อยมากเมื่อ เทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยมด้วย เช่น หินที่มีลักษณะเป็นชั้น การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นแบน (Flat or Flaky) ก็ต่อเมื่อมีความหนาน้อยกว่า 0.6 เท่าของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคในแต่ละขนาดตระแกรง

1.5. ยาวเรียว (Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมาก เมื่อเทียบกับความกว้างและความหนา การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นยาวเรียว (Elongated) ก็ต่อเมื่อมีความยาวมากกว่า 1.8 เท่าของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐานซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคในแต่ละขนาดตระแกรง

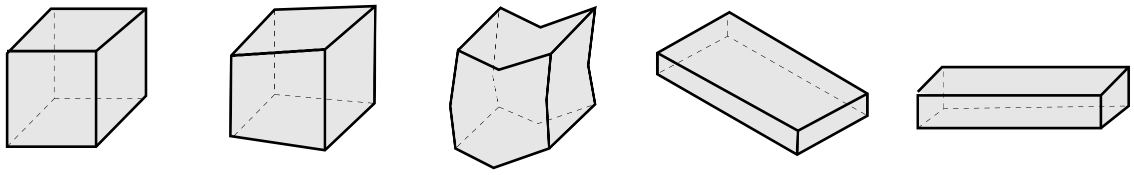
1.6. แบนและยาวเรียว (Flaky and Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมากกว่าความกว้างมาก และมีความกว้างมากกว่าความหนามาก

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

กลม (Rounded)



เป็นเหลี่ยมมุม (Angular)

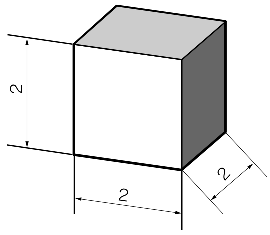


รูปที่ 1 *การแบ่งประเภทของมวลรวมตามรูปร่างของอนุภาค*

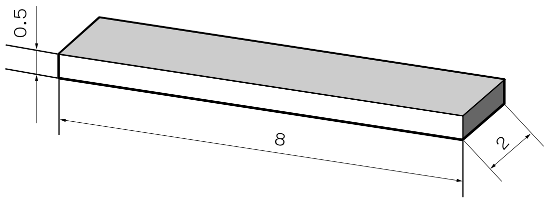
2. อิทธิพลของรูปร่างมวลรวมต่อคอนกรีต

2.1. กำลังอัดและความสามารถเทได้ (Strength and Workability) รูปร่างของมวลรวม (Shape) มีความสำคัญต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมวลรวมที่มีรูปร่างแบน (Flat or Flaky) หรือ ยาวเรียว (Elongated) จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมมากกว่ามวลรวมปกติ เมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ตามที่แสดงในตัวอย่างที่ 1 ดังนั้นมวลรวมที่มีรูปร่างแบนหรือยาวเรียวจึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น เพื่อให้ได้ความสามารถเทได้ (Workability) เท่าๆ กัน หรือถ้าใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่าเดิม กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง เพราะต้องเพิ่มปริมาณน้ำหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั่นเอง

ตัวอย่างที่ 1 สมมุติว่าหินมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 2 x 2 x 2 ซม. จะมีปริมาตร 8 ลบ.ซม. และมีพื้นที่ผิว 2 x 2 x 6 = 24 ตร.ซม. แต่ถ้าหินนี้มีรูปร่างแบนยาว (Flaky and Elongated) ขนาด 0.5 x 2 x 8 ซม. จะมีปริมาตร 8 ลบ.ซม. และมีพื้นที่ผิว = 2 x (0.5x2) + 2 x (0.5x8) + 2 x (2x8) = 42 ตร.ซม.



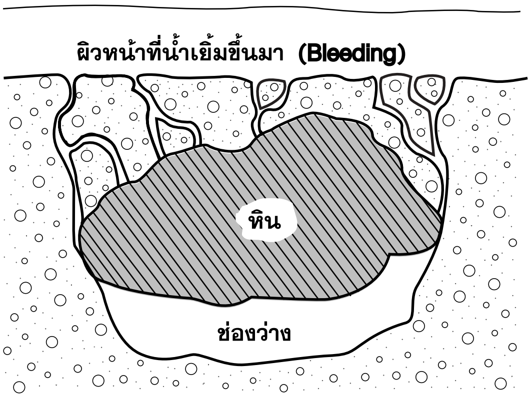
พื้นที่ผิว = 24 ตร.ซม.
ปริมาตร = 8 ลบ.ซม.



พื้นที่ผิว = 42 ตร.ซม.
ปริมาตร = 8 ลบ.ซม.

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

2.2. **ความทนทาน (Durability)** จากการที่มวลรวมมีรูปร่างแบนหรือยาวเรียว ถ้าใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่าเดิม นอกจากกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง เพราะต้องเพิ่มปริมาณน้ำหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แล้ว ยังมีผลให้ความทนทานของคอนกรีตลดลงอีกด้วย ทั้งนี้เพราะน้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หิน และบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีตหรือที่เรียกว่าการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แอ่งน้ำดังกล่าวจะเป็นช่องว่างที่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีต (Inter Connection Void) ทำให้คอนกรีตมีความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability) เพิ่มขึ้นและความทนทาน (Durability) ลดลง



รูปที่ 2 *ลักษณะแอ่งน้ำใต้มวลรวมที่เป็นสาเหตุให้ความทนทานของคอนกรีตลดลง*

สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปในประเทศไทยมวลรวมที่จะนำมาใช้ควรมีดัชนีความแบน (Flakiness Index) ไม่เกิน 40% และดัชนีความยาว (Elongation Index) ไม่เกิน 35% ส่วนคอนกรีตที่ใช้ในงานปั๊มและคอนกรีตกำลังอัดสูง ควรมีค่าดังกล่าวไม่เกิน 25%

การทดสอบหาดัชนีความแบนของหิน

มาตรฐานที่ใช้

BS 812 : Section 105.1 : 1989

Flakiness Index of Coarse Aggregate

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1% ของน้ำหนักมวลรวมที่ใช้ทดสอบ

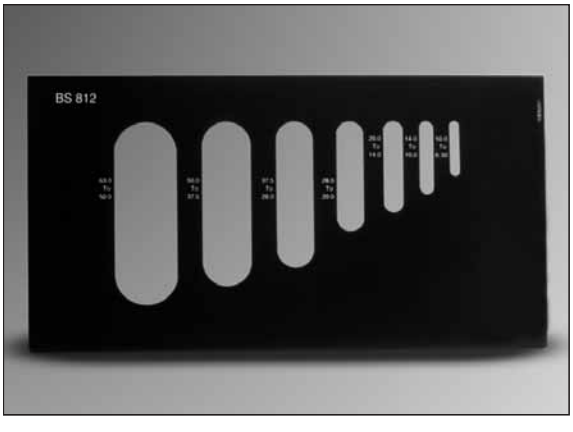
2. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

3. เครื่องแยกขนาดคละที่มีขนาดและตะแกรงเหมาะสมกับวัตถุดิบที่จะนำมาทดสอบ โดยใช้ชุดของตะแกรง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ทดสอบ

ตะแกรงชนิด Squarte Hole Perforated Plate 450 mm or 300 mm (มม.)
63.0
50.0
37.5
28.0
20.0
14.0
10.0
6.3

4. เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal Thickness Gauge) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 *เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal Thickness Gauge)*

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

วิธีทดสอบ

1. นำมวลรวมมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 63.0 มม. 50.0 มม. 37.5 มม. 28.0 มม. 20.0 มม. 14.0 มม. 10.0 มม. และ 6.3 มม. จากนั้นแยกส่วนที่ค้างบนตะแกรงขนาด 63.0 มม. และส่วนที่ผ่านตะแกรง 6.3 มม. ออกไป

2. ล้างหินให้สะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ชั่งน้ำหนักมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานแต่ละขนาดให้ได้ตามตารางที่ 2 แล้วบันทึกค่า

4. คำนวณหาค่าน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง 63.0 มม. และค้างตะแกรง 6.3 มม. บันทึกค่า M_1

5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่ค้างของตัวอย่างแต่ละขนาดเทียบกับน้ำหนักรวม

6. ตัดขนาดคละที่มีน้ำหนักน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ของน้ำหนักรวมทิ้งไป แล้วรวมน้ำหนักที่เหลือใหม่บันทึกเป็นค่า M_2

7. วัดความแบนของตัวอย่างทดสอบแต่ละขนาดให้ตรงกับขนาดของ Metal Thickness Guage ดังตารางที่ 2 โดยการใช้มือแยกมวลรวมที่ไม่สามารถผ่านช่องของ Metal Thickness Guage ได้ออกแล้วชั่งน้ำหนักมวลรวมแต่ละขนาดที่ **ผ่าน** Guage ต่อ จากนั้นคำนวณหาน้ำหนักรวม บันทึกเป็นค่า M_3

8. คำนวณหาค่าดัชนีความแบน

$$\text{Flakiness Index (FI)} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

ตารางที่ 2 น้ำหนักตัวอย่างทดสอบตามขนาดตะแกรงและความกว้างของช่อง Metal Thickness Gauge

ตะแกรงมาตรฐานแต่ละขนาด		น้ำหนักตัวอย่างน้อยสุดของตะแกรงแต่ละขนาด (กก.)	ความกว้างช่องว่างของ Metal Thickness Gauge* (มม.)
ผ่านทั้งหมด (มม.)	ค้างทั้งหมด (มม.)		
63.0	50.0	50.0	33.9 ± 0.30
50.0	37.5	35.0	26.3 ± 0.30
37.5	28.0	15.0	19.7 ± 0.30
28.0	20.0	5.0	14.4 ± 0.15
20.0	14.0	2.0	10.2 ± 0.15
14.0	10.0	1.0	7.2 ± 0.10
10.0	6.3	0.5	4.9 ± 0.10

หมายเหตุ ** ขนาดเท่ากับ 0.6 เท่าของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงที่ผ่านและที่ค้าง*

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

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทดสอบ	น้ำหนักที่ค้าง (กรัม)	น้ำหนักที่ผ่าน (กรัม)
28.00	-	-	-	-
20.00	330.3	12.37	213.3	117.0
14.00	1,205.5	45.14	884.4	321.1
10.00	816.0	30.55	615.5	200.5
6.30	318.9	11.94	242.7	76.2
น้ำหนักรวม	2,670.7	100.00	1,955.9	714.8

$$\text{Flakiness Index (FI)} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

$$= \frac{714.8}{2{,}670.7} \times 100$$

$$= 26.76\ \%$$

การทดสอบหาดัชนีความยาวของหิน

มาตรฐานที่ใช้

BS 812 : Section 105.2 : 1990

Elongation Index of Coarse Aggregate

อุปกรณ์

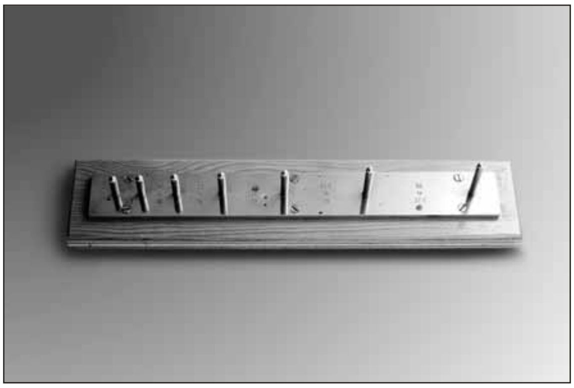
1. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1% ของน้ำหนักมวลรวมที่ใช้ทดสอบ
2. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
3. เครื่องแยกขนาดคละที่มีขนาดและตะแกรงเหมาะสมกับวัตถุดิบที่จะนำมาทดสอบ โดยใช้ชุดของตะแกรง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ทดสอบ

ตะแกรงชนิด Squarte Hole Perforated Plate 450 mm or 300 mm (มม.)
50.0
37.5
28.0
20.0
14.0
10.0
6.3

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

4. เครื่องมือทดสอบความยาว (Metal Length Gauge) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบความยาว (Metal Length Gauge)

วิธีทดสอบ

1. นำมวลรวมมาทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50.0 มม. 37.5 มม. 28.0 มม. 20.0 มม. 14.0 มม. 10.0 มม. และ 6.3 มม. จากนั้นแยกมวลรวมส่วนที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 มม. และส่วนที่ผ่านตะแกรง 6.3 มม. ออกไป

2. ล้างหินให้สะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ชั่งน้ำหนักมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานแต่ละขนาดให้ได้ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 น้ำหนักตัวอย่างทดสอบตามขนาดตะแกรงและช่องว่างระหว่าง Metal Length Gauge

ตะแกรงมาตรฐานแต่ละขนาด		น้ำหนักตัวอย่างน้อยสุดของตะแกรงแต่ละขนาด (กก.)	ช่องว่างระหว่าง Metal Length Gauge* (มม.)
ผ่านทั้งหมด (มม.)	ค้างทั้งหมด (มม.)		
50.0	37.5	35.0	78.7 ± 0.3
37.5	28.0	15.0	59.0 ± 0.3
28.0	20.0	5.0	43.2 ± 0.3
20.0	14.0	2.0	30.6 ± 0.3
14.0	10.0	1.0	21.6 ± 0.2
10.0	6.3	0.5	14.7 ± 0.2

หมายเหตุ ** ขนาดเท่ากับ 1.8 เท่าของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงที่ผ่านและที่ค้าง*

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

4. คำนวณหาค่าน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง 50.0 มม. และค้างบนตะแกรง 6.3 มม. บันทึกเป็นค่า M_1

5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่ค้างของตัวอย่างแต่ละขนาดเทียบกับน้ำหนักรวม

6. ตัดขนาดคละที่มีน้ำหนักน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ของน้ำหนักรวมทิ้งไป รวมน้ำหนักที่เหลือใหม่บันทึกเป็นค่า M_2

7. วัดความยาวของตัวอย่างทดสอบแต่ละขนาดให้ตรงกับขนาด Metal Length Gauge ดังตารางที่ 4 โดยการใช้มือแยกมวลรวมที่ไม่สามารถผ่านช่องว่างของ Metal Length Gauge ออก แล้วชั่งน้ำหนักมวลรวมแต่ละขนาดที่**ไม่ผ่าน** Guage ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าน้ำหนักรวมบันทึกเป็นค่า M_3

8. คำนวณหาค่าดัชนีความยาว

$$\text{Elongation Index} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

ตัวอย่างที่3 การคำนวณหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)

ขนาดตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทดสอบ	น้ำหนักที่ผ่าน (กรัม)	น้ำหนักที่ค้าง (กรัม)
28.0	-	-	-	-
20.0	330.3	12.37	319.4	10.8
14.0	1,205.5	45.14	980.0	225.0
10.0	816.0	30.55	477.6	338.4
6.3	318.9	11.94	99.7	219.1
น้ำหนักรวม	2,670.7	100.00	1,876.7	793.3

$$\text{Elongation Index} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

$$= \frac{793.3}{2,670.7} \times 100$$

$$= 29.70\ \%$$

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

บทที่ 8

การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย (Organic Impurities in Fine Aggregate)

บทนำ

การทดสอบนี้เพื่อทดสอบเบื้องต้นว่าทรายที่จะนำมาเป็นวัสดุผสมทำคอนกรีตนั้นมีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินกำหนดหรือไม่ ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์มีผลต่อการก่อตัวและกำลังอัดของคอนกรีต

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สารอินทรีย์ในทรายมักเกิดจากซากพืชและซากสัตว์ที่ผุเน่าแล้ว ถ้าในทรายมีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไปอาจมีผลกระทบต่อการก่อตัวของปูนซีเมนต์ นอกจากนั้น ยังมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์จะมีผบกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ดังนั้นก่อนนำทรายไปผสมคอนกรีตจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบปริมาณสารอินทรีย์เบื้องต้นเสียก่อน การทดสอบปริมาณสารอินทรีย์เบื้องต้นด้วยวิธีการทดสอบความเข้มของสี (Colormetric Test) ทำได้โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเปรียบเทียบสีของน้ำในขวดที่มีทรายกับสีของสารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐาน โดยถ้าสีของน้ำในขวดที่มีทรายเข้มกว่าสารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐานเบอร์ 3 ให้ถือในเบื้องต้นว่าทรายที่นำมาทดสอบนั้นมีสารอินทรีย์เจือปนมาก ไม่เหมาะสมที่จะนำมาผสมทำคอนกรีต ถ้ามีความจำเป็นต้องนำมาใช้จริงๆ ต้องนำทรายนั้นมาล้างจนแน่ใจว่า ปริมาณสารอินทรีย์ที่เจือปนนั้นไม่มากเกินกว่าที่กำหนด หรือต้องทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการนำทรายดังกล่าวมาทำก้อนมอร์ต้าเพื่อทดสอบกำลังอัด ทั้งนี้เพราะไม่ใช่สารอินทรีย์ทุกชนิดที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต สีที่เข้มผิดปรกตินั้นอาจเนื่องมาจากทรายดังกล่าวมีแร่เหล็กมาก

การทดสอบปริมาณสารอินทรีย์ที่เจือปนในทรายนั้นต้องทำทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแหล่งหินทรายใหม่ ซึ่งจะกระทำบ่อยเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของคุณสมบัติของทราย และเมื่อเวลาใดก็ตามที่คอนกรีตเกิดการแข็งตัวช้าผิดปกติ

การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 40

Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregate for Concrete

อุปกรณ์

1. ขวดแก้วที่มีปริมาตร 350 มล. หรือ 470 มล.
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก
3. สารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐาน

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 3 ส่วนต่อน้ำ 97 ส่วน โดยน้ำหนักจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3%
2. นำทรายมาชั่งน้ำหนักประมาณ 450 กรัม จากนั้นใส่ทรายลงในขวดให้ได้ปริมาตรประมาณ 130 มล.
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3% ให้ได้ปริมาตรรวมกับทรายถึงระดับ 200 มล. แล้วเขย่าไล่ฟองอากาศ จากนั้นปรับปริมาณสารละลายอีกครั้ง จนกระทั่งปริมาตรของทรายและสารละลายอยู่ที่ 200 มล. หลังการเขย่า
4. ปิดฝาขวดแก้วเขย่าแรงๆ จนทรายและสารละลายเข้ากัน แล้วตั้งขวดแก้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม.

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

5. เตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อเทียบสีโดยละลายผงโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ในอัตรา 0.25 กรัมต่อกรด 100 มล. ซึ่งจะต้องเตรียมก่อนการใช้เทียบสีไม่เกิน 2 ชม. หรือใช้แผ่นกระจกสีมาตรฐานเบอร์ 3 ที่ได้รับการสอบเทียบเรียบร้อย

6. นำของเหลวในขวดที่มีทรายมาเปรียบเทียบสีกับสารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐานเบอร์ 3

7. ถ้าสีของของเหลวเข้มกว่าสารละลายมาตรฐานหรือสีมาตรฐาน เบอร์ 3 ในแผ่นกระจกสีให้ถือว่าทรายที่นำมาทดสอบมีสารอินทรีย์เจือปนมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาผสมคอนกรีต ถ้าจำเป็นต้องนำมาผสมคอนกรีตจะต้องทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าก่อนที่จะนำทรายดังกล่าวไปใช้ในงานคอนกรีต

รูปที่ 1 *การเปรียบเทียบสีของเหลวกับแผ่นกระจกสีมาตรฐาน*

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

บทที่ 9
การทดสอบความคงทนของมวลรวม (Soundness)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านทานการสลายตัวของมวลรวมในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งความเสียหายที่เกิดจากเกล็ดเกลือของสารละลายในช่องว่างมวลรวม จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับความเสียหายของมวลรวมที่จุดเยือกแข็ง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของมวลรวมที่เหมาะสมที่จะนำมาทำคอนกรีตนั้นนอกจากมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานการขัดสีแล้วนั้น ความคงทน (Soundness) ยังเป็นอีกคุณสมบัติที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะคอนกรีตอาจต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น สภาพเปียกและแห้งสลับกัน (Wetting and Drying) หรือต้องอยู่ในสภาวะที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง (Freezing and Thawing) สภาพแวดล้อมดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลรวมอย่างมาก ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายในคอนกรีตได้ ตั้งแต่แตกร่อนเป็นแผ่น (local scaling, pop-outs) จนถึงก่อให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง

โดยทั่วไปแล้วดูเหมือนว่าความพรุนของมวลรวม (Porosity) จะแปรผกผันกับความคงทน (Soundness) นั่นคือ มวลรวมที่มีความพรุนมากจะมีความคงทนน้อย แต่จริงๆ กลับพบว่ามวลรวมที่มีความพรุนบางชนิด เช่น หินพูมิส (Pumice) ซึ่งมีความพรุนสูงกลับมีความคงทนเช่นกัน ดังนั้นความไม่คงทนของมวลรวมนั้น (Unsoundness) จึงเกี่ยวข้องกับรูปร่าง การเชื่อมต่อ และขนาดของช่องว่างภายในมวลรวม (Pore Size) มากกว่าความพรุนของมวลรวมเพียงปัจจัยเดียว โดยขนาดของช่องว่างภายในมวลรวม (Pore Size) ที่เล็กกว่า 4-5 ไมโครเมตรนั้น ถือเป็นขนาดช่องว่างวิกฤติที่จะปล่อยให้น้ำซึมเข้าไปในมวลรวมได้ แต่ไม่สามารถซึมออกเมื่อน้ำในมวลรวมช่องว่างนั้นแข็งตัวจากอุณหภูมิที่ต่ำลงและขยายตัวจะก่อให้เกิดแรงดันภายใน ทำให้มวลรวมเสียหาย

การทดสอบความคงทนของมวลรวมทำได้โดยการแช่มวลรวมให้อยู่ในสภาพแห้งและเปียกสลับกันในสารละลายโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต 5 รอบ จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของมวลรวม ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน 12% ถ้าใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือไม่เกิน 18% ถ้าใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผสมทำคอนกรีต

การทดสอบความคงทนของมวลรวม

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 88

Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate

อุปกรณ์

1. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
2. ตะกร้าสำหรับใส่หินและทราย
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. เครื่องชั่งน้ำหนักที่อ่านค่าได้ละเอียดได้ถึง 0.1 กรัม หรือ 0.1% ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ทดสอบ
5. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
6. ไฮโดรมิเตอร์สำหรับวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลาย
7. สารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต
8. สารละลายแบเรียมคลอไรด์

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

รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบความคงทน

การเตรียมตัวอย่าง

1. นำทรายมาร่อนแยกส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8″ จนถึงค้างตะแกรงเบอร์ 50 โดยเผื่อน้ำหนักทรายที่ค้างในแต่ละตะแกรงให้ได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดปริมาณมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

ผ่านตะแกรง	ค้างตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
# 30 (600 μm)	# 50 (300 μm)	100 ± 0.1
# 16 (1.18 mm)	# 30 (600 μm)	100 ± 0.1
# 8 (2.36 mm)	# 16 (1.18 mm)	100 ± 0.1
# 4 (4.75 mm)	# 8 (2.36 mm)	100 ± 0.1
$\frac{3}{8}''$ (95 mm)	# 4 (4.75 mm)	100 ± 0.1

2. นำทรายที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาล้างน้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักของทรายแต่ละขนาดให้ได้ 100 ± 0.1 กรัม

3. นำหินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ขึ้นไปล้างน้ำให้สะอาด อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส แยกขนาดและชั่งน้ำหนักให้ได้ตามที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 2 ในกรณีที่มีหินขนาดใหญ่กว่า 3/4″ ให้นับจำนวนก้อนไว้ด้วย

ตารางที่ 2 รายละเอียดปริมาณมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดของหิน (นิ้ว)	ผ่านตะแกรง (นิ้ว)	ค้างตะแกรง (นิ้ว)	น้ำหนัก (กรัม)
$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	#4	300 ± 5
$\frac{3}{4} - \frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	330 ± 5
	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	670 ± 10
$1\frac{1}{2} - \frac{3}{4}$	1	$\frac{3}{4}$	500 ± 30
	$1\frac{1}{2}$	1	1,000 ± 50
$2\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	2,000 ± 200
	$2\frac{1}{2}$	2	3,000 ± 300

วิธีทดสอบ

1. แช่ตัวอย่างที่เตรียมไว้ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) หรือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) โดยให้สารละลายท่วมตัวอย่างอย่างน้อย 1/2″ ทิ้งไว้ไม่ต่ำกว่า 16 ชม. แต่ไม่เกิน 18 ชม. ปิดภาชนะให้มิดชิด ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายไว้ที่ 21 ± 1 องศาเซลเซียส

รูปที่ 2 ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต

2. นำตัวอย่างขึ้นจากสารละลาย เมื่อแช่ครบตามเวลา แล้วปล่อยให้สารละลายไหลออกจากตัวอย่างประมาณ 15 ± 5 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายเดิมอีก

3. ทำซ้ำกระบวนการแช่สารละลาย และนำมาอบแห้งสลับกันเช่นนี้ทั้งหมด 5 ครั้ง

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

4. หลังจากครบ 5 ครั้ง ล้างตัวอย่างให้สะอาดด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 43 ± 6 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทดสอบความสะอาดได้ โดยหยดสารละลายแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) ลงในน้ำล้างตัวอย่าง ถ้าน้ำยังขุ่นอยู่แสดงว่ายังล้างหินไม่สะอาด ถ้าล้างหินสะอาดแล้วนำหินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3 *การเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ลงในน้ำล้างตัวอย่าง*

5. หลังจากอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วนำตัวอย่างไปร่อนผ่านตะแกรงดังนี้

- ทราย นำไปร่อนผ่านตะแกรงชุดเดิมดังตารางที่1
- หิน นำไปร่อนผ่านตะแกรงด้วยมือดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดตะแกรงที่ใช้ร่อนมวลรวมหยาบหลังจากแช่สารละลาย

ขนาดหิน (นิ้ว)	ตะแกรงขนาด (นิ้ว)
$2\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{4}$
$1\frac{1}{2} - \frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$
$\frac{3}{4} - \frac{3}{8}$	$\frac{5}{16}$
$\frac{3}{8}$ – #4	#5

ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด ผลต่างของน้ำหนักก่อนทดสอบกับน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง คือน้ำหนักที่หายไป

การรายงานผล

ข้อมูลการรายงานผลประกอบด้วย

1. น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละส่วนก่อนทดสอบ
2. เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละชุดที่ผ่านตะแกรงที่กำหนด
3. หาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ที่สูญเสียของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยเปรียบเทียบตามสัดส่วนขนาดคละของตัวอย่างก่อนทดสอบ

ข้อยกเว้น

1. สำหรับทรายที่มีขนาดใหญ่กว่า 3/8" ไม่เกิน 10% ให้ถือว่าส่วนที่ละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 50 มีการสูญเสีย 0% และส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่า 3/8" มีการสูญเสียเท่ากับขนาดถัดไปที่เล็กกว่า

2. หินที่มีส่วนที่ละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่า 10% ให้สมมุติว่า ส่วนที่ละเอียดกว่าเบอร์ 4 มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย เท่ากับขนาดถัดไปที่ใหญ่กว่า

ตัวอย่างที่ 1 ผลการทดสอบความคงทนต่อสารเคมีของมวลรวมหยาบ

ขนาดตะแกรง (นิ้ว)	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรง	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	
		ก่อนแช่	หลังแช่
$1\frac{1}{2}$	–	–	–
1	–	–	–
$\frac{3}{4}$	5.4	500.2	498.0
$\frac{1}{2}$	43.2	670.6	667.4
$\frac{3}{8}$	28.5	330.5	324.2
#4	20.2	300.1	295.6
ละเอียดกว่า #4	2.7	–	–
รวม	100	1,801.4	1,785.2

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{1,801.4-1,785.2 \times 100}{1,801.4} = 0.90\ \%$$

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

ตัวอย่างที่ 2 ผลการทดสอบความคงทนต่อสารเคมีของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรง	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	
		ก่อนแช่	หลังแช่
$\frac{3}{8}''$	0.5	-	-
# 4	1.9	-	-
# 8	8.3	100.00	98.53
# 16	16.8	100.04	98.48
# 30	27.6	100.07	98.89
# 50	28.1	100.03	99.53
ละเอียดกว่า #4	16.7	-	-
รวม	100	400.14	395.43

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{400.14 - 395.43 \times 100}{400.14}$$

$$= 1.18\ \%$$

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

บทที่ 10
การทดสอบหาปริมาณวัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร (Materials Finer Than 75 μm in Aggregate by Washing)

บทนำ

การทดสอบนี้เพื่อทดสอบว่ามวลรวมที่จะนำมาผสมทำคอนกรีตนั้น มีปริมาณวัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรมากเกินกำหนด ที่จะนำมาผสมในการทำคอนกรีตหรือไม่

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 คือ วัสดุจำพวก ฝุ่น (Dust) ดินเหนียว (Clay) และตะกอน (Silt) จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต คือ วัสดุดังกล่าวจะเคลือบผิวมวลรวมทำให้ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสท์กับมวลรวม ประกอบกับคอนกรีตที่มีมวลรวมดังกล่าวผสมอยู่จะต้องการปริมาณน้ำมากขึ้น ทำให้คอนกรีตที่ได้จะมีการหดตัว (Shrinkage) สูงและจะเกิดรอยแตกร้าวเมื่อคอนกรีตแข็งตัว และทำให้กำลังอัด (Strength) และความคงทน (Durability) ของคอนกรีตลดลง

การทดสอบหาปริมาณวัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรทำได้ 2 วิธี

1. วิธีการล้าง (Washing) ทำได้โดยการนำมวลรวมมาอบจนน้ำหนักคงที่ แล้วบันทึกค่าน้ำหนักไว้ ต่อจากนั้นนำตัวอย่างล้างน้ำผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปอบจนน้ำหนักคงที่อีกครั้ง น้ำหนักที่หายไปถือเป็นปริมาณวัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

2. วิธีการตกตะกอน (Sedimentation) เป็นวิธีที่สะดวกสามารถทำในสนามได้ง่าย เพื่อประมาณค่าปริมาณฝุ่นในมวลรวม ซึ่งทำได้โดยใส่ทรายแห้งลงไปในขวดแก้วที่มีขนาดความจุประมาณ 1 ลิตร ประมาณครึ่งขวด แล้วเติมน้ำลงไปจนได้ระดับน้ำประมาณ 2 เท่าของระดับทราย เขย่าขวดแรงๆ ประมาณ 1 นาที แล้วปล่อยให้ทรายตกตะกอน ดิน ฝุ่นผง หรือโคลนซึ่งมีน้ำหนักเบาและละเอียดกว่าจะลอยตกลงมาทีหลัง ต่อจากนั้นวัดความหนาของตะกอนที่ทับถมอยู่เหนือทราย แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของวัสดุขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จาก

$$\frac{\text{ความหนาของตะกอน ดิน ฝุ่นผงหรือโคลน}}{\text{ความสูงทั้งหมด}} \times 100$$

ปริมาณวัสดุจำพวก ฝุ่น (Dust) ดินเหนียว (Clay) และตะกอน (Silt) ที่ปนอยู่ในมวลรวมละเอียด ไม่ควรมีปริมาณเกิน 5% สำหรับผสมในการทำคอนกรีตในงานทั่วไป และไม่ควรเกิน 3% สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการขัดสีส่วนปริมาณที่ผสมในมวลรวมหยาบนั้นต้องไม่เกิน 4% สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และ 2% สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการขัดสีตามลำดับ ถ้าเกินกว่านี้ต้องทำการแยกออกเสียก่อนที่จะนำมาใช้งาน

การทดสอบหาปริมาณฝุ่นด้วยวิธีการล้าง

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 117

Standard Test Method for Material Finer Than 75 μm (No. 200) Seive in Mineral Aggregates by Washing

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

อุปกรณ์

1. ตู้อบที่สามารถรักษาอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

2. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม หรือ 0.1% ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ทดสอบโดยใช้ค่าที่ละเอียดกว่าเป็นเกณฑ์

3. ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 16 และเบอร์ 200

4. ภาชนะบรรจุมีขนาดใหญ่พอสำหรับใส่ตัวอย่างและใส่น้ำให้ท่วม เมื่อคนมวลรวมแล้วทั้งตัวอย่างและน้ำต้องไม่มีการสูญหาย

วิธีทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยเผื่อให้มีน้ำหนักหลังอบแห้งตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบตามขนาดใหญ่ที่สุด

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (มม.)	จำนวนน้อยสุดที่ใช้ (กรัม)
4.75 (#4) หรือเล็กกว่า	300
9.50 ($\frac{3}{8}''$)	1,000
19.0 ($\frac{3}{4}''$)	2,500
37.5 ($1\frac{1}{2}''$) หรือใหญ่กว่า	5,000

2. อบตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักให้ละเอียดถึง 0.1% ของน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ บันทึกเป็นค่าน้ำหนักแห้งก่อนการล้าง

3. นำตัวอย่างทดสอบที่ชั่งแล้วใส่ในภาชนะที่จัดเตรียมไว้เติมน้ำให้ท่วม กวนตัวอย่างให้พอเพียงเพื่อที่จะทำให้วัตถุที่ละเอียดกว่าเบอร์ 200 แยกออกจากมวลรวมหลุดลอยอยู่ในน้ำได้หมด รีบรินน้ำล้างที่วัสดุละเอียดยังแขวนลอยหรือละลายอยู่ทันที โดยรินผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 ซึ่งมีตระแกรงเบอร์ 16 ซ้อนด้านบน

***รูปที่ 1** การล้างตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 200*

4. เติมน้ำลงในตัวอย่างให้ท่วมเป็นครั้งที่สอง กวนตัวอย่างแล้วรินเหมือนครั้งก่อน ทำซ้ำตามวิธีเดิมจนกว่าน้ำที่ล้างจะสะอาด โดยยังไม่ต้องนำสารแขวนลอยที่ค้างในตะแกรงกลับมาใส่คืนในภาชนะอีก การรินต้องระวังมิให้อนุภาคใหญ่ๆ ที่ตกตะกอน (ไม่แขวนลอย) หลุดออกมา

5. เทวัตถุทั้งหมดที่ค้างบนตะแกรงร่อน โดยใช้น้ำฉีดพ่นล้างตัวอย่างกลับไปยังภาชนะเดิม แล้วนำมวลรวมที่ล้างไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ บันทึกเวลาที่ใช้ในการอบ จากนั้นชั่งน้ำหนักให้ละเอียดถึง0.1%ของน้ำหนักตัวอย่างก่อนล้าง บันทึกค่าน้ำหนักมวลรวมหลังล้าง

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

การคำนวณ

น้ำหนักฝุ่น = น้ำหนักวัสดุแห้งก่อนล้าง - น้ำหนักวัสดุแห้งหลังล้าง

$$\text{เปอร์เซ็นต์ฝุ่น} = \frac{\text{น้ำหนักฝุ่น}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนล้าง}} \times 100$$

ค่าตัวอย่าง

น้ำหนักก่อนล้าง = 4,737.0 กรัม

น้ำหนักหลังล้าง = 4,691.7 กรัม

น้ำหนักฝุ่น = 4,737.0 - 4,691.7

= 45.3 กรัม

$$\text{เปอร์เซ็นต์ฝุ่น} = \frac{45.3}{4{,}737.0} \times 100$$

= 0.96 %

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

บทที่ 11
การทดสอบความสามารถเทได้ (Workability)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีตด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การทดสอบการยุบตัว (Slump Test) การทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น (Compacting Factor Test) การทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่ (Kelly Ball Test) และการทดสอบการไหลตัว (Flow Table) ทั้งนี้เพราะความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีตสด มีผลอย่างมากต่อการขนส่ง (Transportation) การเทลงแบบ (Placing) การทำให้คอนกรีตอัดแน่น (Compacting) และการแต่งผิวหน้าของคอนกรีต (Finishing) โดยเฉพาะความสามารถในการอัดแน่นของคอนกรีตสด จะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว เช่น กำลังอัด ความคงตัว ความทนทาน และความต้านทานในการซึมผ่านของน้ำ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถเทได้ (Workability)

ในทางทฤษฎี คือ ผลรวมของพลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค (Internal Friction) เพื่อให้เกิดการอัดแน่นอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัตินั้น พลังงานที่ใส่เข้าไปนั้นจะต้องเอาชนะทั้งแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction) ระหว่างอนุภาค และแรงเสียดทานที่ผิว (Surface Friction) ระหว่างเนื้อคอนกรีตกับไม้แบบและเหล็กเสริม นอกจากนี้พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการเขย่าไม้แบบ และเขย่าคอนกรีตให้แน่นอีกด้วย

ความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีตประกอบด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ

• **ความข้นเหลว (Consistency)** คือ สภาพความเหลวของคอนกรีต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลของคอนกรีต

• **การยึดเกาะ (Cohesiveness)** คือ คุณสมบัติของเนื้อคอนกรีตที่สามารถจับรวมตัวเป็นกลุ่มหรือสลายตัวออกจากกันได้ยาก ซึ่งเกี่ยวข้องกับแนวโน้มของคอนกรีตที่จะเกิดการเยิ้ม (Bleeding) หรือการแยกตัว (Segregation)

อย่างไรก็ตามค่าความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีตที่เหมาะสมในการใช้งาน นอกจากคำนึงถึงความง่ายในการทำงานและการไม่แยกตัวของเนื้อคอนกรีตแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงชนิดของโครงสร้าง วิธีการเทและวิธีการจี้เขย่า เพื่อให้เนื้อคอนกรีตเกิดการอัดแน่น เช่นคอนกรีตที่เหมาะสมกับงานฐานรากขนาดใหญ่ที่มีค่ายุบตัวสูง อาจไม่เหลวเพียงพอที่จะเทในงานที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นมาก หรือโครงสร้างบางๆ

ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่กำหนดเป็นมาตรฐานในการวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติสามารถประมาณค่าความสามารถเทได้ หลายวิธีคือ

1. การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test)

ค่ายุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรงแต่เป็นการวัดความข้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Characteristic) แม้วิธีนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบคอนกรีตที่เหลว หรือแห้งมาก แต่ก็มีประโยชน์อย่างมากและสะดวกสำหรับการควบคุมความสม่ำเสมอของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เช่น ในกรณีที่ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่ามากกว่าปกติที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่าจะต้องมีความผิดปกติเกิดขึ้นในสัดส่วนผสม ขนาดคละ หรือความชื้นในมวลรวม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตคอนกรีตสามารถตรวจสอบและแก้ไขได้

การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัด ตำด้วยเหล็กตำแล้วจึงค่อยๆ ยกโคนขึ้นอย่างช้าๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง ความสูงที่ยุบตัวลงของคอนกรีตที่วัดได้ถือเป็น**ค่ายุบตัวของคอนกรีต**

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

ตารางที่ 1 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย

ประเภทของงาน	ค่ายุบตัวที่เหมาะสม(ซม.)
พื้นถนนสนามบิน	5.0 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานทั่วไป	7.5 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานฐานราก	10.0 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานปั๊ม	10.0 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะเล็ก	10.0 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะใหญ่	มากกว่า 15
คอนกรีตสำหรับงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรืองานที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15

2. การทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น (Compacting Factor Test)

การทดสอบสัดส่วนการอัดแน่นเป็นการวัดความสามารถเทได้ (พลังงานที่ใช้เพื่อให้เกิดการอัดแน่นอย่างสมบูรณ์) ด้วยวิธีกำหนดพลังงานมาตรฐานค่าหนึ่ง แล้ววัดระดับการอัดแน่น (Compacting Factor) ซึ่งสามารถหาได้โดยการหาอัตราส่วนความหนาแน่น (Density Ratio) ของคอนกรีตในภาชนะทรงกระบอกที่ได้จากอุปกรณ์ทดสอบ (Partially Compacted) ต่อความหนาแน่นของคอนกรีตในภาชนะทรงกระบอกที่ได้จากการอัดแน่นเต็มที่ (Fully Compacted)

วิธีการนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตที่แห้งหรือมีความสามารถเทได้ต่ำ เพราะการเปลี่ยนแปลงความสามารถเทได้สำหรับคอนกรีตที่แห้งเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าระดับการอัดแน่น (Compacting Factor) เปลี่ยนไปมาก แต่สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้สูง จะให้ค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตจนเต็มกรวยบนของอุปกรณ์ทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น ดังรูปที่ 6 จากนั้นเปิดฝากรวยบนให้คอนกรีตตกลงสู่กรวยล่างแล้วเปิดฝากรวยล่างให้คอนกรีตตกลงสู่ภาชนะทรงกระบอก ทำการชั่งน้ำหนักของคอนกรีตในภาชนะทรงกระบอกถือว่าเป็น Weight of Partially Compacted Concrete ต่อจากนั้นทำการหาค่าน้ำหนักคอนกรีตที่อัดแน่นเต็มที่ด้วยการกระทุ้งถือว่าเป็น Weight of Fully Compacted Concrete แล้วจึงคำนวณหาค่าอัตราส่วนการอัดแน่นต่อไป

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบระดับความสามารถเทได้กับอัตราส่วนการอัดแน่น

ระดับความสามารถเทได้	อัตราส่วนการอัดแน่น
ต่ำมาก	0.78
ต่ำ	0.85
ปานกลาง	0.92
สูง	0.95

3. การทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่ (Ball Penetration Test)

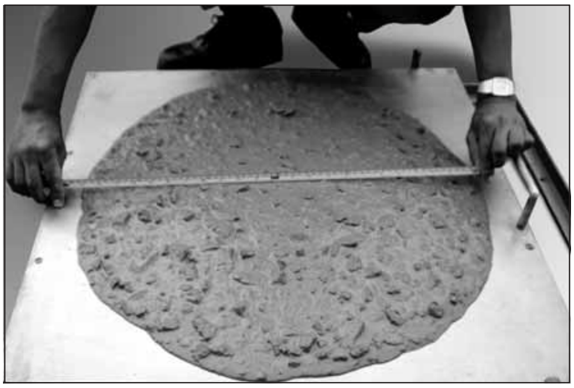
การทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่ มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบค่ายุบตัวในแง่ที่เป็นการทดสอบในสนามและใช้เพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของคอนกรีต แต่สามารถทำได้ง่ายกว่า เร็วกว่าและสามารถใช้ทดสอบคอนกรีตที่อยู่ในรถเข็นหรือเทลงในแบบหล่อได้อีกด้วย การทดสอบทำได้โดยการหย่อนลูกบอลเคลลี่ลงในคอนกรีต แล้ววัดค่าความความลึกของลูกบอลที่จมลงไป แต่ความหนาของคอนกรีตที่จะทดสอบด้วยวิธีนี้ต้องมากกว่า 20 ซม. และต้องห่างจากขอบภาชนะที่ทดสอบไม่น้อยกว่า 46 ซม.

4. การทดสอบการไหลตัว (Flow Test)

ในปัจจุบัน มีการใช้คอนกรีตที่มีความเหลวมาก (Flow Concrete) ในงานเสา คาน หรือฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นมาก คอนกรีตดังกล่าวมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ดังนั้นวิธีวัดค่าความสามารถเทได้ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตชนิดนี้ จึงใช้วิธีทดสอบการไหลตัว (Flow Test) ของคอนกรีตแทนการทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) ทั้งนี้เพราะค่าที่ได้จากการวัดค่ายุบตัวของคอนกรีตเหลวมากจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันในการวัดแต่ละครั้ง การทดสอบการไหลตัวทำคล้ายกับการทดสอบค่ายุบตัว แต่ต่างกันที่ขนาดของกรวย และคอนกรีตจะถูกทดสอบบนโต๊ะเขย่า คือหลังจากที่ยกกรวยขึ้นแล้วจะทำการยกโต๊ะเขย่าขึ้น 15 ครั้ง คอนกรีตจะแผ่กระจาย แล้วจึงวัดเส้นผ่านศูนย์กลางคอนกรีตสองแนวที่ตั้งฉากกัน ค่าการไหลตัวของคอนกรีต คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองที่วัดได้ ซึ่งมาตรฐาน

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

กำหนดว่าคอนกรีตเหลวมาก (Flow Concrete) ต้องมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง ทั้ง 2 แนว มากกว่า 55 ซม. นอกจากนั้นการทดสอบการไหลตัวยังสามารถบอกได้ว่า คอนกรีตนั้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ โดยดูจากคอนกรีตหลังการทดสอบ ถ้าคอนกรีตมีการแยกตัวแสดงว่าคอนกรีตนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ให้ทำการปรับส่วนผสมใหม่



รูปที่ 1 *ค่าการไหลตัวของคอนกรีตเหลวมาก*

การทดสอบค่ายุบตัว

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 143

Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete

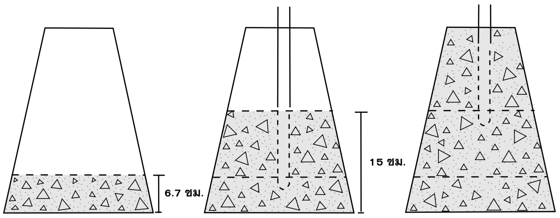
อุปกรณ์

1. โคน (Slump Mold) รูปกรวยทรงตัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 10 ซม. และด้านล่าง 20 ซม. สูง 30 ซม. มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบทั้ง 2 ข้าง
2. เหล็กตำ (Tamping Rod) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม. ปลายกลมมน
3. แผ่นเหล็กสำหรับรองมีลักษณะเรียบเป็นระนาบ
4. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก ตลับเมตร หรือไม้วัด

รูปที่ 2 *อุปกรณ์ทดสอบค่ายุบตัว*

วิธีทดสอบ

1. นำอุปกรณ์จุ่มน้ำให้เปียก
2. วางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบ นำโคนขึ้นวาง ใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้างไว้
3. ใช้ช้อนตักคอนกรีตใส่ลงในโคน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาตรเท่าๆ กัน ชั้นที่ 1 ใส่คอนกรีตในโคนสูงประมาณ 6-7 ซม. ตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง ในการตำต้องตำให้ทั่วพื้นที่ ใส่คอนกรีตชั้นที่ 2 จนได้ส่วนสูงประมาณ 15 ซม. ตำให้ทะลุถึงคอนกรีตชั้นที่ 1 เล็กน้อย ใส่คอนกรีตชั้นที่ 3 ให้พ้นขอบจนเต็ม แล้วตำให้ทะลุคอนกรีตชั้นที่ 2 เพียงเล็กน้อย ปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ รวมทั้งทำความสะอาดบริเวณโคนและแผ่นเหล็กรอง



รูปที่ 3 *ปริมาณคอนกรีตที่ใส่ในโคนและการตำ*

4. ดึงโคนขึ้นตรงๆ โดยไม่หมุนหรือเอียง
5. วางโคนลงข้างๆ คอนกรีตแล้ววัดค่ายุบตัวของคอนกรีต

ค่ายุบตัว คือ ค่าที่คอนกรีตยุบตัวจากเดิม โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีตที่ยุบตัวในการวัดให้วัดละเอียดถึง 0.5 ซม.

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

รูปที่ 4 การวัดค่ายุบตัว

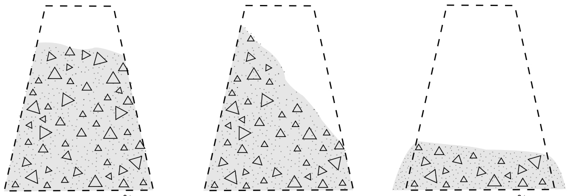
รูปแบบการยุบตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปมี 3 แบบคือ

1. การยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) เป็นการยุบตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของคอนกรีตเอง

2. การยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) เป็นการยุบตัวแบบเฉือนซึ่งเป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีตส่วนบน ในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง

3. การยุบตัวแบบล้ม (Collapse Slump) เป็นการยุบตัวที่เกิดจากคอนกรีตที่มีความเหลวมาก

ถ้าหากคอนกรีตมีการยุบตัวแบบเฉือน หรือแยกตัวเพราะเหลวมากเกินไป ให้ทำการทดสอบใหม่โดยใช้คอนกรีตที่ยังไม่ได้ใช้ในการทดสอบ ถ้าหากพังลง 2 ครั้งติดต่อกันแสดงว่า Slump Test อาจไม่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตนี้ มาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนในการยุบตัวมีค่า ± 2.5 ซม. เช่นถ้าต้องการค่ายุบตัว 7.5 ซม. ค่าที่ยอมรับได้คือ 7.5 ± 2.5 ซม. หรือ 5-10 ซม.



รูปที่ 5 รูปแบบการยุบตัว

การทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น

มาตรฐานที่ใช้

BS 1882 : PART 103 ; 1983

Method for Determination of Compacting Factor

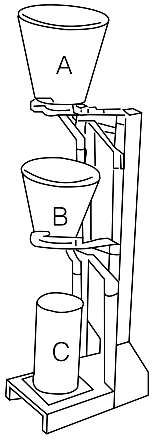
อุปกรณ์

1. เครื่อง Compacting Factor ซึ่งประกอบด้วยกรวยยอดตัดบน A กรวยยอดตัดล่าง B และภาชนะรูปทรงกระบอก C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

2. เหล็กตำ

3. เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ถึง 25 กก. โดยอ่านได้ละเอียด 10 กรัม

4. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก



รูปที่ 6 อุปกรณ์ทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น

วิธีทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักภาชนะทรงกระบอก C

2. ใช้ช้อนตัก ตักคอนกรีตใส่ในกรวยบน A จนเต็มปาดผิวหน้าจนเรียบ

3. เปิดฝาล่างของกรวยบน A ให้คอนกรีตตกลงมาในกรวยล่าง B ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า จะมีคอนกรีตส่วนหนึ่งล้นออกไป

4. เปิดฝาล่างของกรวยล่าง B ให้คอนกรีตตกลงในภาชนะรูปทรงกระบอก C

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

5. ปาดผิวหน้าคอนกรีตในภาชนะรูปทรงกระบอก C ให้เรียบและทำความสะอาดผิวด้านข้างภาชนะให้สะอาด

6. ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของคอนกรีตในภาชนะ C ถือว่าเป็น Weight of Partially Compacted Concrete, W_p โดยอ่านค่าให้ละเอียดถึง 10 กรัม

7. เทคอนกรีตในภาชนะ C ออก จากนั้นตักคอนกรีตใหม่ใส่เป็นชั้น 6 ชั้น ชั้นละประมาณ 5 ซม. เท่าๆ กัน กระทุ้งให้แน่นอย่างเต็มที่ ปาดผิวหน้าให้เรียบ

8. ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักคอนกรีตอัดแน่นในภาชนะ C โดยถือว่าเป็น Weight of Fully Compacted Concrete, W_f โดยอ่านค่าให้ละเอียดถึง 10 กรัม

9. คำนวณหาค่า Compacting Factor (C.F.)

$$C.F. = \frac{W_p}{W_f}$$

ข้อควรระวัง

1. ส่วนผสมคอนกรีตต้องมีขนาดใหญ่สุดของหิน ไม่เกิน 1 1/2" หรือ 38 มม.

2. ในกรณีที่คอนกรีตแห้งมากๆ คอนกรีตอาจจะอุดตันที่ด้านล่างของกรวย ให้ใช้เหล็กกระทุ้งแยงให้คอนกรีตไหลลงไปข้างล่าง

การทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่

มาตรฐานที่ใช้

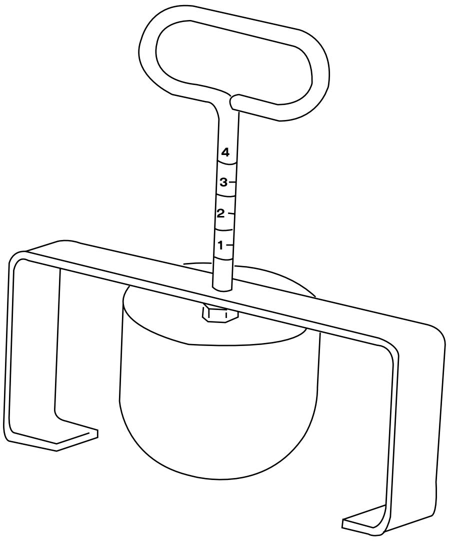
ASTM C 360

Standard Test Method for Ball Penetration in Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete

อุปกรณ์

1. ลูกบอลโลหะเคลลี่ (Kelly Ball) เป็นลูกกลมโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 ซม. หนัก 14 กก.

2. ภาชนะใส่คอนกรีต ซึ่งมีความลึกไม่น้อยกว่า 20 ซม. และความกว้างด้านข้างไม่น้อยกว่า 45 ซม.



***รูปที่ 7** ลูกบอลเคลลี่*

วิธีทดสอบ

1. ตักคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ใส่ในภาชนะและปาดผิวให้เรียบ พยายามอย่าให้ภาชนะได้รับการสั่นสะเทือนหรือโดนกระแทก

2. ค่อยๆ หย่อนลูกบอลโลหะเคลลี่อย่างเบาๆ ลงบนคอนกรีต

3. อ่านค่าความลึกของลูกบอลที่จมลงไปในคอนกรีตจากสเกลของเครื่องมือ โดยอ่านให้ละเอียดถึง 1/4" (6.4 มม.) ทำการทดสอบใหม่อีก 2 ครั้ง

4. ถ้าค่าแตกต่างระหว่างค่าความลึกมากสุดกับตื้นสุดมากกว่า 1" (25 มม.) ให้ทำการทดสอบเพิ่มจนกระทั่ง 3 ค่าการทดลองที่ติดต่อกันมีค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่เกิน 1" (25 มม.)

การทดสอบการไหลตัว

มาตรฐานที่ใช้

DIN 1048 : Part 1

Method for Determination of Flow

อุปกรณ์

1. โต๊ะเขย่า (Flow Table) ขนาด 70 x 70 ซม. ที่มีพื้นเรียบเป็นระนาบ

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

2. กรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 13 ซม. ด้านล่าง 20 ซม. สูง 20 ซม. มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบ

3. ไม้ตำหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 x 40 มม.

4. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก

รูปที่ 8 *อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว*

วิธีทดสอบ

1. ทำอุปกรณ์ทั้งหมดให้เปียก

2. วางโคนลงกลางโต๊ะเขย่าให้ตรงรอยขีดแล้วใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้าง

3. ตักคอนกรีตใส่โคน 2 ชั้น แต่ละชั้นตำด้วยไม้ตำ 10 ครั้ง

4. เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทำความสะอาดโต๊ะเขย่า

5. ยกโคนขึ้นตรงๆ

6. ยกโต๊ะเขย่าขึ้นให้สูงประมาณ 40 ± 1 มม. และปล่อยลง ทำอย่างนี้ 15 ครั้ง คอนกรีตจะแผ่กระจายบนโต๊ะเขย่า

7. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออกโดยวัด 2 แนวที่ตั้งฉากกัน

8. ค่าการไหลตัวของคอนกรีต คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองที่วัดได้

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

บทที่ 12
การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต และปริมาณอากาศ
(Unit Weight and Air Content of Concrete)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight of Concrete) และหาปริมาณอากาศ (Air Content) ในคอนกรีตด้วยวิธี Gravimetric และวิธีความดัน (Pressure Method) ค่าหน่วยน้ำหนักเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่า คอนกรีตที่มีปริมาตรหนึ่งๆ นั้นมีค่าน้ำหนักเท่าใด ใช้สำหรับเปลี่ยนค่าปริมาตรให้เป็นค่าน้ำหนักหรือค่าน้ำหนักให้เป็นค่าปริมาตร เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป ส่วนค่าปริมาณอากาศนั้นบอกให้ทราบว่าในหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตนั้นมีปริมาณอากาศร้อยละเท่าใด ซึ่งปริมาณอากาศนั้นมีผลต่อการแยกตัว การเยิ้ม ค่ายุบตัว กำลังอัด และความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ (Freeze and Thaw)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight of Concrete)

คือ ค่าน้ำหนักของคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยรวมปริมาณอากาศด้วย มีประโยชน์สำหรับการเปลี่ยนค่าปริมาตรให้เป็นค่าน้ำหนักหรือค่าน้ำหนักให้เป็นค่าปริมาตร เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณอากาศด้วยวิธี Gravimetric

1.1. ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight of Concrete) คือ

• **จำนวนและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่นำมาผสมทำคอนกรีต** มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) ที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตเบา เช่น Expanded Clay Aggregate, Expanded Shale Aggregate, Foamed Slag, Sintered Fly Ash, Vermiculite, Perlite, หรือ Pumice มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 60-1,000 กก./ลบ.ม. ส่วนมวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) ที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตหนัก เช่น Magnetite (Fe_3O_4), Barite ($BaSO_4$) หรือก้อนเหล็ก มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 2,100-6,100 กก./ลบ.ม. และมวลรวมปกติที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป เช่น หินปูนหรือกรวดมีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1,100-1,750 กก./ลบ.ม.

• **ฟองอากาศที่ถูกกักกระจาย (Entrained Air) และปริมาณช่องว่างของน้ำที่ถูกกักอยู่ใต้มวลรวมหรือเหล็กเสริม (Entrapped Air)** การที่คอนกรีตมีช่องว่าง หรือปริมาณอากาศมากขึ้นทำให้เนื้อแท้ของคอนกรีตลดลง ซึ่งจะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลงนั่นเอง

• **อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์** การที่คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำนั้น จะมีเนื้อแน่นและส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงขึ้นด้วย

1.2. ชนิดของคอนกรีตเมื่อใช้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เป็นเกณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็น

• **คอนกรีตทั่วไป (Normal Weight Concrete)** คือ คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2,400 กก./ลบ.ม ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ทั้งในอาคารและงานถนน

• **คอนกรีตเบา (Lightweight Concrete)** คือ คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 300-1,850 กก./ลบ.ม. นิยมนำไปใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน จนถึงใช้เป็นชิ้นส่วนของโครงสร้าง เช่น พื้น เสา คาน ผนัง และฐานราก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักของอาคาร ส่งผลให้เป็นการประหยัดต้นทุนโดยรวม มีความคงทนอยู่ในระดับที่ดีแต่มีความต้านทานต่อการขัดสีต่ำ

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

- **คอนกรีตหนัก (Heavyweight Concrete)** คือคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักมากกว่า 3,200 กก./ลบ.ม. โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานโครงสร้างที่ต้องป้องกันรังสีหรือกัมมันตภาพรังสี

2. ปริมาณอากาศ (Air Content)

คือ ค่าที่บอกให้ทราบว่าในหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตนั้นมีปริมาณอากาศร้อยละเท่าใด ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น

2.1. โพรงอากาศของน้ำที่ถูกกักอยู่ใต้มวลรวมหรือเหล็กเสริม (Entrapped Air) โพรงอากาศชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่และเกิดในบริเวณที่จี้เขย่าคอนกรีตไม่ดีพอ โดยเกิดจากการที่คอนกรีตมีปริมาณน้ำมากเกินไป น้ำส่วนหนึ่งจะถูกกักอยู่ใต้หินหรือเหล็กเสริม เมื่อคอนกรีตแข็งตัว แอ่งน้ำดังกล่าวจะกลายโพรงอากาศทำให้ความทึบน้ำ ความทนทาน และกำลังอัดคอนกรีตลดลง

2.2. ฟองอากาศที่ถูกกักกระจาย (Entrained Air) ฟองอากาศชนิดนี้เกิดจากการใส่สารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบนผิวของอนุภาคที่มักจะรวมกันอยู่ระหว่างผิวน้ำและอากาศทำให้แรงตึงผิวลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25-1 มม. กระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและคงตัวในคอนกรีต

ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีต

1. เพิ่มความทนทานของคอนกรีตในห้องเย็น ที่จุดเยือกแข็ง (Freezing) น้ำภายใน Capillary pore จะเกิดการขยายตัวจนเต็ม แล้วน้ำส่วนเกินจะถูกผลักดันไปยัง Air Void ผ่านทางเนื้อซีเมนต์เพสท์ ปริมาณความดันที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของน้ำจาก Capillary pore ไปยัง Air Void ถ้าความดันมีปริมาณมากอาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ การใส่สารกักกระจายฟองอากาศจะเป็นการเพิ่ม Air Void ให้กระจายอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต ทำให้น้ำจาก Capillary pore สามารถไหลไปยัง Air Void ได้สะดวกขึ้น ดังนั้นความดันภายในคอนกรีตจึงลดลง ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นน้ำใน Air Void จะละลาย (Thawing) และไหลกลับเข้าสู่เนื้อซีเมนต์เพสท์ ทำให้คอนกรีตสามารถทนทานอยู่ในสภาวะที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็งได้อย่างต่อเนื่อง

2. เพิ่มความสามารถเทได้ ลดการแยกตัวและการเยิ้ม อนุภาคที่กลมของฟองอากาศจะประพฤติตัวเหมือนมวลรวมละเอียด ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวอนุภาค ทำให้ความสามารถเทได้เพิ่มขึ้นและช่วยพยุงมวลรวมให้ลอยตัวอยู่ในซีเมนต์เพสท์ จึงทำให้ลดการเยิ้ม

3. กำลังอัดคอนกรีตลดลง ปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทุก 1% จะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงประมาณ 5% แต่เหตุผลหนึ่งที่ยังมีความนิยมใช้สารกักกระจายฟองอากาศ เพราะความสามารถเทได้ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ ค่ากำลังอัดที่ลดลงจะถูกชดเชยกับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น

การหาปริมาณฟองอากาศสามารถทำได้โดย

1. **Gravimetric Method** วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยอาศัยการเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่มีอากาศปนอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ถูกไล่อากาศออกไปแล้ว วิธีนี้จะใช้ได้เมื่ออัตราส่วนผสมของคอนกรีตและค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบที่ใช้ทำคอนกรีตคงที่

2. **Volumetric Method** วิธีนี้หาโดยเทน้ำใส่ด้านบนผิวคอนกรีต แล้วทำการไล่อากาศขึ้นด้านบนด้วยการเขย่าและกวนขณะที่คอนกรีตยังอยู่ใต้ระดับน้ำ จากนั้นเปรียบเทียบปริมาตรของคอนกรีตที่ถูกอัดแน่นในภาชนะ (Pycnometer) ซึ่งมีอากาศปนอยู่กับปริมาตรของคอนกรีตที่ถูกไล่อากาศออกไป อุปสรรคของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือ น้ำหนักของน้ำที่จะไปแทนที่อากาศนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักคอนกรีต นอกจากนั้นผลการทดสอบอาจจะคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากช่องว่างในมวลรวมเองอีกด้วย

3. **Pressure Method** วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เหมาะสมกับการใช้งานในสนาม และถือว่ามีความถูกต้องมากที่สุด การทดสอบอาศัยหลักการที่ปริมาตรของอากาศจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิคงที่) ซึ่งทำการทดสอบโดยใส่คอนกรีตลงในแอร์มิเตอร์ (Air Meter) แล้วปิดฝาใส่น้ำเข้าไปจนเต็มแล้วอัดความดันจากด้านบนของผิวน้ำ ปริมาตรของอากาศในคอนกรีตจะลดลงซึ่งทำให้ระดับน้ำลดลงด้วย จากนั้นจึงอ่านค่าปริมาณอากาศจากหน้าปัดของแอร์มิเตอร์

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

ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่จำเป็นต้องทราบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและค่าปริมาณอากาศสามารถอ่านได้โดยตรงเลย แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับคอนกรีตที่มีมวลรวมพรุน

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตและปริมาณอากาศด้วยวิธี Gravimetric

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 138

Standard Method for Unit Weight and Air Content (Gravimetric) of Concrete

อุปกรณ์

1. ถังเหล็กสำหรับใส่คอนกรีตขนาดมาตรฐานซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดใหญ่สุดของหิน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดถังเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดใหญ่สุดของหิน (นิ้ว)	ขนาดถังเหล็กมาตรฐาน (ลิตร)
1	6
$1\frac{1}{2}$	11
2	14
3	28
$4\frac{1}{2}$	70
6	100

2. เหล็กตำหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่ 1 ตร.นิ้ว
3. เครื่องชั่งซึ่งสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.1 กก.
4. ช้อนตักและเหล็กปาดคอนกรีต

รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบหน่วยน้ำหนัก

วิธีทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักถังเปล่าบันทึกค่าไว้

2. เติมน้ำให้เต็มถังแล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาตรของถังโดยความสัมพันธ์

$$\text{ปริมาตรของถัง}, V_C = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ชั่งได้}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

3. ใส่คอนกรีตลงในภาชนะแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นตำตามข้อกำหนดที่ขึ้นกับขนาดถัง ดังตารางที่ 2 แล้วใช้ฆ้อนยางเคาะด้านข้าง 10-15 ครั้ง

ตารางที่ 2 จำนวนครั้งที่ตำตามขนาดถัง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	จำนวนครั้งที่ตำ
14	10
24	25
35	50

4. ใช้เหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบทำความสะอาดด้านข้าง

5. นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกน้ำหนักที่ได้ (W_C)

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

6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาหน่วยน้ำหนัก โดยในการคำนวณ ควรมีความละเอียดถึง 10 กก./ลบ.ม

$$\text{หน่วยน้ำหนักคอนกรีต}, W_U = \frac{\text{น้ำหนักคอนกรีตในถัง}}{\text{ปริมาตรถัง}} = \frac{W_C}{V_C}$$

7. คำนวณหาค่าปริมาณอากาศ

$$\text{ปริมาณอากาศ (\%)} = \frac{(W/V) - W_U}{(W/V)} \times 100$$

W = น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด (กก.) ที่ใช้ทำคอนกรีตใน 1 ลบ.ม.

V = ปริมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Volume) ของคอนกรีต 1 ลบ.ม.

= ผลรวมของน้ำหนักวัสดุแต่ละชนิดหารด้วยค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุแต่ละชนิดคูณ 1,000

ค่าตัวอย่าง

น้ำหนักคอนกรีต (W_C)	=	6.60	กก.
ปริมาตรของคอนกรีต (V_C)	=	2.7×10^{-3}	ลบ.ม.
น้ำหนักหิน ต่อ 1 ลบ.ม.	=	1,160	กก.
น้ำหนักทราย ต่อ 1 ลบ.ม.	=	700	กก.
น้ำหนักปูน ต่อ 1 ลบ.ม.	=	360	กก.
น้ำหนักน้ำ ต่อ 1 ลบ.ม.	=	162	กก.

น้ำหนักรวมวัตถุดิบ ต่อ 1 ลบ.ม. (W)

= 1,160 + 700 + 360 + 162 = 2,382 กก.

ปริมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Volume)

$$= \frac{1,160}{(2.75\times1,000)} + \frac{700}{(2.65\times1,000)} + \frac{360}{(3.15\times1,000)} + \frac{162}{(1.0\times1,000)}$$

= 0.962 ลบ.ม.

$$\text{หน่วยน้ำหนัก } (W_u) = \frac{W_c}{V_c} = \frac{6.60}{2.7 \times 10^{-3}}$$

= 2,445 กก./ลบ.ม.

ปริมาณอากาศ (% Air Content)

$$= \frac{(W/V) - W_U}{(W/V)} \times 100 = \frac{(2,382/0.962) - 2,445}{(2,382/0.962)} \times 100$$

= 1.05 %

การทดสอบหาปริมาณอากาศด้วยวิธีความดัน (Pressure Method)

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 231

Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by Pressure Method

อุปกรณ์

1. แอร์มิเตอร์
2. เหล็กตำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม.
3. ฆ้อนยาง ลูกยาง ภาชนะใส่น้ำ
4. ช้อนตักแผ่นเหล็กสำหรับปาดหน้า

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

รูปที่ 2 *อุปกรณ์ทดสอบปริมาณอากาศ*

วิธีทดสอบ

1. นำอุปกรณ์ทั้งหมดไปจุ่มน้ำให้เปียก แล้วใช้ผ้าซับน้ำที่คงค้างในภาชนะให้หมด

2. ตักคอนกรีตใส่ลงในแอร์มิเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน ในแต่ละชั้นตำ 25 ครั้งด้วยเหล็กตำ

3. ใช้ฆ้อนยางตีรอบๆ แอร์มิเตอร์ 10-15 ครั้ง เพื่อไล่อากาศในคอนกรีตออกให้หมด

4. ใช้แผ่นเหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทำความสะอาดบริเวณขอบแอร์มิเตอร์ ปิดฝาและขันสกรูให้แน่น

5. เปิดวาล์วสำหรับใส่น้ำทั้งสองข้าง ใช้ลูกยางดูดน้ำใส่จนเต็ม โดยสังเกตจากน้ำที่ไหลออกมาอีกด้านหนึ่ง เมื่อน้ำเต็มจึงปิดวาล์ว

6. อัดอากาศเข้าไปในหม้อลมที่อยู่บริเวณฝาปิดจนเต็มโดยสังเกตจากหน้าปัดของเครื่อง เข็มจะชี้ที่เลขศูนย์

7. กดปุ่มอัดอากาศแล้วใช้ฆ้อนยางเคาะด้าน ข้างแอร์มิเตอร์เบาๆ

8. บันทึกค่าจากหน้าปัดของเครื่อง

การประเมินผล

ในการหาปริมาณอากาศควรทำ 2 ครั้งและค่าที่ได้ทั้ง 2 ครั้งต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.2% นำค่าทั้ง 2 ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้ คือ ค่าปริมาณอากาศในคอนกรีต

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

บทที่ 13
การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time of Concrete)

บทนำ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time of Concrete) ซึ่งมีประโยชน์เพราะทำให้ทราบว่า เมื่อระยะเวลาเท่าใดที่ยังสามารถผสม เท อัดแน่น แต่งผิวคอนกรีต และระยะเวลาที่คอนกรีตสามารถเริ่มรับกำลังได้ ทำให้สามารถวางแผนการทำงานเกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตได้ถูกต้อง

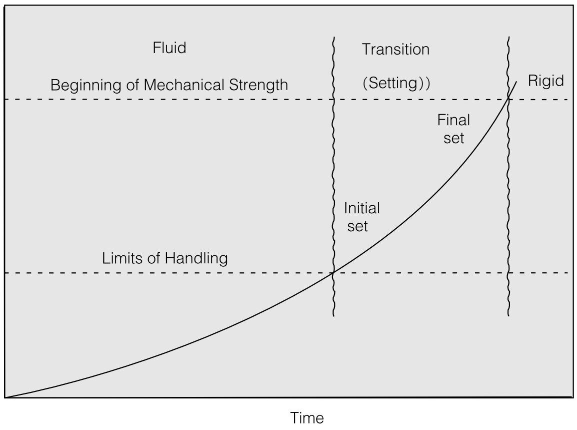
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ถือเป็นลักษณะทางกายภาพที่แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ซึ่งการก่อตัวของคอนกรีต คือ กระบวนการเริ่มแข็งตัวของคอนกรีตสดโดยมีระยะเวลาที่สำคัญอยู่ 2 ช่วง ดังรูปคือ

1. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เป็นระยะเวลาที่บอกให้ทราบว่าภายในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นคอนกรีตยังสามารถที่จะผสม เท อัดแน่นและแต่งผิวได้ (Limit of Handling)

2. ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) เป็นระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาพการแข็งตัวและเริ่มพัฒนากำลังอัด (Beginning of Mechanical Strength)

ค่าทั้งสองนี้เป็นค่าที่ถูกตั้งขึ้นโดยการทดสอบหาความต้านทานการกด (Penetration Resistance) ของมอร์ต้าที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งการทดสอบทำโดย การเทมอร์ต้าลงในภาชนะมาตรฐานทรงลูกบาศก์ แล้ววัดแรงที่ใช้ในการกดหัวกดให้จมลงไปในคอนกรีต 2.5 ซม. ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าแรงกดต่อพื้นที่เพื่อนำมาเขียนกราฟ ระหว่างแรงต้านของเนื้อมอร์ต้าต่อพื้นที่กับระยะเวลาหลังผสม ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และ

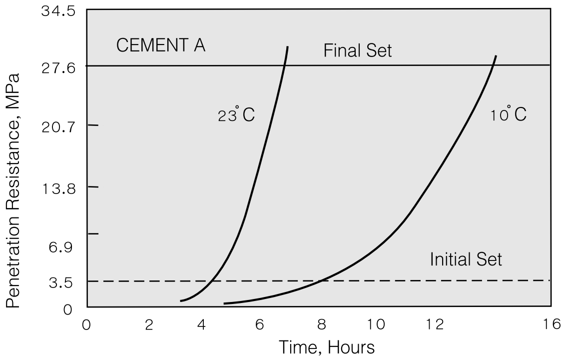


รูปที่ 1 ขั้นตอนการก่อตัวและการแข็งตัว (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials; Mehta & Monteiro)

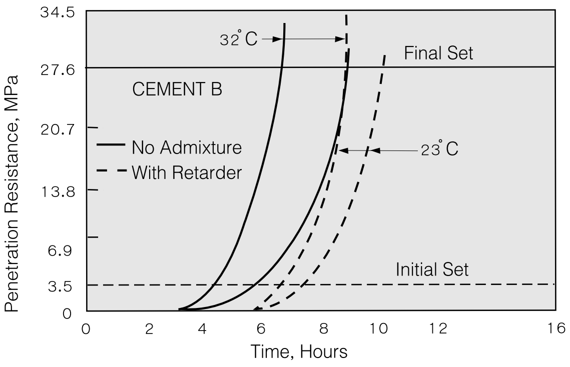
ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์/ตร.นิ้ว (3.5 MPa) และ 4,000 ปอนด์/ตร.นิ้ว (27.6 MPa) ตามลำดับ

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัว เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนั้นชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และน้ำยาผสมคอนกรีตก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวด้วยเช่นกัน

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



รูปที่ 2 *ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials; Mehta & Monteiro)*



รูปที่ 3 *ผลของน้ำยาหน่วงการก่อตัวต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials; Mehta & Monteiro)*

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

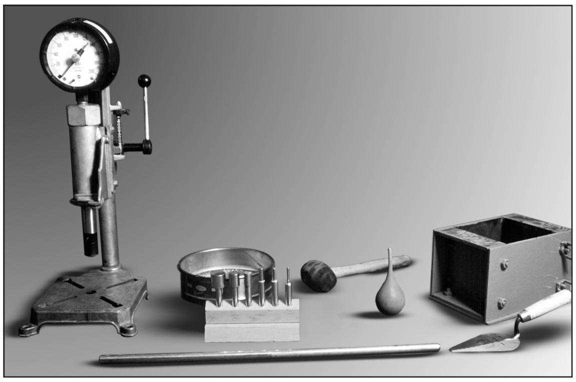
มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 403

Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance

อุปกรณ์

1. เครื่องมือหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
2. ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
3. เหล็กตำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม.
4. แบบรูปทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ซม.
5. ค้อนยาง ลูกยาง เทอร์โมมิเตอร์ เกรียงเหล็ก



รูปที่ 4 *อุปกรณ์ทดสอบเวลาการก่อตัวของคอนกรีต*

วิธีทดสอบ

1. นำคอนกรีตร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
2. นำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เทลงแบบลูกบาศก์ที่เตรียมไว้ โดยใส่ให้ความสูงต่ำกว่าขอบแบบประมาณครึ่งซม.
3. ใช้เหล็กตำให้ทั่วพื้นที่ ใช้ค้อนยางเคาะด้านข้างแบบเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากส่วนผสม
4. วัดอุณหภูมิ
5. ปาดผิวหน้าให้เรียบ
6. วางทิ้งไว้เมื่อมีน้ำลอยขึ้นมาให้ ใช้ลูกยางดูดน้ำออก
7. ยกแบบวางบนเครื่องทดสอบที่ใส่หัวกดไว้เรียบร้อย แล้วกดให้หัวกดจมในเนื้อคอนกรีต 2.5 ซม. จดค่าน้ำหนักที่ขึ้นบนสเกล เวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลากดและขนาดของหัวกด หัวกดที่ใช้มีให้เลือกตั้งแต่ขนาดพื้นที่ 1 1/2 1/4 1/10 1/20 1/40 ตร.นิ้ว ในการทดสอบจะเลือกหัวกดให้เหมาะสมกับสภาพคอนกรีต โดยในช่วงแรกจะใช้หัวกดขนาดใหญ่ และเมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตยิ่งแข็งตัว จะเลือกหัวกดขนาดเล็กลง ในการทดสอบต้องหาแรงต้านทานอย่างน้อย 6 จุด เพื่อนำมาเขียนกราฟ

การคำนวณ

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

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

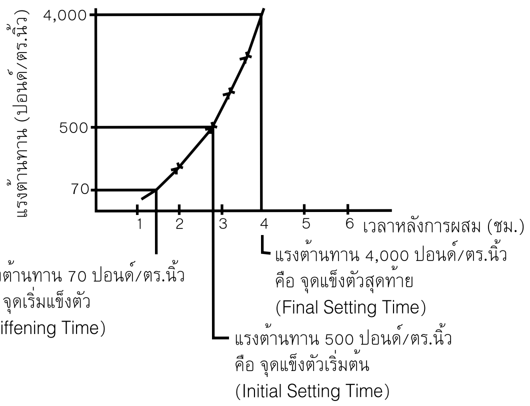
การเขียนกราฟ

เมื่อได้ค่าแรงต้านทานและเวลาหลังจากการผสม นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟ

แกนนอน คือ เวลาหลังจากการผสมคอนกรีต หน่วยเป็น ชม.

แกนตั้ง คือ ค่าแรงต้านทาน หน่วยเป็นปอนด์/ตร.นิ้ว หรือ กก./ตร.ซม.

ลงจุดที่ได้และลากเส้นกราฟ จากนั้นนำกราฟมาหาค่าเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

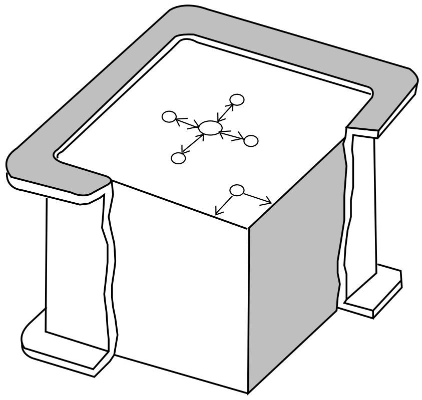


รูปที่ 5 *กราฟแสดงวิธีการหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต*

ข้อควรระวัง

1. ในการใช้หัวกดคอนกรีต ระยะระหว่างช่องที่กดต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดที่ใช้ และต้องไม่น้อยกว่า 1/2"

2. จุดที่กดจะต้องห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 1"



รูปที่ 6 *ระยะช่องว่างของการทดสอบเวลาการก่อตัว*

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

บทที่ 14
การทดสอบการเยิ้ม
(Bleeding)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการเยิ้มของคอนกรีต การเยิ้มของคอนกรีตมีผลต่อความแข็งแรงของผิวด้านบนของคอนกรีต กำลังอัด และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต

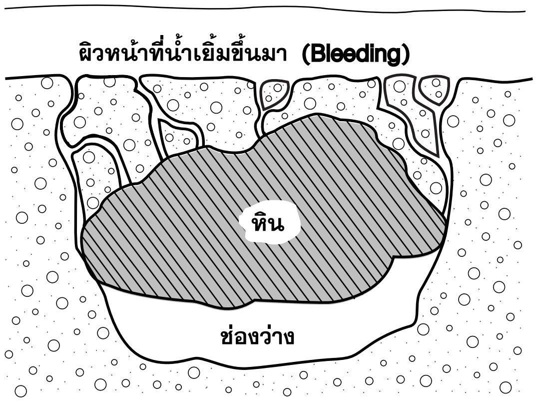
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเยิ้ม (Bleeding) คือ การคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีตที่มีเหลือจากการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ โดยปรากฏการณ์นี้มีลักษณะที่สำคัญคือ น้ำบางส่วน (ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เบาที่สุดของส่วนผสม) จะถูกดันให้ลอยตัวขึ้นมาบนผิวหน้าของคอนกรีต อันเนื่องมาจากการจมลงของมวลรวม (องค์ประกอบที่หนักกว่า) โดยการเยิ้มเป็นรูปแบบหนึ่งของการแยกตัว ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่สามารถของส่วนผสม ที่จะกักน้ำที่แผ่กระจายอยู่เอาไว้ขณะที่มวลรวมจมลง และการเยิ้มจะหยุดเมื่อซีเมนต์เพสท์แข็งตัวพอที่จะหยุดกระบวนการจมลงของมวลรวม

การเยิ้มจะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีต ใน 2 ลักษณะ

1. การเยิ้มจะส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่บริเวณผิวสูงขึ้น กำลังอัดและความทนทานจะลดลง นอกจากนั้นถ้าน้ำที่ลอยขึ้นมานั้นพามวลรวมละเอียดขึ้นมาด้วย จะทำให้เกิดชั้นของส่วนละเอียดบนผิวหน้า (Laitance) ซึ่งเป็นรูพรุนไม่แข็งแรง และมีความต้านทานต่อการเสียดสีต่ำ เมื่อถูกเสียดสีจะแตกเป็นฝุ่น (Dusting) ในที่สุด ดังนั้นถ้าเกิดส่วนละเอียดบนผิวหน้า (Laitance) ก่อนการเทคอนกรีตชั้นต่อไปจะต้องสกัดและล้างผิวหน้าที่เสียออกให้หมดเสียก่อน

2. นอกจากน้ำที่ลอยขึ้นมาแล้วน้ำบางส่วนจะถูกกักไว้ใต้มวลรวมหยาบหรือเหล็กเสริม ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสท์กับมวลรวม หรือเหล็กเสริมลดลงอย่างมาก และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะเกิดช่องว่างที่น้ำซึมผ่าน (Capillary pores) ที่เรียงตัวในทิศทางเดียว ทำให้การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นโพรงอากาศเหล่านี้ยังทำให้ความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตในโครงสร้างต่ำลง



รูปที่ 1 *การเยิ้มของคอนกรีตก่อให้เกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียว*

การเยิ้มไม่ได้ก่อให้เกิดผลเสียต่อคอนกรีตเสมอไป เพราะถ้าอัตราที่น้ำเยิ้มขึ้นมาเท่ากับอัตราการระเหยแล้วจะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ยกเว้นถ้าอัตราการระเหยมากกว่าอัตราการเยิ้ม อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วได้ (Plastic Shrinkage Crack)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเยิ้ม (Bleeding)

1. คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ การเยิ้มจะลดลงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น

2. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่เป็นด่างมาก หรือมี C_3A มาก จะมีการเยิ้มน้อย

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

3. อุณหภูมิสูงจะเพิ่มอัตราการเยิ้มแต่ไม่กระทบต่อปริมาณน้ำที่เยิ้มรวม

4. สัดส่วนของคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 150 มม. (#100) และปริมาณปูนซีเมนต์มากจะมีแนวโน้มเกิดการเยิ้มน้อยกว่า

5. สารกักกระจายฟองอากาศ และสารปอซโซลานจะช่วยลดการเยิ้ม

การทดสอบการเยิ้มของคอนกรีต

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 232

Standard Test Method for Bleeding of Concrete

อุปกรณ์

1. ภาชนะเหล็กใส่คอนกรีตมีปริมาตรประมาณ 0.5 ลบ.ฟุต โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 10 ± 1/4″ (25.1 ± 0.64 ซม.) และสูงประมาณ 11 ± 1/4″ (27.9 ± 0.64 ซม.)
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. กระบอกแก้วที่มีความจุประมาณ 100 มล.
4. ลูกยาง
5. เหล็กตำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 ซม.
6. ค้อนยาง เกรียงเหล็ก และช้อนตัก

***รูปที่ 2** อุปกรณ์ทดสอบค่าการเยิ้ม*

วิธีทดสอบ

1. ตักคอนกรีตใส่ลงในภาชนะโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นตำ 25 ครั้งและเคาะด้านข้างด้วยค้อนยาง 10-15 ครั้ง

2. ปรับระดับผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบโดยพยายามใช้เกรียงให้น้อยที่สุด ผิวบนสุดควรต่ำกว่าขอบของภาชนะ 3 ± 0.3 ซม. ชั่งน้ำหนักคอนกรีตในภาชนะ S

3. หลังจากปาดผิวเรียบแล้ว เริ่มจับเวลาและวัดอุณหภูมิคอนกรีต

4. ใช้ Pipet ดูดน้ำที่เยิ้มออกมาทุก 10 นาที ในช่วงเวลา 40 นาทีแรก แล้วหลังจากนั้นทุกๆ 30 นาที จนกระทั่งไม่มีการเยิ้มออกมาอีก

5. คำนวณค่าปริมาตรการเยิ้มต่อพื้นที่ผิวหน้าคอนกรีต

$$\text{ปริมาตรการเยิ้มต่อพื้นที่ผิวหน้า} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำทั้งหมดที่เยิ้มออกมา}}{\text{พื้นที่ผิวหน้าของคอนกรีตในภาชนะ}}$$

6. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่เยิ้มต่อน้ำที่ใช้ในการผสม

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเยิ้ม} = \frac{WD \times 100}{wS}$$

W = น้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ผสม (กก.)
w = น้ำหนักของน้ำที่ใช้ผสม (กก.)
D = น้ำหนักของน้ำที่เยิ้มออกมาจากคอนกรีต (กรัม)
S = น้ำหนักของคอนกรีตในภาชนะทรงกระบอก (กรัม)

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

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณหาค่าการเยิ้ม

เวลา (นาที)	ปริมาตร (มล.)	น้ำหนัก, D (กรัม)	ปริมาตรการเยิ้มต่อพื้นผิวหน้า (มล./ตร.ซม.)	เปอร์เซ็นต์การเยิ้ม
10	7.6	7.6	43.41×10^{-3}	1.21
20	25.3	25.3	144.51×10^{-3}	4.04
30	30.5	30.5	174.22×10^{-3}	4.87
40	31.2	31.2	178.21×10^{-3}	4.98

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาชนะทรงกระบอก = 14.43 ซม.
พื้นที่ผิวหน้าคอนกรีตในภาชนะ = 175.07 ตร.ซม.
น้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ผสม (W) = 73.08 กก.
น้ำหนักของน้ำที่ใช้ผสม (w) = 6.70 กก.
น้ำหนักของคอนกรีตในภาชนะทรงกระบอก (S) = 6,800 กรัม

ปริมาตรการเยิ้มต่อพื้นที่ผิวหน้า ที่เวลา 10 นาที

$$= \frac{7.6}{175.07}$$

$$= 43.41 \times 10^{-3} \text{ มล./ตร.ซม.}$$

เปอร์เซ็นต์การเยิ้ม ที่เวลา 10 นาที

$$= \frac{WD \times 100}{wS}$$

$$= \frac{73.08 \times 7.6 \times 100}{6.7 \times 6,800}$$

$$= 1.21\ \%$$

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

บทที่ 15

การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลงตามระยะเวลาอย่างไร และนำไปใช้ในการหาเวลาที่เหมาะสมในการที่จะนำคอนกรีตไปใช้งาน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) คือการสูญเสียความเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาผ่านไป การสูญเสียค่าการยุบตัวถือเป็นเหตุการณ์ปกติสำหรับคอนกรีตที่จะต้องแข็งตัวขึ้นเรื่อยๆ จากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพสท์ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จากการดูดซึมของมวลรวม และจากการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้วควรรีบลำเลียง เท และแต่งผิวให้ทันกับระยะเวลาที่คอนกรีตยังสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่ายุบตัว

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสูญเสียค่าการยุบตัว

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิของคอนกรีตขณะที่คอนกรีตถูกผสม ลำเลียง ยิ่งสูงมากเท่าใด ระยะเวลาการสูญเสียค่ายุบตัวยิ่งเร็วขึ้น ดังนั้นในสถานที่ที่อากาศร้อน มวลรวมที่ใช้ในการผสมควรทำให้มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ เช่น การพรมน้ำ หรือควรกองเก็บในบริเวณที่ร่ม

2. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ การสูญเสียค่ายุบตัวจะมีมากเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีส่วนผสมของ C_3A หรือมีส่วนประกอบที่มีอัลคาไลน์สูง

3. สารผสมเพิ่ม คอนกรีตที่ใส่น้ำยาลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) มีแนวโน้มที่จะเกิดการสูญเสียค่ายุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะน้ำยาดังกล่าวจะทำให้ผงซีเมนต์กระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเร็วขึ้น ดังนั้นในการใช้น้ำยาดังกล่าวควรใช้ปริมาณให้เหมาะสมตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

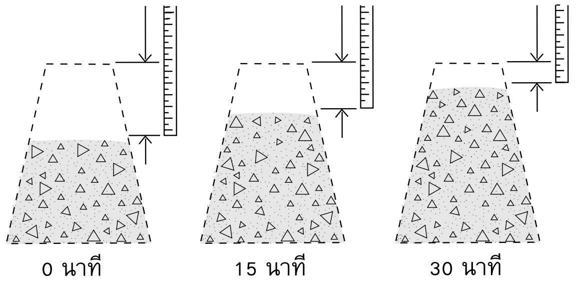
อุปกรณ์

การทดสอบนี้ใช้อุปกรณ์ทดสอบชุดเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่ายุบตัว

วิธีทดสอบ

1. นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยมาวัดอุณหภูมิและหาค่าการยุบตัวเริ่มต้น
2. เทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสม ทิ้งไว้โดยปิดฝาโม่ไม่ให้น้ำระเหยออก และควรเปิดเครื่องผสมเป็นระยะ
3. เทคอนกรีตมาหาค่ายุบตัว แล้วบันทึกค่า
4. ทำเช่นนี้ทุกๆ 15 นาที จนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว

นำผลการทดสอบที่ได้มาหาเวลาที่เหมาะสมในการที่จะนำคอนกรีตไปใช้งาน



***รูปที่ 1** ค่ายุบตัวของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป*

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

บทที่ 16

การทดสอบกำลังอัด และกำลังดึงของคอนกรีต (Compressive Strength and Tensile Strength of Concrete)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Uniaxial Compression Test และทดสอบกำลังดึงด้วยวิธี Flexural Test และวิธี Splitting Test ทั้งนี้เพราะการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำในรูปของการนำคอนกรีตสด มาทำก้อนตัวอย่างโดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้างนั้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

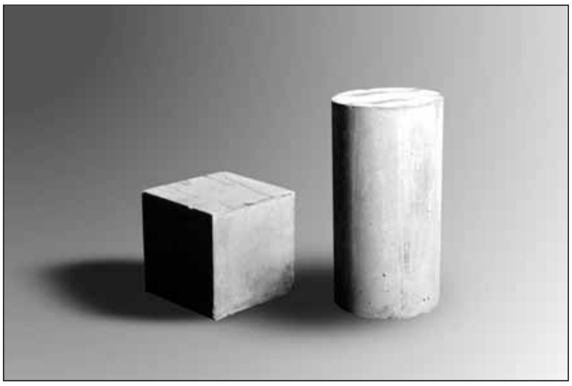
กำลังของคอนกรีต (Strength) เป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งจะแสดงความสามารถในการรับแรงของคอนกรีต โดยการทดสอบกำลังของคอนกรีตสามารถทำได้ คือ

1. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compression Test)

ถึงแม้ในทางปฏิบัติคอนกรีตจะได้รับทั้งแรงกด แรงดึง หรือแรงเฉือนใน 2 ทิศทางหรือมากกว่านั้น แต่การทดสอบที่สะดวกที่สุดที่กระทำในห้องทดสอบ คือ การทดสอบกำลังอัดด้วยวิธี Uniaxial Compression Test ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวที่อายุ 28 วัน ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายให้เป็นดัชนีทั่วไปในการวัดกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการทดสอบทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรง คือ

- **รูปทรงรูปบาศก์** ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881: PART 3 ขนาดที่ใช้คือ 15 x 15 x 15 ซม.
- **รูปทรงกระบอก** ตามมาตรฐานอเมริกา ASTM C 192 ขนาดที่ใช้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

หลังจากคอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชม. จึงถอดแบบออก ต่อจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำ เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 3 ต่อไป



รูปที่ 1 *ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด*

รูปที่ 2 *การบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีต*

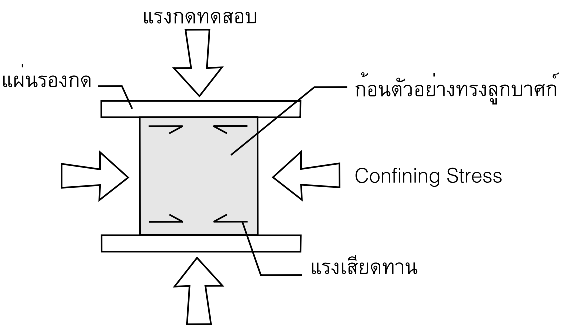
© 2000 The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.

รูปที่ 3 การกดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบ

กำลังอัดของทั้ง 2 รูปทรงที่ได้จากเครื่องทดสอบนี้จะให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก

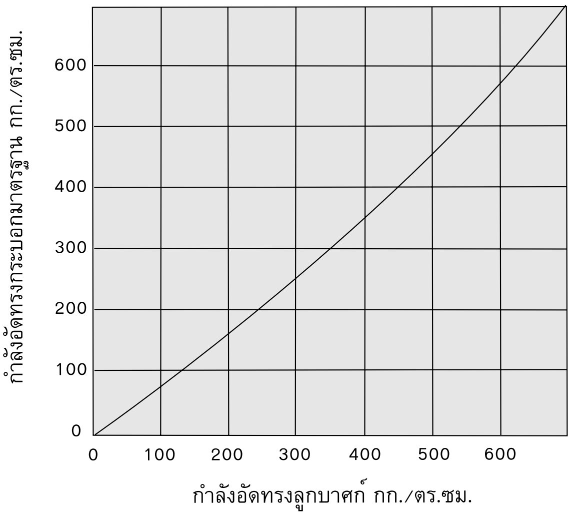
1. องค์ประกอบเรื่องความชะลูด กล่าวคือ รูปทรงกระบอกมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้าง (Slenderness Ratio) มากกว่ารูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งอัตราส่วนความชะลูดดังกล่าว ส่งผลให้กำลังอัดรูปทรงกระบอกต่ำกว่ารูปทรงลูกบาศก์

2. ขณะที่กดก้อนตัวอย่างนั้น ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า Confining Stress ดังรูป โดยค่า Confining Stress นี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์จึงให้ค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก



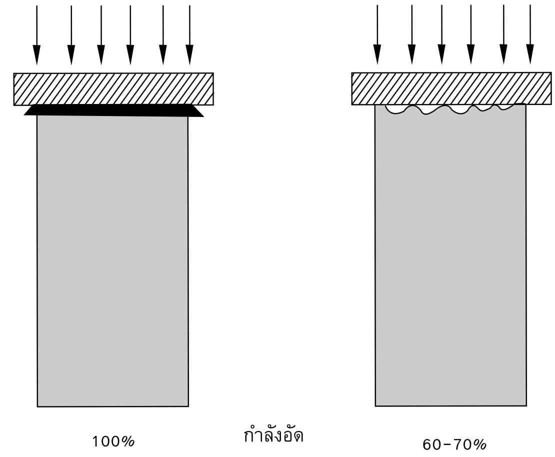
รูปที่ 4 แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด ซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (Confining Stress)

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน วสท.) ได้ให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแปลงกำลังอัดทรงลูกบาศก์เป็นกำลังอัดทรงกระบอก

ในทางปฏิบัตินั้นผิวด้านบนของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมักจะไม่เรียบ ทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนการทดสอบจะต้องทำการ Cap ก้อนตัวอย่างทั้ง 2 ด้านด้วยกำมะถันเสียก่อน ส่วนก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์นั้นไม่ต้อง Cap ก้อนตัวอย่างเพราะมีผิวด้านข้างอีก 4 ด้านเรียบที่สามารถนำมาทดสอบได้



รูปที่ 6 ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ CAP หัวและไม่ CAP หัว

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

ปัจจัยอื่นในด้านการทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

1. วิธีการทำก้อนตัวอย่าง คอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าจากการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า

2. ขนาดและลักษณะของก้อนทดสอบ การใช้แท่งทดสอบที่ขนาดต่างจากขนาดมาตรฐานที่กำหนดให้ความสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกัน เช่น ก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะทดสอบ (Core Test) ถ้าความสูงที่เจาะออกมาสั้นกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะต้องปรับแก้กำลังของคอนกรีตด้วย

ตารางที่ 1 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังอัด

สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D)	ค่าปรับแก้ของกำลังอัด
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

3. อัตราการกด ถ้าใช้อัตราการกดสูงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงควรใช้อัตราการกดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 1.43-3.47 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และ 1.12-2.72 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

4. ความชื้นของก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นจะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่แห้ง เพราะการขยายตัวของซีเมนต์เพสท์ อันเนื่องมาจากการดูดซึมน้ำจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสท์กับมวลรวมลดลง โดยมาตรฐาน ASTM C 39 แนะนำให้ทำการทดสอบก้อนตัวอย่างในสภาพชื้น ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความผันแปรอันเนื่องมาจากระดับของความแห้ง

การประเมินผลกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อทดสอบกำลังอัดแล้วต้องดำเนินการประเมินผล โดยทำตามมาตรฐาน ACI 318R Chapter E Concrete Quality, Mixing, and Placing หรือตามมาตรฐาน วสท. ภาค 3 เกณฑ์กำหนดในการก่อสร้าง ซึ่งมีวิธีการประเมินดังนี้

ค่ากำลังอัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

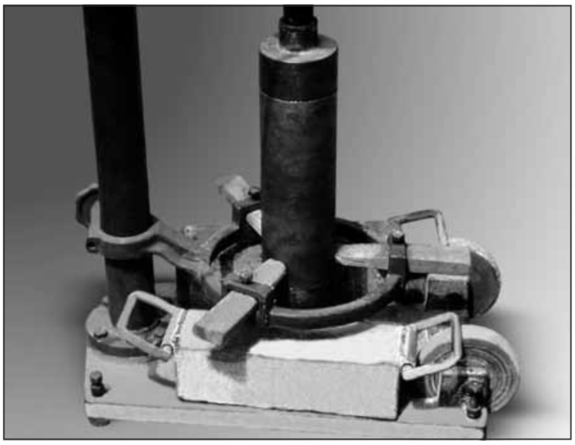
1. ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจากการทดสอบ 3 ครั้งติดต่อกัน มากกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (f'_c)

2. ค่ากำลังอัดแต่ละครั้งต่ำกว่ากำลังอัด (f'_c) ที่ต้องการได้ไม่เกิน 30 กก./ตร.ซม.

ในกรณีที่ต้องเจาะก้อนคอนกรีตในโครงสร้างมาทดสอบ (Core Test) การประเมินผล มีดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจะต้องได้ค่าไม่น้อยกว่า 85% ของค่ากำลังอัดที่กำหนด (f'_c)

2. ค่ากำลังอัดแต่ละก้อนต้องได้ค่าไม่น้อยกว่า 75% ของค่ากำลังอัดที่กำหนด (f'_c)



รูปที่ 7 การเจาะคอนกรีตในโครงสร้างเพื่อทดสอบ

รูปที่ 8 ก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะคอนกรีตในโครงสร้าง

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

2. การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต (Tensile Strength Test)

ถึงแม้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่การทราบค่ากำลังดึงนี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และการหดตัว

วิธีวัดแรงดึงในคอนกรีตทำได้ 3 วิธีคือ

1. **Direct Tensile Test** โดยปกติแล้วการให้แรงดึงโดยตรงกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตทำได้ยากเพราะมักเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ เนื่องจาก

- เกิดการเยื้องศูนย์ของก้อนตัวอย่าง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมาก
- มีหน่วยแรงอื่นแทรกเข้ามาจากหัวจับยึด เกิดเป็นหน่วยแรงเฉพาะที่ และในที่สุดจะเกิดการแตก ณ บริเวณนี้ จากนั้นจะแพร่ขยายไปอย่างรวดเร็ว กำลังดึงที่ได้จะเป็นของบริเวณที่มีกำลังต่ำสุด ซึ่งไม่ตรงกับค่ากำลังของเนื้อคอนกรีตจริง จากเหตุผลทั้ง 2 นี้ ผลจากการทดลองจึงมีความเชื่อมั่นต่ำ ทำให้ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานวิธีทดสอบแบบนี้ขึ้น

2. **Flexural Tensile Test** เนื่องจากการหากำลังดึงของคอนกรีตโดยตรงทำได้ยาก จึงมีความนิยมในการหากำลังดึงของคอนกรีตจากการทดสอบคานคอนกรีตภายใต้แรงดัดแทน โดยค่าหน่วยแรงดึงจะเกิดสูงสุดที่บริเวณท้องคานที่เรียกว่า โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ซึ่งหาได้ตามสมการ

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

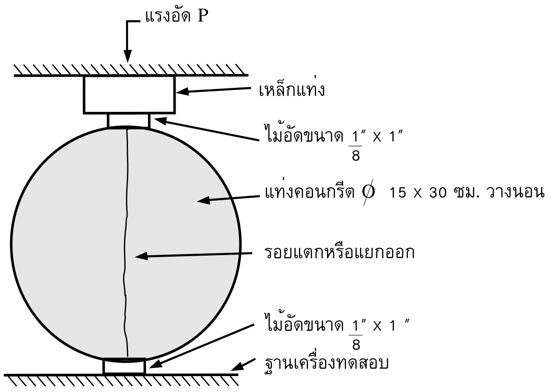
R = โมดูลัสการแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)
P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)
L = ความยาวของคาน (ซม.)
b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (ซม.)
d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (ซม.)

กำลังดึงของคอนกรีตที่คำนวณด้วยวิธีนี้จะมีค่ามากกว่ากำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต 50-100 % จากผลกระทบของ Strain Gradient เนื่องจากหน่วยการยืดหดตัวในคอนกรีตที่เกิดขึ้น อยู่ในลักษณะส่วนโค้ง มิใช่การยืดหดในลักษณะเส้นตรงอย่างที่สมมุติ ซึ่งทำให้โมดูลัสของการแตกร้าวมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดความลึกของคานทดสอบ นอกจากนั้นในกรณีทดสอบกำลังดึงโดยตรง ปริมาตรทั้งหมดของคอนกรีตจะได้รับหน่วยแรงดึงที่กระทำ แต่การทดสอบการดัดนั้นปริมาตรของคอนกรีตส่วนน้อยบริเวณท้องคานเท่านั้นที่ได้รับหน่วยแรงดึง แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังดัดก็มีประโยชน์สำหรับงานควบคุมคุณภาพคอนกรีตในงานถนนและพื้นสนามบิน เพราะคอนกรีตดังกล่าวต้องรับน้ำหนักในรูปลักษณะของแรงดัด

3. **Splitting Test** การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ทดสอบหากำลังดึงของคอนกรีตโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน วางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนบนเครื่องทดสอบแรงอัด ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกร้าวนี้ได้ตามสมการ

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

f_s = Splitting Strength
P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)
L = ความยาวของก้อนตวอย่างทรงกระบอก (ซม.)
d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (ซม.)



รูปที่ 9 *การทดสอบกำลังดึงด้วยวิธี Splitting Test*

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

กำลังดึงที่ได้จากวิธีนี้จะสูงกว่ากำลังดึงจริง ประมาณ 5-12 % แต่ถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกว่าค่าที่ได้จากค่ากำลังดัด และข้อดีของวิธีนี้ คือ ก้อนตัวอย่างสามารถใช้ทดสอบได้ทั้งกำลังอัดและกำลังดึง

การทำก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

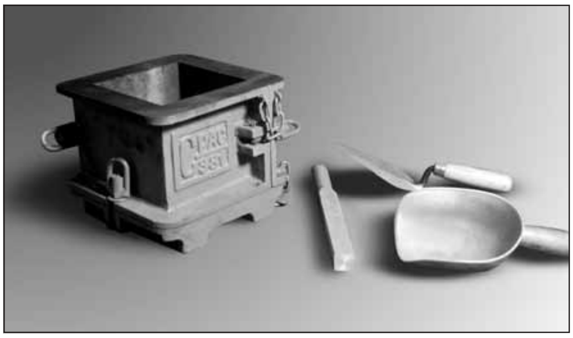
มาตรฐานที่ใช้

BS 1881 : PART 3

Method of Making and Curing Test Specimens

อุปกรณ์

1. แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ซม.
2. เหล็กตำหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตร.นิ้ว
3. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก



รูปที่ 10 *อุปกรณ์ทำก้อนตัวอย่าง รูปทรงลูกบาศก์*

วิธีทำก้อนตัวอย่าง

1. ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
2. ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่ากันๆ แต่ละชั้นตำด้วยเหล็กตำ 35 ครั้ง
3. เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ

การทำก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C192

Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

อุปกรณ์

1. แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
2. เหล็กตำขนาดเส้นผ่านศูนยกลาง 16 มม. ปลายกลมมน
3. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก

รูปที่ 11 *อุปกรณ์ทำก้อนตัวอย่าง รูปทรงกระบอก*

วิธีทำก้อนตัวอย่าง

1. ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
2. ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่ากันๆ แต่ละชั้น ตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง
3. เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ

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

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

มาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์

BS 1881 : PART 4

Method of Testing Concrete for Strength

มาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก

ASTM C 39

Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบกำลังอัด
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. ตลับเมตร

การเตรียมตัวอย่าง

1. รักษาความชื้นของตัวอย่างทดสอบอยู่ตลอดเวลา หลังจากนำขึ้นจากบ่อ บ่มจนกระทั่งทำการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างเหล่านี้ ต้องทำการทดสอบในขณะที่อยู่ในสภาพชื้น

2. ตรวจสอบตัวอย่างทดสอบ สังเกตดูว่ามีตัวอย่างทดสอบใดที่มีขนาดแตกต่างจากมาตรฐานมากๆ อย่างเห็นได้ชัด ถ้าพบให้ตัดตัวอย่างทดสอบนั้นทิ้งไป

วิธีทดสอบ

1. วัดและบันทึกค่าความสูง ความกว้าง และความยาวของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยวัดระยะระหว่างหน้าตัดแนวดิ่งให้ละเอียดถึงระดับมม. (กรณีก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์)

2. วัดและบันทึกความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบโดยวัด 2 แนว ที่ตั้งฉากกัน ให้วัดให้ละเอียดถึงระดับมม.(กรณีก้อนตัวอย่างทรงกระบอก)

3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ และบันทึกค่ากรณีก้อนตัวอย่างทรงกระบอกให้ทำการ Capping ตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถันเพื่อให้มั่นใจว่า ผิวหน้าตัดตัวอย่างทดสอบตั้งฉากกับแกนของตัวอย่างทดสอบ

4. นำก้อนตัวอย่างวางบนกึ่งกลางของแท่นทดสอบโดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

5. เปิดเครื่องทดสอบ โดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอประมาณ 1.43-3.47 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และ 1.12-2.72 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

6. กดก้อนตัวอย่างจนพัง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

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

หน่วยที่ใช้ทั่วไป คือ

1. กก./ตร.ซม. (ksc)
2. นิวตัน/ตร.มม. (N/mm^2)

การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต โดยวิธี Flexural Strength

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete

วิธีทดสอบ

1. นำแท่นทดสอบตัวอย่างรูปคาน ติดเข้ากับเครื่องทดสอบ

2. แบ่งก้อนตัวอย่างตามยาว โดยเหลือบริเวณปลายไว้สองส่วน ส่วนละ 7.5 ซม. ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน ส่วนละ 15 ซม.

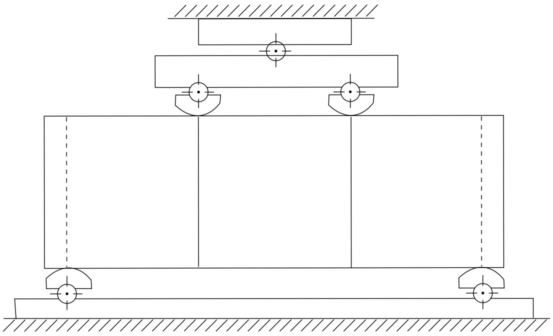
3. วางก้อนตัวอย่างลงบนแท่น โดยให้รอยขีดอยู่ตรงกับฐานของแท่น

4. ปรับแท่นกดด้านบนมาวางบนก้อนตัวอย่างให้ตรงรอยขีดเช่นกัน

5. ตั้งน้ำหนักกดให้คงที่ อัตราที่ใช้คือ 0.14-0.20 กก./ตร.ซม./วินาที

6. เปิดเครื่องกดน้ำหนัก จนก้อนตัวอย่างหัก บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังดัด

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



รูปที่ 12 *การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตด้วยวิธี Flexural Test*

การคำนวณ

กรณีที่ 1 ถ้าก้อนตัวอย่างแตกในช่วงกลาง

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

กรณีที่ 2 ถ้าก้อนตัวอย่างไม่แตกอยู่ในช่วงกลาง

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

ซึ่งค่านี้เป็นค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด ที่หน้าตัดวิกฤติ แต่ไม่ใช่ค่าหน่วยแรงดึงของคาน

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

ถ้าค่า a มากกว่า 5% ของความยาวคานให้ทำการทดลองใหม่

การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี Splitting Tensile Test

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 496

Standard Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบกำลังอัด
2. แผ่นไม้อัดขนาด 3 x 25 มม. 2 แผ่น
3. ตลับเมตร

วิธีทดสอบ

1. วัดและบันทึกความสูงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยวัด 2 แนว ที่ตั้งฉากกันให้ละเอียดถึงระดับมม. แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
2. วางก้อนตัวอย่างในแนวนอนใต้หัวกด โดยรองด้านบนและด้านล่างก้อนตัวอย่าง ดังรูปที่ 9
3. เพิ่มแรงกดบนก้อนตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอด้วยอัตรา 0.12-0.23 กก./ตร.ซม./วินาที จนก้อนตัวอย่างพัง ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่านศูนย์กลาง
4. คำนวณหากำลังต้านทานแรงดึงได้จากสมการ

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

f_s = Splitting Strength
P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)
L = ความยาวของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ซม.)
d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (ซม.)

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

บทที่ 17
การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio)

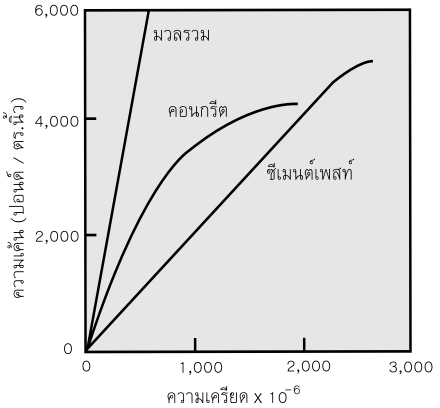
บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ซึ่งค่าโมดูลัสยืดยุ่นเป็นค่าที่มีความสำคัญในการหาค่าความเค้น ค่าโมเมนต์ และค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอุโมงค์ เขื่อน และโครงสร้างประเภท Statically Indeterminate

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

เมื่อใส่แรงลงในคอนกรีต จะเกิดหน่วยการหดตัวหรือความเครียด ดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าคอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริงเหมือนกับมวลรวมหรือซีเมนต์เพสท์ คือ เมื่อถูกหน่วยแรงกระทำจะเกิดความเค้น (Stress) ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความเครียด (Strain) และกลับคืนสภาพเดิมเมื่อนำแรงออก



รูปที่ 1 *กราฟ Stress-Strain ของคอนกรีต มวลรวม และซีเมนต์เพสท์ (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials; Mehta & Monteiro)*

การที่คอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริง เป็นผลมาจากกระบวนการแพร่กระจายของรอยร้าวในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

ปกติในเนื้อคอนกรีตมีรอยร้าวเล็กๆ (Micro-cracks) อยู่แล้ว โดยจำนวนและขนาดของรอยร้าวขึ้นอยู่กับลักษณะการเยิ้ม การบ่ม และความแข็งแรงของบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) ระหว่างซีเมนต์เพสท์กับมวลรวมหยาบ

ในช่วงที่คอนกรีตได้รับความเค้นไม่เกิน 30% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวดังกล่าวจะยังไม่เพิ่มและไม่ขยายตัวจึงทำให้กราฟในช่วงดังกล่าวยังคงเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2

เมื่อคอนกรีตได้รับความเค้นเกิน 30% ของความเค้นสูงสุด จำนวนความกว้าง และความยาวของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) จะเริ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนความเครียดต่อความเค้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้กราฟเริ่มเบี่ยงเบนไม่เป็นเส้นตรง

ที่ระดับความเค้น 50% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) จะเริ่มคงที่ และเมื่อความเค้นอยู่ในช่วง 50-60% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณซีเมนต์เพสท์ (Matrix Zone)

ที่ระดับความเค้นประมาณ 75% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวบริเวณซีเมนต์เพสท์ (Matrix Zone) จะแพร่กระจายมากขึ้น อีกทั้งรอยร้าวบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) เริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงนี้ ทำให้กราฟเริ่มโค้งเข้าสู่แนวนอนมากขึ้น

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

ที่ระดับความเค้นมากกว่า 75% ของความ เค้นสูงสุด รอยร้าวทั้งในบริเวณซีเมนต์เพสท์ (Matrix Zone) และบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) เกิดมากขึ้นและเริ่มมีความต่อเนื่องกัน ทำให้การเพิ่มความเค้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมาก

ชนิดของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

1.1. โมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ (Static Modulus of Elasticity)

เนื่องจากกราฟ Stress-Strain ของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่จากการทดสอบจึงมี 3 วิธีคือ

- **โมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial Tangent Modulus)** คือ ค่าความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับโค้งตรงจุดเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สุด
- **โมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มต้นกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus)** เป็นค่าโมดูลัสที่ใช้งานได้ดีในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพราะมีการรวมค่าการเปลี่ยนรูป (Deformation) ทั้งจากน้ำหนักที่ใส่เข้าไป (Strain) และผลของการคืบ (Creep) เข้าไปด้วย ค่าโมดูลัสชนิดนี้ยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานว่าจะวัดที่ความเค้นเท่าใด ในบางห้องทดสอบกำหนดให้ทำที่ระดับ 15% 25% 40% หรือ 50% ของค่าความเค้นสูงสุด และค่าโมดูลัสชนิดนี้จะลดลงเมื่อค่าความเค้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นการแสดงผลต้องแสดงระดับความเค้นด้วย
- **โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus)** คือ ค่าความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใดๆบนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว

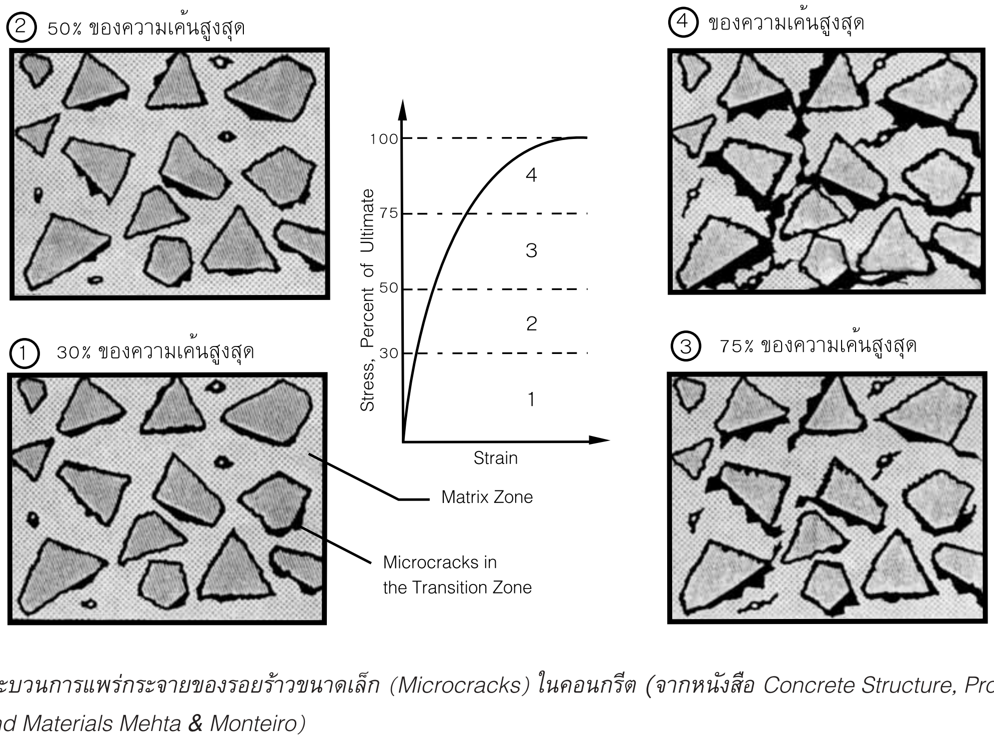
สำหรับการออกแบบทั่วไป ACI Building Code 318 ได้กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ของคอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักระหว่าง 1.45-2.48 ตัน/ลบ.ม. มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต คือ

$$E_c = 4{,}270\ W^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad \text{(กก./ตร.ซม.)}$$

โดย E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)

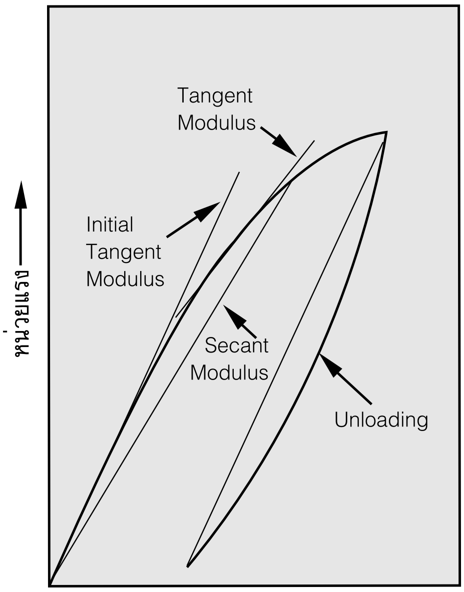
W = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (ตัน/ลบ.ม.) (คอนกรีตน้ำหนักธรรมดาให้ใช้ W เท่ากับ 2.323 ตัน/ลบ.ม.)

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)



***รูปที่ 2** กระบวนการแพร่กระจายของรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracks) ในคอนกรีต (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials Mehta & Monteiro)*

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



รูปที่ 3 *กราฟค่าโมดูลัสชนิดต่าง ๆ ของคอนกรีต*

ปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ของคอนกรีต

1. ความพรุนและลักษณะของบริเวณรอยต่อ ช่องว่าง รอยร้าว และแคลเซียมไฮดรอกไซด์บริเวณรอยต่อมีบทบาทสำคัญต่อรูปร่างกราฟ Stress-Strain ของคอนกรีต

2. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสท์ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสท์ที่สูงจะทำให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสสูงไปด้วย

3. อัตราการให้น้ำหนัก การให้น้ำหนักเร็วจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้น

4. สภาพของก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างที่อยู่ในสภาพเปียก จะให้ค่าโมดูลัสที่สูงกว่าตัวอย่างในสภาพแห้งประมาณ 15%

5. คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

- มวลรวมหยาบที่มีค่าโมดูลัสสูง จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสของคอนกรีตสูงขึ้น
- ขนาดใหญ่สุด รูปร่าง ลักษณะผิว และขนาดคละจะมีผลต่อรอยร้าว(Microcracks) บริเวณรอยต่อระหว่างซีเมนต์เพสท์กับมวลรวม ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของกราฟ Stress-Strain ของคอนกรีต
- ณ ระดับกำลังอัดที่เท่ากัน โมดูลัสยืดยุ่นของคอนกรีตเบา จะมีค่าเพียง 40-50% ของคอนกรีตปกติ

6. สัดส่วนผสม ยิ่งใช้ปริมาณมวลรวมหยาบมาก คอนกรีตจะยิ่งมีค่าโมดูลัสสูงขึ้น

7. อายุของคอนกรีต ยิ่งคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ค่าโมดูลัสและกำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

8. อุณหภูมิขณะเริ่มบ่ม การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง จะไปเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กำลังอัดในระยะแรกสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิปกติ แต่การเกิดปฏิกิริยาที่เร็วเกินไปก็มีข้อเสียคือ จะทำให้การกระจายตัวของ CSH ในเนื้อซีเมนต์เพสท์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดในช่วงท้ายลดลง

1.2. โมดูลัสยืดหยุ่นที่ไม่คงที่ (Dynamic Modulus of Elasticity)

สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยเสียง (Sonic Test) โดยปรกติมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบคงที่ 20-40% เป็นค่าที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเค้นสำหรับโครงสร้างที่อยู่บริเวณที่มีการเกิดแผ่นดินไหวและโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระแทก

1.3. โมดูลัสการดัดงอ (Flexural Modulus of Elasticity)

มีประโยชน์ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างถนน หาได้จากการวัดการแอ่นตัวของการทดสอบแรงดัดในคานคอนกรีต ค่าโดยประมาณสามารถหาได้จากสมการ

$$E = \frac{PL^3}{48\,I\,y} \quad \text{(กก./ตร.ซม.)}$$

P = น้ำหนักที่กด (กก.)

L = ความยาวคาน (ซม.)

I = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (ซม.^{4})

y = ค่าการแอ่นตัวบริเวณกลางคาน(ซม.)

2. ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, μ)

ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) คือ อัตราส่วนของหน่วยการหดตัวด้านข้าง (Lateral Strain) ต่อหน่วยการหดตัวในแนวแกนที่รับน้ำหนัก (Axial Strain)

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

เมื่อมีการให้น้ำหนัก ซึ่งคอนกรีตปกติจะมีค่าประมาณ 0.15-0.20 จากการวิจัยยังไม่พบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองกับคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การบ่ม หรือขนาดคละของมวลรวม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าอัตราส่วนปัวซองจะมีค่าลดลงในคอนกรีตกำลังอัดสูง คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำและคอนกรีตที่ได้รับหน่วยน้ำหนักไม่คงที่ (Dynamic Load) อัตราส่วนปัวซองนี้ไม่ค่อยมีการใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป แต่มีความสำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างของอุโมงค์ เขื่อน และโครงสร้างประเภท Indeterminate Structure

การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง

มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 469

Standard Test Method for Static of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Testing Machine)
2. Compressometer
3. Extensometer
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. ตลับเมตร

รูปที่ 4 *ก้อนตัวอย่างที่ได้รับการติดตั้ง Compressometer*

วิธีทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง และหาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วทำการ Cap หัวก้อนตัวอย่างด้วยกำมะถัน

2. ติดตั้ง Compressometer และ Extensometer เข้ากับก้อนตัวอย่าง แล้วนำไปวางบนเครื่องทดสอบกำลังอัด

3. กดน้ำหนักก้อนตัวอย่าง โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราคงที่ ประมาณ 2.5 กก./ตร.ซม./วินาที

4. เมื่อก้อนตัวอย่างใกล้แตกให้ถอด Compressometer และ Extensometer ออก

5. กดก้อนตัวอย่างต่อไปจนพัง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดกับการหดตัว แล้วคำนวณหาค่า

6.1. กำลังอัดสูงสุด (Ultimate Strength)

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi d^2_{av}}$$

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

P = น้ำหนักสูงสุด

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ที่วัด 2 ทิศทางตั้งฉากกัน

6.2. กำลังอัดในช่วงยืดหยุ่น (Compressive Strength at Elastic limit)

$$\sigma_e = 0.40\ (\sigma_c)$$

6.3. ค่าโมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial Tangent Modulus, E_i)

6.4. ค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus, E_t) ที่ 40% ของกำลังอัดสูงสุด

6.5. ค่าโมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มต้นกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus, E_s) ที่ 40% ของกำลังอัดสูงสุด

$$E_S = \frac{\sigma_e - \sigma_o}{\varepsilon_e - 0.000050}$$

σ_e = หน่วยแรงที่ 40% ของหน่วยแรงสูงสุด

σ_o = หน่วยแรงที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ 0.000050

ε_e = หน่วยการหดตัวตามแนวแกนที่หน่วยแรงเท่ากับ 40% ของหน่วยแรงสูงสุด

6.6. ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, μ)

$$\mu = \frac{\varepsilon_e^t - \varepsilon_o^t}{\varepsilon_e - 0.000050}$$

ε_e^t = หน่วยการขยายตัวด้านข้างที่หน่วยแรงตามแนวแกน เท่ากับ 40% ของหน่วยแรงสูงสุด

ε_o^t = หน่วยการขยายตัวด้านข้างที่หน่วยการหดตัวตามแนวแกนเท่ากับ 0.000050

ε_e = หน่วยการหดตัวตามแนวแกนที่หน่วยแรงเท่ากับ 40% ของหน่วยแรงสูงสุด

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

บทที่ 18
การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength)

บทนำ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของเหล็กเสริมชนิดกลมและชนิดข้ออ้อยที่ฝังในก้อนคอนกรีตตัวอย่างด้วยวิธีการดึง (Pull-Out Test) ทั้งนี้เพราะโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปส่วนใหญ่มักมีการเสริมเหล็กเพื่อช่วยในการรับแรง ไม่ว่าจะเป็นการเสริมเหล็กธรรมดาหรือลวดเหล็กก็ตาม ดังนั้นกำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ของคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เพียงพอจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

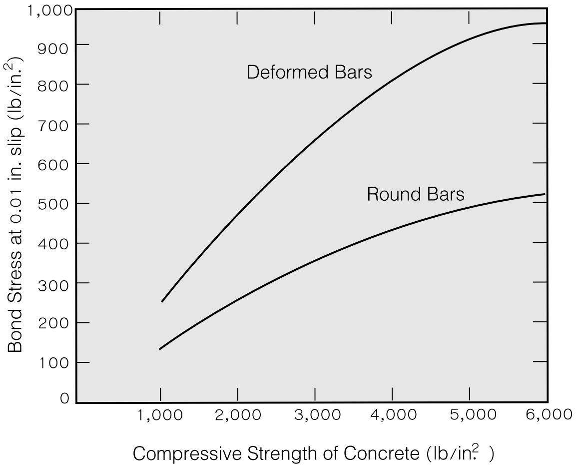
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) เกิดจากการยึดติด (Adhesion) และแรงเสียดทาน (Friction) ของเหล็กเสริมกับซีเมนต์เพสท์ที่แข็งตัวแล้ว แต่มีความยากในการวัดค่าที่แท้จริง ทั้งนี้เพราะมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง เช่น ขณะที่คอนกรีตได้รับการบ่มและแข็งตัว จะเกิดการหดตัว ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลง ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง ถ้าคอนกรีตมีการแตกร้าวหรือน้ำซึมผ่านได้ง่ายจะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายใน ซึ่งจะส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวเช่นกัน นอกจากคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีตเองแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย คือ ขนาดของเหล็กเสริม ชนิดของเหล็กเสริม ตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต (ทำหน้าที่รับแรงดึง แรงอัด หรือแรงดัด) การจี้เขย่าบริเวณเหล็กเสริม ช่องว่างอากาศใต้เหล็กเสริมที่เกิดจากการเยิ้ม คอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะเปียกและแห้งสลับกันหรือไม่ และคอนกรีตต้องอยู่ในสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่จุดเยือกแข็งหรือไม่

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงยังไม่มีวิธีการวัดกำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ที่เป็นมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยการดึง (Pull-Out Test , ASTM C 234) ถือเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการเปรียบเทียบค่ากำลังในการยึดเหนี่ยวของคอนกรีต ซึ่งทำโดย การหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. แล้วฝังเหล็กเสริมไว้ ต่อจากนั้นทำการดึงเหล็กเสริมออก ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีต กับเหล็กเสริม โดยกำลังในการยึดเหนี่ยวสูงสุด (Maximum Bond Strength) สามารถหาได้จากแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่ของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต

ในทางปฏิบัตินั้นถือว่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีต (Bond Strength) มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต คือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตจะเพิ่มตาม และกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยจะมากกว่าเหล็กกลม ดังรูปที่ 1 และพบว่ากำลังในการยึดเหนี่ยวลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ไม่เท่ากันของเหล็กและคอนกรีต

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



รูปที่ 1 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับกำลังอัดของคอนกรีต (จากหนังสือ Concrete Structure, Properties, and Materials; Mehta & Monteiro)*

การทดสอบแรงยึดหนี่ยว ของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม

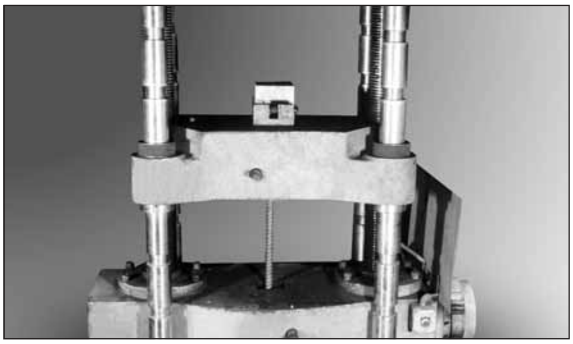
มาตรฐานที่ใช้

ASTM C 234

Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel

อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องทดสอบกำลังดึง
2. อุปกรณ์ทดสอบแรงยึดเหนี่ยว
3. Dial Micrometer
4. Micrometer
5. ไม้บรรทัดเหล็ก



รูปที่ 2 *อุปกรณ์ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวและเครื่องทดสอบแรงดึง*

วิธีทดสอบ

1. หล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. แล้วฝังเหล็กข้ออ้อยหรือเหล็กกลมที่ต้องการทดสอบลงไป เมื่อก้อนตัวอย่างแข็งตัวแล้ว 24 ซม. จึงถอดแบบและบ่มภายในห้องบ่ม เพื่อรอการทดสอบที่ 28 วันต่อไป

2. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมโดย Micrometer และระยะที่ฝังเหล็กลงไปในก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยไม้บรรทัดเหล็ก

3. ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวเข้ากับก้อนตัวอย่าง

4. ติดตั้งก้อนตัวอย่างเข้ากับหัวจับเครื่องทดสอบกำลังดึง และ Dial Micrometer เพื่อวัดระยะเลื่อนของเหล็กเสริม

5. เปิดเครื่องเพื่อดึงเหล็กเสริม โดยควบคุมแรงดึงให้ไม่เกิน 5.78 กก./ตร.ซม./วินาที

6. บันทึกแรงดึงและระยะเลื่อนของเหล็กเสริมทุก 0.02 มม.

7. ทำการทดสอบจนกว่าแรงที่ใช้ดึงเหล็กเสริมถึงจุดสูงสุด หรือเมื่อคอนกรีตเริ่มชำรุดแยกออกจากกัน หรือเมื่อระยะลื่นมีค่ามากกว่า 2.5 มม.

8. เขียนกราฟระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถลและคำนวณหากำลังยึดหนี่ยวสูงสุด (Maximum Bond Stress)

$$\text{กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด}}{\text{พื้นที่เหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต}}$$

9. ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับเหล็กกลม

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

เอกสารอ้างอิง

1. Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02, 1996
2. Concrete Structure, Properties, and Materials, 2nd Edition, P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro, Prentice Hall, New Jersey 1993
3. Design and Control of Concrete Mixtures, 13th Edition, Steven H. Kosmatka and William C. Panarese, Portland Cement Association, Illinois
4. Properties of Concrete, 3rd Edition, A. M. Neville, Longman Scientific & Technical, New York 1981
5. คอนกรีตเทคโนโลยี ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร 2540

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

คณะผู้จัดทำ

คณะที่ปรึกษา

1. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร
2. บุญรอด คุปติทัพหิ
3. วีระพล สูตรสุคนธ์
4. สันติ จรัสกำจรกูล
5. ธงชัย วิวัฒน์สุขไพศาล
6. นฤชา เกษมสำราญ

ผู้เรียบเรียง

1. เมธี บุญเลี้ยงอุปถัมภ์
2. ฉัตรชัย ชูพานิช

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

CPAC

คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด

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