

**การทดสอบวัสดุ: บรรยาย**  
**Material Testing: Lecture**

**เรียบเรียงโดย**

ผศ. ดร. สิริรัชชัช แสงอาทิตย์  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## คำนำ

เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ (Material Testing) เล่มนี้ ได้ถูกเรียบเรียงขึ้นมาด้วยจุดประสงค์ที่จะใช้เป็นเอกสารอ้างอิงอ่านประกอบการเรียนในรายวิชา Material Testing ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจะช่วยให้นักศึกษาที่ไม่สามารถจดคำบรรยายได้ทันได้มีเอกสารที่จะใช้ทบทวนหลังจากการบรรยาย ซึ่งผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะช่วยให้นักศึกษาทำความเข้าใจในเนื้อหาของวิชาได้มากขึ้น สุดท้ายเอกสารการสอนเล่มนี้ยังขาดความสมบูรณ์อยู่มาก ถ้านักศึกษาเห็นควรว่าจะต้องเปลี่ยนแปลงแก้ไขและปรับปรุงในส่วนใด ช่วยกรุณาแจ้งให้ทราบด้วยจักขอบคุนมาก

ผศ. ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มกราคม 2545



## สารบัญ

### บทที่ 1 การเขียนรายงานผลการทดสอบ

1.1 การจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ .....	1-1
1.2 การบรรยายเนื้อหาที่เขียน .....	1-3
1.3 การเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ .....	1-3
1.4 ตาราง.....	1-3
1.5 รูปประกอบ .....	1-5

### บทที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 บทนำ .....	2-1
2.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน .....	2-1
2.3 Normal Distribution .....	2-4
2.4 Standard normal variable เมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนจำกัด.....	2-7

### บทที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบทางกล

3.1 บทนำ .....	3-1
3.2 ประเภทของการทดสอบทางกล .....	3-1
3.3 การออกแบบการทดสอบ .....	3-2
3.4 การเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	3-3
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	3-3
3.6 การวัด.....	3-3

### บทที่ 4 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

4.1 หน่วยแรงและความเครียด (Stress และ Strain) .....	4-1
4.2 แผนภาพหน่วยแรง-ความเครียด (Stress-Strain Diagram) .....	4-1
4.3 พฤติกรรมของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ .....	4-3
4.4 กฎของฮุก (Hooke's law) .....	4-6
4.5 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) .....	4-8
4.6 การวิบัติของวัสดุเนื่องจากการคืบและการล้า .....	4-9

### บทที่ 5 ลักษณะพิเศษของการทดสอบ

5.1 บทนำ .....	5-1
----------------	-----

5.2 การทดสอบแรงดึง (Tension test) .....	5-1
5.3 การทดสอบแรงกดอัด (Compression test) .....	5-9
5.4 การทดสอบแรงเฉือน (Shear test) .....	5-14
5.5 การทดสอบการดัด (Bending test) .....	5-21
5.6 การทดสอบการล้า (Fatigue test) .....	5-29

## **บทที่ 6 คุณสมบัติของวัสดุ**

6.1 บทนำ.....	6-1
6.2 เหล็กโครงสร้าง (Structural steel) .....	6-1
6.3 คอนกรีต (Concrete) .....	6-7
6.4 ไม้ (Timber) .....	6-11
6.5 อิฐดินเผา (Masonry) .....	6-17
6.6 อลูมิเนียม (Aluminum) .....	6-19
6.7 พลาสติกเสริมใยแก้ว (Fiber-Reinforced Plastic Composite) .....	6-22

## **หนังสืออ้างอิง**

## บทที่ 1

### การเขียนรายงานผลการทดสอบ

#### 1.1 การจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ

การจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบที่ถูกต้อง สมบูรณ์ และเป็นระเบียบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบวัสดุเพราะจะทำให้ผู้ใช้ผลการทดสอบเข้าใจในผลการทดสอบอย่างถูกต้อง

ในการจัดทำรายงานผลการทดสอบในวิชานี้จะต้องมีลำดับการจัดเรียงเนื้อหาของรายงานดังนี้

1. ปกหน้า (cover sheet)
2. รายละเอียดของปัญหา (statement of the problem)
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ (materials, apparatus, and methods of testing)
4. สรุปย่อผลการทดสอบ (summary of the test results)
5. สรุปและวิจารณ์ผล (conclusion and discussion)
6. ภาคผนวก (appendixes)

##### 1.1.1 ปกหน้า

ปกหน้าของรายงานจะบอกถึงรายละเอียดเกี่ยวกับรายงาน เช่น ชื่อเรื่องของปฏิบัติการ ใครเป็นผู้ทำการทดสอบและเขียนรายงาน วันที่ทำการทดสอบ และวันที่ส่งรายงานผลการทดสอบ เป็นต้น รูปที่ 1-1 แสดงตัวอย่างของปกหน้าของรายงานที่จะใช้เป็นแบบอย่างในการเขียนรายงานผลการทดสอบในวิชานี้

##### 1.1.2 รายละเอียดของปัญหา

ส่วนนี้ของรายงานจะต้องบอกถึงวัตถุประสงค์ของการทดสอบ ขอบเขตของการทดสอบ และมาตรฐานการทดสอบที่ใช้

##### 1.1.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ

ส่วนนี้ของรายงานจะบอกถึงรายละเอียดของขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งมักจะถูกนำเสนอโดยการเขียนรูปของตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือที่ใช้อย่างคร่าวๆ พร้อมทั้งให้คำอธิบายกำกับในส่วนที่เห็นว่าสำคัญ ซึ่งควรเขียนให้สั้นและเข้าใจง่าย

##### 1.1.4 สรุปย่อผลการทดสอบ

ส่วนนี้ของรายงานจะเป็นเสนอผลการทดสอบและผลการคำนวณ ซึ่งมักจะถูกแสดงอยู่ในรูปของตาราง (tables) แผนภาพ (diagrams) กราฟ (graphs) และแผนภูมิ (charts) โดยจะต้องจัดเรียงตาราง แผนภาพ กราฟ และแผนภูมิให้เป็นระเบียบ มีลำดับการนำเสนอที่เป็นขั้นตอน มีหมายเลขกำกับพร้อมคำอธิบายอย่างชัดเจน โดยทั่วไปแล้ว ตาราง แผนภาพ กราฟ และแผนภูมิจะต้องมีความชัดเจน เข้าใจง่าย และแสดงถึงความสัมพันธ์ของสิ่งที่ต้องการทดสอบหาอย่างชัดเจน



**Suranaree University of Technology**  
**Institute of Engineering**

410 214 Material Testing

Experiment #1

Inspection of the Testing laboratory

Submitted to

Dr. Sittichai Seangatith

Submitted by

Mr. Dang Dumdee

B4100000

Group M3A

Date Performed: January 11, 1999

Due Date: January 18, 1999

รูปที่ 1-1 ตัวอย่างปกหน้าของรายงานผลการทดสอบ



### 1.1.5 สรุปและวิจารณ์ผล

ส่วนนี้ของรายงานจะเป็นการนำเสนอบทสรุป บทวิจารณ์ และบทวิเคราะห์ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่ได้ พฤติกรรมของวัสดุและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ โดยจะต้องกล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้มีความแม่นยำเพียงใด มีความน่าเชื่อถือขนาดไหน ตรงกับที่ได้คาดหมายไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลที่ใช้อ้างอิงในเอกสารอ้างอิงต่างๆ และถ้าไม่เป็นไปตามที่คาดหมายแล้ว สาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนคืออะไร โดยทั่วไปแล้ว บทสรุปและบทวิจารณ์การทดสอบจะถูกเขียนขึ้นมาเป็นข้อๆ และเป็นลำดับ ข้อความที่ใช้ควรมีความกระชับ ได้ใจความครอบคลุมถึงจุดประสงค์และขอบเขตของการศึกษาที่ได้ตั้งไว้ในตอนต้นอย่างสมบูรณ์

### 1.1.6 ภาคผนวก

ส่วนนี้ของรายงานจะแสดงถึงรายละเอียดของมาตรฐานการทดสอบ ตัวอย่างการคำนวณ ผลการทดสอบที่วัดได้ (ข้อมูลดิบ) และข้อมูลของวัสดุที่ใช้อ้างอิง

### 1.2 การบรรยายเนื้อหาที่เขียน

การบรรยายในรายงานผลการทดสอบเป็นการอธิบายถึงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งอาจจะเป็นตัวเลขและรูปภาพ ให้สอดคล้องและสัมพันธ์กับพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของวัสดุที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นการเขียนบรรยายจะต้องมีความกระชับ ชัดเจน ถูกต้อง และสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ผลการทดสอบสามารถเข้าใจผลที่ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

ในการเขียนบรรยายนั้น การใช้ตัวย่อและสัญลักษณ์จะต้องมีความสอดคล้องกันตลอดรายงาน นอกจากนั้นแล้ว การสะกดคำ การใช้คำ การใช้เว้นวรรค และย่อหน้าควรที่จะต้องมีความถูกต้องด้วย ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้รายงานดังกล่าวดูเป็นระเบียบและสวยงาม

### 1.3 การเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์

สมการต่างๆ มักจะถูกใช้ในเขียนรายงานผลการทดสอบเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เรากำลังทดสอบหา สมการที่มีความสำคัญจะต้องระบุหมายเลขของสมการให้เหมาะสม ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1-2 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการอธิบายสมการแรงวิกฤติ (critical load) และสมการหน่วยแรงวิกฤติ (critical stress) ของเสา นอกจากนั้นแล้ว สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการจะเป็นตัวพิมพ์ (font) แบบ “*italic*” และจะต้องเป็นสากล เช่น  $\sigma$  ใช้แทนหน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) และ  $\tau$  ใช้แทนหน่วยแรงเฉือน (shear stress) เป็นต้น

### 1.4 ตาราง

ตารางมักถูกใช้ในการแสดงผลการทดสอบและผลการคำนวณ ดังนั้น ตารางจะต้องมีความชัดเจน มีความสอดคล้อง และมีความสมบูรณ์ในตัวเอง โดยตารางจะต้องมีคำบรรยายเพื่อแสดงรายละเอียดว่าตารางดังกล่าวอธิบายถึงสิ่งใดอย่างย่อๆ นอกจากนั้นแล้ว จะต้องมีการบ่งบอกว่าแต่ละ column และ row ของตารางแทนตัวแปรอะไร และมีหน่วยเป็นอะไร รูปที่ 1-3 แสดงตัวอย่างของตารางที่มีลักษณะที่ถูกต้อง

ในกรณีที่เสาถูกรองรับโดย pin supports ที่ปลายทั้งสองด้านของเสา เราจะหาค่าแรงวิกฤติ (critical load)  $P_{cr}$  ของเสาได้จากสมการ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

เมื่อ  $E$  เป็นค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเสา

$I$  เป็นค่า moment of inertia ที่น้อยที่สุดของหน้าตัดของเสา

$L$  เป็นค่าความยาวของเสา

เนื่องจาก  $I$  มีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของเสา  $A$  ในรูป  $I = Ar^2$  เมื่อ  $r$  คือค่า radius of gyration ของหน้าตัดของเสา ดังนั้น เมื่อแทนสมการของ  $I$  ดังกล่าวลงในสมการที่ 3 และทำการจัดเรียงเทอมใหม่ เราจะได้สมการที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงวิกฤติของเสา  $\sigma_{cr}$  ในรูป

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (4)$$

เมื่อทำการจัดเรียงเทอมใหม่อีกครั้ง เราจะได้สมการของอัตราส่วนความชลูด (slenderness ratio)  $L/r$  ของเสาในรูป

$$\frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{cr}}}$$

รูปที่ 1-2 ตัวอย่างการเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบการโก่งเดาะของเสาเหล็ก

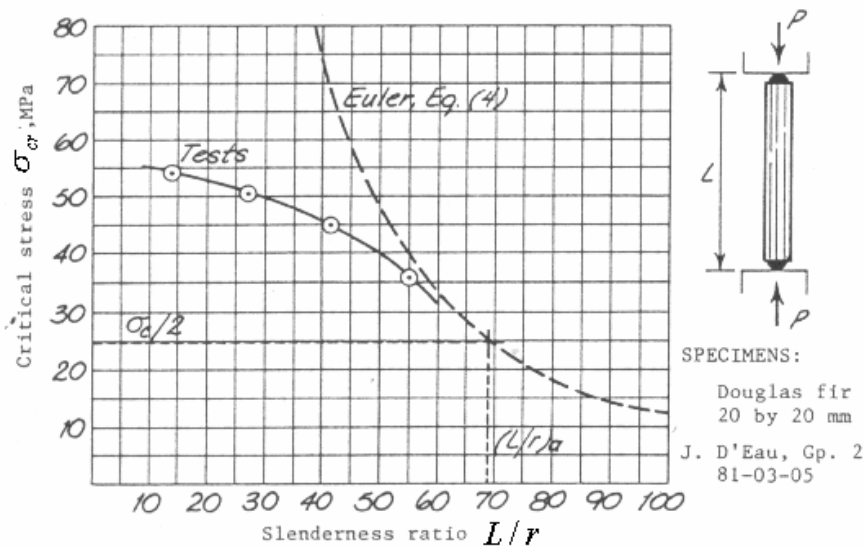
Specimen No.	Length, $L$ (mm)	Slenderness Ratio, $(L/r)$ (mm <sup>2</sup> )	Critical Loads, $P_{cr}$ (kN)	Critical Stress, $\sigma_{cr}$ (MPa)
1	80.2	13.9	21.4	53.5
2	159.4	27.6	20.0	50.1
3	241.0	41.7	17.9	44.7
4	320.7	55.5	14.2	35.5

รูปที่ 1-3 ตัวอย่างตารางที่มีลักษณะที่เหมาะสม

### 1.5 รูปประกอบ

ในรายงานผลการทดสอบ รูปประกอบหมายถึง ภาพวาดของตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ แผนภาพ กราฟ แผนภูมิ และรูปถ่ายต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการแสดงรายละเอียดและอธิบายส่วนต่างๆ ของรายงานผลการทดสอบให้มีความชัดเจนมากขึ้น ดังที่มีคำพูดว่า "รูปภาพหนึ่งรูปแทนคำอธิบายเป็นร้อยเป็นพันคำ" ดังนั้น การจัดเตรียมรูปจึงต้องกระทำอย่างละเอียดถูกต้อง มีขนาดที่เหมาะสม และมีความสมบูรณ์ที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูปต่างๆ ต้องมีหมายเลขและคำอธิบายกำกับรูปด้วยเสมอ

ในการเขียนกราฟจะต้องมีการตั้งแกน โดยมีคำอธิบายกำกับให้เข้าใจว่าแต่ละแกนแทนตัวแปรอะไร การแบ่งสเกล (scale) ของกราฟจะต้องมีความละเอียดที่พอเพียงและครอบคลุมถึงส่วนที่เรากำลังทดสอบหาให้ครบถ้วน จุดต่างๆ ของข้อมูลจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ถ้าข้อมูลมีหลายชุดแล้ว สัญลักษณ์ที่ใช้แทนข้อมูลแต่ละชุดควรมีความแตกต่างกันที่เห็นได้ชัดเจน นอกจากนั้นแล้ว เส้นกราฟจะต้องมีความคมชัดและเส้นกราฟที่แสดงถึงชุดข้อมูลที่ต่างกันจะต้องมีสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันพร้อมกับมีคำอธิบายแต่ละเส้นที่ชัดเจนด้วย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1-4



รูปที่ 1-4 ตัวอย่างของกราฟที่เหมาะสม



## บทที่ 2

### การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 2.1 บทนำ

การวัดหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะมีความผิดพลาด (error) ที่เราไม่สามารถควบคุมได้เกิดขึ้นด้วยเสมอ ซึ่งมักจะมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบทั้งขนาด รูปร่าง และวัสดุที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบ ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด และการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบไม่ดีพอ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว การทำการทดสอบที่เหมือนกันสองครั้งมักจะให้ผลการทดสอบที่ไม่เท่ากัน แต่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น เราจะต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อที่จะประมาณความเป็นไปได้และความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

#### 2.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean และ standard deviation)

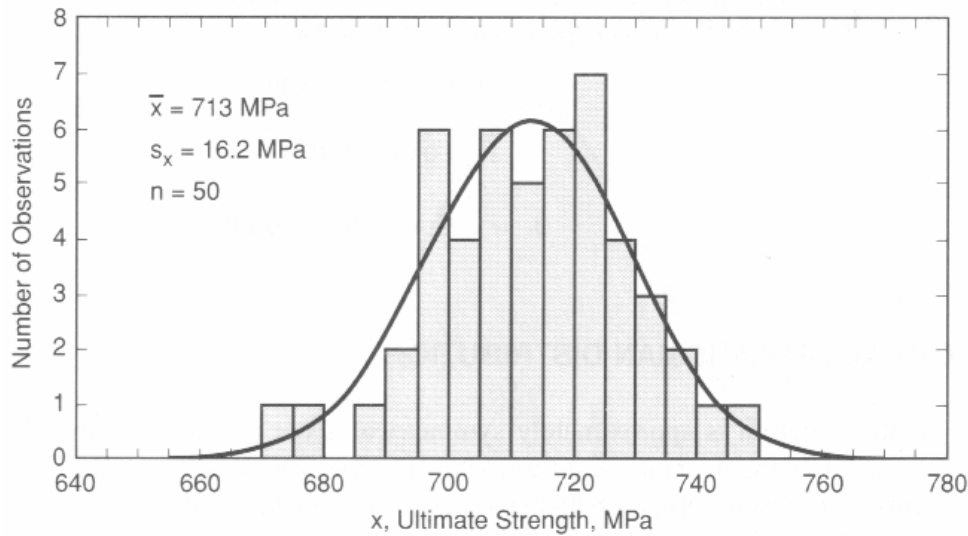
โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติทางกลของวัสดุจะมีความเบี่ยงเบนหรือแปรปรวนทางสถิติ (statistical variation) เมื่อเราทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุซ้ำกันหลายๆ ครั้ง โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีลักษณะเหมือนกันแล้ว ข้อมูลที่ได้มักจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้น เมื่อเราได้ข้อมูลมาแล้ว เรามักจะทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างทดสอบ (sample mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างทดสอบ (sample standard deviation) นอกจากนั้นแล้ว ข้อมูลที่ได้มักจะถูกนำมาเขียนแผนภาพ histogram เพื่อศึกษาการกระจายของข้อมูล โดยที่แผนภาพ histogram จะเป็นแผนภูมิแท่ง (bar chart) ที่มีแกนอนแสดงถึงช่วงค่าต่างๆ ของข้อมูลที่ทดสอบได้และแกนตั้งแสดงถึงจำนวนของตัวอย่างทดสอบที่มีคุณสมบัติทางกลที่อยู่ในช่วงต่างๆ ดังกล่าว

รูปที่ 2-1 แสดงตัวอย่างแผนภาพ histogram ของกำลังประลัย (ultimate strength) ของเหล็ก SAE 4340 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (tension test) ตัวอย่างทดสอบจำนวน 50 ตัวอย่าง ซึ่งเราจะเห็นได้จากแผนภาพว่า ตัวอย่างทดสอบเหล็กดังกล่าวมีค่า ultimate strength ที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบางตัวอย่างทดสอบมีค่า ultimate strength ที่สูงมากถึง 740 MPa แต่บางตัวอย่างทดสอบให้มีค่า ultimate strength ที่ต่ำเพียง 680 MPa

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างทดสอบ (sample mean) เป็นค่ากึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมด โดยจะมีตัวอย่างทดสอบประมาณครึ่งหนึ่งที่ให้ข้อมูลสูงกว่าค่าเฉลี่ยและอีกครึ่งหนึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ย จากข้อมูลของค่า ultimate strength ของเหล็กที่ได้ เราจะหาค่าเฉลี่ย ultimate strength ของเหล็ก (sample mean)  $\bar{x}$  ได้โดยใช้สมการ

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

โดยที่  $x_i$  เป็นค่า ultimate strength ของเหล็กที่ได้จากการทดสอบครั้งที่  $i$  และ  $i$  มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง  $n$  ซึ่งในที่นี้ เราจะกำหนดให้  $\bar{x} = 713$  MPa ดังนั้น จะมีตัวอย่างทดสอบประมาณครึ่งหนึ่งให้ค่า ultimate strength สูงกว่าค่าดังกล่าวและอีกประมาณครึ่งหนึ่งให้ค่า ultimate strength ต่ำกว่าค่าดังกล่าว



รูปที่ 2-1 ตัวอย่างของ histogram ของ ultimate strength ของเหล็ก SAE 4340

จากแผนภาพ histogram ในรูปที่ 2-1 เราจะเห็นได้ว่า ข้อมูลส่วนใหญ่จะมีค่าที่เบี่ยงเบนออกจากค่า sample mean โดยที่ค่า ultimate strength ของเหล็กโดยส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกับ sample mean อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนออกจาก sample mean สูงมากแล้ว เราจะพบว่า ค่า ultimate strength ของเหล็กโดยส่วนใหญ่จะต่างกับค่า sample mean ที่สูงมากด้วย โดยทั่วไปแล้ว เราจะวัดค่าค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลของข้อมูลจาก sample mean โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างทดสอบ (sample standard variation) หรือ  $s_x$  โดยที่

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}}$$

โดยที่  $x_i$  เป็นค่า ultimate strength ของเหล็กที่ได้จากการทดสอบครั้งที่  $i$  และ  $i$  มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง  $n$  ในที่นี้ เราจะกำหนดให้  $s_x = 16.2$  MPa ลักษณะที่สำคัญของค่า sample standard variation คือ จะบ่งบอกถึงคุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบและคุณภาพของการทดสอบ

นอกจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างทดสอบแล้ว เราจะสามารถวัดค่าเบี่ยงเบนหรือแปรปรวนของข้อมูลได้โดยใช้ตัวแปรอีกตัวหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์การเบี่ยงเบนของตัวอย่างทดสอบ (sample coefficient of variation) หรือ  $\delta_x$  โดยที่

$$\delta_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$$

ค่า sample coefficient of variation  $\delta_x$  นี้จะไม่มีหน่วย แต่มักจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ เช่น จากตัวอย่าง  $\delta_x = (16.2/713)100\% = 8.3\%$  เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วค่า  $\delta_x$  ของคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจะมีค่าเท่าใดก็ตาม เช่น ค่า yielding strength ของเหล็กมักจะมีค่า  $\delta_x$  ประมาณ 7% ขณะที่ค่าเฉลี่ยของ yielding strength จะมีค่าต่างกันถึง 10 เท่าจาก 200 MPa ถึง 2000 MPa ก็ตาม เป็นต้น ตารางที่ 2-1 แสดงค่า sample coefficient of variation ของคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

**ตารางที่ 2-1** ค่า sample coefficient of variation ของคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	$\delta_x$ (%)
Yielding strength ของโลหะ	7
Ultimate strength ของโลหะ	5
Modulus of elasticity ของโลหะ	5
Compressive strength ของคอนกรีต	15
กำลังของไม้	15
จำนวนรอบที่ก่อให้เกิดการวิบัติของ fatigue test	50

เราควรทราบด้วยว่า ค่า sample mean  $\bar{x}$  และค่า sample standard variation  $s_x$  เป็นค่าเฉลี่ยและค่า standard variation ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบจำนวนจำกัด  $n$  ตัวอย่างทดสอบเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากค่า true mean  $\mu$  และค่า true standard variation  $\sigma$  ที่เป็นค่าเฉลี่ยจริงและค่า standard variation จริงที่จะหาได้จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่มีจำนวนมหาศาล

#### ตัวอย่างที่ 2-1

จากการทดสอบหาค่าหน่วยแรงวิกฤติ (critical stress) ของเสาเหล็กจำนวน 10 ตัวอย่างทดสอบ เราได้ผลการทดสอบดังที่แสดงในตารางที่ 2-2 จงหาค่า sample mean  $\bar{x}$  ค่า sample standard variation  $s_x$  และค่า coefficient of variation  $\delta_x$  ของข้อมูลดังกล่าว

**ตารางที่ 2-2** ค่าหน่วยแรงวิกฤติ (critical stress) ของเสาเหล็ก

ตัวอย่างทดสอบที่	ค่า critical stress ของเสาเหล็ก (MPa)
1	45.6
2	48.9
3	52.2
4	59.0
5	51.7
6	54.0
7	44.5
8	46.7
9	52.2
10	54.4

ค่า sample mean

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ &= \frac{509.2}{10} \\ &= 50.9 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ค่า sample standard variation

$$\begin{aligned}s_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{182.18}{9}} \\ &= 4.50 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ค่า coefficient of variation

$$\begin{aligned}\delta_x &= \frac{s_x}{\bar{x}} \\ &= \frac{4.50}{50.9} \\ &= 0.0884 = 8.84\%\end{aligned}$$

### 2.3 Normal distribution

ถ้าการเบี่ยงเบนหรือการแปรปรวน (variation) ของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีความสมมาตรรอบค่าเฉลี่ยของข้อมูลแล้ว เราจะสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายแบบปกติ (normal distribution) ซึ่งจะมีเส้นกราฟเป็นรูประฆังคว่ำ ดังที่แสดงโดยกราฟเส้นทึบในรูปที่ 2-1

ในการคำนวณหา normal distribution ของข้อมูลนั้น เรามักจะเปลี่ยนตัวแปร  $x$  ให้อยู่ในรูปของ standard normal variable  $z$  โดยที่

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

ซึ่งตัวแปร  $z$  นี้จะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยที่แท้จริง (true mean หรือ  $\mu$ ) ของข้อมูล และเนื่องจากตัวแปร  $z$  เป็นค่าที่ได้จาก  $x - \mu$  ที่ถูกหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจริง (true standard variation หรือ  $\sigma$ ) ของข้อมูล ดังนั้น ตัวแปร  $z$  นี้จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่า  $\sigma$  นอกจากนั้นแล้ว แกนตั้งของกราฟรูประฆังของ normal distribution จะหาได้จากสมการ

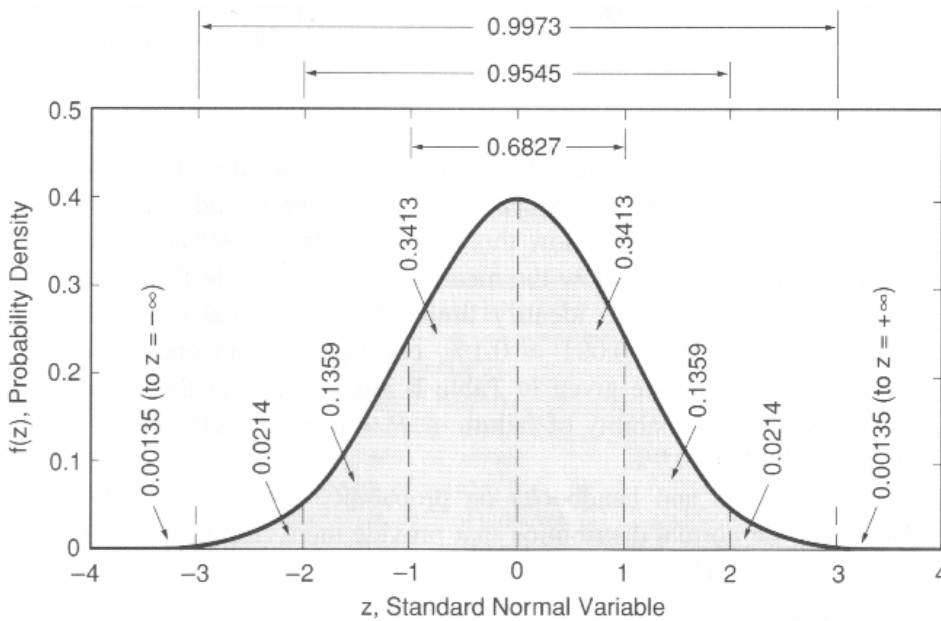
$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

ซึ่งมักจะถูกเรียกว่า probability density function

สมมุติว่าเราใช้จำนวนของตัวอย่างทดสอบจำนวนมากเพื่อหาค่า  $\bar{x}$  และค่า  $s_x$  ดังนั้น ค่า  $\bar{x}$  และค่า  $s_x$  ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับ true mean  $\mu$  และ true standard variation  $\sigma$  และถ้ากำหนดให้การกระจายของข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปของ normal distribution ดังที่แสดงในรูปที่ 2-2 จากรูป เราจะเห็นได้ว่า



1.  $\int_{-1}^1 f(z)dz = 0.6827$  หรือ 68.27% ของข้อมูลผลการทดสอบอยู่ในช่วง  $\mu \pm \sigma$
2.  $\int_{-2}^2 f(z)dz = 0.9545$  หรือ 95.45% ของข้อมูลผลการทดสอบอยู่ในช่วง  $\mu \pm 2\sigma$
3.  $\int_{-3}^3 f(z)dz = 0.9973$  หรือ 99.73% ของข้อมูลผลการทดสอบอยู่ในช่วง  $\mu \pm 3\sigma$
4.  $\int_{-4}^4 f(z)dz = 0.99994$  หรือ 99.994% ของข้อมูลผลการทดสอบอยู่ในช่วง  $\mu \pm 4\sigma$
5.  $\int_{-\alpha}^{\alpha} f(z)dz = 1.0000$  หรือพื้นที่ใต้ normal distribution curve ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 2-2 กราฟรูประฆังของ normal distribution

พิจารณาผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก SAE 4340 ดังที่แสดงในรูปที่ 2-1 ถ้าเราใช้ค่าเฉลี่ยของ ultimate strength  $\bar{x} = 713$  MPa ในการออกแบบโครงสร้าง เราจะพบว่า ที่จุดวิกฤติของโครงสร้าง ชิ้นส่วน ของโครงสร้างที่เราทำการออกแบบมีความน่าจะเป็นในการวิบัติ (probability to failure หรือ  $P$ ) เท่ากับ 50% ทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าดังกล่าวเป็นค่ากึ่งกลางของค่า ultimate strength ที่เราทดสอบได้ ซึ่งจะมีตัวอย่าง ทดสอบครั้งหนึ่งให้ค่า ultimate strength สูงกว่าค่าเฉลี่ยและจะมีตัวอย่างทดสอบอีกครั้งหนึ่งให้ค่า ultimate strength ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ดังนั้น โดยทั่วไปแล้ว เราจะใช้ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในการ ออกแบบโครงสร้าง ซึ่งค่าดังกล่าวจะหาได้โดยการพิจารณากราฟของ normal distribution

พิจารณาแผนภาพ normal distribution ดังที่แสดงในรูปที่ 2-2 และจากสมการ  $z = (x - \mu) / \sigma$  เรา พบว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจะสอดคล้องกับค่า standard normal variable  $z = 0$  ถ้าเราทำการ integrate สมการ  $f(z)$  จาก 0 ถึง  $\alpha$  แล้ว เราจะได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่อยู่เหนือค่า  $z = 0$  มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ 50% โดยค่าที่ได้

นี่จะเป็นค่าความน่าเชื่อถือ  $R$  (reliability) หรือความเป็นไปได้ที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะไม่เกิดการวิบัติที่จุดวิกฤติของโครงสร้าง และถ้าเราทำการ integrate สมการ  $f(z)$  จาก  $-\alpha$  ถึง 0 แล้วเราจะได้อ่าพื้นที่ใต้กราฟที่อยู่ใต้ค่า  $z = 0$  มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ 50% ซึ่งค่าที่ได้นี้จะแสดงถึงความน่าจะเป็นในการที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ ( $P$ ) ที่จุดวิกฤติของโครงสร้าง

ความสัมพันธ์ของค่าความน่าเชื่อถือ  $R$  (reliability) และค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติ  $P$  (probability to failure) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เราใช้ในการออกแบบจะอยู่ในรูป

$$R = 1 - P$$

เนื่องจากเราจะต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในการออกแบบโครงสร้าง ดังนั้น ค่า standard normal variable  $z$  ที่เราจะใช้ในการออกแบบจะต้องมีค่าต่ำกว่าศูนย์ โดยทั่วไปแล้วเพื่อความปลอดภัยของโครงสร้าง เราจะใช้ค่า  $z$  เท่ากับหรือน้อยกว่า -3 ในการออกแบบ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าของข้อมูล  $x = \mu - 3\sigma$  เมื่อเราทำการ integrate สมการ  $f(z)$  จาก  $-\alpha$  ถึง -3 แล้วเราจะได้อ่าพื้นที่ใต้กราฟที่อยู่เหนือค่า  $z = -3$  มีค่าเท่ากับ 0.99865 หรือมีความเป็นไปได้ที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะไม่เกิดการวิบัติ ( $R$ ) ที่จุดวิกฤติของโครงสร้างเท่ากับ 99.865% และในทางกลับกัน ความน่าจะเป็นในการที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ ( $P$ ) ที่จุดวิกฤติของโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับ  $1 - 0.99865 = 0.00135$  หรือ 0.135% ดังนั้น จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 2-1 และถ้าเราสมมติให้ค่า  $\bar{x}$  และค่า  $s_x$  เป็นค่าประมาณของค่า  $\mu$  และ  $\sigma$  แล้ว เนื่องจาก  $1/0.135 \approx 740$  เราจะได้ว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ตัวอย่างทดสอบ 1 ตัวอย่างจากจำนวน 740 ตัวอย่างจะมีค่า ultimate strength  $x$  ต่ำกว่าค่า  $\mu - 3\sigma = 713 - 3(16.2) = 664.4 \text{ MPa}$  ตารางที่ 2-3 แสดงค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติและค่าความน่าเชื่อถือของค่า  $x$  ต่างๆ

ตารางที่ 2-3 ค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติและค่าความน่าเชื่อถือของค่า  $x$

ค่า $x$	ค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติ, $P$ (%)	เศษส่วนของค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติ, $100\% / P$	ค่าความน่าเชื่อถือ, $R$ (%)
$\mu$	50	1/2	50
$\mu - \sigma$	15.9	1/6	84.1
$\mu - 1.28\sigma$	10	1/10	90
$\mu - 2\sigma$	2.28	1/44	97.72
$\mu - 2.33\sigma$	1	1/100	99
$\mu - 3\sigma$	0.135	1/740	99.865
$\mu - 3.09\sigma$	0.1	1/1000	99.9
$\mu - 3.72\sigma$	0.01	1/10000	99.99
$\mu - 4\sigma$	0.00317	1/31600	99.99683

## ตัวอย่างที่ 2-2

จากผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้างจำนวน 121 ตัวอย่างทดสอบพบว่า ค่า yielding stress ของเหล็กดังกล่าวมีค่า sample mean  $\bar{x} = 794$  MPa และค่า sample standard variation  $s_x = 38.6$  MPa และถ้าสมมุติให้ข้อมูลมีการกระจายแบบ normal distribution แล้ว จงทำการประมาณค่า yielding stress ของเหล็กที่ความน่าเชื่อถือ  $R = 99\%$

ความน่าเชื่อถือ  $R = 99\%$  สอดคล้องกับความเป็นไปได้ที่จะเกิดการวิบัติ  $P = 1\%$  หรือ 1 ใน 100 ของตัวอย่างทดสอบจะมีค่า yielding stress ต่ำกว่าค่าดังกล่าว จากตารางที่ 2-2 ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับค่า  $x$  ที่  $\mu - 2.33\sigma$

ถ้าเราสมมุติให้ค่า  $\bar{x}$  และค่า  $s_x$  เป็นค่าประมาณของค่า  $\mu$  และ  $\sigma$  แล้วเราจะได้ว่า ค่า yielding stress ของเหล็กที่มีความน่าเชื่อถือ  $R = 99\%$  มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} x_{99} &= \bar{x} - 2.33s_x \\ &= 794 - 2.33(38.6) \\ &= 704 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2.4 Standard normal variable เมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนจำกัด

การใช้ normal distribution ในการหาค่าของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างจะไม่มีถูกต้อง ในกรณีที่คุณสมบัติเชิงกลดังกล่าวได้มาจากการทดสอบตัวอย่างทดสอบจำนวนน้อยๆ เนื่องจากว่า ค่า sample mean  $\bar{x}$  และค่า sample standard variation  $s_x$  จะมีค่าแตกต่างจากค่า true mean  $\mu$  และค่า true standard variation  $\sigma$  โดยทั่วไปแล้ว เมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนน้อยๆ แล้วเราจะประมาณค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างได้โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น (confidence level หรือ  $C$ ) ที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับความถูกต้องและความมั่นใจในผลการทดสอบ เช่น ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% 95% และ 99% เป็นต้น โดยที่ confidence level  $C = 95\%$  หมายความว่ามีโอกาส 95% ที่ความน่าเชื่อถือจะสอดคล้องกับจริง โดยกำหนดให้ confidence level ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการใช้ค่า true mean  $\mu$  และค่า true standard variation  $\sigma$  มีค่าเท่ากับ 100%

ตารางที่ 2-4 แสดงค่า standard normal variable เมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนจำกัดหรือค่า  $k$  ของระดับความน่าเชื่อถือ  $R = 90\%$   $R = 99\%$  และ  $R = 99.9\%$  สำหรับระดับความไว้วางใจ (confidence level) ที่  $C = 95\%$  ขอให้สังเกตด้วยว่า  $k$  จะมีตัวห้อย (subscript) 2 ตัว ตัวแรกจะแสดงค่าระดับความความน่าเชื่อถือ  $R$  และตัวที่สองจะแสดงระดับความไว้วางใจ  $C$  เช่น  $k_{90,95}$  เป็นค่า standard normal variable เมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนจำกัดที่มีค่าระดับความความน่าเชื่อถือ  $R = 90\%$  และมีระดับความไว้วางใจ  $C = 95\%$  เป็นต้น และเมื่อตัวอย่างทดสอบมีจำนวนอนันต์ (infinity) แล้ว ค่า  $k$  จะสอดคล้องกับค่า  $z$  ดังที่แสดงในตารางที่ 2-3

นอกจากนั้นแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่า  $k$  ได้จากสมการของ U.S. Department of Defense handbook MIL-HDBK-5G เมื่อจำนวนของตัวอย่างทดสอบ  $n \geq 16$  ดังนี้

$$k_{90,95} = 1.282 + e^{\left[0.958 - 0.520 \ln n + \frac{3.19}{n}\right]}$$

$$k_{99,95} = 2.326 + e^{\left[1.340 - 0.522 \ln n + \frac{3.87}{n}\right]}$$

ตารางที่ 2-4 ค่า  $k$  เมื่อ  $R = 90\%$   $R = 99\%$  และ  $R = 99.9\%$  สำหรับ  $C = 95\%$

จำนวนของการทดสอบ $n$	Reliability level		
	$R = 90\%$ $k_{90,95}$	$R = 99\%$ $k_{99,95}$	$R = 99.9\%$ $k_{99.9,95}$
5	3.41	5.74	7.50
10	2.35	3.98	5.20
20	1.93	3.30	4.32
50	1.65	2.86	3.77
100	1.53	2.68	3.54
200	1.45	2.57	3.40
500	1.39	2.48	3.28
Infinity	1.28	2.33	3.09

### ตัวอย่างที่ 2-3

จากตัวอย่างที่ 2-2 จงประมาณค่า yielding stress ของเหล็กที่มีระดับความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวที่  $R = 99\%$  และมีค่า confidence level ที่  $C = 95\%$

เมื่อเราแทนค่า  $n = 121$  ลงในสมการ  $k_{99,95} = 2.326 + e^{\left[1.340 - 0.522 \ln n + \frac{3.87}{n}\right]}$  เราจะได้ว่า

$$k_{99,95} = 2.65$$

ดังนั้น ค่า yielding stress ของเหล็กที่  $R = 99\%$  และที่  $C = 95\%$  มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} x_{99,95} &= \bar{x} - 2.65s_x \\ &= 794 - 2.65(38.6) \\ &= 692 \text{ MPa} \end{aligned}$$

ขอให้สังเกตด้วยว่า ค่า yielding stress ของเหล็กที่ได้มีค่าลดลงจากที่ได้จากตัวอย่างที่ 2-2 เนื่องจากจำนวนการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีจำนวนจำกัด

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดสอบทางกล

#### 3.1 บทนำ

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้างคือ กำลัง (strength) ของวัสดุ ซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อแรงกระทำ (loads) ต่างๆ โดยไม่เกิดการวิบัติ (failure) เช่น ไม่เกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว โครงสร้างที่ถูกออกแบบจะต้องมีความแกร่ง (stiffness) ที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำ โดยที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้

ในการออกแบบโครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุจะมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behavior) ขององค์อาคารของโครงสร้าง แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ถ้าเราไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้มาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น

คุณสมบัติทางกลของวัสดุคือ พฤติกรรมทางกลของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เรามักให้ความสนใจประกอบด้วย กำลัง (strength) ความแกร่ง (stiffness) ความยืดหยุ่น (elasticity) ความเป็นพลาสติก (plasticity) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy capacity)

กำลัง (strength) ของวัสดุเป็นความสามารถของวัสดุที่ใช้ต้านทานต่อแรงกระทำโดยไม่เกิดการวิบัติ ความแกร่ง (stiffness) ของวัสดุเป็นความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงกระทำ ซึ่งค่า modulus of elasticity เป็นตัวบ่งบอกถึงความแกร่งของวัสดุในช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic)

ความยืดหยุ่น (elasticity) ของวัสดุเป็นความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงกระทำ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (permanent set) เกิดขึ้น

ความเป็นพลาสติก (plasticity) ของวัสดุเป็นความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่อวัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงพลาสติก (plastic) โดยไม่เกิดการแตกหัก (rupture)

#### 3.2 ประเภทของการทดสอบทางกล

ประเภทของการทดสอบทางกล (mechanical tests) สามารถแบ่งออกได้โดยการพิจารณาถึงวิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (loading methods) และเงื่อนไขการทดสอบ (testing conditions)

##### 3.2.1 วิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ

วิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเป็นการแยกประเภทของการทดสอบทางกลที่พบเห็นมากที่สุด โดยจะพิจารณาถึงปัจจัย 3 ประการคือ

1. ประเภทของหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทคือ
  - a. การทดสอบแรงดึง (tension test)
  - b. การทดสอบแรงกดอัด (compression test)

- c. การทดสอบแรงเฉือนตรง (direct shear test)
  - d. การทดสอบแรงบิด (torsion test)
  - e. การทดสอบแรงค้ด (flexural test)
2. อัตราการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (rate of loading) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ
    - a. การทดสอบแบบสถิตย์ (static test) เป็นการทดสอบที่มีอัตราการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ จนกระทั่ง อัตราการให้แรงกระทำไม่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบ และระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่ยาวนานนัก
    - b. การทดสอบแบบจลน์ (dynamic test) เป็นการทดสอบที่มีอัตราการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบอย่างรวดเร็ว จนกระทั่ง จะต้องนำผลของความเฉื่อย (inertia effects) เข้ามาพิจารณาด้วย โดยทั่วไปแล้ว dynamic tests จะรวมถึงการทดสอบการกระแทก (impact test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
    - c. การทดสอบระยะยาว (long-term test) เป็นการทดสอบที่มีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเป็นเวลายาวนานมากๆ เช่น การทดสอบการคืบ (creep test) เป็นต้น
  3. จำนวนครั้งที่แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ
    - a. การให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเพียงรอบเดียว ซึ่งส่วนใหญ่ของการทดสอบจะเป็นการทดสอบลักษณะนี้
    - b. การให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเกินกว่า 1 รอบ เช่น การทดสอบการล้า (fatigue test) เป็นต้น

### 3.2.2 เงื่อนไขการทดสอบ

คุณสมบัติทางกลของวัสดุโดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และสารเคมี เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว เราจะพิจารณาแบ่งประเภทการทดสอบตามสภาวะแวดล้อมนั้นๆ เช่น การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

### 3.3 การออกแบบการทดสอบ

ในการออกแบบการทดสอบ เราควรที่จะต้องคำนึงถึงความสำคัญของการทดสอบ ความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ ความสามารถในการทำการทดสอบซ้ำ ความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบ และค่าใช้จ่ายในการทดสอบ ดังนั้น เราจะต้องตอบคำถามพื้นฐานดังต่อไปนี้ ก่อนที่เราจะออกแบบการทดสอบ

1. อะไรเป็นสิ่งที่เรากำลังจะทดสอบหา?
2. การทดสอบประเภทใดบ้างที่จะให้คำตอบแก่เรา?
3. เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบกับสภาพการใช้งานจริงของวัสดุได้อย่างไร?
4. อะไรคือข้อจำกัดของการทดสอบที่เราเลือกใช้?
5. เราต้องการความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบระดับไหน?
6. ลักษณะของตัวอย่างทดสอบควรจะเป็นอย่างไร?

## 7. จำนวนของตัวอย่างทดสอบที่จะต้องใช้ควรมีจำนวนเท่าใด?

### 3.4 การเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบจะต้องถูกเลือกและจัดเตรียมขึ้นมาเป็นอย่างดี โดยเราจะต้องปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบที่ใช้อ้างอิง เช่น มาตรฐานของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testings and Materials หรือ ASTM) เป็นต้น ของวัสดุแต่ละชนิดอย่างเคร่งครัด เช่น ซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C183 อิฐดินเผาตามมาตรฐาน ASTM C67 อิฐบล็อกตามมาตรฐาน ASTM C143 และไม้ตามมาตรฐาน ASTM D143 เป็นต้น โดยจะต้องให้มีความคลาดเคลื่อนของขนาดและรูปร่างอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนั้นแล้ว เราจะต้องเตรียมจำนวนของตัวอย่างทดสอบให้มีจำนวนมากเพียงพอในการทดสอบในแต่ละชุดของการทดสอบ

### 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ในการเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเราจะคำนึงถึงปัจจัย 3 ประการคือ

1. จุดประสงค์ของการทดสอบ
2. ความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือที่เราต้องการ
3. ค่าใช้จ่าย

### 3.6 การวัด

ในการทดสอบวัสดุนั้น นอกจากเราต้องสังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบแล้ว เราจะต้องทำการวัดค่าต่างๆ ที่เราสนใจ โดยทั่วไปแล้ว เราจะต้องวัดความยาว แรงกระทำ น้ำหนัก ความดัน ระยะเวลา และอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งเราต้องทำด้วยความรอบคอบและระมัดระวัง เพื่อให้ความผิดพลาด (error) เกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้ว เราจะแบ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบออกเป็น 2 ประเภทคือ ความผิดพลาดที่เป็นระบบ (systematic error) และความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ (accidental error)

systematic error เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างมีระบบและอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของค่าจริงที่เราต้องการวัด โดยทั่วไปแล้ว ถ้าเราทราบความสัมพันธ์ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับสิ่งที่เราต้องการวัด เช่น มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง เป็นต้น เราจะสามารถปรับแก้ความผิดพลาดชนิดนี้ออกไปจากการวัดได้โดยง่าย เช่น เมื่อรถยนต์วิ่งด้วยความเร็ว 100 km/h แล้ว เครื่องวัดความเร็ววัดความเร็วรถยนต์ได้ 99 km/h ดังนั้น ถ้าความผิดพลาดดังกล่าวเป็นความผิดพลาดที่เป็นระบบแล้ว เราพบว่า เมื่อรถยนต์วิ่งด้วยความเร็ว 110 km/h แล้ว เครื่องวัดความเร็วจะวัดความเร็วรถยนต์ได้ 108.9 km/h เป็นต้น

accidental error เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างไม่เป็นระบบและจะอยู่ทั้งทางด้านมากกว่าค่าจริงและน้อยกว่าค่าจริงที่เราต้องการวัด เช่น ถ้าเราทำการวัดความยาวของตัวอย่างทดสอบ ที่ตำแหน่งเดียวกัน เป็นจำนวน 5 ครั้งโดยคน 5 คนแล้ว เราพบว่า ค่าที่อ่านได้จะมีทั้งมากกว่าค่าที่เป็นจริงและน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว เราจะไม่สามารถปรับแก้ความผิดพลาดชนิดนี้ให้ถูกต้องได้ แต่จะใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติลดค่าความผิดพลาดนี้ลงได้

ความเที่ยงตรง (accuracy) ของเครื่องมือวัดคือความไว (sensitivity) ของเครื่องมือวัดในการตอบสนองต่อพฤติกรรมของวัสดุและค่าน้อยที่สุดที่อ่านได้ (least reading) ของเครื่องมือวัดดังกล่าว เช่น dial gauge ที่ตอบสนองต่อการยืดตัวของตัวอย่างทดสอบที่ 0.001 mm จะมีความไวมากกว่า dial gauge ที่ตอบสนองต่อการยืดตัวของตัวอย่างทดสอบที่ 0.01 mm และ dial gauge ที่มีค่า least reading ที่ 0.001 mm จะมีความเที่ยงตรงมากกว่า dial gauge ที่มีค่า least reading ที่ 0.01 mm เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว ความเที่ยงตรงจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำ (precision) ของเครื่องมือวัด



## บทที่ 4

### พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

#### 4.1 หน่วยแรงและความเครียด (stress และ strain)

ในการทดสอบแรงดึง (tension test) เราจะให้แรง (load)  $P$  กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (specimen) และวัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation)  $\delta$  ของตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างทดสอบ

stress บ่งบอกถึงความเข้มข้น (intensity) ของแรงภายใน (internal force) ที่กระทำอยู่บนระนาบพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น  $\text{N/m}^2$  เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว เราจะแบ่งหน่วยแรงออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางที่แรงกระทำกับพื้นที่คือ หน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) และหน่วยแรงเฉือน (shear stress)

หน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) หรือ  $\sigma$  คือความเข้มข้นของแรงภายในที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ถ้าหน่วยแรงตั้งฉากกระทำกับพื้นที่หน้าตัดในลักษณะดึงออก หน่วยแรงนี้จะถูกเรียกว่า หน่วยแรงดึง (tensile stress) ถ้าหน่วยแรงตั้งฉากกระทำกับพื้นที่หน้าตัดในลักษณะกดอัด หน่วยแรงนี้จะถูกเรียกว่า หน่วยแรงกดอัด (compressive stress)

หน่วยแรงเฉือน (shear stress) หรือ  $\tau$  คือความเข้มข้นของแรงภายในที่กระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

strain เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบต่อหนึ่งหน่วยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ เช่นเดียวกับในกรณีของหน่วยแรง เราจะแบ่งความเครียดออกเป็น 2 ประเภทคือ ความเครียดตั้งฉาก (normal strain) และความเครียดเฉือน (shear strain)

ความเครียดตั้งฉากเป็นการยืดตัว (elongation) หรือการหดตัว (contraction) ของส่วนของเส้นตรงบนตัวอย่างทดสอบต่อหนึ่งหน่วยความยาวของส่วนของเส้นตรงนั้น มีหน่วยวัดเป็นความยาว/ความยาว

ความเครียดเฉือน (shear strain) เป็นการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนของเส้นตรงสองเส้นบนตัวอย่างทดสอบ ที่เริ่มต้นทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน มีหน่วยวัดเป็นเรเดียน (radian)

#### 4.2 แผนภาพหน่วยแรง-ความเครียด (stress-strain diagram)

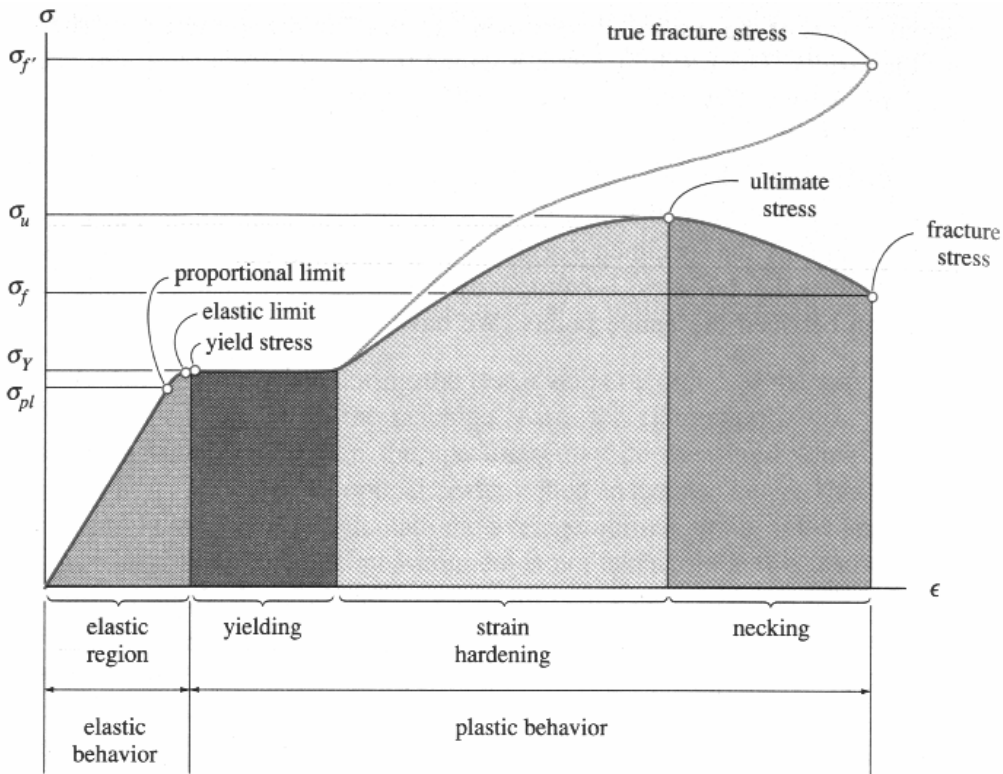
ในการทดสอบแรงดึง ข้อมูลของแรงดึงและการยืดตัวที่ได้มาจากการทดสอบจะถูกนำมาคำนวณหาค่า stress และ strain จากนั้น นำค่า stress และ strain ที่ได้ไปเขียนแผนภาพ stress-strain diagram ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4-1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของ stress-strain diagram ของเหล็กเหนียว โดยทั่วไปแล้ว เราจะแบ่ง stress-strain diagram ออกได้เป็น 2 ประเภทคือ engineering stress-strain diagram และ true stress-strain diagram

##### Engineering stress-strain diagram

ค่าหน่วยแรงและความเครียดที่ใช้ในการเขียน stress-strain diagram ชนิดนี้จะหามาได้โดยการใช้ค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัด  $A_0$  และค่าเริ่มต้นของความยาว  $L_0$  ของตัวอย่างทดสอบ (specimen) โดยที่

$$\sigma = \frac{P}{A_o}$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_o}$$



รูปที่ 4-1 ตัวอย่าง stress-strain diagram ของเหล็กเหนียว (mild steel)

**True stress-strain diagram**

ค่า true stress  $\tilde{\sigma}$  และ true strain  $\tilde{\epsilon}$  ที่ใช้ในการเขียน true stress-strain diagram จะหามาได้โดยการ ใช้ค่าพื้นที่หน้าตัด  $A$  และความยาวของตัวอย่างทดสอบ (specimen)  $L$  ในขณะที่เราอ่านค่าของแรงดึง  $P$  และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง  $\delta$  โดยที่

$$\tilde{\sigma} = \frac{P}{A} = \sigma \left( \frac{A_o}{A} \right)$$

$$\tilde{\epsilon} = \int_{L_o}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_o} = \ln(1 + \epsilon)$$

โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างจะถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วง elastic ภายใต้แรงกระทำ ซึ่ง ในช่วงนี้ วัสดุมีความแกร่ง (stiffness) สูง ดังนั้น ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้จาก engineering stress-strain diagram และ true stress-strain diagram แทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเลย โดยทั่วไปแล้ว เราจะใช้ engineering stress-strain diagram มากกว่า true stress-strain diagram เพราะว่าเราเขียน engineering stress-strain diagram ได้ ง่ายกว่า true stress-strain diagram

จากรูปที่ 4-1 เราสามารถแบ่งพฤติกรรมของเหล็กเหนียว (mild steel) ออกได้เป็น 4 ช่วงคือ

### ช่วงยืดหยุ่น (elastic)

ในช่วงนี้ วัสดุที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบจะตอบสนองต่อ load แบบยืดหยุ่น (elastic) หรือเมื่อเราเอาแรงที่กระทำออกจากตัวอย่างทดสอบแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะคืนตัวกลับไปทีรูปร่างและความยาวเริ่มต้น ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า ในช่วงนี้ หน่วยแรง (stress) จะแปรผันโดยตรงกับความเครียด (strain) จนถึงค่าของหน่วยแรงค่าหนึ่ง ซึ่งถูกเรียกว่า *proportional limit* หรือ  $\sigma_{pl}$  และเมื่อค่าหน่วยแรงมีค่ามากกว่าค่าของ  $\sigma_{pl}$  แล้ว วัสดุนั้นจะยังคงมีพฤติกรรมแบบ elastic อยู่ โดยที่จุดสุดท้าย ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบ elastic นี้คือจุด *elastic limit*

### ช่วงคลาก (yielding)

ช่วง yielding นี้จะเริ่มเมื่อค่าของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับค่า yielding stress  $\sigma_y$  หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของ load ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุในลักษณะนี้เราจะเรียกว่า พฤติกรรมแบบ *perfectly plastic*

### ช่วง strain hardening

เมื่อสิ้นสุดการ yielding ของวัสดุแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถในการต้านทาน load เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังที่เราจะเห็นได้จากกราฟที่ stress-strain curve เริ่มที่มีความชันเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังที่แสดงตามรูปที่ 4-1 แต่ความชันของ curve นี้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อค่าของหน่วยแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสุดท้าย ความชันของ curve นี้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุด *ultimate stress* หรือ  $\sigma_u$  (จุดที่วัสดุมีความสามารถในการรับหน่วยแรงที่มีค่าสูงสุด) เรามักจะเรียกพฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้ว่า *strain hardening*

### ช่วง necking

หลังจากที่ค่าของหน่วยแรงในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับ  $\sigma_u$  แล้ว พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ในบริเวณ gauge-length จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกกันว่า *necking* ดังที่แสดงตามรูปที่ 4-2a พฤติกรรมของวัสดุในลักษณะนี้เกิดขึ้นจากการเลื่อน (slip) บนระนาบของผลึกของเหล็กเหนียวและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบก็จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลให้ค่าของ load และค่าความชันของ stress strain curve มีค่าลดลงตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุมีการแตกหักเกิดขึ้น ดังที่แสดงตามรูปที่ 4-2b ค่าของหน่วยแรงที่จุดนี้มักจะถูกเรียกว่า *fracture stress*  $\sigma_f$

## 4.3 พฤติกรรมของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ (behavior of ductile and brittle materials)

### วัสดุเหนียว (ductile materials)

วัสดุเหนียวเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ (failure) เช่น เหล็กโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้น วัสดุประเภทนี้จะสามารถที่จะดูดซับพลังงานได้มาก คุณสมบัติความเหนียว (ductility) ของวัสดุจะหาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (percent elongation) หรือค่าเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction of area) ของตัวอย่างทดสอบ ถ้าเรากำหนดให้ความยาวของ gauge length เริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบมีค่า  $L_0$  และความยาวของ gauge length ที่จุดที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกหักมีค่า  $L_f$  แล้ว



รูปที่ 4-2 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเหนียว

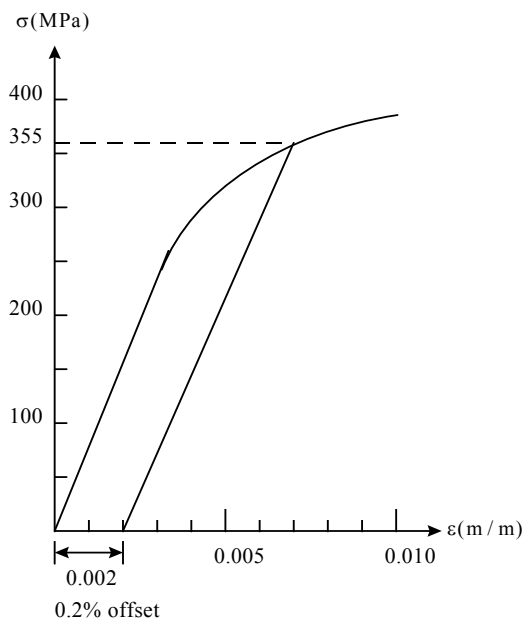
$$\text{Percent elongation} = \frac{(L_f - L_o)}{L_o} 100\%$$

ถ้าเรากำหนดให้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับ  $A_o$  และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบที่จุดที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกหักมีค่าเท่ากับ  $A_f$  แล้ว

$$\text{Percent reduction of area} = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} 100\%$$

โลหะโดยส่วนใหญ่ เช่น aluminum เป็นต้น จะไม่มีจุด yielding point ที่ชัดเจน ดังที่แสดงตามรูปที่

4-3

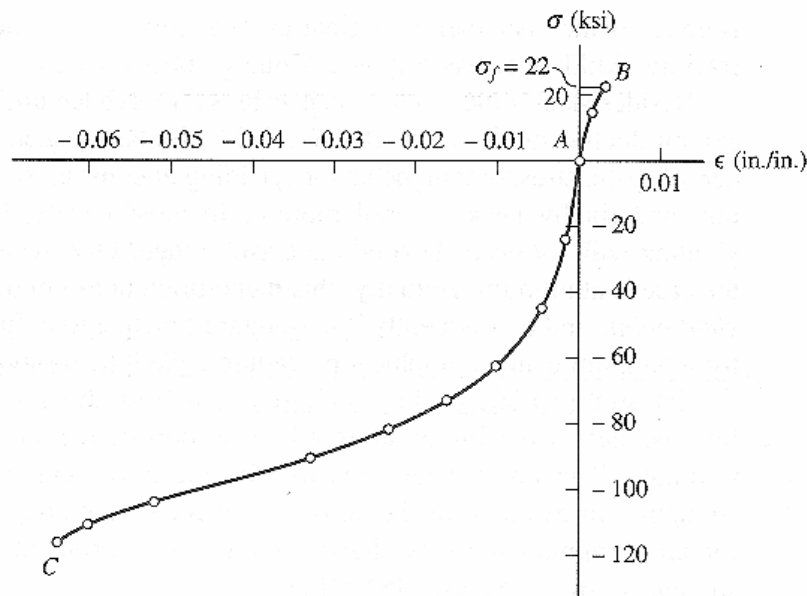


รูปที่ 4-3 วิธี 0.2% offset

ในทางปฏิบัติ เราจะหาค่า yielding stress ของวัสดุดังกล่าวได้โดยใช้วิธี *offset method* ในวิธีการนี้ เราจะเลือกค่า strain ที่ 0.2% strain (0.002 mm/mm) บนแกนของ strain จากนั้น เราจะลากเส้นตรงให้ขนานไปกับส่วนของ stress-strain curve ที่เป็นเส้นตรง เมื่อเส้นตรงที่เราลากตัดกับ stress-strain curve ที่จุดใด จุดนั้นจะถือว่าเป็นจุด yielding point ของวัสดุและค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับจุดนี้คือ yielding stress

### วัสดุเปราะ (brittle materials)

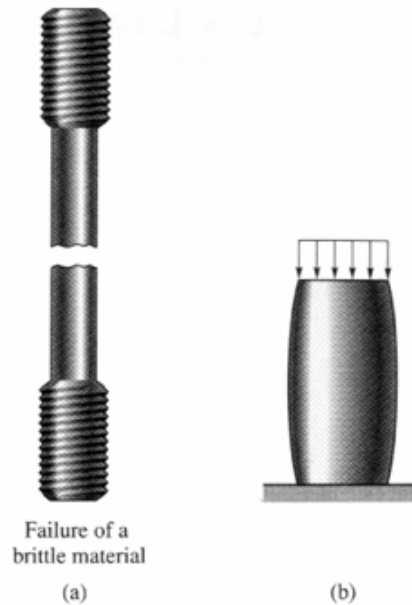
วัสดุเปราะ (brittle materials) เป็นวัสดุที่ไม่เกิดการ yielding หรือมีแต่น้อยมากก่อนการวิบัติของวัสดุ เช่น เหล็กหล่อ (cast iron) และคอนกรีต เป็นต้น รูปที่ 4-4 เป็นตัวอย่างของ stress-strain diagram ของเหล็กหล่อ



รูปที่ 4-4 stress-strain diagram ของเหล็กหล่อ

วัสดุชนิดนี้มักจะเป็นวัสดุที่มีค่าหน่วยแรงดึงประลัย (ultimate tensile stress) ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรงกดอัดประลัย (ultimate compressive stress) ซึ่งการที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า การแตกหักที่เกิดขึ้นจากแรงดึงนั้น จะเริ่มจากการที่ตัวอย่างทดสอบมีรอยแตกที่มีขนาดเล็กมากๆ (microscopic crack) บนผิวของตัวอย่างทดสอบ (เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ) รอยแตกนี้จะมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนถึงจุดๆ หนึ่ง เมื่อพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าน้อยลงจนกระทั่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุ ตัวอย่างทดสอบก็จะเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด การวิบัตินี้จะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 4-5a

ในทางกลับกัน รอยแตกดังกล่าวจะถูกปิดลงภายใต้แรงกดอัด (compressive load) และตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจะมีพฤติกรรมที่คล้ายกับวัสดุเหนียว (ductile material) โดยตัวอย่างทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีการ ไปงอออกทางด้านข้างที่มีลักษณะคล้ายถังเบียร์ (barrel) ก่อนที่จะเกิดการวิบัติดังที่แสดงในรูปที่ 4-5b



รูปที่ 4-5 ลักษณะการวิบัติของวัสดุเปราะ

#### 4.4 กฎของฮุก (Hooke's law)

เมื่อวัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) ค่าหน่วยแรง  $\sigma$  จะแปรผันโดยตรงกับค่าความเครียด  $\epsilon$  ซึ่งข้อเท็จจริงนี้ได้ถูกค้นพบโดย Robert Hooke และถูกเรียกว่า *Hooke's law* ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ

$$\sigma = E\epsilon$$

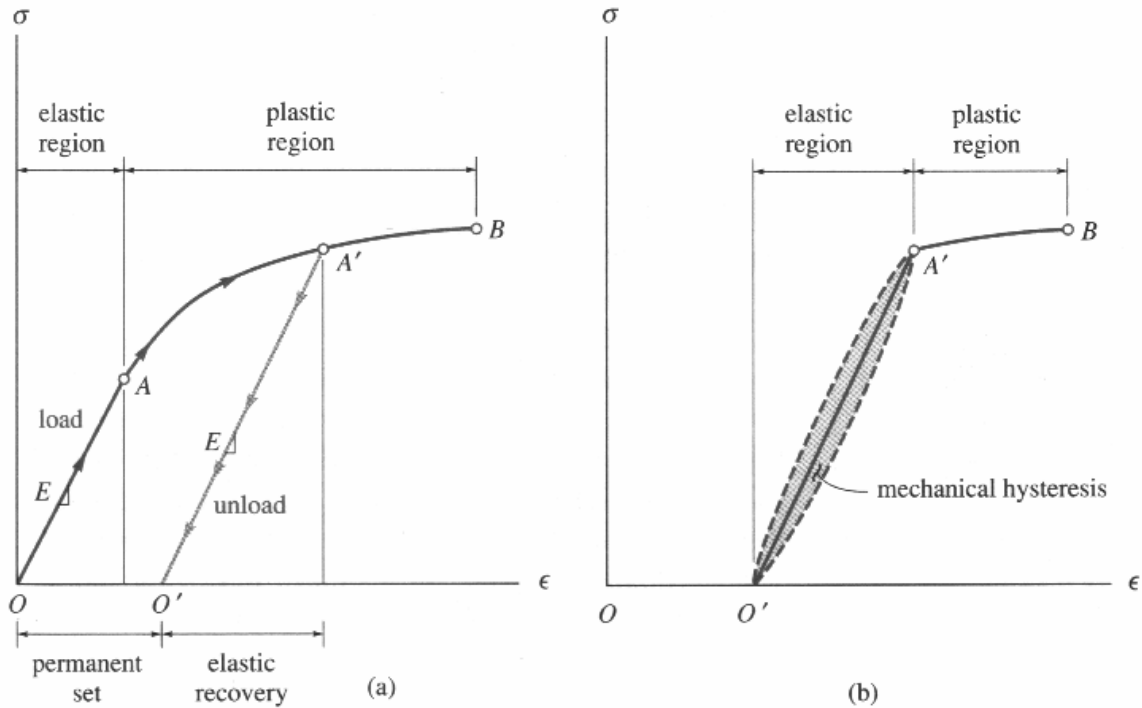
เมื่อ  $E =$  ค่า modulus of elasticity ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าความชันของ stress-strain curve ในช่วง linear elastic และเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแกร่ง (stiffness) ของวัสดุ ค่า  $E$  นี้จะมีหน่วยเช่นเดียวกับหน่วยแรง เช่น GPa เป็นต้น ค่า  $E$  เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุชนิดหนึ่งๆ ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับค่า proportional limit ของวัสดุนั้น

#### พฤติกรรม strain hardening

พิจารณารูปที่ 4-6a ซึ่งเป็น stress-strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ทำจากวัสดุเหนียว (ductile material) เช่น เหล็กกล้า (steel) และทองเหลือง (brass) เป็นต้น เมื่อตัวอย่างทดสอบนี้ถูกกระทำโดยแรงผ่านจุด yielding point  $A$  ไปสู่ช่วง plastic ที่จุด  $A'$  แล้ว จากนั้น เราเอาแรงกระทำนั้นออก วัสดุจะมีการคืนตัวสู่สถานะสมดุลจากจุด  $A'$  ไปยังจุด  $O'$  โดยที่การคืนตัวนี้จะเป็นการคืนตัวแบบ elastic และวัสดุจะยังคงมี plastic strain คงเหลืออยู่ในตัววัสดุเท่ากับ  $OO'$  ซึ่งเรามักเรียก plastic strain นี้ว่า *permanent set*

ถ้าเราทำการให้แรงกระทำ กับตัวอย่างทดสอบอีกครั้ง วัสดุก็จะเกิดการตอบสนองตามแนวการคืนตัวแบบ elastic  $O'A'$  จนเกิดการ yielding อีกครั้งหนึ่งที่จุด  $A'$  จากนั้น stress-strain curve ของวัสดุก็จะไปตามแนวทางเดิมจนถึงจุด  $B$  ซึ่งการที่วัสดุมีจุด yielding point ที่เปลี่ยนไปนี้เกิดจาก strain hardening และจะ

ทำให้วัสดุมีช่วง elastic region ที่ใหญ่ขึ้น แต่ความเหนียว (ductility) ของวัสดุจะมีค่าน้อยลง (สังเกตได้จาก การที่พื้นที่ใต้ stress-strain curve มีค่าน้อยลง)



รูปที่ 4-6 พฤติกรรม strain hardening ของวัสดุเหนียว

โดยทั่วไปแล้ว พลังงานความร้อนบางส่วนจะสูญเสียไปจากตัวอย่างทดสอบ เมื่อเราเอาแรงกระทำ ออกและให้แรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบอีกครั้ง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ unloaded curve และ loaded curve ของ ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 4-6b โดยที่พื้นที่ที่อยู่ระหว่าง unloaded curve และ loaded curve จะแทนค่าของพลังงานที่สูญเสียไปและมักจะถูกเรียกว่า *hysteresis loop* ซึ่งมีความสำคัญมากในการเลือก วัสดุที่จะใช้ทำ damper เพื่อรองรับการสั่นของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกล

#### โมดูลัสการคืนตัว (modulus of resilience)

modulus of resilience หรือ  $u_r$  เป็นค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (strain energy density) ของวัสดุ เมื่อวัสดุมีค่าหน่วยแรงเท่ากับ proportional limit ดังที่แสดงด้วยสามเหลี่ยมสีทึบภายใต้ stress-strain diagram ในรูปที่ 4-7a ซึ่งค่าของ modulus of resilience นี้จะบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานโดยไม่มีการเสียรูปอย่างถาวร ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$u_r = \frac{1}{2} \sigma_{pl} \epsilon_{pl} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{pl}^2}{E}$$

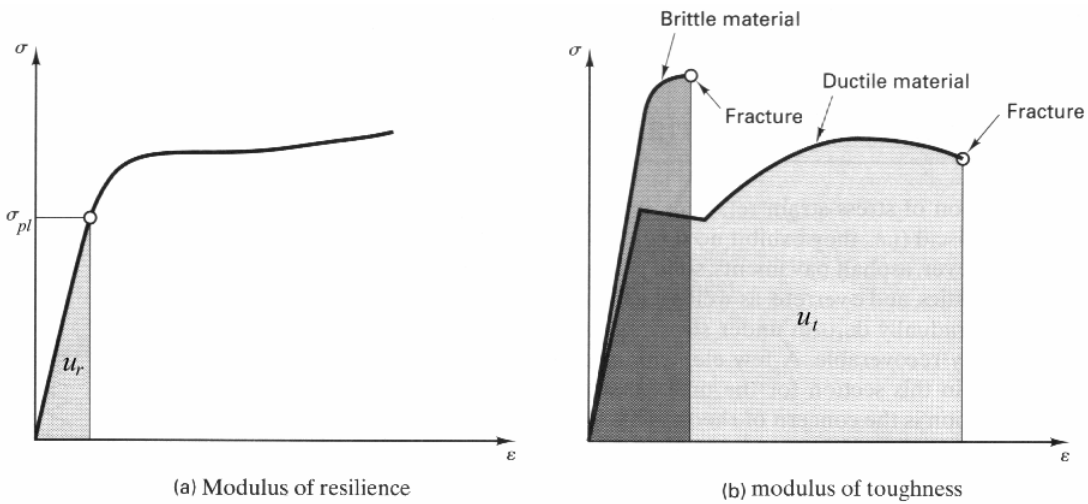
#### โมดูลัสความเหนียว (modulus of toughness)

modulus of toughness หรือ  $u_t$  เป็นค่า strain energy density ทั้งหมดที่วัสดุเก็บกักไว้ก่อนที่วัสดุจะ เกิดการวิบัติ ดังที่แสดงด้วยพื้นที่ใต้ stress-strain diagram ที่ระบายด้วยสีทึบ ในรูปที่ 4-7b ซึ่งค่า modulus of toughness นี้มีความสำคัญมากในการที่จะป้องกันการพังทลายของโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างนั้นถูกกระทำ

โดยแรงที่มีค่าสูงมากๆ โดยที่ไม่ได้ออกแบบให้รองรับ (accidentally overloaded) เช่น แรงจากแผ่นดินไหว เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว เนื่องจากวัสดุที่มีค่า  $u_t$  สูงมักจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้ จะเป็นเครื่องหมายเตือนถึงการวิบัติที่กำลังจะเกิดขึ้นด้วย

สำหรับวัสดุเหนียว ค่า modulus of toughness สามารถประมาณได้จากสมการ

$$u_t \approx \epsilon_f \left( \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \right)$$

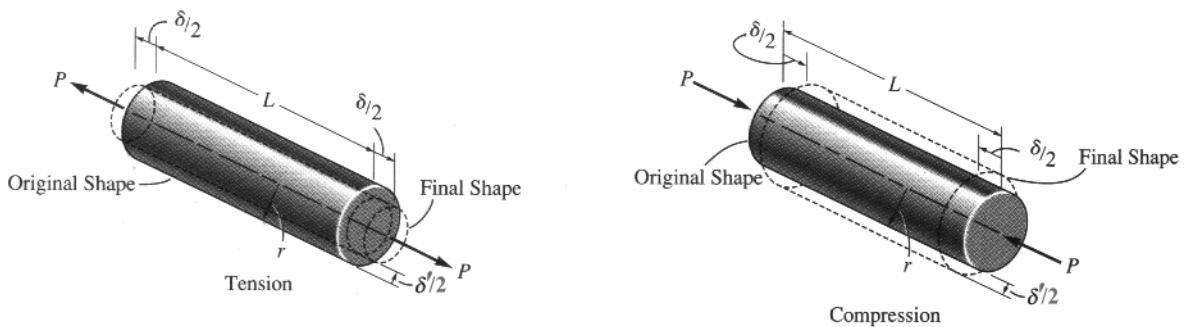


รูปที่ 4-7 modulus of resilience และ modulus of toughness ของวัสดุ

4.5 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

เมื่อแท่งวัสดุ ซึ่งมีความยาวเริ่มต้น  $L$  และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น  $d$  ถูกกระทำโดยแรงดึงในแนวแกน (axial tensile force) ดังที่แสดงในรูปที่ 4-8 แล้ว แท่งวัสดุดังกล่าวจะเกิดการยืดตัว ( $\delta$ ) ในแนวแกน (longitudinal direction) และจะเกิดการหดตัว ( $\delta'$ ) ในแนวขวาง (lateral direction) ของแท่งวัสดุ ในทางตรงกันข้าม เมื่อแท่งวัสดุดังกล่าวถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกน (axial compression force) แล้ว แท่งวัตถุจะเกิดการหดตัว  $\delta$  ในแนวแกนและจะเกิดการยืดตัว  $\delta'$  ในแนวขวาง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-8 ดังนั้น จากนิยามของความเครียดตั้งฉาก สมการของ strain ในแนวแกน  $\epsilon_{long}$  และในแนวขวาง  $\epsilon_{lat}$  เนื่องจากแรงดึงจะอยู่ในรูป

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad \text{และ} \quad \epsilon_{lat} = -\frac{\delta'}{d}$$



รูปที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ deformable bar



ในช่วงต้นคริสต์ศักราช 1800 S.D. Poisson พบว่า ในช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบ elastic อัตราส่วนของ  $\epsilon_{lat}$  ต่อ  $\epsilon_{long}$  มีค่าที่คงที่ และเป็นค่าเฉพาะของวัสดุแบบเนื้อเดียว (homogenous) และมีพฤติกรรมไม่ขึ้นกับทิศทางที่แรงกระทำ (isotropic) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ได้ถูกเรียกว่า *Poisson's Ratio* และเขียนได้ในรูป

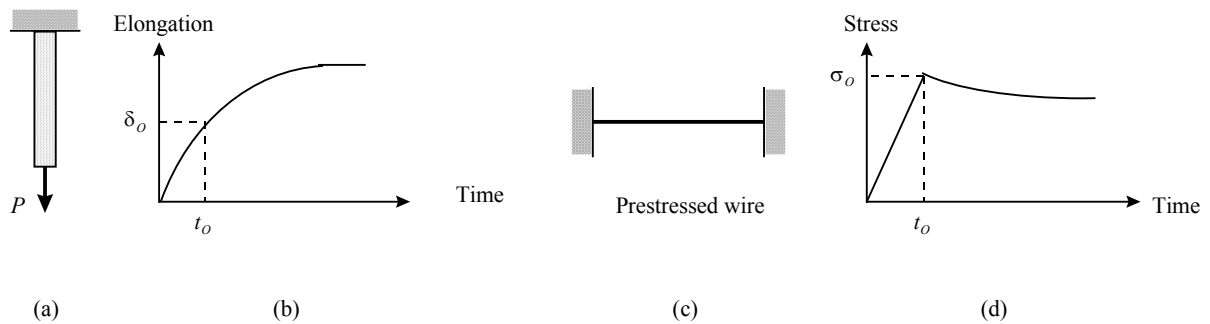
$$\nu = -\frac{\text{lateral strain}}{\text{longitudinal strain}} = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}}$$

ค่า Poisson's ratio จะไม่มีหน่วย และโดยปกติแล้ว วัสดุในทางวิศวกรรมมักจะมีค่า Poisson's ratio อยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.33 ในทางทฤษฎีแล้ว ค่า Poisson's ratio จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5

#### 4.6 การวิบัติของวัสดุเนื่องจากการคืบและการล้า

##### การคืบ (creep)

creep เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุบางชนิดที่ขึ้นอยู่กับเวลา เช่น เมื่อแท่งวัตถุ ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9a ถูกกระทำโดยแรงในแนวแกน  $P$  ซึ่งทำให้เกิดการยืดตัว  $\delta_0$  ในช่วงเวลา  $t_0$  ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9b หลังจากนั้น ถ้าเราให้แรง  $P$  มีค่าคงที่และกระทำต่อแท่งวัตถุในช่วงเวลาที่ยาวนานพอสมควรแล้ว วัสดุที่ใช้ทำแท่งวัตถุอาจจะมีการเปลี่ยนรูปร่างที่ต่อเนื่อง ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9b การเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวจะถูกเรียกว่า creep ซึ่งอาจจะมีค่ามากจนกระทั่งแท่งวัตถุดังกล่าวเกิดการวิบัติหรือหมดประโยชน์ในการใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว creep ที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่วัสดุถูกกระทำโดยแรงและขนาดของแรง ถ้าขนาดของแรงมีค่าสูงและกระทำเป็นเวลานานแล้ว creep ที่เกิดขึ้นในวัสดุจะมีค่ามากกว่า เมื่อวัสดุนั้นถูกกระทำโดยแรงที่มีค่าต่ำกว่าและถูกกระทำเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่า

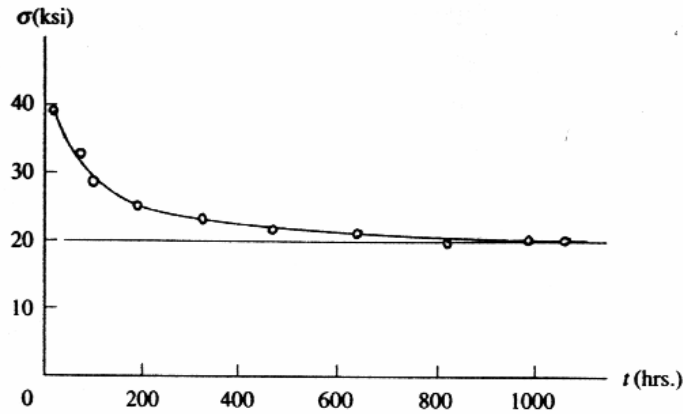


รูปที่ 4-9 creep และ relaxation ของวัสดุ

พิจารณาอีกรูปแบบหนึ่งของ creep เมื่อเส้นลวดที่ถูกยึดแน่นที่ปลายทั้งสองข้าง ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9c ถูกกระทำโดยแรงดึงในแนวแกน ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงดึง  $\sigma_0$  ในช่วงเวลา  $t_0$  ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9d จากนั้น เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ เป็นระยะเวลาพอสมควร ค่าของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดจะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังที่แสดงในรูปที่ 4-9d ซึ่งการลดลงของหน่วยแรงในลักษณะนี้มักจะถูกเรียกว่า relaxation ของวัสดุ

โดยทั่วไปแล้ว creep จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ในวัสดุบางประเภท เช่น เหล็กกล้า (steel) เป็นต้น creep จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะที่วัสดุถูกแรงกระทำ รูปที่ 4-10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง creep

strength ของ stainless steel ที่อุณหภูมิ 1200 °F กับเวลา วัสดุนี้จะมี yielding strength 40 ksi (276 MPa) ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อทำการ load วัสดุนี้ไปเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1200 °F แล้ว เราจะเห็นว่า yielding strength มีค่าลดลงเหลือแค่ 20 ksi (138 MPa) เท่านั้น

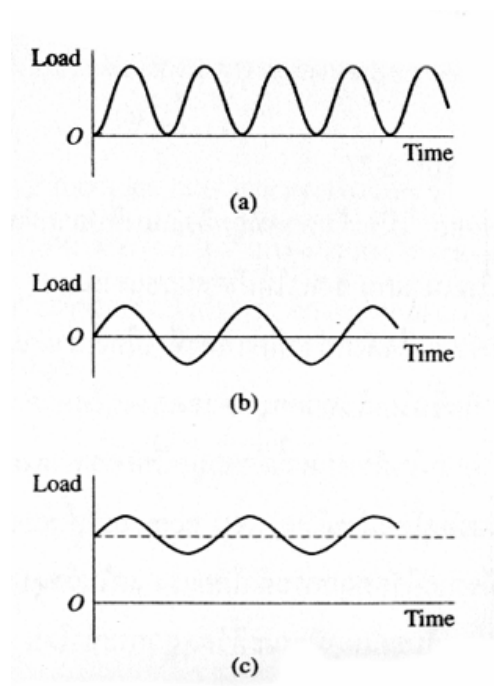


σ - t diagram for stainless steel at 1200°F and creep strain at 1%

รูปที่ 4-10

**การล้า (fatigue)**

fatigue เกิดขึ้นเมื่อวัสดุจำพวกโลหะ ซึ่งถูกกระทำโดยหน่วยแรงหรือความเครียด ที่มีค่าน้อยกว่าค่าของ yielding stress หรือ strain แบบซ้ำไปซ้ำมา (repeated cycles) แล้วเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle fracture) รูปที่ 4-11 แสดงรูปแบบต่างๆ ของ fatigue load



รูปที่ 4-11 รูปแบบต่างๆ ของ fatigue load

การวิบัติในลักษณะนี้เกิดขึ้นจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดบกพร่องที่มีขนาดเล็กมากๆ ที่มักจะพบอยู่ที่ผิวขององค์อาคารของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบ หน่วยแรงดังกล่าวจะมีค่าสูงมากกว่าค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงบนหน้าตัดขององค์อาคารของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบมาก เมื่อวัสดุถูกกระทำโดยหน่วยแรงนี้แบบซ้ำไปซ้ำมาแล้ว จุดบกพร่องในวัสดุก็จะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะทำให้ค่าหน่วยแรงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จนในที่สุด พื้นที่หน้าตัดขององค์อาคารของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบก็จะมีขนาดลดลงจนถึงจุดๆ หนึ่งที่องค์อาคารของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงกระทำต่อไปได้อีก และจะทำให้ห้องอาคารของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกหักแบบฉับพลัน (sudden fracture) ขึ้น



## บทที่ 5

### ลักษณะพิเศษของการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน แต่ที่เห็นได้ชัดเจนสำหรับวิศวกรก็คือ ใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมและตรวจสอบคุณภาพของวัสดุที่ได้ผลิตขึ้น

การใช้ผลการทดสอบวัสดุดังกล่าวทำให้ผู้ปฏิบัติการทดสอบจะต้องทำการทดสอบให้มีความสอดคล้องกัน มิฉะนั้นแล้ว ผู้นำผลการทดสอบไปใช้จะเกิดความสับสน ซึ่งนำไปสู่ความไม่ปลอดภัยของโครงสร้างได้ ดังนั้น จึงเกิดความร่วมมือกันของวิศวกร เจ้าหน้าที่ของรัฐ และสถาบันวิจัยต่างๆ ในการพัฒนามาตรฐานการทดสอบ (standard test methods) เช่น มาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก.) และสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials หรือ ASTM) เป็นต้น

มาตรฐานการทดสอบจะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบ แต่จะไม่กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการทดสอบ ดังนั้น เราควรที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีของการทดสอบและคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อที่จะทำการทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.2 การทดสอบแรงดึง (tension test)

##### 5.2.1 บทนำ

การทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดแบบสถิตย์ (static) เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุดและถูกใช้อย่างกว้างขวางที่สุดในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดึงที่เราสนใจได้แก่

1. proportional limit,  $\sigma_{pl}$
2. yielding stress,  $\sigma_y$
3. ultimate stress,  $\sigma_u$
4. fracture stress,  $\sigma_f$
5. percent of elongation
6. percent of area reduction
7. modulus of elasticity,  $E$
8. modulus of resilience,  $u_r$

การที่จะเลือกว่าการทดสอบแรงดึงหรือการทดสอบแรงกดอัดอย่างไรนั้นมีความเหมาะสมมากกว่ากันนั้น เราจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

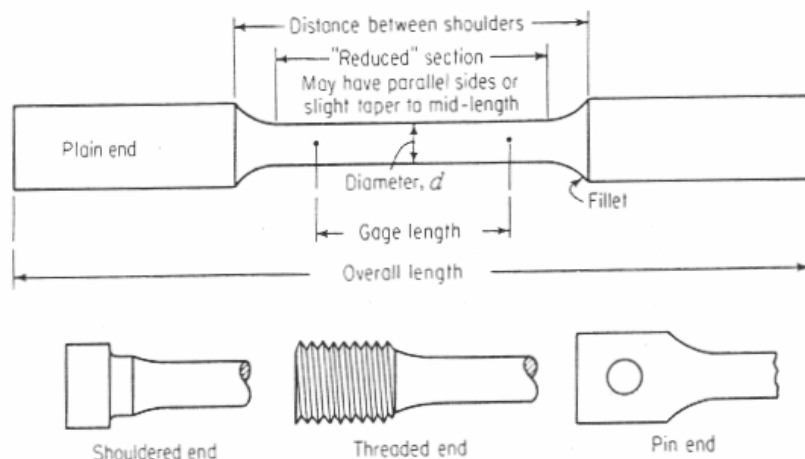
1. ความเหมาะสมของวัสดุที่เรากำลังจะทดสอบ เช่น โลหะมักจะถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเพื่อรับแรงดึง เพราะมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ดังนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะจะถูกทดสอบแรงดึง แต่ในวัสดุ

เพราะบางประเภท เช่น คอนกรีตและอิฐ เป็นต้น จะมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกดอัด ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการรับแรงกดอัด และมักจะถูกทดสอบโดยการทดสอบแรงกดอัด

2. ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด เช่น ไม้เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่ค่อนข้างสูง แต่ไม้ไม่สามารถนำมาใช้ในโครงสร้างรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดเชื่อมต่อได้ง่าย ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของไม้จึงได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบแรงดึง
3. ความยากและความซับซ้อนในการจับยึดตัวอย่างทดสอบ

### 5.2.2 ตัวอย่างทดสอบ

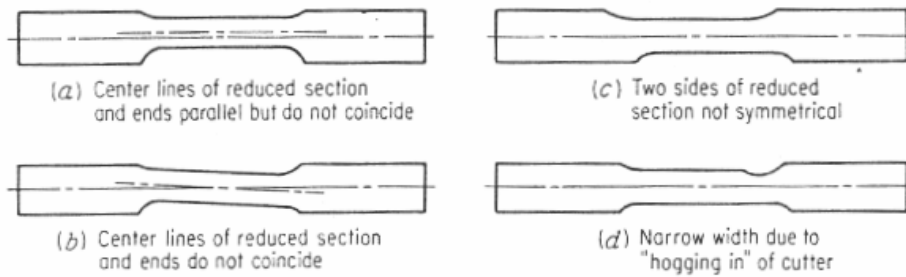
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงอาจจะมีหน้าตัดทรงกลม สี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ ถ้าแผ่นเหล็กมีความหนาพอที่จะทำการกลึงให้เป็นหน้าตัดทรงกลมได้ ( $>10$  mm) ตัวอย่างทดสอบในรูปของแท่งกลมก็จะถูกนำมาใช้ทดสอบ แต่หากว่าแผ่นเหล็กนั้นบางมากจนไม่สามารถนำมากลึงได้แล้ว เราก็จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปที่ 5-1 แสดงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม เราควรสังเกตด้วยว่า ปลายทั้งสองของตัวอย่างทดสอบจะถูกขยายให้ใหญ่กว่าบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่บริเวณดังกล่าว เนื่องจากผลของความเข้มข้นของหน่วยแรง (stress concentration) ที่เกิดจากการจับตัวอย่างทดสอบที่ปลายทั้งสองของตัวอย่างทดสอบ และปลายของตัวอย่างทดสอบที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ shouldered end, treaded End, และ pin end ดังที่แสดงในรูป โดยที่ shouldered end และ treaded End จะได้รับความนิยมมากกว่า pin end



รูปที่ 5-1 แสดงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม

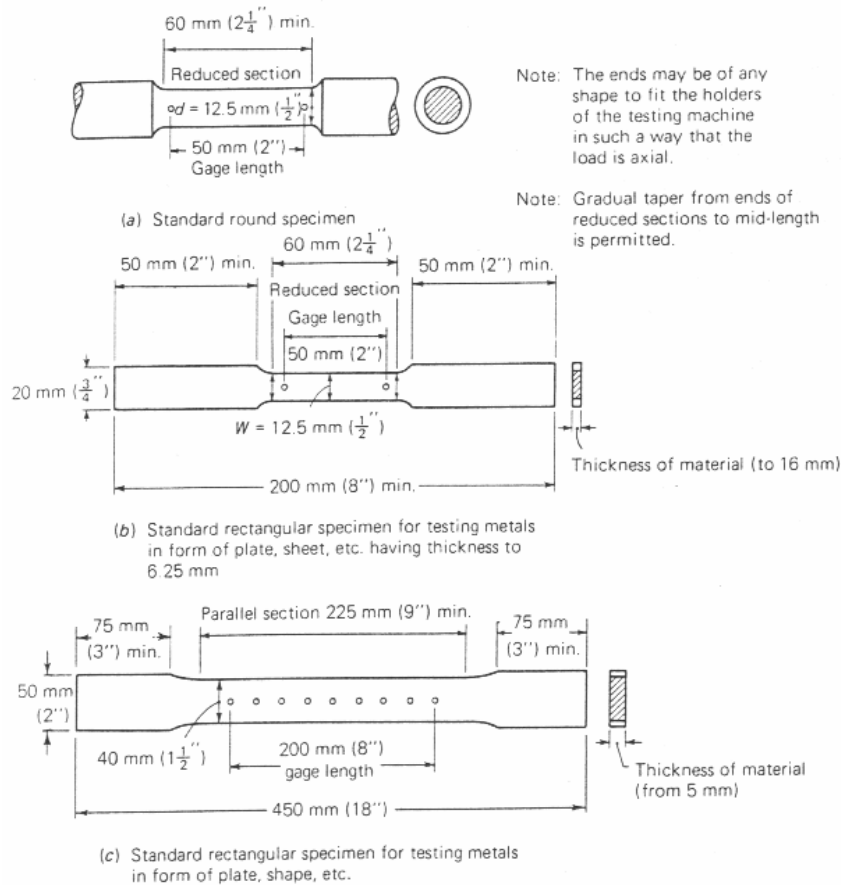
รูปที่ 5-2 แสดงลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบไม่มีความสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อได้ถูกกำหนดไว้ใน ASTM E8 ดังที่แสดงในรูปที่ 5-3 และ 5-4 ตามลำดับ

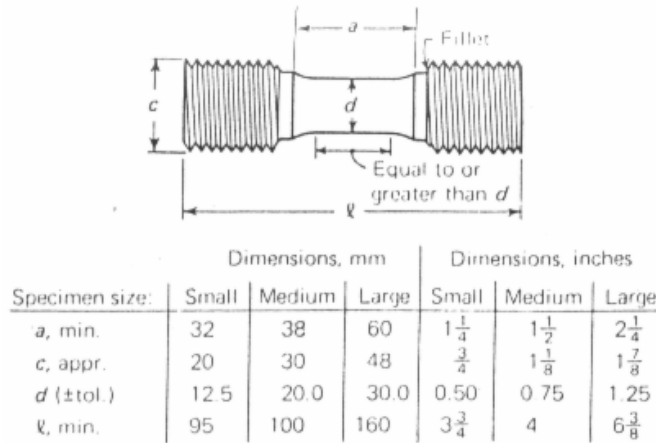


รูปที่ 5-2 ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ

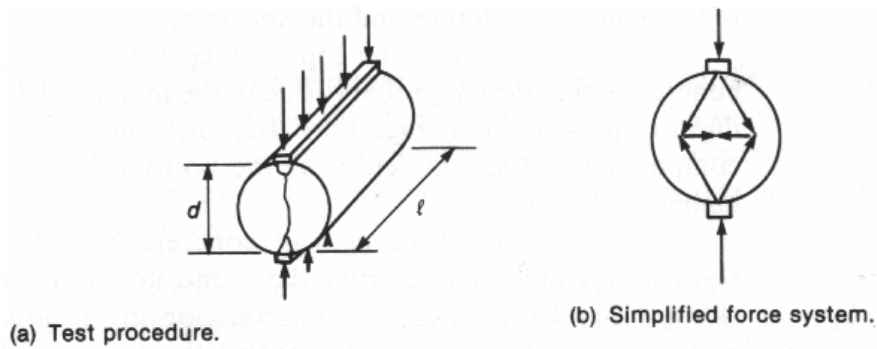
อีกรูปแบบหนึ่งของการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เรามักพบคือ การหากล้างรับแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งจะทำให้ได้โดยการทำ splitting tensile test ตามมาตรฐานของ ASTM C496 โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 150x300 mm และจะถูกกระทำโดยแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 5-5a ซึ่งแรงกดอัดนี้จะทำให้เกิด arch action ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวราบและจะทำให้เกิดการแตกร้าวในแท่งคอนกรีตในแนวตั้ง ดังที่แสดงในรูปที่ 5-5b



รูปที่ 5-3 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 5-4 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 5-5 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตภายใต้ splitting tensile test

สมการที่ใช้คำนวณหา splitting tensile strength  $f_{ct}$  ของคอนกรีตในกรณีนี้จะอยู่ในรูป

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld}$$

เมื่อ  $P$  = แรงสูงสุดที่กระทำ  $l$  = ความยาวของตัวอย่างทดสอบ และ  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ

### 5.2.3 เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

ดูในกลุ่มมือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ 410 214 Material Testings ปฏิบัติการที่ 3 สำหรับเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ และปฏิบัติการที่ 7 สำหรับคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว เราจะสามารถหา Poisson's ratio โดยการทำการทดสอบแรงดึงได้ด้วย ดังที่ได้กล่าวถึงในปฏิบัติการที่ 2 การทดสอบหา Poisson's ratio ของยาง โดยเราจะต้องทำการวัดค่าการยืดตัวในแนวแกนเพื่อหาค่า strain ในแนวแกน ( $\epsilon_{long}$ ) และค่าการหดตัวในแนวขวางเพื่อหาค่า strain ในแนวขวาง ( $\epsilon_{lat}$ ) จากนั้น แทนค่าลงในสมการ

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}}$$

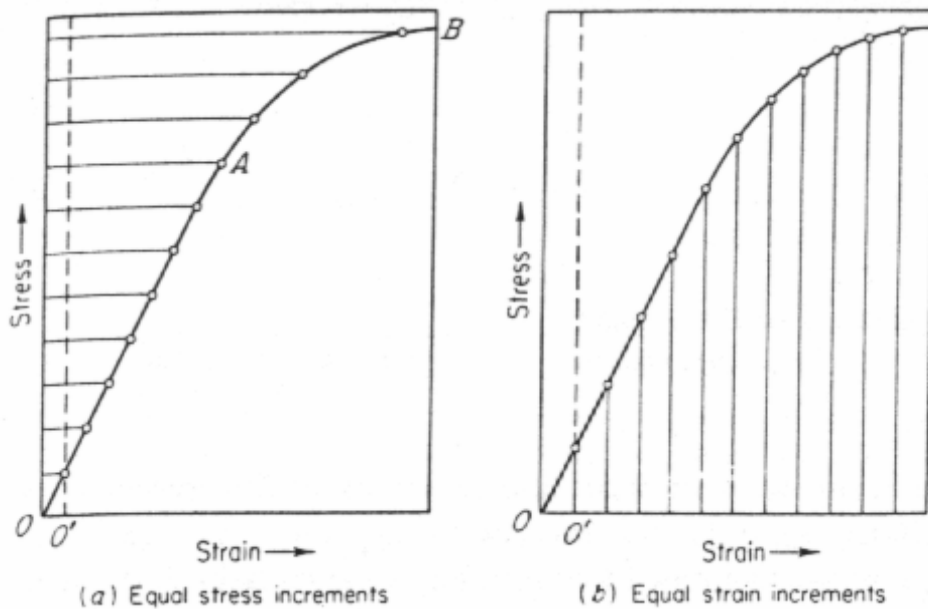
### 5.2.4 ข้อสังเกตของการทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบแรงดึงของวัสดุเหนียวนั้น เราจะต้องจดบันทึกความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำและความยาวของตัวอย่างทดสอบที่ค่าแรงกระทำต่างๆ เพื่อที่จะ



นำไปคำนวณหาค่า stress และ strain และเขียน stress-strain diagram นอกจากนั้นแล้ว เราจะต้องสังเกตและจดบันทึกในสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้ด้วย

1. ลักษณะความบกพร่องของตัวอย่างทดสอบ
2. ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและความเร็วในการทดสอบ
3. พฤติกรรมในช่วงต่างๆ ของวัสดุ โดยเฉพาะช่วงที่พฤติกรรมของวัสดุเปลี่ยนจาก elastic เป็น plastic ซึ่งเราจะต้องเปลี่ยนรูปแบบของการทดสอบจาก Load-controlling test (equal stress increment) เป็น displacement-controlling test (equal strain increment) เนื่องจากว่าในช่วง plastic การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงมาก ขณะที่วัสดุมีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำในช่วงนี้ที่ต่ำมาก

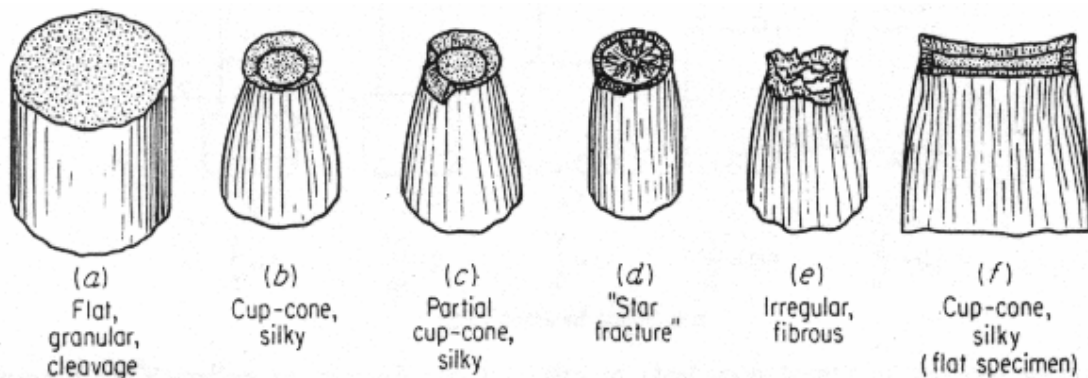


รูปที่ 5-6 Load-controlling test และ displacement-controlling test

พิจารณารูปที่ 5-6 ซึ่งเป็น stress-strain diagram ของวัสดุเหนียวชนิดหนึ่ง จากรูปที่ 5-6a เราจะเห็นได้ว่า เมื่อเราใช้การทดสอบแบบ Load-controlling test ซึ่งเป็นการเพิ่มของแรงกระทำที่คงที่และทำการวัดค่าการยืดตัวของตัวอย่างทดสอบที่แรงกระทำค่าต่างๆ แล้ว เราจะได้ข้อมูลที่ละเอียดในระหว่างระหว่างจุด A ถึงจุด B อย่างไรก็ดีตาม ถ้าเราใช้การทดสอบแบบ displacement-controlling test ดังที่แสดงในรูปที่ 5-6b แล้ว เราจะได้จำนวนข้อมูลที่ละเอียดพอสมควรในช่วงดังกล่าว

4. ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะดูจากรูปแบบ ลักษณะความหยابละเอียด และสีของรอยแตกหัก โดยทั่วไปแล้ว รูปแบบของรอยแตกหักจะถูกแบ่งออกเป็นรูปแบบที่สมมาตรคือ cup-cone, flat, และ irregular หรือรูปแบบที่ไม่สมมาตรคือ partial cup-cone, flat, และ

irregular ลักษณะความหยาบละเอียดซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น silky, fine grain, coarse grain, fibrous, crystalline, glassy, และ dull รูปที่ 5-7 แสดงตัวอย่างของรอยแตกหักที่มักพบเห็นในการทดสอบแรงดึงของโลหะ จากการสังเกตรอยแตกหักดังกล่าวจะช่วยให้เราระบุได้ว่า วัสดุที่เราทดสอบเป็นวัสดุประเภทใด เช่น รูปที่ 5-7a เป็นลักษณะการแตกหักสำหรับตัวอย่างทดสอบรูปทรงกลมของเหล็กหล่อ และรูปที่ 5-7b จะเป็นเป็นลักษณะการแตกหักสำหรับตัวอย่างทดสอบรูปทรงกลมของเหล็กเหนียว เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว การตรวจสอบรอยแตกหักยังจะช่วยให้ทราบสาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่ากำลังและความเหนียวที่ค่อนข้างต่ำไปจากความเป็นจริงด้วย เช่น รอยแตกที่ไม่สมมาตรในเหล็กเหนียวอาจเกิดจากการที่แรงกระทำไม่อยู่ในแนวแกน หรืออาจจะเกิดจากการที่ตัวอย่างทดสอบมีความบกพร่องอยู่ภายในเนื้อวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 5-7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึง

### 5.2.5 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการทดสอบแรงดึงและแรงกดอัด

#### การเยื้องศูนย์ (eccentricity)

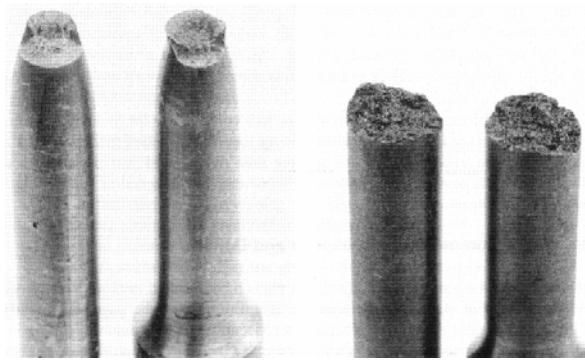
การที่แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบไม่อยู่ในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบจะทำให้การกระจายของหน่วยแรงดึงบนหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่คงที่ โดยทั่วไปแล้ว กำลังของเหล็กเหนียวจะไม่ถูกกระทบมากนักจากการที่แรงดึงมีการเยื้องศูนย์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากเหล็กเหนียวมีพฤติกรรมก่อนการวิบัติแบบ plastic แต่กำลังของเหล็กหล่อหรือวัสดุเปราะอาจจะถูกกระทบอย่างมาก เนื่องจากเหล็กหล่อหรือวัสดุเปราะมีการวิบัติแบบทันทีทันใด

#### ความเร็วในการทดสอบ (test speed)

โดยทั่วไปแล้ว กำลังของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นและความเหนียวของวัสดุจะมีค่าลดลง เมื่อความเร็วในการทดสอบมีค่ามากขึ้น เช่น เหล็กเหนียวจะมีค่า yield strength สูงขึ้น 30% เมื่อความเร็วในการทดสอบเพิ่มขึ้นจากปกติ 14000 เท่า และเมื่อทำการทดสอบแบบ long-term test ต่อไม้และเหล็กเหนียว เราจะได้ว่ากำลังของไม้และเหล็กเหนียวจะมีค่าลดลง เป็นต้น

### 5.2.6 การวิบัติของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อภายใต้แรงดึง

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ เราจะเห็นได้ว่า วัสดุ 2 ชนิดนี้มีการวิบัติที่แตกต่างกัน รูปที่ 5-8 แสดงรอยแตกหักที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างทดสอบขนาด 9 mm ของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ โดยที่การวิบัติของเหล็กเหนียวจะเกิดจากการเลื่อนของระนาบของผลึกของเหล็ก โดยปกติแล้วระนาบที่เกิดการเลื่อนนี้จะทำมุมประมาณ  $45^\circ$  กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ และการวิบัติของเหล็กหล่อจะเกิดจากความเครียดดึง ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงดึงไปตามระนาบที่ทำมุมประมาณ  $90^\circ$  กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5-8 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อภายใต้แรงดึง

พิจารณา element ของวัสดุที่ตัดออกมาจากตัวอย่างทดสอบ ซึ่งถูกกระทำโดยแรงดึง  $T$  แรงดึงดังกล่าวจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงตั้งฉาก  $\sigma_y$  บน element และจะมีสถานะของหน่วยแรง ดังที่แสดงในรูปที่ 5-9a โดยใช้หลักการเขียน Mohr's circle เราจะได้ว่า สถานะของหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าหน่วยแรงต่างๆ มีค่าดังนี้  $\sigma_x = 0$ ,  $\sigma_y = \sigma_Y$ , และ  $\tau_{xy} = 0$  และจุดศูนย์กลางของ Mohr's circle จะอยู่ที่จุด

$$\left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0 \right] = \left[ \frac{\sigma_Y}{2}, 0 \right]$$

และรัศมีของ Mohr's circle มีค่าเท่ากับ

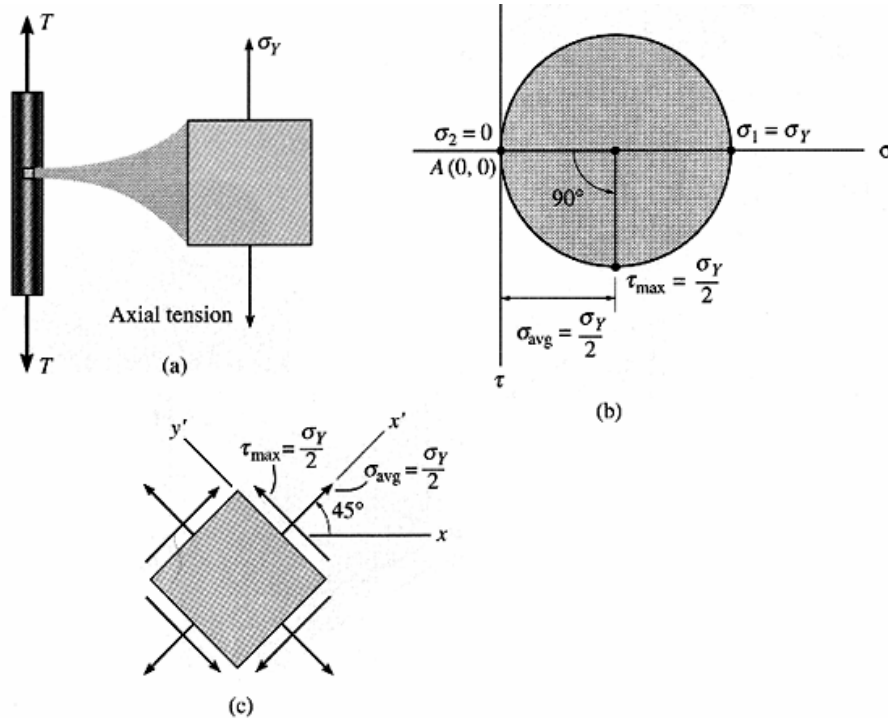
$$R = \sqrt{\left[ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right]^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{\sigma_Y}{2}$$

และเราสามารถเขียน Mohr's circle ได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-9b

จากรูป เราจะได้ว่า principal stress สูงสุดที่เกิดขึ้นบน element มีสถานะของหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $\sigma_y$  และค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสถานะของหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_Y}{2}$$

โดยที่จะเกิดขึ้นเมื่อ element เกิดการหมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นมุม  $90^\circ / 2 = 45^\circ$  ดังที่แสดงในรูปที่ 5-9c หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม  $45^\circ$  นอกจากนั้นแล้ว จาก Mohr's circle เราจะเห็นได้ว่า หน่วยแรงเฉือนสูงสุดดังกล่าวจะเกิดร่วมกับหน่วยแรงตั้งฉาก  $\sigma_y / 2$  ด้วย



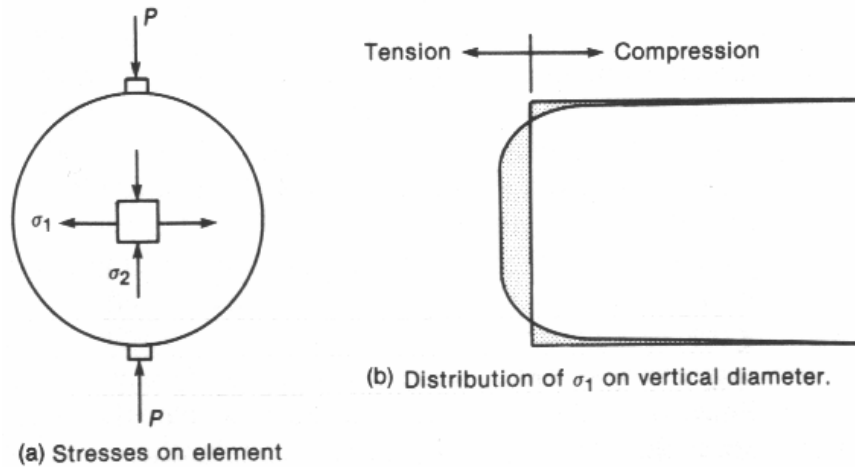
รูปที่ 5-9 Mohr's circle ของสถานะของหน่วยแรงของ element ของเหล็กเหนียวภายใต้แรงดึง

โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเหนียว (0.2% carbon) จะมีกำลังรับแรงดึงแตกหัก (true tensile fracture strength) เท่ากับ 713 MPa และมีกำลังรับแรงเฉือนประลัย (shear ultimate strength) เท่ากับ 310 MPa ซึ่งเมื่อเราทำการเพิ่มแรงดึงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับ shear ultimate strength ที่ 310 MPa แล้ว เราจะเห็นได้จาก Mohr's circle ว่า ที่จุดดังกล่าว ค่าหน่วยแรงดึง principal stress สูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพียง  $\sigma_y = 2(310) = 620$  MPa เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าค่า true tensile fracture strength ของเหล็กเหนียว ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบเหล็กเหนียวจึงวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือนที่ระนาบ  $45^\circ$  กับแนวที่แรงกระทำ ซึ่งเราจะเรียกการวิบัติในลักษณะนี้ว่า การเลื่อน (slip)

ในทางตรงกันข้าม เหล็กหล่อ (cast iron) มีกำลังรับแรงดึงประลัย (tensile ultimate strength) เท่ากับ 140 MPa และมีกำลังรับแรงเฉือนประลัย (shear ultimate strength) เท่ากับ 255 MPa ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าเมื่อเราให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง หน่วยแรงดึงบนเหล็กหล้อมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า tensile ultimate strength ที่ 140 MPa แล้ว ค่า หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนเหล็กหล่อจะมีค่าเพียง  $\tau_{max} = 140/2 = 70$  MPa เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าค่า shear ultimate strength มาก ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบเหล็กหล่อจึงวิบัติโดยหน่วยแรงดึง เมื่อหน่วยแรงดึงในวัสดุมีค่าถึง tensile ultimate strength และการวิบัติจะเป็นการแตกหัก (fracture) ที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ที่ระนาบทำมุม  $90^\circ$  กับแนวแรง เราจะเรียกการแตกหักในลักษณะนี้ว่าการแตกแยก (separation)

รูปที่ 5-10a แสดงสถานะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบที่แรงกดอัดกระทำผ่าน เราจะเห็นได้ว่า element ดังกล่าวถูกกระทำโดย principal tensile stress  $\sigma_1$  ซึ่งเกิดจาก arch action ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.2.2 และ principal compressive stress

$\sigma_2$  ซึ่งเกิดจากแรงกดอัด  $P$  โดยที่หน่วยแรง  $\sigma_1$  จะมีการกระจายตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-10b เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกดอัด ดังนั้น การแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบจึงอยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบดังกล่าว ดังที่แสดงในรูปที่ 5-5a



รูปที่ 5-10 สภาวะหน่วยแรงในคอนกรีตในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบที่แรงกดอัดกระทำผ่าน

### 5.3 การทดสอบแรงกดอัด (compression test)

#### 5.3.1 บทนำ

วัสดุบางประเภทเช่น คอนกรีต เป็นต้น มีกำลังรับแรงกดอัดที่ดีกว่าแรงดึงและมักถูกนำมาใช้ในการรับแรงกดอัดในโครงสร้าง ดังนั้น วัสดุดังกล่าวจึงมักถูกทดสอบโดยการทดสอบแรงกดอัด (compression test) การทดสอบแรงกดอัดมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึงมาก ทั้งในส่วนของลักษณะและขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูล และการตีความข้อมูล ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงกดอัดที่เราสนใจได้แก่

1. compressive stress at proportional limit,  $\sigma_{c,pl}$
2. yielding compressive stress,  $\sigma_{c,y}$
3. ultimate compressive stress,  $\sigma_{c,u}$
4. modulus of elasticity,  $E$
5. modulus of resilience,  $u_r$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกับแรงดึง เราจะต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ในการทดสอบแรงกดอัด

1. ความยากในการที่จะให้แรงกดอัดกระทำผ่านจุด centroid ของหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งถ้าแรงกดอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางแล้ว แรงดังกล่าวก็จะก่อให้เกิดทั้งหน่วยแรงกดอัด (compressive

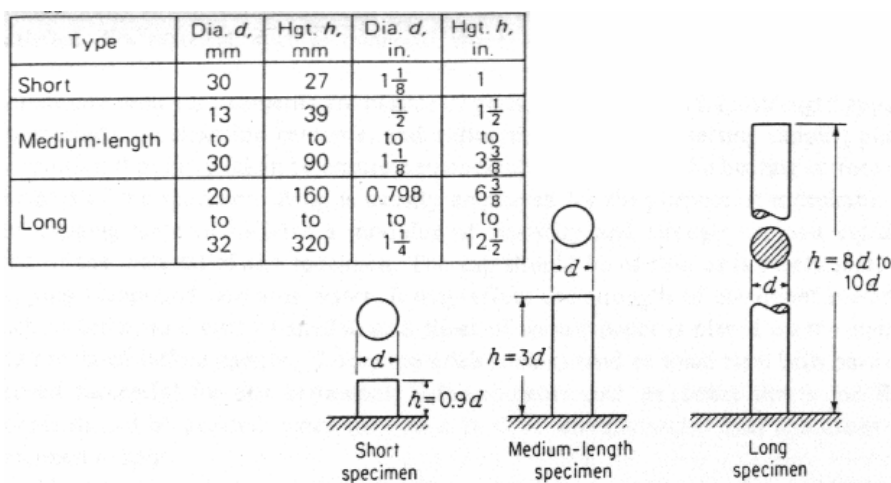
stress) และหน่วยแรงคด (bending stress) ขึ้นในตัวอย่างทดสอบและจะทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2. แรงกดอัดมักจะทำให้เกิดการโก่งคด (buckling) ในตัวอย่างทดสอบที่ชลูด (slender) มากๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันการโก่งคด ซึ่งเป็นพฤติกรรมของเสา ตัวอย่างทดสอบจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่และสั้นอย่างพอเพียง ซึ่งการที่ตัวอย่างทดสอบมีขนาดใหญ่และสั้นนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบตามมาคือ เครื่องทดสอบที่ใช้ต้องมีกำลังสูงมากและต้องใช้เครื่องมือวัดการหดตัวที่มีความถูกต้องสูง ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง
3. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบจะป้องกันการขยายตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเนื่องจากผลของ Poisson's ratio ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างทดสอบรับหน่วยแรงเนื่องจากแรงเสียดทานดังกล่าวด้วยและจะทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

### 5.3.2 ตัวอย่างทดสอบ

โดยทั่วไปแล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการโก่งคดของตัวอย่างทดสอบก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะวิบัติ โดยกำลังรับแรงกดอัดของวัสดุ เราจะกำหนดให้ความยาวสูงสุดของตัวอย่างทดสอบมีค่าได้ไม่เกิน 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ และตัวอย่างทดสอบไม่ควรสั้นกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 5-11 แสดงตัวอย่างทดสอบแรงกดอัดของโลหะตามมาตรฐาน ASTM E9 โดยที่ตัวอย่างทดสอบที่มีลักษณะสั้น (Short) จะใช้สำหรับการทดสอบโลหะที่จะใช้ในโครงสร้างที่รับแรงแบกทาน (bearing loads) เป็นหลัก สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวขนาดกลาง (medium-length) จะใช้สำหรับการทดสอบโลหะที่จะใช้ในโครงสร้างทั่วไป และสำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวมาก (long) จะถูกนำมาใช้หาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของโลหะ



รูปที่ 5-11 ตัวอย่างทดสอบแรงกดอัดของโลหะตามมาตรฐาน ASTM E9

สำหรับคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C 31 กำหนดให้ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวมไม่น้อยกว่า 3 เท่า และเนื่องจากขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างจะมีค่าประมาณ 25-51 mm ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกที่นิยมใช้มากที่สุดจึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และสูง 300 mm และถ้าตัวอย่างทดสอบมีรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่าแล้ว ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมักจะมีความยาว 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยทั่วไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกจะได้รับความนิยมมากกว่าตัวอย่างทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า

สำหรับการทดสอบแรงกดอัดของไม้ในแนวขนานเส้นและตั้งฉากกับเส้น มาตรฐาน ASTM D143 กำหนดให้ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งไม้สี่เหลี่ยมที่มีขนาด 50x50x200 mm และ 50x50x150 mm ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบแรงกดอัดของอิฐดินเผา มาตรฐาน ASTM C67 กำหนดให้ตัวอย่างทดสอบเป็นอิฐครึ่งก้อน ซึ่งจะถูกทดสอบในแนวราบ (flatwise)

### 5.3.3 เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

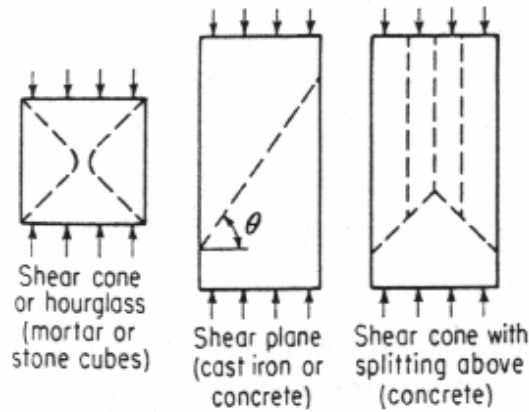
ดูในคู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ 410 214 Material Testings ปฏิบัติการที่ 5 สำหรับไม้ ปฏิบัติการที่ 6 สำหรับอิฐดินเผา และปฏิบัติการที่ 7 สำหรับคอนกรีต

### 5.3.4 ข้อสังเกตของการทดสอบแรงกดอัด

ในช่วงที่ตัวอย่างทดสอบยังมีพฤติกรรมแบบ elastic นั้น stress-strain curve ที่ได้จากการทดสอบแรงกดอัดจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับส่วนแรกของ stress-strain curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง และคุณสมบัติเชิงกล เช่น modulus of elasticity และ proportional stress เป็นต้น ก็สามารถหามาได้โดยวิธีการเดียวกัน แต่เมื่อพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบเลยช่วงนี้ไปแล้ว พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในการทดสอบแรงกดอัดจะแตกต่างไปจากพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในการทดสอบแรงดึง เนื่องจาก ภายใต้แรงกดอัดตัวอย่างทดสอบจะมีการขยายตัวทางด้านข้างทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นและ stress-strain curve จะมีความชันเพิ่มขึ้นแทนที่จะมีความชันลดลงดังเช่นที่เกิดขึ้นในการทดสอบแรงดึง ดังนั้น กำลังรับแรงกดอัดประลัย (compressive ultimate strength) จะมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงกดอัดที่จุดแตกหัก (compressive fracture strength)

รูปที่ 5-12 แสดงลักษณะการวิบัติที่มักเกิดขึ้นในวัสดุเปราะ (brittle material) ซึ่งเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (shear failure) โดยเราสามารถแบ่งลักษณะการวิบัติได้เป็น 3 แบบคือ

1. shear cone หรือ hourglass ซึ่งจะพบมากในการทดสอบแรงกดอัดของปูนก่อ (mortar) รูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า
2. shear plane ซึ่งจะพบมากในการทดสอบแรงกดอัดของเหล็กหล่อและคอนกรีตรูปทรงกระบอก
3. shear cone และการแตกร้าวด้านบน ซึ่งจะพบมากในการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก



รูปที่ 5-12 ลักษณะการวิบัติที่มักเกิดขึ้นในวัสดุเปราะ

รูปที่ 5-13 แสดงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบของวัสดุชนิดต่างๆ โดยรูปที่ 5-13a แสดงลักษณะการวิบัติของเหล็กหล่อ (cast iron) aluminum alloy และเหล็กรีดร้อน (hot-rolled steel) ตามลำดับจากทางซ้ายมือไปยังขวามือ จากรูป จะเห็นได้ว่า เหล็กรีดร้อนจะเกิดการวิบัติโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมากโดยไม่มีแตกหักเกิดขึ้น ส่วนเหล็กหล่อและ aluminum alloy จะมีการวิบัติโดยมีการแตกหัก แต่ aluminum alloy จะมีการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติแบบแตกหัก และรูปที่ 5-13b แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีต โดยมีการแตกร้าวเกิดขึ้นในแนวเอียงก่อนการวิบัติ

ในกรณีที่วัสดุเปราะต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) ระหว่างอนุภาคในวัสดุนั้น มุมที่เกิดการวิบัติจะไม่ทำมุม  $45^\circ$  กับแนวราบตามที่เราสามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ Mohr's circle แต่มุมนั้นจะเป็น function กับมุมของความเสียดทานภายใน  $\mu$  ระหว่างอนุภาคในวัสดุด้วย ตัวอย่างของวัสดุที่มีพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวคือ คอนกรีต โดยทั่วไปแล้ว ค่าของมุมที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง  $50^\circ$  ถึง  $60^\circ$

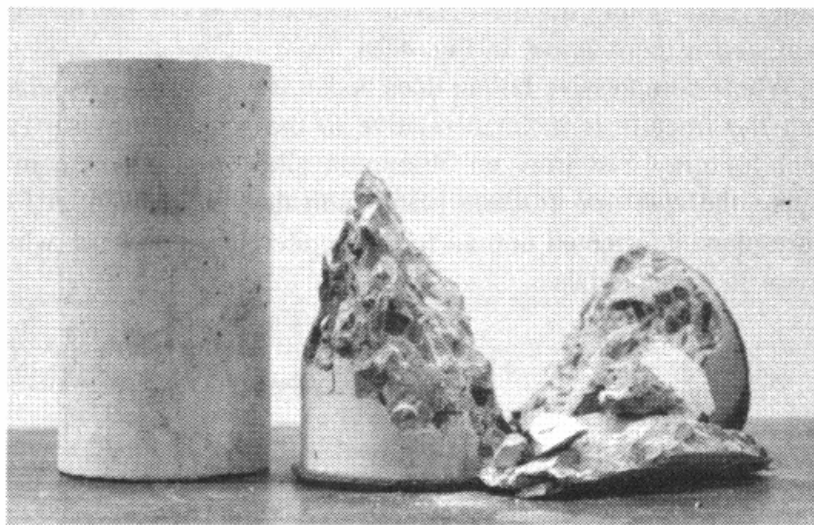
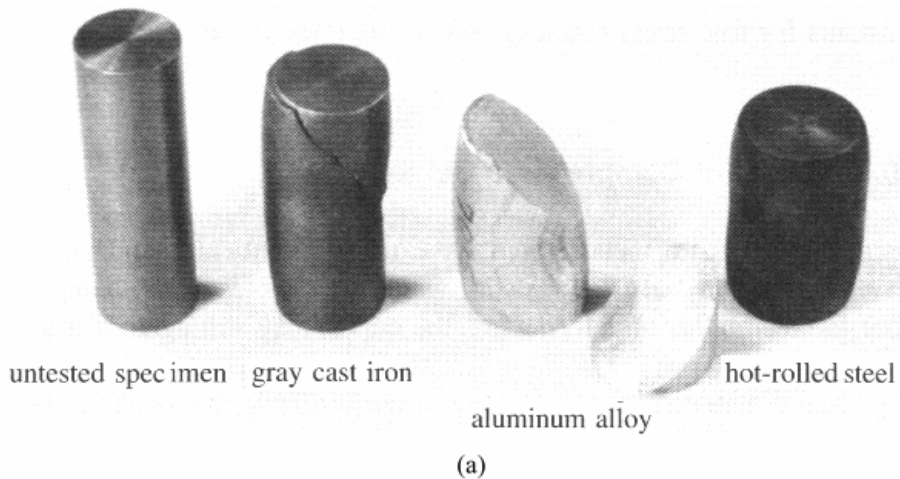
สาเหตุที่คอนกรีตมีพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวก็เนื่องจากว่า

1. คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุ (nonhomogeneous material) ซึ่งทำให้รูปแบบของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุมีค่าเปลี่ยนไปจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุ
2. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างห้วกดกับตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะทำให้สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างทดสอบที่สั้นมากๆ

รูปที่ 5-14a แสดง Mohr's circle ของสภาวะของหน่วยแรงที่จุดวิบัติของ element ของวัสดุเปราะที่ถูกกระทำโดยหน่วยแรงกดอัด (compressive stress) และของสภาวะของหน่วยแรงที่จุดวิบัติของ element ที่ถูกกระทำโดยหน่วยแรงดึง (tensile stress) จากรูป ระบายที่เกิดการวิบัติจะหาได้โดยการลากเส้นสัมผัส



Mohr's circle ในกรณีของหน่วยแรงกดอัดและในกรณีของหน่วยแรงดึง จากนั้น เราจะหามุมของระนาบที่เกิดการแตกหักได้จากการวัดค่าของมุม  $\phi$  โดยที่มุมดังกล่าวมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนส่วนของ Mohr's circle และมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนส่วนล่างของ Mohr's circle ดังนั้น รอยแตกที่เกิดขึ้นบน element ของวัสดุเพราะจะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 5-14b โดยจะทำมุม  $\phi/2$  จากแนวแรงกระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา

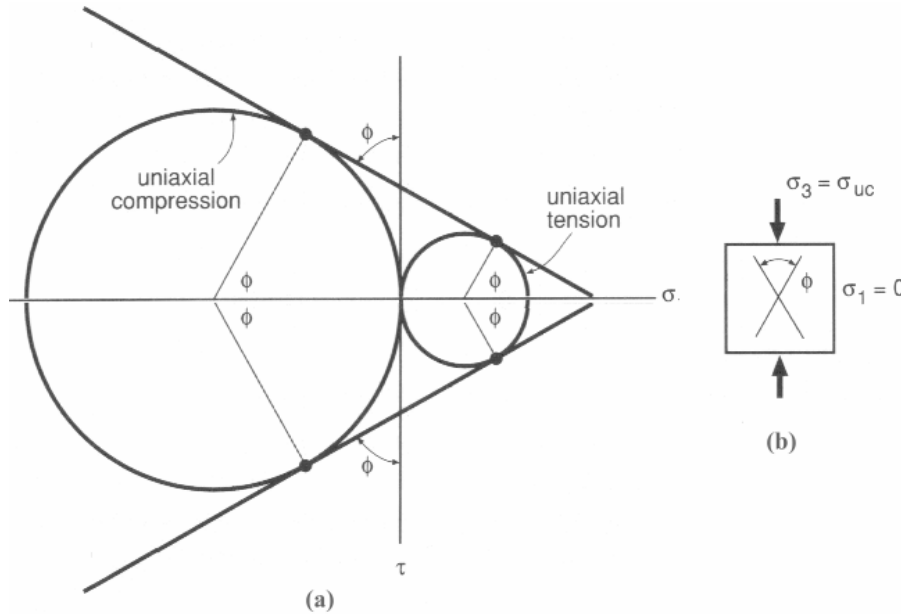


รูปที่ 5-13 รูปร่างของตัวอย่างทดสอบก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบของวัสดุชนิดต่างๆ

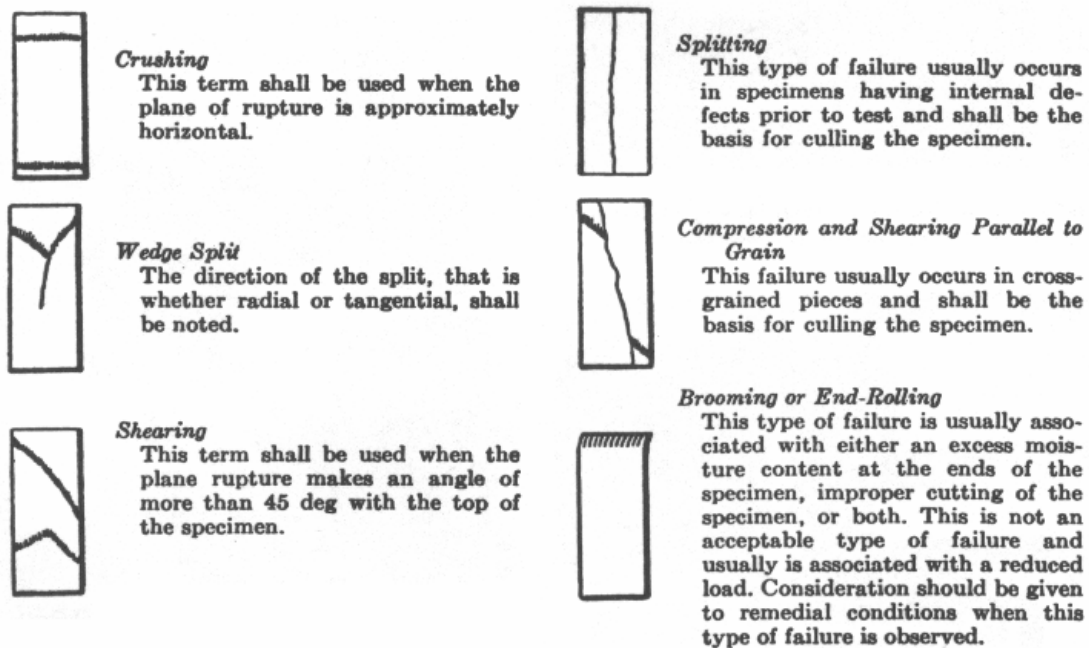
ลักษณะการวิบัติของไม้โดยแรงกดอัดจะแตกต่างจากลักษณะการวิบัติของคอนกรีตและเหล็กหล่อ โดยแรงกดอัดอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไม้ประกอบด้วยเส้นไม้จำนวนมากที่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่แน่นอน (เช่น ในแนวแกนของลำต้น เป็นต้น) โดยที่ไม้จะมีค่า elastic limit ที่ค่อนข้างต่ำ ไม่มีจุด yielding point ที่ชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ค่อนข้างมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ

คุณสมบัติทางกลของไม้ขึ้นอยู่กับทิศทางที่แรงกระทำต่อไม้ สำหรับไม้ที่ถูกแรงกระทำโดยแรงกดอัดในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้นั้น แรงดังกล่าวจะทำให้เกิดการอัดแตก (crushing) ของเนื้อไม้ แต่สำหรับไม้ที่

ถูกแรงกระทำโดยแรงกดอัดในแนวขนานกับเส้นไม้ แรงดังกล่าวจะทำให้เกิดการ โกงเดาะของเส้นไม้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าว (rupture) ขึ้น เนื่องจากการ โกงเดาะของเส้นไม้จะพยายามดันให้เนื้อไม้แยกออกจากกัน รูปที่ 5-15 แสดงลักษณะของการวิบัติแบบต่างๆ ของไม้



รูปที่ 5-14 Mohr's circle ของสถานะหน่วยแรงที่จุดวิบัติของ element ของวัสดุเปราะภายใต้หน่วยแรงกดอัด



รูปที่ 5-15 ลักษณะของการวิบัติแบบต่างๆ ของไม้

#### 5.4 การทดสอบแรงเฉือน (shear test)

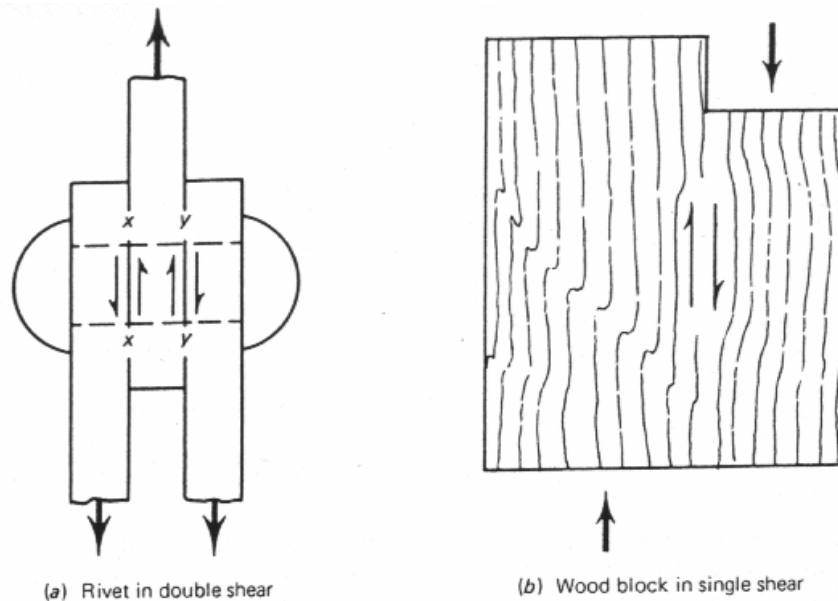
##### 5.4.1 บทนำ

ในการทดสอบแรงเฉือน เราสนใจคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการกระทำของแรงเฉือน 2 ประเภท คือ แรงเฉือน โดยตรง (direct shear) และแรงเฉือนเนื่องจากการบิด (torsional shear)

### direct shear

พิจารณารูปที่ 5-16 เนื่องจากว่าแรงเฉือนในกรณีนี้เกิดจากการกระทำโดยตรงของแรงเฉือนต่อแท่ง ตัวอย่างทดสอบ เราจึงเรียกแรงเฉือนในลักษณะนี้ว่า direct shear โดยทั่วไปแล้ว direct shear มักจะเกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อที่ใช้สลักเกลียวเป็นตัวเชื่อมต่อแผ่น (plate) วัสดุสองแผ่นเข้าด้วยกัน direct shear จะถูกแบ่งออกได้อีกเป็น 2 แบบคือ

1. double shear ดังที่แสดงในรูปที่ 5-16a ซึ่งในกรณีนี้หมุดถูกกระทำโดยแรงเฉือนในสองระนาบ และหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของหมุดจะหาได้จากสมการ  $\tau = P/2A$  เมื่อ  $P$  เป็นแรงดึงที่กระทำต่อจุดเชื่อมต่อและ  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของหมุด
2. single shear ดังที่แสดงในรูปที่ 5-16b ซึ่งในกรณีนี้ถ้าสมมุติให้แรงทั้งสองมีระยะเยื้องศูนย์กลางที่น้อยมากแล้ว เราจะเห็นได้ว่า แท่งไม้จะถูกกระทำโดยแรงเฉือนในระนาบเดียวและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของหมุดจะหาได้จากสมการ  $\tau = P/A$  เมื่อ  $P$  เป็นแรงกดอัดที่กระทำต่อแท่งไม้และ  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของระนาบที่เกิดการวิบัติ



รูปที่ 5-16 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear)

### torsional shear

เมื่อเพลลาของเครื่องจักรกล ดังที่แสดงในรูปที่ 5-17a ถูกกระทำโดยแรงบิด (torque)  $T$  ที่ปลายทั้งสองข้างของเพลลาแล้ว เพลลาดังกล่าวจะเกิดการบิดขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 5-17b และเราจะหาค่ามุมบิด  $\phi$  ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดใดๆ ของเพลลาได้โดยใช้สมการ

$$\phi = \frac{TL}{GJ}$$

เมื่อ  $L$  เป็นความยาวของเพลลา  $J$  เป็น polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัดของเพลลา และ  $G$  เป็น shearing modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเพลลา ถ้าเพลลามีหน้าตัดทรงกลมตันและมีรัศมี  $r$  แล้ว เราจะได้ว่า

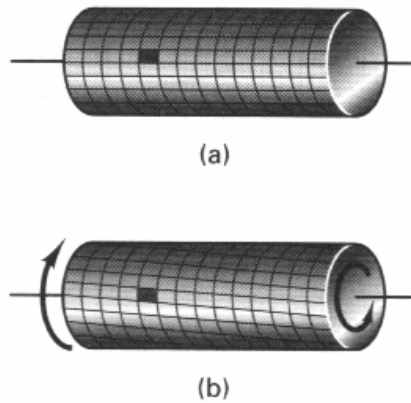
$$J = \frac{\pi r^4}{2}$$

แรงบิดดังกล่าวจะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ขึ้นในวัสดุ โดยที่จะหาได้โดยใช้สมการ

$$\tau = \frac{Tr}{J}$$

เมื่อ  $r$  เป็นรัศมีของเพลลา และเราจะหาค่าความเครียดเฉือน (shear strain)  $\gamma$  ที่เกิดขึ้นบนเพลลาได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{r\phi}{L}$$



รูปที่ 5-17 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเพลลาภายใต้แรงบิด

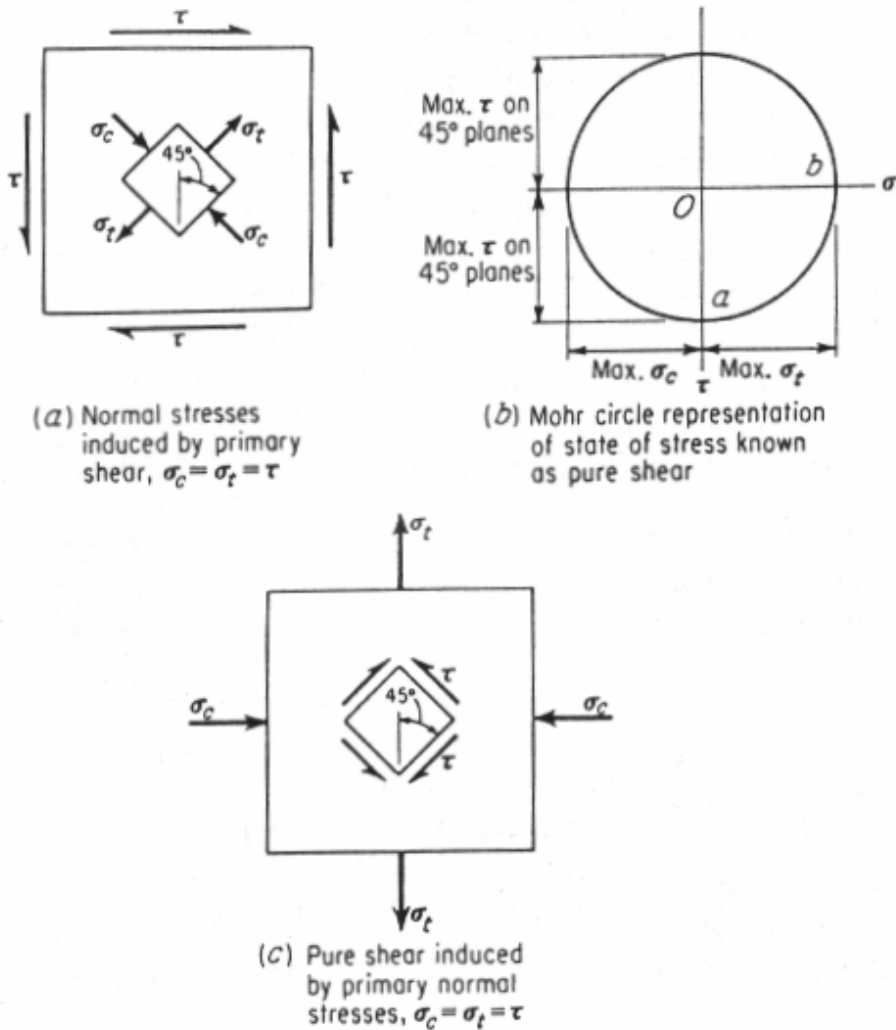
หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบน element ของวัสดุในกรณีของแรงบิดนี้จะอยู่ในสภาวะของหน่วยแรงเฉือนอย่างเดียวน (pure shear) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18a เนื่องจาก element ดังกล่าวถูกระงับโดยหน่วยแรงเฉือนเท่านั้น จากหลักการ stress transformation และ Mohr's Circle ที่ได้ศึกษาไปแล้วในวิชา mechanics of materials เราจะได้ว่า หน่วยแรงที่กระทำอยู่บน element ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $\sigma_x = \sigma_y = 0$  และ  $\tau_{xy} = \tau$  ดังนั้น จุดศูนย์กลางของ Mohr's circle จะอยู่ที่จุด

$$\left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0 \right] = [0, 0]$$

และรัศมีของ Mohr's circle มีค่าเท่ากับ

$$R = \sqrt{\left[ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right]^2 + \tau_{xy}^2} = \tau$$

และเราสามารถเขียน Mohr's circle ได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18b ขอให้สังเกตด้วยว่า เนื่องจาก Mohr's circle มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $(0, 0)$  และรัศมีเท่ากับหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ดังนั้น ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (maximum shear stress) จะมีค่าเท่ากับค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลัก (principal normal stresses) เนื่องจากความยาวของเส้นรัศมี  $Oa$  มีค่าเท่ากับความยาวของเส้นรัศมี  $Ob$



รูปที่ 5-18 Mohr's circle ของสภาวะหน่วยแรงของ element ภายใต้หน่วยแรงเฉือน

เมื่อเราทำการหมุนเส้นรัศมี  $Oa$  ของ Mohr's Circle ทวนเข็มนาฬิกาไปเป็นมุม  $90^\circ$  ไปยังเส้นรัศมี  $Ob$  แล้ว element ดังกล่าวจะเกิดการหมุนไปเป็นมุม  $45^\circ$  ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18a และสภาวะของหน่วยแรง pure shear จะถูกเปลี่ยนเป็นสภาวะของหน่วยแรงในสองแกน (biaxial stress) ซึ่งมีเฉพาะหน่วยแรงกดอัดหลัก (compressive principal stresses)  $\sigma_c$  และหน่วยแรงดึงหลัก (tensile principal stresses)  $\sigma_t$  กระทำอยู่บน element ดังกล่าว ดังนั้น ถ้าโครงสร้างถูกกระทำโดยแรงบิดและถ้าวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างมีกำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดอัดแล้ว การวิบัติของโครงสร้างจะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

ในทางตรงกันข้าม สภาวะของหน่วยแรงในสองแกน (biaxial stress)  $\sigma_c$  และ  $\sigma_t$  จะถูกเปลี่ยนเป็นสภาวะของหน่วยแรง pure shear  $\tau$  ได้โดยการหมุน stress element ไปเป็นมุม  $45^\circ$  ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18c

### 5.4.2 ข้อจำกัดของการทดสอบแรงเฉือน

ในการทดสอบ Direct shear เราจะทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ โดยให้เกิดหน่วยแรงคัตบนระนาบที่จะเกิดการเฉือนให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้ว การติดตั้งดังกล่าวจะทำให้ยากมาก อีกทั้งยังจะมีแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ และระดับความแข็งและความคมของแผ่นเหล็กที่ใช้เฉือนตัวอย่างทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นเพียงค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยประมาณของวัสดุเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว การทำการทดสอบ direct shear จะไม่สามารถหาคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นแรงเฉือน (shearing modulus of elasticity) ของวัสดุได้ เนื่องจากเราไม่สามารถวัดหาค่าความเครียดเฉือน (shearing strain) ที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างทดสอบได้ ดังนั้น ถ้าเราต้องการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลดังกล่าว เราจำเป็นต้องทำการทดสอบแรงบิด (torsion test)

ในการทดสอบแรงบิด เราจะสามารถคำนวณหาค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress) และความเครียดเฉือน (shearing strain) ได้ จากนั้น เราจะใช้ข้อมูลที่ได้นี้มาเขียน shear stress-shear strain diagram ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 จากนั้น เราจะหาคุณสมบัติทางกลต่างๆ ของวัสดุที่ถูกกระทำโดยแรงเฉือนได้ ซึ่งประกอบด้วย

1. shearing stress at proportional limit,  $\tau_{pl}$
2. yielding shearing stress,  $\tau_y$
3. ultimate shearing stress,  $\tau_u$
4. fracture shearing stress,  $\tau_f$
5. shear modulus of elasticity หรือ modulus of rigidity,  $G$

อย่างไรก็ตาม การทดสอบแรงบิดก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถนำมาใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเพราะได้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ทำด้วยวัสดุเพราะจะวิบัติโดยแรงดึงที่ทำมุม  $45^\circ$  กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบก่อนที่วัสดุจะวิบัติโดยแรงเฉือน

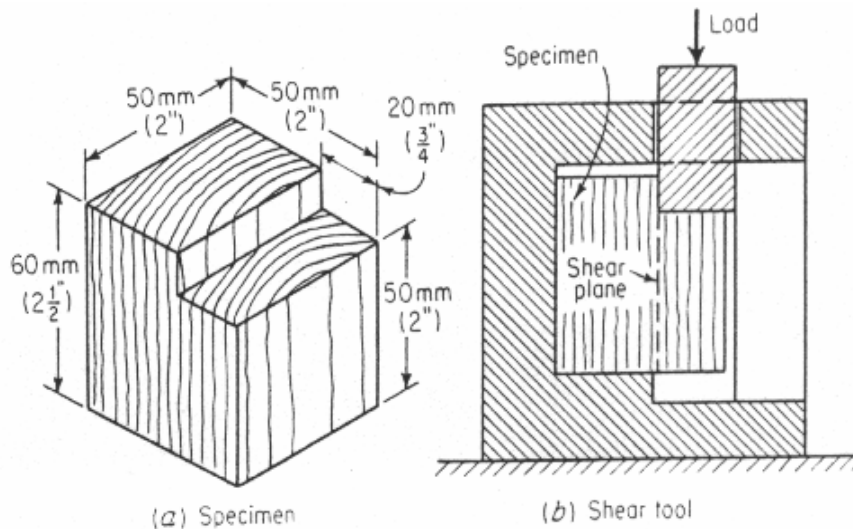
### 5.4.3 ตัวอย่างทดสอบ

#### direct shear test

การทดสอบ direct shear ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 10 การทดสอบแรงเฉือนของทองแดงและอลูมิเนียม นั้น เป็นการให้แรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่างทดสอบแบบสองระนาบ (double shear) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-16a โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่พอดีกับช่องว่างของจุดเชื่อมต่อ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นเมื่อแรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการทดสอบ direct shear ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 11 การทดสอบแรงเฉือนของไม้ในแนวขนานเสี้ยน เป็นการให้แรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่างทดสอบแบบระนาบเดียว (single shear) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-16b โดยตัวอย่างทดสอบจะต้องมีรูปร่างและขนาดตามที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 143 ดังที่แสดงในรูปที่ 5-19a และเครื่องจับตัวอย่างทดสอบจะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 5-19b โดยเครื่องจับตัวอย่าง

ทดสอบจะต้องจับตัวอย่างทดสอบได้แน่นหนา โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะต้องไม่เกิดการหมุนขณะที่แรงกระทำ และแรงกระทำจะต้องกระทำนานไปกับระยะเวลาของการเฉือน



รูปที่ 5-19 ตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนของไม้ในแนวขนานเส้น

#### torsion test

การเลือกตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบแรงบิด (torsion test) นั้น เราต้องพิจารณาถึง

1. ตัวอย่างทดสอบจะต้องมีขนาดที่ใหญ่พอที่เราจะวัดหาค่าความเครียดเฉือน (shear strain) ได้อย่างถูกต้อง
2. ตัวอย่างทดสอบจะต้องมีความยาวพอเพียงที่จะทำให้ความเข้มข้นของหน่วยแรง (stress concentration) ที่จุดยึดจับมีผลน้อยมากต่อการวัดหาค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress)

นอกจากนั้นแล้ว ถ้าเราต้องการที่จะหาค่ากำลังรับแรงเฉือนผกผัน (proportional shearing strength) ของวัสดุแล้ว เราจะไม่ใช่ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกตัน เนื่องจากเราจะไม่สามารถวัดค่าดังกล่าวที่ผิววนอกสุดของตัวอย่างทดสอบได้โดยง่าย แต่เราจะใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกกลวง ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แทน โดยที่ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจะต้องมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาประมาณ 10 ถึง 12

#### 5.4.4 เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

ดูในคู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ 410 214 Material Testings ในปฏิบัติการที่ 4 การทดสอบแรงบิดของเหล็กและเหล็กหล่อ ในปฏิบัติการที่ 10 การทดสอบแรงเฉือนของทองแดงและอลูมิเนียม และในปฏิบัติการที่ 11 การทดสอบแรงเฉือนของไม้ในแนวขนานเส้น

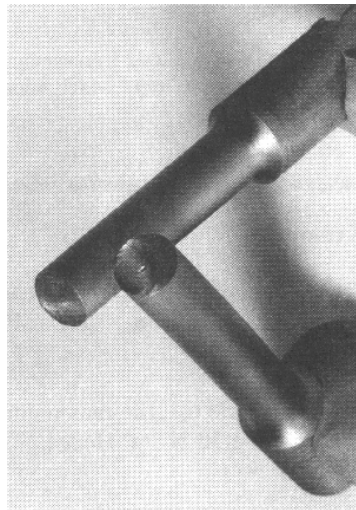
#### 5.4.5 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ

การแตกหักที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะมีความแตกต่างกับการการแตกหักที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึงและแรงกดอัด เนื่องจากว่า ที่จุดวิบัติภายใต้แรงเฉือน ตัวอย่างทดสอบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่หน้าตัดและความยาวของตัวอย่างทดสอบ

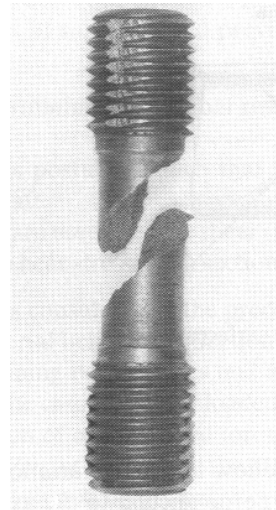
รูปที่ 5-20 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบแรงบิด ซึ่งจากการทดสอบเราจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทดสอบที่ทำด้วยวัสดุเหนียวจะมีการแตกหักของตัวอย่างทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-20a ซึ่งมีหน้าตัดที่เกิดการแตกหักที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบและหน้าตัดการแตกหักจะมีลักษณะที่เรียบค่อนข้างเรียบ ซึ่งการวิบัติในลักษณะนี้จะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

ในบางกรณี เราอาจจะสังเกตเห็นแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่ชัดเจน โดยแนวแกนดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นปุ่มขนาดเล็กที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดของรอยแตก การเกิดขึ้นของแนวแกนดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

1. รอยแตกจะเริ่มก่อตัวที่ผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากถูกกระทำโดยหน่วยแรงเฉือน (shear stress) ที่มีค่าสูงสุด
2. รอยแตกเกิดการขยายตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ
3. ระบายทั้งสองข้างของรอยแตกดังกล่าวมีการนูนตัวขึ้นมาจากผลของ Poisson's effect
4. เมื่อการนูนตัวของระบายดังกล่าวมีค่าค่อนข้างมากแล้ว การนูนตัวดังกล่าวจะก่อให้เกิดการดันกันเองของระบายทั้งสองและจะทำให้รอยแตกแยกออกจากกันไปตามแนวยาวของตัวอย่างทดสอบ
5. เมื่อรอยแตกกินเนื้อวัสดุเข้าไปจนถึงจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของรอยแตกแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะวิบัติโดยแรงเฉือนและแรงค้ำดังกล่าวร่วมด้วย



a.) การแตกร้าวใน Steel (Ductile material)



b.) การแตกร้าวใน Cast iron (Brittle material)

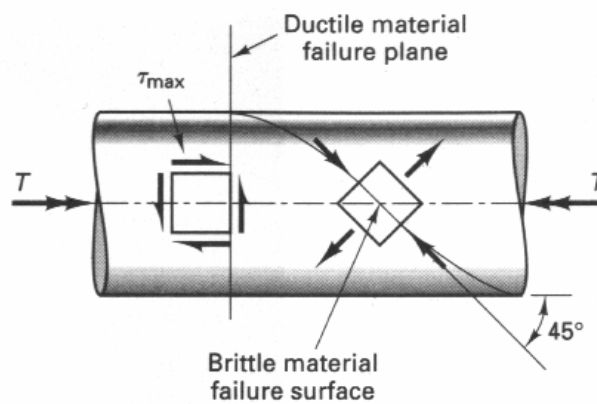
### รูปที่ 5-20 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบแรงบิด

เราจะอธิบายถึงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อที่มีลักษณะแตกต่างกันได้จากการพิจารณา Mohr's circle และกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดึงของวัสดุดังกล่าว

จาก Mohr's circle ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18c และจาก stress element ดังที่แสดงในรูปที่ 5-21 เราจะเห็นได้ว่า เนื่องจากเหล็กเหนียว (0.2% carbon) มีค่ากำลังรับแรงดึงแตกหัก (true tensile fracture strength)



เท่ากับ 713 MPa และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนประลัย (ultimate shear strength) เท่ากับ 310 MPa เมื่อเราทำการเพิ่มแรงบิดที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบมากขึ้นเรื่อยๆ แล้ว หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วย และเมื่อค่าหน่วยแรงเฉือนดังกล่าวมีค่าเท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนประลัย 310 MPa แล้ว จาก Mohr's circle และจากข้อสังเกตที่ว่า ในสภาวะของ pure shear ค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลัก (principal normal stress) บน stress element จะมีค่าเท่ากับค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (maximum shear stress) ดังนั้น ค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลักที่เกิดขึ้นบน stress element ที่ถูกหมุนไป  $45^\circ$  จะมีค่าเท่ากับ 310 MPa ด้วย ซึ่งค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลักดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเหนียวมาก ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบเหล็กเหนียวจึงวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือนที่ระนาบทำมุม  $90^\circ$  กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5-21 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ

ตัวอย่างทดสอบที่ทำด้วยวัสดุเปราะจะมีการวิบัติ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-20b โดยที่รอยแตกจะทำมุมกับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ  $45^\circ$  ซึ่งการวิบัติในลักษณะนี้จะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดึง

จาก Mohr's circle ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18c และจาก stress element ดังที่แสดงในรูปที่ 5-21 เราจะเห็นว่า เนื่องจากเหล็กหล่อ (cast iron) มีกำลังรับแรงดึงประลัย (tensile ultimate strength) เท่ากับ 140 MPa และมีกำลังรับแรงเฉือนประลัย (shear ultimate strength) เท่ากับ 255 MPa เมื่อเราทำการเพิ่มแรงบิดกระทำต่อตัวอย่างทดสอบมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนเหล็กหล้อมีค่าเท่ากับ 140 MPa แล้ว จาก Mohr's circle เมื่อเราหมุน stress element ดังกล่าวไปเป็นมุม  $45^\circ$  เราจะได้ว่า ค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลัก (principal normal stress) ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าเท่ากับ 140 MPa ด้วย ซึ่งเท่ากับค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กหล่อ ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบจึงวิบัติโดยค่าหน่วยแรงตั้งฉากหลักที่ระนาบ  $45^\circ$  กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

## 5.5 การทดสอบการดัด (bending test)

### 5.5.1 บทนำ

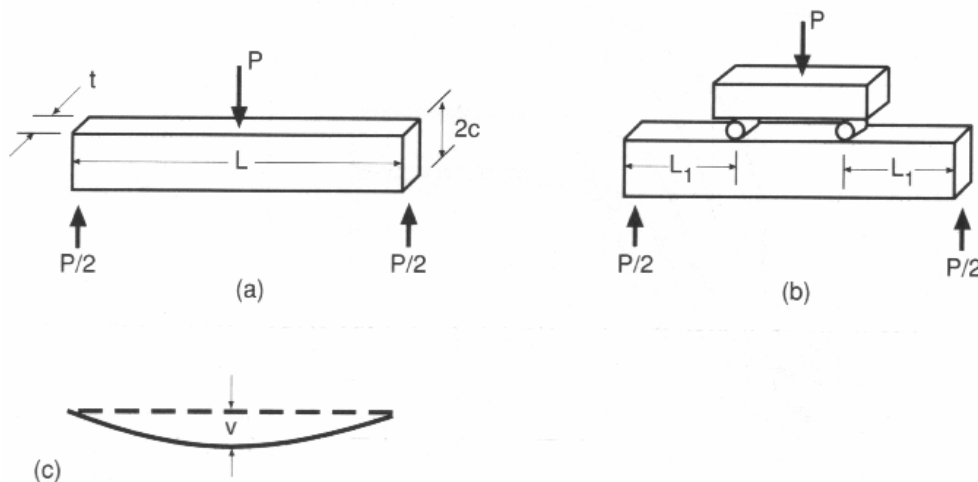
การทดสอบการดัดของคาน (bending test หรือ flexural test) เป็นการทดสอบที่ไม่ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพงนัก เมื่อเทียบกับการทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงกดอัด ทั้งนี้เนื่องจากว่าแรงที่จะทำให้

ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติมักมีค่าที่ไม่มากนักและการโก่งตัว (deflection) ของคานที่จุดวิบัติจะมีค่าค่อนข้างสูงมาก เมื่อเทียบกับการยืดและหดตัวของตัวอย่างทดสอบในการทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงกดอัด

ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดัดที่เราสนใจได้แก่

1. flexural stress at yielding point,  $\sigma_y$
2. flexural modulus of elasticity,  $E$
3. modulus of rupture,  $\sigma_r$
4. modulus of resilience,  $u_r$

การทดสอบนี้มักถูกใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงของสำหรับวัสดุเปราะ เนื่องจาก ในการทดสอบแรงดึง วัสดุเปราะ เช่น คอนกรีต เป็นต้น จะเกิดการแตกหักที่จุดยึดจับตัวอย่างทดสอบได้ง่าย ตัวอย่างทดสอบการดัดมักจะมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมและทรงกลมและจะถูกกระทำโดยแรงกระทำเป็นจุด (point loads) ในลักษณะให้แรงกระทำสามจุด (three-point loading) หรือให้แรงกระทำสี่จุด (four-point loading) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-22a และ 5-22b ตามลำดับ



รูปที่ 5-22 การทดสอบแบบ three-point loading และแบบ four-point loading

เมื่อคานถูกกระทำโดยแรง  $P$  แล้ว วัสดุที่อยู่ส่วนบนของหน้าตัดของคานจะถูกทำให้หดตัวลง เนื่องจากถูกกระทำโดยหน่วยแรงกดอัด (compressive stress) และวัสดุที่อยู่ส่วนล่างของหน้าตัดของคานจะถูกทำให้ยืดออก เนื่องจากถูกกระทำโดยหน่วยแรงดึง (tensile stress)

จากการที่คานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะดังกล่าวดังกล่าวและถ้าวัสดุที่ทำคานยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) แล้ว การกระจายของความเครียดตั้งฉาก (normal strain) บนหน้าตัดของคานจะมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง โดยมีค่าสูงสุดที่ผิวบนและผิวล่างสุดของตัวอย่างทดสอบ และจาก Hooke's law เราจะได้ว่า การกระจายของหน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) บนหน้าตัดของคานก็จะมีลักษณะเป็นการกระจายแบบเส้นตรงด้วย ดังนั้น ระหว่างผิวบนสุดและผิวล่างสุดของคานจะมีแกนๆ หนึ่ง

ซึ่งมีค่าหน่วยแรงตั้งฉากและความเครียดตั้งฉากเท่ากับศูนย์ ซึ่งเราจะเรียกแกนดังกล่าวว่า แกนสะเทิน (neutral axis) และถ้าหากเราทำด้วยวัสดุที่มีความสัมพันธ์ของ stress-strain ของแรงดึงเหมือนกับความสัมพันธ์ของ stress-strain ของแรงกดอัดแล้ว เราจะได้ว่า แกนสะเทินดังกล่าวจะตัดผ่านจุด centroid ของหน้าตัดของคาน

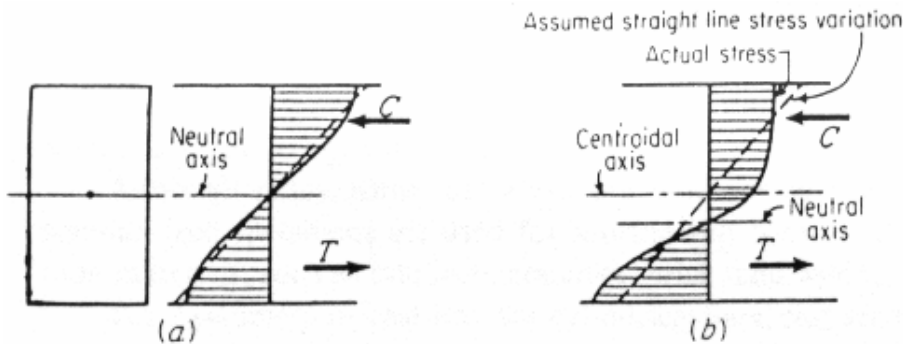
จากรูปที่ 5-22 ค่าสูงสุดของหน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) บนหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของคานจะเกิดขึ้นที่ระยะ  $c$  จากแกนสะเทินของคาน และจะหาได้จากสมการ flexural formula

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

เมื่อ  $M =$  โมเมนต์ (moment) ถัดภายใน ที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดที่เราากำลังพิจารณาขอบแกนสะเทิน

$I =$  moment of inertia ของหน้าตัดของคานที่เราากำลังพิจารณาขอบแกนสะเทิน

เมื่อวัสดุที่ทำคานมีพฤติกรรมเกินช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) แล้ว การกระจายของหน่วยแรงตั้งฉากบนหน้าตัดของคานจะไม่มีลักษณะเป็นการกระจายแบบเส้นตรงอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากว่าหน่วยแรง (stress) จะไม่แปรผันเป็นเส้นตรงกับความเครียด (strain) ดังที่แสดงโดยเส้นทึบในรูปที่ 5-23a ถ้าเราสมมุติให้การกระจายของหน่วยแรงตั้งฉากเป็นแบบเส้นตรง ดังที่แสดงโดยเส้นประในรูปที่ 5-23a แล้วค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่เกิดขึ้นบนผิวด้านบนและด้านล่างของคานก็จะสูงกว่าความเป็นจริง



รูปที่ 5-23 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานเนื่องจากการดัด

ถ้าวัสดุมีความสัมพันธ์ของ stress-strain ของแรงดึงต่างกับความสัมพันธ์ของ stress-strain ของแรงกดอัด เราจะได้ว่า แกนสะเทิน (neutral axis) ของคานจะไม่ตัดผ่านจุด centroid ของหน้าตัดของคาน ถ้ากำหนดให้วัสดุมีความแกร่งในการต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าในการต้านทานต่อแรงกดอัดแล้ว แกนสะเทินก็จะเลื่อนลงมาทางส่วนล่างของคาน ดังที่แสดงโดยเส้นทึบในรูปที่ 5-23b

ในกรณีที่วัสดุที่ใช้ทำคาน ดังที่แสดงในรูปที่ 5-22a มีพฤติกรรมแบบ linear elastic จนถึงจุดวิบัติ เราจะสามารถหาค่าหน่วยแรงแตกหักประลัย (ultimate fracture stress) เนื่องจากการดัดหรือที่มักถูกเรียกว่า โมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture)  $\sigma_r$  ได้จากค่าแรงที่จุดแตกหัก (failure load)  $P_{failure}$  ซึ่งจาก flexural formula เมื่อ  $I = 2tc^3/3$  เราจะได้ว่า

$$\sigma_r = \frac{3L}{8tc^2} P_{failure}$$

นอกจากนั้นแล้ว กำลังคดกเนื่องจากการคด (flexural yielding strength) ของวัสดุก็สามารถหาได้จากสมการดังกล่าว โดยที่ค่าแรงที่จุดแตกหัก  $P_{failure}$  จะถูกแทนที่โดย  $P_{offset}$  เมื่อ  $P_{offset}$  เป็นค่าแรงที่จุดเริ่มต้นของการคด (yielding) โดยทั่วไปแล้ว สำหรับเหล็ก  $P_{offset}$  จะเป็นค่าแรงที่คานเกิดการโก่งตัว 0.5 mm ห่างจาก (offset) จุดเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและค่าการโก่งตัวของคาน ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$\sigma_y = \frac{3L}{8tc^2} P_{offset}$$

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการคด (flexural modulus of elasticity) ของวัสดุที่ใช้ทำคานจะสามารถหาได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและค่าการโก่งตัว (load-deflection curve) และสมการการโก่งตัวของคาน ในกรณีการทดสอบแรงคดแบบให้แรงกระทำสามจุด (three-point loading test) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-22a เราจะได้ว่า

$$v = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$P = \frac{48EI}{L^3} v$$

ดังนั้น ค่าความชัน (slope)  $k = dP / dv$  ของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและค่าการโก่งตัว ในช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบเส้นตรงจะมีค่าเท่ากับ

$$k = \frac{48EI}{L^3}$$

และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการคด (flexural modulus of elasticity) จะหาได้จาก

$$E = \frac{L^3}{48I} k$$

### 5.5.2 ข้อจำกัดของการทดสอบการคด

โครงสร้างมักจะประกอบด้วยองค์อาคารที่ต้านทานต่อแรงกระทำที่ทำให้เกิดการคด เช่น คาน เป็นต้น การออกแบบขององค์อาคารดังกล่าวจะใช้คุณสมบัติทางกลต่างๆ ของวัสดุ ซึ่งได้แก่ กำลังรับแรงดึง (tension strength) กำลังรับแรงกดอัด (compression strength) กำลังรับแรงเฉือน (shear strength) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ซึ่งจะหาได้จากการทดสอบเท่านั้นและสมการที่ใช้ในการออกแบบเป็นสมการที่ใช้ประมาณพฤติกรรมขององค์อาคารดังกล่าวเท่านั้น

ในบางกรณีที่องค์อาคารของโครงสร้างมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนจนไม่สามารถหาสมการมาอธิบายได้โดยง่าย เช่น การโก่งคดโดยการคดและการบิด (flexural-torsional buckling) เป็นต้น แล้วเราจำเป็นต้องทำการทดสอบขององค์อาคารของโครงสร้างดังกล่าว เพื่อศึกษาและตรวจสอบพฤติกรรมที่แท้จริงขององค์อาคารดังกล่าวก่อนการออกแบบ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการคด (flexural modulus of elasticity) ของวัสดุได้จากการทดสอบนี้จะถูกนำมาหาค่าการโก่งตัว (deflection) ของคานที่ถูกกระทำโดยแรงแบบอื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตาม การคำนวณหา

ค่าการโก่งตัวโดยใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการตัดอาจจะมีผลผิดพลาดเกิดขึ้นได้ในบางกรณี ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้

1. ค่าการโก่งตัวของคานที่เกิดขึ้นอาจจะไม่ได้เกิดจากโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว เช่น ในกรณีที่คานสั้นและเล็ก ค่าการโก่งตัวของคานจะเกิดจากทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เป็นต้น
2. ความสัมพันธ์ของ stress-strain ที่เกิดขึ้นบนคานที่เราคำนวณหาค่าการโก่งตัวอาจเกินช่วง linear elastic ไปแล้ว
3. วัสดุที่ใช้ทำคานอาจมีความบกพร่องในตัวเอง

### 5.5.3 ตัวอย่างทดสอบ

ถ้าเราต้องการทดสอบคานจนเกิดการวิบัติแบบแตกหักเพื่อหาค่าโมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture) แล้ว คานดังกล่าวจะต้องมีขนาดหน้าตัดและความยาวที่ไม่ทำให้เกิดการวิบัติในลักษณะอื่นๆ เช่น การวิบัติโดยการโก่งตัวทางด้านข้าง (lateral buckling) และการวิบัติโดยแรงเฉือน เป็นต้น

เพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติโดยแรงเฉือน คานจะต้องมีอัตราส่วนของความยาวต่อความลึกไม่น้อยกว่า 6 ถึง 12 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ รูปร่างของคาน และลักษณะการกระทำของแรง และในการที่จะป้องกันการวิบัติโดย lateral buckling คานจะต้องมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวไม่น้อยกว่า 15

### 5.5.4 เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

ดูในคู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ 410 214 Material Testings ในปฏิบัติการที่ 6 การทดสอบแรงดัดของอิฐดินเผา ปฏิบัติการที่ 8 การทดสอบแรงดัดของไม้ และปฏิบัติการที่ 9 การทดสอบแรงดัดของเหล็กและเหล็กหล่อ

### 5.5.5 ข้อสังเกตของการทดสอบการดัด

ในการทดสอบนี้ เราจะต้องทำการสังเกตและจดบันทึกลักษณะและชนิดของตัวอย่างทดสอบ จุดบกพร่องที่มีอยู่บนตัวอย่างทดสอบ ขนาดของตัวอย่างทดสอบ ชนิดและอัตราการใช้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ และอื่นๆ เช่นเดียวกับการทดสอบแบบอื่นๆ ที่กล่าวไปแล้ว

โดยทั่วไปแล้ว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการดัด (flexural modulus of elasticity) จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (tension test) และการทดสอบแรงกดอัด (compression test)

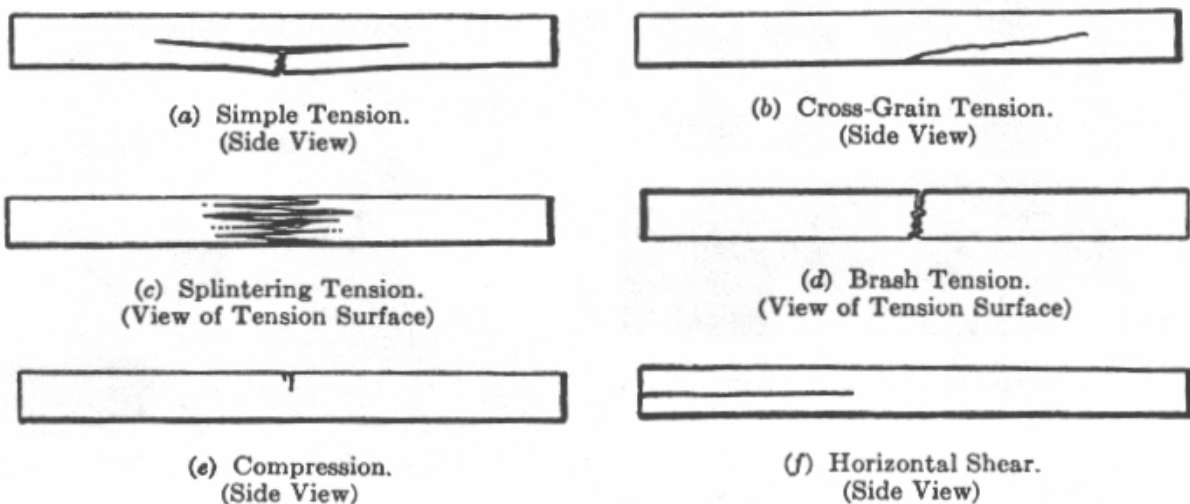
ค่า proportional limit ที่หาได้โดยการทดสอบนี้จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงกดอัด ทั้งนี้เนื่องจากการคลาก (yielding) ของวัสดุในการทดสอบการดัดจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันตลอดหน้าตัด แต่จะเกิดขึ้นที่ผิวบนสุดและล่างสุดของตัวอย่างทดสอบก่อนและจึงขยายเข้าสู่บริเวณแกนสะเทิน (neutral axis) ของคาน

## การแตกหัก (rupture)

การวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ทำด้วยวัสดุประเช่น เหล็กหล่อ (cast iron) และคอนกรีต เป็นต้น จะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด โดยการแตกหักจะเริ่มจากผิวนอกสุดของตัวอย่างทดสอบด้านที่ถูกกระทำโดยแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากว่า วัสดุประมีกำลังรับแรงดึงน้อยกว่ากำลังรับแรงกดอัดมาก

คานไม้อาจจะเกิดการวิบัติขึ้นได้หลายรูปแบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-24 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิบัติโดยแรงดึงที่ผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกกระทำโดยแรงดึง เนื่องจากความแกร่งของไม้เมื่อถูกกระทำโดยแรงดึงในแนวนอนเส้นมักจะมีความสูงกว่าจากความแกร่งของไม้เมื่อถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวตั้งกล่าว ดังนั้น แกนสะเทิน (neutral axis) ของคานไม้จะเลื่อนเข้าหาผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกกระทำโดยแรงดึง ดังที่แสดงในรูปที่ 5-23b และผิวดังกล่าวจะถูกกระทำโดยแรงที่มีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนที่รับแรงกดอัด ดังนั้น คานไม้จึงมักเกิดการแตกที่ผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบที่รับแรงดึงก่อนผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบที่รับแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 5-24a ถึง 5-24d
2. วิบัติโดยแรงกดอัดที่ผิวด้านนอกสุดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกกระทำโดยแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 5-24e
3. วิบัติโดยโก่งเดาะทางด้านข้าง (lateral deflection) ของส่วนของคานไม้ที่ถูกกระทำโดยแรงกดอัด
4. วิบัติโดยแรงเฉือนในแนวนอน (horizontal shear) โดยมีรอยแตกขนานไปตามแนวเส้นบริเวณแกนสะเทิน (neutral axis) ของคาน ดังที่แสดงในรูปที่ 5-24f
5. วิบัติในลักษณะของการกดอัดบริเวณที่แรงกระทำเป็นจุด (concentrated load) กระทำ



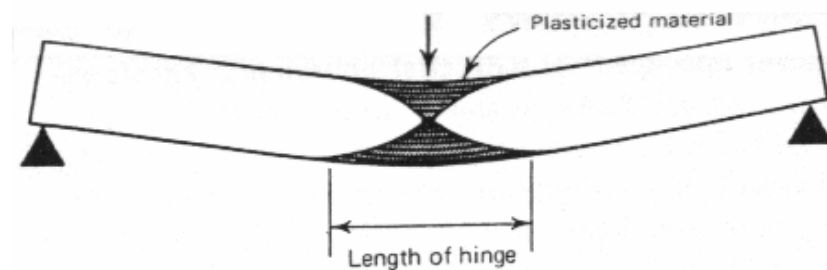
รูปที่ 5-24 ลักษณะการวิบัติแบบต่างๆ ของคานไม้

การแตกหักที่เกิดขึ้นในคานเหล็กหล่อและคานคอนกรีต (วัสดุเปราะ) จะมีลักษณะที่แน่นอนกว่าการแตกหักที่เกิดขึ้นในคานไม้ โดยที่จะเกิดขึ้นที่หน้าตัดของคานที่รับ โมเมนต์ดัด (bending moment) สูงสุด และที่ผิวนอกสุดของส่วนของคานที่ถูกกระทำโดยแรงดึง

ในกรณีที่มีการแตกหักเป็นแบบผสมระหว่างลักษณะการแตกหักหลายๆ แบบแล้ว เราจะต้องทำการสังเกตและจดบันทึกลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดมากขึ้น เช่น ลักษณะของการเกิดการคลากเป็นจุด (localized yielding) และการโก่งเดาะ (buckling) เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว เราควรระบุด้วยว่าลำดับของลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร

### การคลาก (yielding)

คานซึ่งทำด้วยวัสดุเหนียว (ductile material) จะมีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปเกิดขึ้น เมื่อโมเมนต์ดัด (bending moment) สูงสุดที่เกิดขึ้นบนคานมีค่าเท่ากับค่า plastic moment แล้ว วัสดุที่หน้าตัดดังกล่าวก็จะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง plastic และจุดดังกล่าวจะทำหน้าที่เหมือน hinge และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานจะมีค่าที่สูงมากอย่างรวดเร็ว โดยที่แรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยทั่วไปแล้ว เราจะเรียกจุดดังกล่าวว่า plastic hinge ดังที่แสดงในรูปที่ 5-25 โดยที่เราควรบันทึกถึงตำแหน่งที่เกิด plastic hinge และความยาวของ plastic hinge ด้วย



รูปที่ 5-25 plastic hinge

### 5.5.6 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ

ในการทำการทดสอบการดัดของวัสดุเปราะนั้น ชนิดและอัตราการใช้แรงกระทำ ความยาวของช่วง (span) และขนาดของหน้าตัดของคาน จะมีผลกระทบต่อผลการทดสอบที่ได้

#### ประเภทของแรงกระทำ (loading type)

การทดสอบคานโดยใช้คานอย่างง่าย (simple beam) ที่มีจุดรองรับเป็นหมุดและ roller นั้น ค่าสูงสุดของโมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture) ที่กึ่งกลางของช่วง (span) ของคานในทางทฤษฎีจะมีค่าสูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดที่เกิดการแตกหักจริงประมาณ 7% เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อวัสดุ และการทดสอบคานโดยใช้คานยื่น (cantilever beam) จะให้ค่าโมดูลัสการแตกหักที่สูงกว่าการทดสอบคานโดยใช้คานอย่างง่ายที่ถูกกระทำโดยแรงกระทำสามจุด (three-point loading) เล็กน้อย เนื่องจากการยึดรั้งที่จุดรองรับ ซึ่งเป็นจุดที่รองรับโมเมนต์สูงสุด

### ขนาดของตัวอย่างทดสอบ (specimen dimensions)

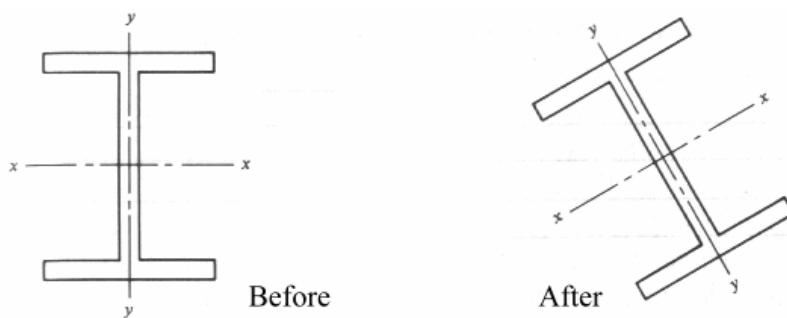
จากผลการทดสอบคานคอนกรีตและคานเหล็กหล่อพบว่า เมื่อคานมีความยาวของช่วง (span) ของคานสั้นลงแล้ว ค่าโมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture) จะมีค่ามากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว รูปร่างของหน้าตัดของคานก็มีผลต่อผลการทดสอบการคด จากการทดสอบคานเหล็กหล่อที่มีรูปร่างหน้าตัดคานรูปตัว I และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันพบว่า คานที่มีหน้าตัดรูปตัว I จะมีค่ากำลังรับแรงคดที่จุดวิบัติมากกว่าคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เมื่อคานเหล็กหล่อ คานคอนกรีต และคานไม้มีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นแล้ว กำลังรับแรงคดที่หาได้จากผลการทดสอบคานดังกล่าวจะมีค่าลดลง เนื่องจากคานที่มีหน้าตัดใหญ่มักจะมีข้อบกพร่องในเนื้อวัสดุมากกว่าคานขนาดเล็ก

### เสถียรภาพ (stability)

คานที่มีหน้าตัดที่เป็นผนังบางเช่น คานหน้าตัดรูปตัว I คานหน้าตัดรูปตัว L และคานหน้าตัดรูปตัว C เป็นต้น ซึ่งทำด้วยเหล็กเหนียวมักจะมีการวิบัติเนื่องจากการขาดเสถียรภาพเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยอาจจะมีลักษณะการวิบัติดังนี้

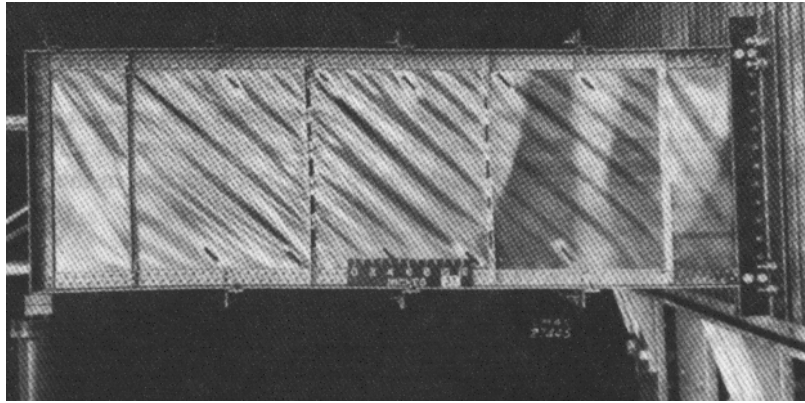
1. ถ้าคานเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ภายใต้การกระทำของแรงแล้ว การวิบัติของคานดังกล่าวอาจจะเกิดก่อนที่ plastic hinge จะเกิดขึ้นได้
2. ในกรณีที่ปีก (flange) ของหน้าตัดของคานหน้าตัดรูปตัว H แบบ wide-flange ซึ่งถูกกระทำโดยแรงกดอัดมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาน้อยกว่า 15 นั้น ปีกดังกล่าวของคานอาจจะเกิดการบิดเบี้ยว (warping) ขึ้นก่อนที่วัสดุจะถึงจุดคด (yielding) ได้ ซึ่งเราเรียกการวิบัติแบบนี้ว่า การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) ถ้าไม่มีการป้องกันการเคลื่อนของหน้าตัดของคานในแนวราบขณะที่เกิดบิดเบี้ยวแล้ว คานดังกล่าวก็อาจจะเกิดการเคลื่อนทางด้านข้างขึ้นด้วย ซึ่งเราเรียกการวิบัติแบบนี้ว่า การโก่งเดาะทางด้านข้าง (lateral buckling) ในกรณีที่การเคลื่อนดังกล่าวเกิดร่วมกับการบิด เราจะเรียกการวิบัติแบบนี้ว่า การโก่งเดาะบิดทางด้านข้าง (lateral-torsional buckling) ดังที่แสดงในรูปที่ 5-26 ซึ่งการวิบัติทางด้านข้างทั้งสองกรณีนี้จะเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใด



รูปที่ 5-26 การโก่งเดาะบิดทางด้านข้าง (lateral-torsional buckling)

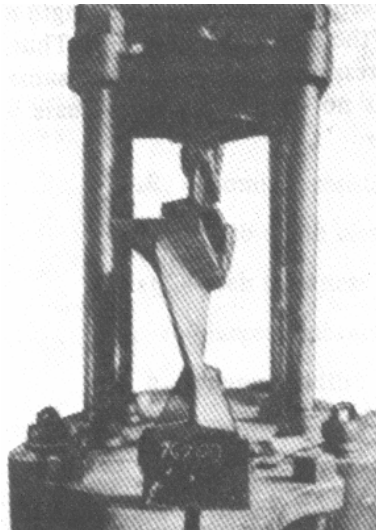


3. แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน เช่น คานหน้าตัดรูปตัว I คานหน้าตัดรูปตัว L และคานหน้าตัดรูปตัว C เป็นต้น ที่มีเวบ (web) ของคานที่บางมากจะก่อให้เกิดการวิบัติที่ web ของคานได้ โดยที่แรงเฉือนจะทำให้เกิดการโก่งเดาะของ web ของหน้าตัดของคาน ดังที่แสดงในรูปที่ 5-27



รูปที่ 5-27 การโก่งเดาะของ web ของหน้าตัดของคาน

4. เมื่อแรงกระทำเป็นจุด (concentrated load) กระทำต่อคานที่มีเวบ (web) ของคานที่บางมากแล้ว จุดที่แรงดังกล่าวกระทำอาจจะมีการวิบัติเกิดขึ้นที่ web ของคานได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 5-28



รูปที่ 5-28 การวิบัติที่ web ของคานเนื่องจากแรงกระทำเป็นจุด (concentrated load)

## 5.6 การทดสอบการล้า (fatigue test)

### 5.6.1 บทนำ

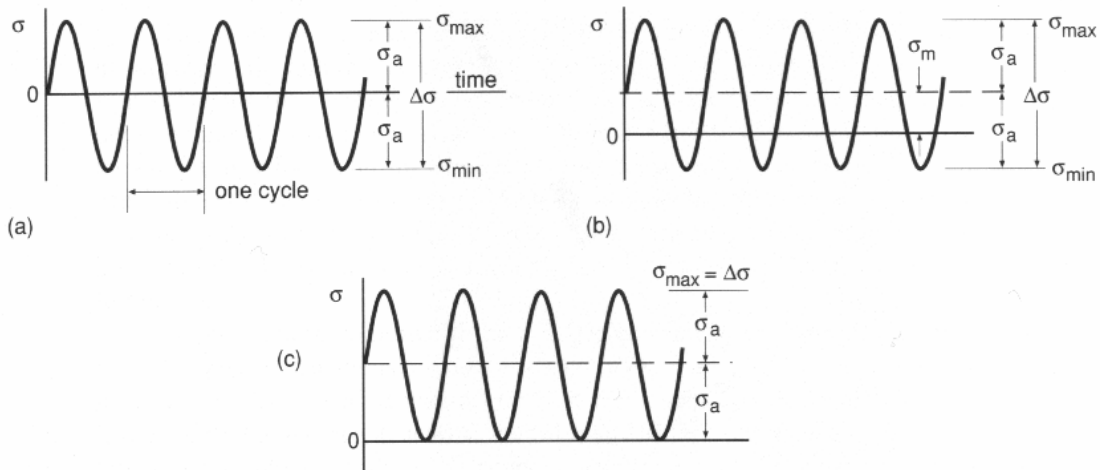
ในบางกรณี โครงสร้างและเครื่องจักรกลจะถูกกระทำโดยแรงกระทำที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาเป็นรอบ โดยมีขนาดของแรงจะมีค่าที่ไม่คงที่ เปลี่ยนไปตามเวลา แต่มีรูปแบบที่ซ้ำเดิมในหนึ่งช่วงเวลา แรงกระทำในลักษณะดังกล่าวมักจะถูกเรียกว่า cyclic load การกระทำของแรงในลักษณะนี้จะทำให้หน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เมื่อ cyclic load กระทำต่อโครงสร้างเป็นเวลานาน

พอควรแล้ว แรงดังกล่าวอาจจะทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติได้ โดยการวิบัตินี้จะถูกรเรียกว่า การล้า (fatigue) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4

จากรูปที่ 5-29 เราจะสามารถหาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงแบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ cyclic load ได้ดังต่อไปนี้

1. stress range เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดหรือ

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$



รูปที่ 5-29 หน่วยแรงแบบต่างๆ ที่เกิดจาก cyclic load

2. mean stress เป็นค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดหรือ

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

ค่า mean stress นี้อาจจะเท่ากับศูนย์ ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 5-29a หรือไม่เท่ากับศูนย์ ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 5-29b และ 5-29c ก็ได้

3. stress amplitude หรือ alternating stress เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างระหว่างค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดหรือ

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

4. stress ratio หรือ range ratio เป็นอัตราส่วนของค่าหน่วยแรงต่ำสุดกับค่าหน่วยแรงสูงสุดหรือ

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

โดยทั่วไปแล้ว เราจะบ่งบอกลักษณะของ cyclic load ได้ 2 แบบคือ บอกค่าหน่วยแรงสูงสุด (maximum stress) ร่วมกับ range ratio และบอกค่า mean stress ร่วมกับ alternating stress ดังที่แสดงในตารางที่ 5-1

ค่าหน่วยแรงที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกทดสอบไปเป็นจำนวนรอบค่าหนึ่งจะถูกรเรียกว่า กำลังรับความล้า (fatigue strength) ของวัสดุ และวัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีค่าหน่วยแรงที่

วัสดุนั้นสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดการล้าเลย ซึ่งเราจะเรียกค่าหน่วยแรงดังกล่าวว่า endurance limit ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 เท่าของกำลังของวัสดุที่หาได้จากการทดสอบแบบ static

ตารางที่ 5-1

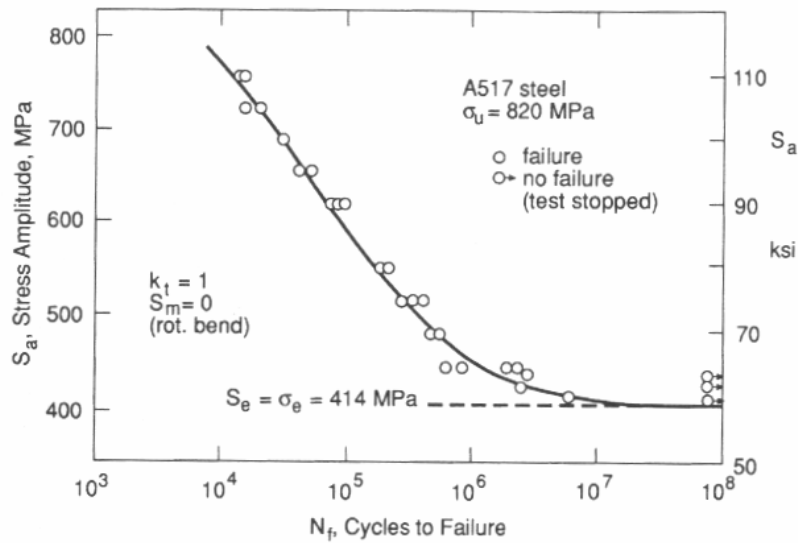
Type of stress variation		Range-ratio nomenclature		Mean-stress nomenclature	
Description	Diagram	Maximum stress	Range ratio	Mean stress	Alternating stress
Steady stress, $\sigma_1$		$\sigma_1$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1.0$	$\sigma_m$	0
Pulsating stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$		$\sigma_1$	$0 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 1$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Pulsating stress, between $\sigma_1$ and 0		$\sigma_1$	$\frac{0}{\sigma_1} = 0$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Partly reversed stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$ , where $-\sigma_1 < \sigma_2 < 0$		$\sigma_1$	$-1 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 0$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Completely reversed stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$ , where $\sigma_2 = -\sigma_1$		$\sigma_1$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1.0$	0	$\pm \sigma_a = \sigma_1$

ในการทดสอบการล้า (fatigue test) เราจะนำข้อมูลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบกับจำนวนรอบที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติมาเขียนกราฟ โดยที่กราฟที่ได้จะถูกเรียกว่า  $S - N$  curve ซึ่งกราฟดังกล่าวจะมีแกนตั้งแสดงค่าของหน่วยแรงและมีแกนนอนแสดงจำนวนรอบที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ fatigue ซึ่งมักจะถูก plot โดยใช้ scale แบบ logarithm ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5-30 จากรูป เราจะได้เห็นว่า เหล็ก A 517 จะมีค่า endurance limit ที่ 414 MPa ซึ่งมีค่าประมาณ 50% ของกำลังประลัย (ultimate strength) ของเหล็ก

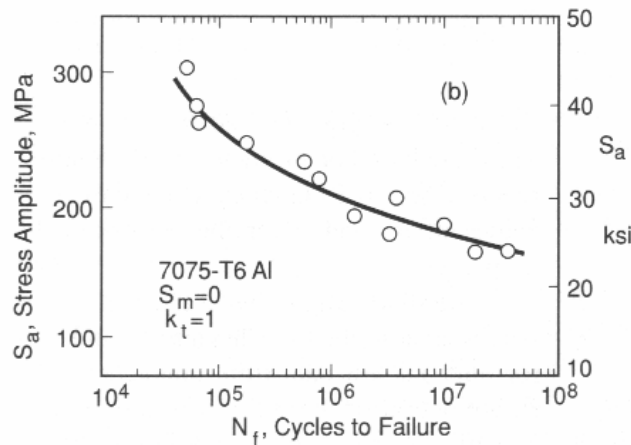
รูปที่ 5-31 แสดง  $S - N$  curve ของ aluminum ซึ่งในกรณีนี้ เราจะเห็นว่า aluminum ไม่มี endurance limit ที่ชัดเจน ซึ่งมาตรฐานการทดสอบจะกำหนดให้ endurance limit ของ aluminum เป็นค่าของหน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนมากๆ เช่น  $10^7$  หรือ  $10^8$  รอบ เป็นต้น ซึ่งจะใช้ค่าเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของวัสดุ

ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล เราจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการล้า (fatigue) ขึ้นในโครงสร้างและเครื่องจักรกล เมื่อโครงสร้างและเครื่องจักรกลดังกล่าวถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนสูงๆ ดังนั้น เมื่อเราทราบ  $S - N$  curve ของวัสดุแล้ว เราจะสามารถหาค่ากำลังรับความล้า (fatigue strength) ของวัสดุได้ และเมื่อเราหารค่า fatigue strength ด้วยค่าส่วนความปลอดภัย (factor of safety) แล้ว เราจะหาค่า

หน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress) ที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากการล้าได้



รูปที่ 5-30 ตัวอย่าง S-N curve ของเหล็ก A517



รูปที่ 5-31 S-N curve ของ aluminum

5.6.2 ข้อจำกัดของการทดสอบการล้า

โดยปกติแล้ว ในการออกแบบโครงสร้าง เช่น สะพานหรืออาคาร เป็นต้น เราจะไม่พิจารณาถึงการเกิดการล้า (fatigue) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในโครงสร้างเหล่านี้มีค่าน้อยมากและเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก โดยได้มีการประมาณการว่า สะพานที่รองรับทางรถไฟจะถูกกระทำโดย cyclic load น้อยกว่า 2 ล้านครั้งในช่วงชีวิตการใช้งาน 50 ปีของสะพาน อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลบางประเภท เช่น ข้อเหวี่ยงของลูกสูบ เป็นต้น อาจจะถูกกระทำโดย cyclic load มากกว่า 2 ล้านครั้งภายในเวลา 1 วันได้ ดังนั้น การล้า (fatigue) จึงต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลดังกล่าว

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการทดสอบการล้า (fatigue test) เพื่อหาค่า endurance limit ของวัสดุคือ การให้แรงดัดกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบที่หมุนด้วยความเร็วที่คงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงดัด (flexural stress) บนตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังที่แสดงในรูปที่ 5-29a อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างหรือเครื่องจักรกลจะไม่ถูกกระทำโดย cyclic load ที่มีค่าคงที่ตลอดเวลา และการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบขนาดเล็กไปวิเคราะห์หา fatigue strength ของโครงสร้างขนาดใหญ่ นั้นมีความไม่แน่นอนค่อนข้างสูง ดังนั้น การทำการทดสอบการล้า (fatigue test) จะต้องคำนึงถึงสภาพความเป็นจริงของการใช้งานของโครงสร้างด้วย

นอกจากนั้นแล้ว การทดสอบการล้ามักจะไม่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมคุณภาพการผลิตวัสดุ เนื่องจากการทดสอบนี้ใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

### 5.6.3 ตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

ดูในคู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ 410 214 Material Testings ในปฏิบัติการที่ 13 การทดสอบความล้าของอลูมิเนียม

### 5.6.5 ข้อสังเกตของการทดสอบการล้า

ในการทดสอบหา endurance limit ของวัสดุ เราจะต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบที่มีลักษณะเหมือนกันจำนวนมาก ตัวอย่างทดสอบแรกควรที่จะต้องถูกทดสอบที่ค่าหน่วยแรงสูงๆ และตัวอย่างทดสอบต่อๆ ไปจะถูกทดสอบที่ค่าหน่วยแรงมีค่าลดหลั่นลงมาเรื่อยๆ ตัวอย่างทดสอบที่มีค่าหน่วยแรงน้อยกว่าค่า endurance limit จะไม่มีการแตกหักเกิดขึ้น และที่ค่าหน่วยแรงค่าหนึ่งๆ เราจะต้องทำการทดสอบตัวอย่างหลายตัวอย่างทดสอบ เพื่อลดความผิดพลาดแบบสุ่ม (random error) ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการทดสอบ

ในการวางแผนการทดสอบการล้า เราจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้

1. ประเภทของการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ: โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของ sine function
2. mean stress: ในการทดสอบหา endurance limit ของวัสดุ ค่าของ mean stress จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติอื่นๆ เราจะดูได้จากรูปที่ 5-30
3. alternating stress: โดยทั่วไปแล้ว ในตัวอย่างทดสอบแรก ค่าสูงสุดของหน่วยแรงในการทดสอบการล้าจะมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของหน่วยแรงในกรณีของการทดสอบแบบ static และจะมีค่าลดลงประมาณ 10 % ในตัวอย่างทดสอบถัดๆ ไป
4. ความถี่ (frequency): ASTM E 466 ระบุค่าสูงสุดของความถี่ที่จะใช้คือ 170 Hz



## บทที่ 6

### คุณสมบัติของวัสดุ

#### 6.1 บทนำ

ในปัจจุบัน วัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารในงานวิศวกรรมโยธาประกอบด้วย

1. เหล็กโครงสร้าง (structural steel)
2. คอนกรีต (concrete)
3. ไม้ (timber)
4. อิฐ (brick)
5. อลูมิเนียม (aluminum)
6. พลาสติกเสริมไฟเบอร์ (fiber-reinforced plastic)

หน้าที่หลักของวัสดุดังกล่าวคือ ต้องมีกำลัง ความแข็งแรง และความคงทนที่พอเพียงที่จะถูกนำไปใช้งานในโครงสร้างที่เรากำลังออกแบบ ดังนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เพื่อที่จะได้เลือกใช้วัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการเลือกใช้วัสดุ ผู้ทำการออกแบบจะต้องทำการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ชนิดของวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้และหาได้ง่ายในท้องตลาดมีอะไรบ้าง?
2. คุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าวแต่ละชนิด เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว เป็นอย่างไร?
3. วัสดุที่พิจารณาอยู่นั้นต้องมีการดูแลรักษามากน้อยแค่ไหนและอย่างไร?
4. วัสดุที่พิจารณาอยู่มีราคาเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมชนิดอื่นๆ?
5. ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและการก่อสร้างเป็นอย่างไร? มีปัจจัยอะไรบ้างที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย?
6. วิธีการกำหนดมาตรฐานของวัสดุที่จะนำมาใช้งานต้องทำอะไร เพื่อที่จะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่เชื่อถือได้?
7. วิธีการทดสอบและตรวจสอบวัสดุเป็นอย่างไร?

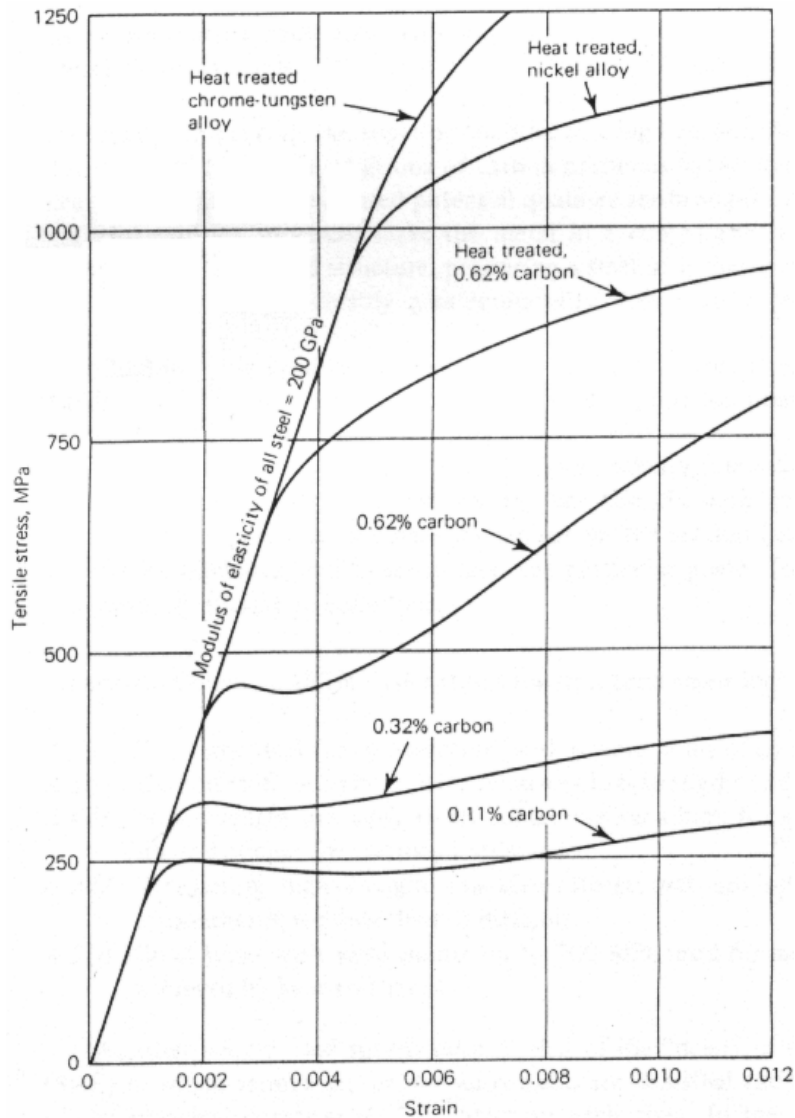
#### 6.2 เหล็กโครงสร้าง (Structural steel)

##### 6.2.1 บทนำ

เหล็กโครงสร้างเป็นโลหะที่ได้จากการนำเอาแร่เหล็ก (iron ore) มาถลุงในเตาถลุง (blast-furnace) ซึ่งจะได้ผลผลิตออกมาเป็นเหล็กคิบ (pig iron) เมื่อนำเหล็กคิบมาผสมกับคาร์บอนและสารชนิดอื่นๆ แล้ว เราจะได้เหล็กที่ใช้ในงานก่อสร้าง 3 ประเภทคือ

1. เหล็กเหนียว (wrought iron) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.1% มีกำลัง (strength) ต่ำ แต่มีความเหนียว (ductility) ที่สูง ซึ่งทำให้เหล็กชนิดนี้ถูกแปลงรูปร่างได้ง่ายและรับแรงกระทำซ้ำได้ดี

2. เหล็กกล้า (steel) เป็นโลหะผสม (alloy) ที่ได้จากการผสมเหล็ก คาร์บอน และ/หรือ สารชนิดอื่นๆ เข้าด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าอัลลอย (alloy steel) โดยที่ carbon steel จะเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2% ถึง 2% โดยทั่วไปแล้ว เหล็กชนิดนี้จะมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 1.2% คุณสมบัติของเหล็กชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ โดยที่ปริมาณคาร์บอนจะมีผลต่อกำลัง ความแข็ง และความเหนียวของเหล็กกล้าชนิดนี้ ดังที่แสดงในรูปที่ 6-1 แต่ alloy steel จะเป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน แต่จะขึ้นอยู่กับสารชนิดอื่นๆ เช่น silicon, sulfur, phosphorous, และ manganese เป็นต้น
3. เหล็กหล่อ (cast iron) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 2.2% ถึง 4.5% มีกำลังต้านทานต่อแรงกดอัดและความแข็งของผิวสูง แต่มีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำและเป็นวัสดุเปราะ



รูปที่ 6-1 stress-strain curve ของเหล็กโครงสร้างชนิดต่างๆ



## 6.2.2 กรรมวิธีการผลิตเหล็กโครงสร้าง

เหล็กกล้าที่ใช้ในการก่อสร้างจะเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.2% โดยทั่วไปแล้วคุณภาพที่ดีของเหล็กกล้าไม่ได้เกิดขึ้นโดยการเติมคาร์บอนและสารชนิดอื่นๆ ลงในเหล็กเท่านั้น แต่ต้องผ่านกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากเมื่อเหล็กหลอมถูกทำให้เย็นตัวลงโดยตรงแล้ว เหล็กที่ได้จะเป็นเหล็กที่เปราะและมีกำลังต่ำ เหล็กดังกล่าวจะต้องถูกนำมาผ่านกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

1. กรรมวิธีทางกลแบบร้อน (hot-working process) เป็นกรรมวิธีที่ให้ความร้อนแก่เหล็กและทำให้เหล็กเย็นตัวลงเป็นลำดับ เพื่อลดความเครียด (strain) ในเนื้อเหล็กให้ต่ำลง และเพื่อทำให้ผลึกของเหล็กมีความละเอียดมากขึ้น กรรมวิธีการนี้จะทำให้เหล็กมีกำลังคลาก (yielding strength), กำลังรับแรงดึง (tensile strength), และความเหนียว (ductility) สูงขึ้นกว่าก่อนที่จะผ่านกรรมวิธีนี้ โดยทั่วไปแล้ว กรรมวิธี hot-working process จะถูกแบ่งย่อยออกได้อีก 3 วิธีคือ annealing, hardening, และ tempering

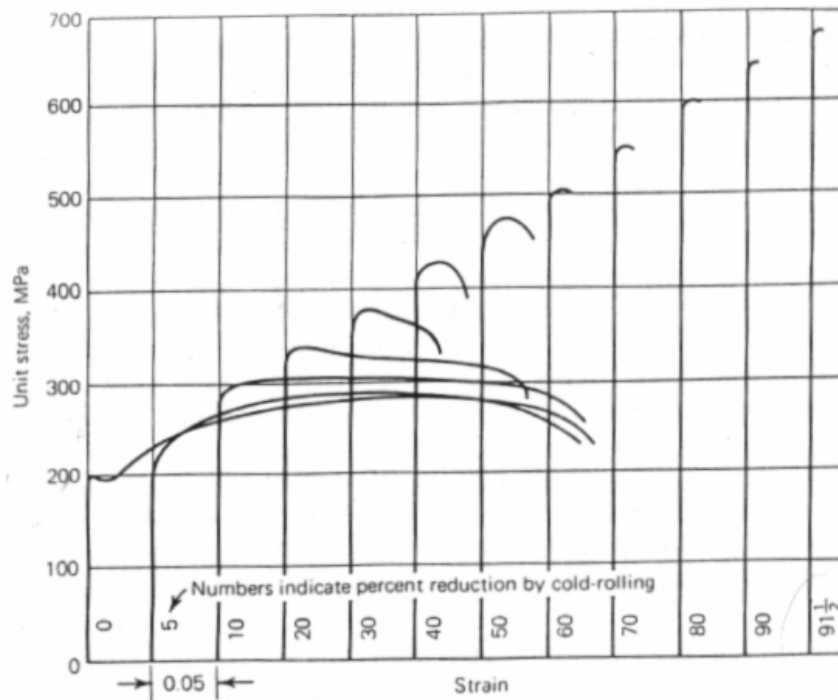
annealing เป็นการให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงอุณหภูมิประมาณ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  และให้เหล็กดังกล่าวค้างอยู่ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลานานพอสมควร เพื่อทำให้ผลึกของเหล็กมีขนาดที่ละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เหล็กมีความเหนียวและอ่อนตัวเพิ่มขึ้นและจะให้ความเครียดในเนื้อเหล็กที่เกิดจากการลดอุณหภูมิที่เร็วเกินไปหรือเนื่องจากการทำ cold work มีค่าลดลง จากนั้น ทำการลดอุณหภูมิของเหล็กลงต่อไปอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งการลดอุณหภูมิอย่างช้าๆ นี้จะทำให้เหล็กไม่มีความเครียดค้างในเนื้อเหล็ก กรรมวิธี annealing นี้จะทำให้เหล็กมีกำลัง (strength), และความเหนียว (ductility) สูงขึ้นจากเดิมมาก

hardening หรือ quenching ในกรรมวิธีนี้ เหล็กจะถูกให้ความร้อนเหมือนกับในกรรมวิธี annealing แต่เหล็กจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มเหล็กร้อนลงใน เช่น น้ำ หรือน้ำมัน หรือน้ำเกลือ เป็นต้น การแข็งตัวของเหล็กดังกล่าวจะทำให้เหล็กที่ได้เป็นเหล็กที่เปราะ โดยทั่วไปแล้ว เราจะทำการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กดังกล่าวต่อไปได้โดยการทำ tempering หรือ drawing

tempering เป็นการทำให้เหล็กที่ผ่านกรรมวิธี quenching ร้อนขึ้นมาอีกครั้งที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก จากนั้น ทำการลดอุณหภูมิของเหล็กลงอีกครั้ง ซึ่งเหล็กที่ได้จะมีความเหนียวมากขึ้นกว่าเหล็กที่ผ่านกรรมวิธี quenching เพียงอย่างเดียว

2. กรรมวิธีทางกลแบบเย็น (cold-working process) เป็นกรรมวิธีที่ทำให้เกิด strain-hardening ในเหล็กและจะทำให้เหล็กมีกำลังคลาก (yielding strength), กำลังรับแรงดึง (tensile strength), และความแข็งต่อการกดที่ผิวเหล็กสูงขึ้นมากกว่ากรรมวิธี hot-working process แต่กรรมวิธีนี้จะทำให้ความเหนียว (ductility) ของเหล็กมีค่าลดน้อยลงกว่าก่อนที่จะผ่านกรรมวิธี ตัวอย่างของ cold-working process คือ การรีดเย็นเหล็ก (cold-rolling) เป็นต้น รูปที่ 6-2 แสดงผลของการรีด

เหล็กต่อ stress-strain curve ของเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเหล็กถูกรีดเย็นมากครั้งขึ้น เหล็กดังกล่าวจะมีกำลังสูงขึ้น แต่ความเหนียวลดลง



รูปที่ 6-2 ผลของการรีดเหล็กต่อ stress-strain curve ของเหล็ก

**6.2.3 ชนิดของเหล็กโครงสร้าง**

โดยทั่วไปแล้ว เหล็กที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ซึ่งมักจะนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักของอาคารหรือเป็นชิ้นส่วนขององค์อาคารของโครงสร้าง โดยจะมีหน้าตัดรูปต่างๆ เช่น รูปตัว H (wide-flange section) รูปตัว I (I-section) รูปตัว C (channel section) และรูปตัว L (angle section) เป็นต้น
2. เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (reinforcing steel) ซึ่งจะอยู่ในรูปของเหล็กเส้นกลม (round bar) และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) ซึ่งเป็นเหล็กเส้นที่ผิวบนมีขี้ผึ้งและครีบ เพื่อเพิ่มการจับเกาะระหว่างเหล็กเส้นและคอนกรีตให้มากขึ้น

ตารางที่ 6-1 แสดงประเภท ผลิตภัณฑ์ และลักษณะการใช้งานของเหล็กโครงสร้างที่สำคัญตามที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM

**6.2.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้าง**

คุณสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน โลหะผสม (alloy) การรีดและการตัดเหล็ก และกรรมวิธีการผลิตเหล็ก

มาตรฐาน ASTM A7 ได้กำหนดคุณสมบัติทางกลขั้นต่ำของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ เหล็กแผ่น และเหล็กเส้น เพื่อใช้ในงานก่อสร้างอาคาร สะพาน และโครงสร้างทั่วไปไว้ดังนี้

Tensile strength	410-500	MPa
------------------	---------	-----

Minimum yield point	220	MPa
Minimum elongation in 200 mm	21	%
Minimum elongation in 50 mm	24	%

**ตารางที่ 6-1** ประเภท ผลิตภัณฑ์ และลักษณะการใช้งานของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM

ประเภท	ผลิตภัณฑ์	ลักษณะการใช้งาน
A 36	Carbon-steel shapes, plates, bars with yielding strength about 250 MPa	Welded, riveted, and bolted construction; bridges, buildings, towers, and general structural purposes
A 53	Welded or seamless pipe, black or galvanized	Welded, riveted, and bolted construction; primary use in building, particularly columns and truss members
A 242	High-strength, low alloy shapes, plates, bars	Welded, riveted, and bolted construction; bridges, buildings, and general structural purposes; atmospheric-corrosion resistance about four times that of carbon steel; a weathering steel
A 441	High-strength, low alloy manganese-vanadium steel shapes, plates, bars	Welded, riveted, and bolted construction but intended primary for welded construction; bridges, buildings, and other structures; atmospheric-corrosion resistance about two times that of carbon steel
A 514	Quenched and tempered plates of high yielding strength up to 700 MPa	Intended primarily for welded bridges and other structure; welding technique must not affect properties of the plate, especially in heat-affected zone

### 6.2.5 มาตรฐานการทดสอบ (standard tests)

วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้างได้ถูกระบุไว้ใน ASTM A370 ดังนี้

1. ASTM E8: Tension Testing of Metallic Materials.
2. ASTM E9: Compression Testing of Metallic Materials.
3. ASTM E10: Test for Brinell Hardness of Metallic Materials.
4. ASTM E18: Test for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of metallic materials.
5. ASTM E23: Notched-Bar Impact Testing of Metallic Materials.

## 6.2.6 ข้อดีและข้อเสียในการใช้เหล็กโครงสร้างในการก่อสร้าง

### ข้อดี

1. มีกำลังสูง (high Strength) - เหล็กเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่ค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้โครงสร้างเหล็กมีน้ำหนักรวมที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น จึงเหมาะที่จะใช้ในการก่อสร้างสะพานที่มีระยะช่วง span ที่ยาวมากๆ และอาคารสูง
2. มีความสม่ำเสมอ (uniformity) - คุณสมบัติทางกลของเหล็กไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากเหมือนดังเช่นคอนกรีต
3. มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง - เหล็กจึงมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับข้อสมมุติฐานต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง
4. Performance - โครงสร้างเหล็กที่ได้รับการดูแลที่เหมาะสมและถูกต้องจะเป็นโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
5. มี ductility และ toughness สูง - เหล็กเป็นวัสดุที่มีกำลังสูงและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากก่อนการวิบัติ ดังนั้น เหล็กจึงเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานได้สูงและสามารถรับหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) ได้ดี โดยที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติจะเป็นเรื่องเตือนภัยว่าการวิบัติของโครงสร้างกำลังจะเกิดขึ้นด้วย
6. ก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว - เหล็กเป็นวัสดุที่สามารถผลิตที่โรงงานแล้ว นำมาประกอบที่สถานที่ก่อสร้างได้ง่าย จึงทำให้การก่อสร้างโครงสร้างเหล็กทำได้อย่างรวดเร็วกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาก

### ข้อเสีย

1. มีค่าดูแลรักษาสูง - เหล็กเป็นวัสดุที่มีการผุกร่อนได้ง่าย ถ้าไม่ได้รับการดูแลรักษาที่ดี ดังนั้น ถ้าโครงสร้างเหล็กไม่ได้ถูกออกแบบให้ถูกต้องแล้ว ค่าบำรุงรักษาโครงสร้างเหล็กจึงมักจะมีค่าสูง
2. เสียค่าใช้จ่ายในการพ่นกันไฟ - กำลังของเหล็กจะมีค่าลดลงมากในกรณีที่เกิดไฟไหม้ขึ้นในโครงสร้างเหล็ก และเนื่องจากเหล็กนำความร้อนได้ดี ดังนั้น อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลุกลามของไฟจากบริเวณที่เกิดไฟไหม้ไปยังบริเวณอื่นๆ ของโครงสร้างได้ง่าย ดังนั้น โครงสร้างเหล็กจึงต้องการระบบป้องกันไฟที่ดีและโครงสร้างเหล็กจะต้องถูกพ่นทับด้วยฉนวนกันไฟ ซึ่งทำให้โครงสร้างเหล็กมีราคาก่อสร้างสูงขึ้น
3. เกิดการโก่งเดาะได้ง่าย - เนื่องจากเหล็กมีกำลังที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น องค์อาคารเหล็กที่รับแรงกดอัดและมีความขรุขระสูงอาจจะวิบัติโดยการโก่งเดาะได้ง่าย
4. การล้า (fatigue) - กำลังของโครงสร้างเหล็กอาจจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อถูกกระทำโดยแรงกระทำซ้ำ (cyclic loads)

5. เมื่อโครงสร้างเหล็กอยู่ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ และเมื่อโครงสร้างเหล็กถูกกระทำโดย cyclic loads เป็นเวลานานแล้ว โครงสร้างเหล็กดังกล่าวจะเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle fracture) ได้

### 6.3 คอนกรีต (concrete)

คอนกรีตเป็นวัสดุประกอบ (composite material) ที่ได้จากการผสมมวลรวม (aggregate) เช่น หิน และทราย เป็นต้น เข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) และน้ำ คอนกรีตอาจแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ และส่วนที่เป็นวัสดุอัดแทรก (filler) ซึ่งได้แก่มวลรวมต่างๆ

คอนกรีตจะเกิดการแข็งตัวเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำซึ่งเรียกว่า ขบวนการไฮเดรชัน (hydration process) โดยที่ขบวนการนี้จะใช้เวลาในการเกิดจนถึงขั้นสุดที่ค่อนข้างนาน ดังนั้น คุณสมบัติของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงและความคงทน เป็นต้น จะเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุเปราะเช่นเดียวกับหิน โดยจะมีกำลังรับแรงกดอัดที่สูงกว่ากำลังรับแรงดึงประมาณ 10 เท่า ดังนั้น คอนกรีตจึงมักถูกเสริมด้วยเหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งเราเรียกคอนกรีตที่ได้ว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete)

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นรูปร่าง ลักษณะ และขนาดที่ต้องการได้ง่าย ดังนั้น คอนกรีตเสริมเหล็กจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งเราจะเห็นได้จากอาคาร สะพาน ถนน และเขื่อน เป็นต้น

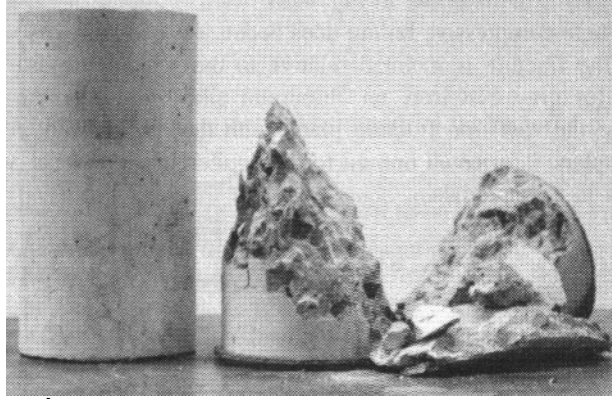
#### 6.3.1 คุณสมบัติทางกล

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วย cement paste และมวลรวม ซึ่งทั้ง cement paste และมวลรวมเป็นวัสดุเปราะที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain แบบเส้นตรงภายใต้แรงกดอัดจนถึงจุดวิบัติ และเนื่องจากวัสดุเปราะมักจะเกิดการแตกหักเนื่องจากแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึง ดังนั้น เมื่อคอนกรีตถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกนแล้ว การวิบัติจึงมักจะอยู่ในรูปของรอยแตกที่ขนานไปกับทิศทางของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด

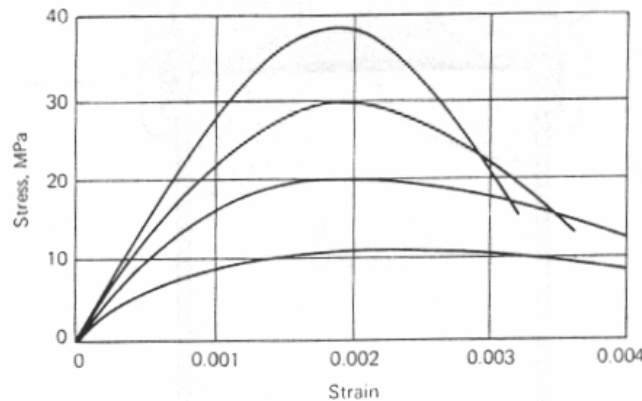
ในการทดสอบแรงกดอัดโดยใช้แท่งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกนั้น จะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวของตัวอย่างทดสอบทางด้านข้าง ซึ่งแรงดังกล่าวจะยับยั้งการแตกในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่จุดดังกล่าว ดังนั้น เรามักจะพบว่า รอยแตกดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ และจะไม่สามารถขยายตัวเข้าสู่บริเวณหัวกดดังกล่าว ทำให้ส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบที่วิบัติแล้วมีรูปร่างเป็นกรวย ดังที่แสดงในรูปที่ 6-3

ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะประกอบด้วยวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงจุดวิบัติ แต่คอนกรีตจะมี stress-strain curve ที่ไม่เป็นเส้นตรง ดังที่แสดงในรูปที่ 6-4 ซึ่งแสดง stress-strain curve ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ที่อายุ 28 วัน และจะมีพฤติกรรมที่ค่อนข้าง

คล้ายคลึงกับวัสดุเหนียว (ductile material) ซึ่งการที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (microcracking) อย่างต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตขณะที่คอนกรีตกำลังจะวิบัติ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการกระจายหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตจากส่วนหนึ่งของแท่งตัวอย่างทดสอบไปยังบริเวณใกล้เคียง



รูปที่ 6-3 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด

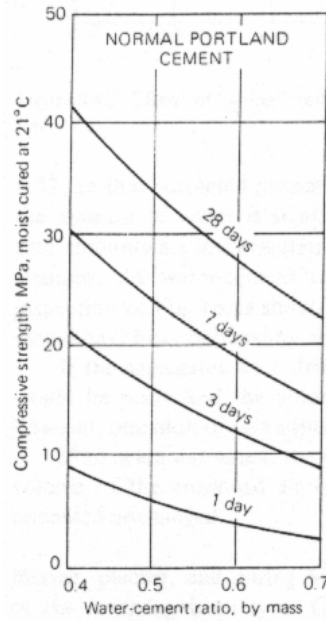


รูปที่ 6-4 stress-strain curve ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด

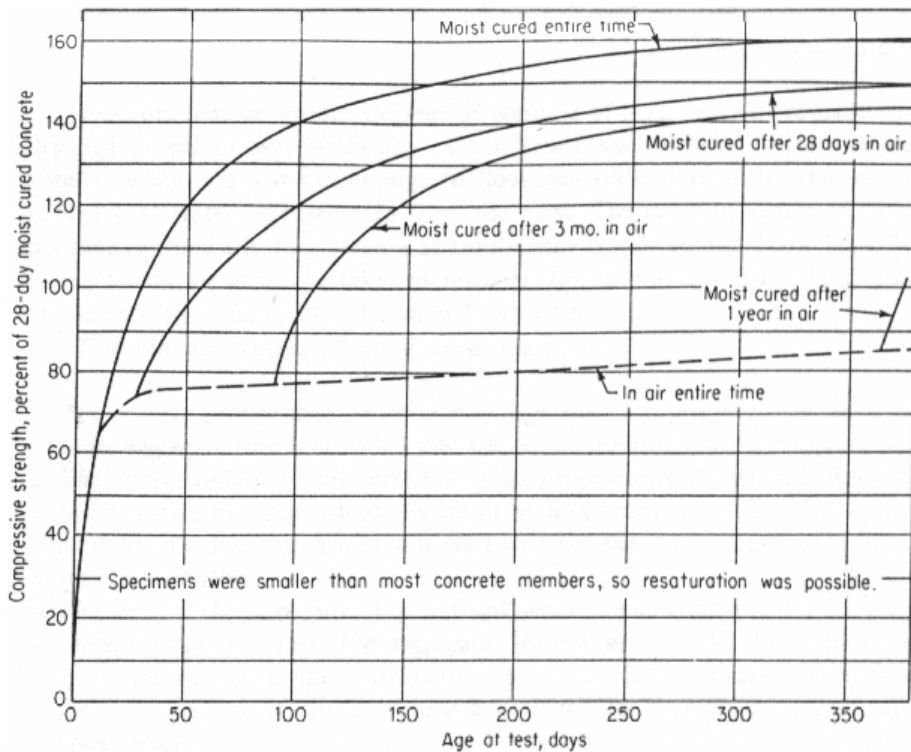
กำลังของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water-cement ratio) - ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 6-5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน โดยที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.7
2. อายุ - กำลังของคอนกรีตที่ยังมีความชื้นอยู่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น เนื่องจากขบวนการไฮเดรชัน (hydration) ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังที่แสดงในรูปที่ 6-5 ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะมีกำลังรับแรงกดอัดมากกว่าคอนกรีตที่อายุน้อยกว่า
3. ลักษณะของปูนซีเมนต์ - ความละเอียดของปูนซีเมนต์และองค์ประกอบของสารเคมีของปูนซีเมนต์มีผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคอนกรีตมีอายุน้อยๆ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นเร็วกว่าน้อยๆ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดน้อย

4. ลักษณะของการบ่มคอนกรีต - เมื่อคอนกรีตถูกบ่มโดยมีการให้ความชื้นอย่างต่อเนื่องและถ้าอุณหภูมิที่บ่มมีค่าสูงขึ้นแล้ว คอนกรีตที่ได้ก็จะมีกำลังสูงขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัด อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และอายุของคอนกรีต



รูปที่ 6-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดและลักษณะของการบ่มคอนกรีต

5. ปริมาณความชื้น (moisture content) ในตัวอย่างทดสอบขณะทำการทดสอบ - ถ้าตัวอย่างทดสอบมีปริมาณความชื้นขณะทำการทดสอบสูงแล้ว คอนกรีตจะมีกำลังที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

6. ความสมบูรณ์ของส่วนผสมและลักษณะของมวลรวม - ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ต่ำและมวลรวมมีลักษณะรูปร่างที่กลมไม่มีเหลี่ยมและมีการคละกัณฑ์ไม่ดีจะมีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง

### 6.3.2 มาตรฐานการทดสอบ

#### มาตรฐานการทดสอบสำหรับคอนกรีต

ASTM C31: Method of Making and Curing Concrete Compression and Flexural Test Specimens in the Laboratory

ASTM C39: Test for Compressive Strength of Molded Concrete Cylinder

ASTM C78: Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)

ASTM C293: Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)

ASTM C496: Test for Splitting Tensile Strength of Molded Concrete Cylinder

#### มาตรฐานการทดสอบสำหรับเหล็กเสริม

ASTM A615: Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement

### 6.3.3 ข้อดีและข้อเสียในการใช้คอนกรีตในการก่อสร้าง

#### ข้อดี

1. ประหยัด - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีราคาที่ย่อมเยา หาซื้อได้ง่าย และต้องการการดูแลรักษาน้อย
2. ความเหมาะสมของวัสดุสำหรับงานสถาปัตยกรรมและโครงสร้าง - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นรูปร่าง ลักษณะ และขนาดที่ต้องการได้ง่าย
3. ความต้านทานต่อไฟไหม้ - คอนกรีตมีความต้านทานต่อไฟไหม้ได้ดี โดยไม่ต้องมีฉนวนกันไฟด้วยฉนวนกันไฟ
4. ความแกร่ง (rigidity) - เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีมวลมากและความแกร่งสูง ดังนั้น การสั่น (vibration) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจึงมีน้อยกว่าในโครงสร้างเหล็ก

#### ข้อเสีย

1. มีกำลังรับแรงดึงต่ำ ทำให้ต้องมีการเสริมเหล็กในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงดึง ซึ่งทำให้การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างมีความยุ่งยากมากขึ้น
2. การก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (cast-in-place concrete construction) จะต้องมีการทำแบบหล่อ (forms) และการค้ำยัน (shoring) ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีราคาสูงขึ้น เนื่องจากค่าแรงและวัสดุในการก่อสร้าง



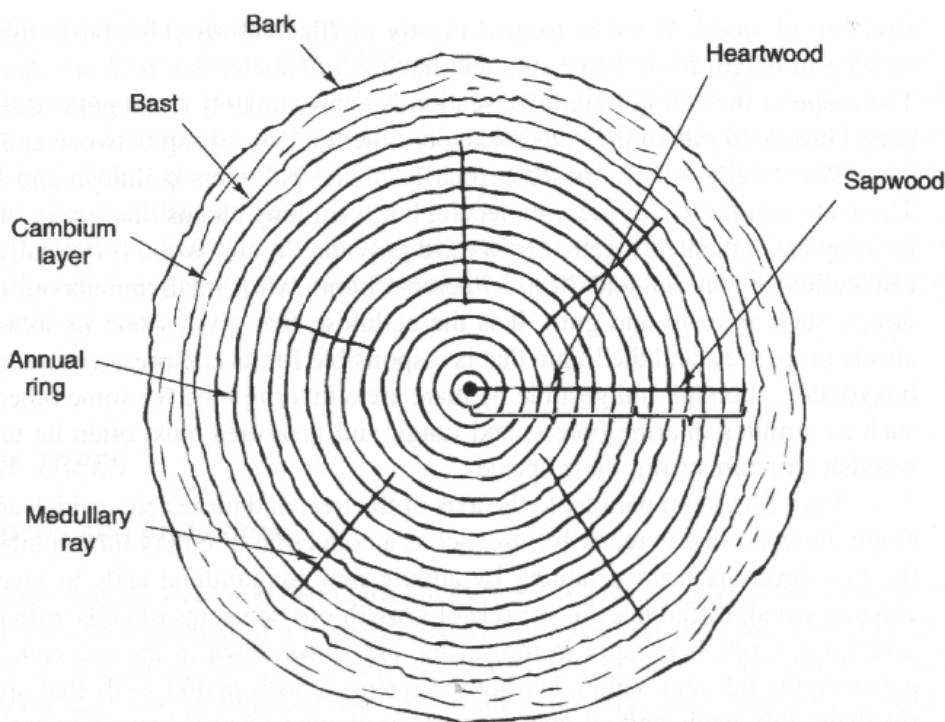
3. มีค่าอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น คอนกรีตจึงไม่ได้รับความนิยมในการก่อสร้างโครงสร้างที่มีระยะช่วง span ที่ยาวมากๆ
4. มีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับเวลา – คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมหดตัว (shrinkage) และการคืบ (creep) ที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาด้วยในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

## 6.4 ไม้ (Timber)

ไม้เป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างมาเป็นเวลานานแล้ว ในปัจจุบัน เนื่องจากป่าไม้มีจำนวนลดลงมาก ทำให้ไม้มีราคาแพง ซึ่งเป็นผลทำให้มีการนำวัสดุอื่นๆ เช่น เหล็กและคอนกรีต เป็นต้น มาใช้แทนไม้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ไม้ก็ยังคงเห็นอยู่ได้ทั่วไป โดยเฉพาะในการก่อสร้างที่อยู่อาศัย เนื่องจากไม้มีความสวยงาม

### 6.4.1 ลักษณะของเนื้อไม้

คุณสมบัติต่างๆ ของไม้ถูกกำหนดโดยลักษณะของเนื้อไม้ รูปที่ 6-7 แสดงหน้าตัดขวางของลำต้นไม้ เนื้อไม้ส่วนนอกสุดเรียกว่าเปลือกไม้ (bark) ถัดเข้ามาจะเป็นชั้นของเยื่อเจริญ (cambium layer) ของไม้ที่มีหน้าที่ในการสร้างเซลล์ (cell) ให้กับต้นไม้อันเนื้อไม้ชั้นถัดมาคือ กระจัง (sap wood) ซึ่งเป็นชั้นสะสมอาหารของต้นไม้อันเนื้อไม้ภายในที่มักมีสีเข้มที่สุดเรียกว่า แกนไม้ (heart wood) ซึ่งเป็นชั้นไม้ที่มีความแข็งแรงและทนทาน ลายวงที่เป็นชั้นๆ ของกระจังและแกนไม้คือ วงปี (annual ring) ของไม้ และลายเส้นที่อยู่แนวรัศมีของไม้เรียกว่า รัศมีไส้ (medullary ray) ส่วนของหน้าตัดขวางของลำต้นไม้ที่นำมาใช้ในการก่อสร้างคือ แกนไม้และกระจัง



รูปที่ 6-7 หน้าตัดขวางของลำต้นไม้

## ตำหนิของไม้ (Defects in lumber)

สิ่งที่มีผลกระทบต่อกำลัง ความคงทน และการใช้งานของไม้คือ ตำหนิของไม้ ซึ่งอาจจะเป็นตำหนิที่เกิดขึ้นเองในเนื้อไม้หรืออาจจะเกิดจากการผลิตที่ไม่ถูกต้อง

จากรูปที่ 6-8 ตำหนิของไม้ที่สำคัญมีดังนี้

shakes คือรอยแตกตามเส้น ระหว่างวงปี ซึ่งมักเกิดจากการกระทำของลม

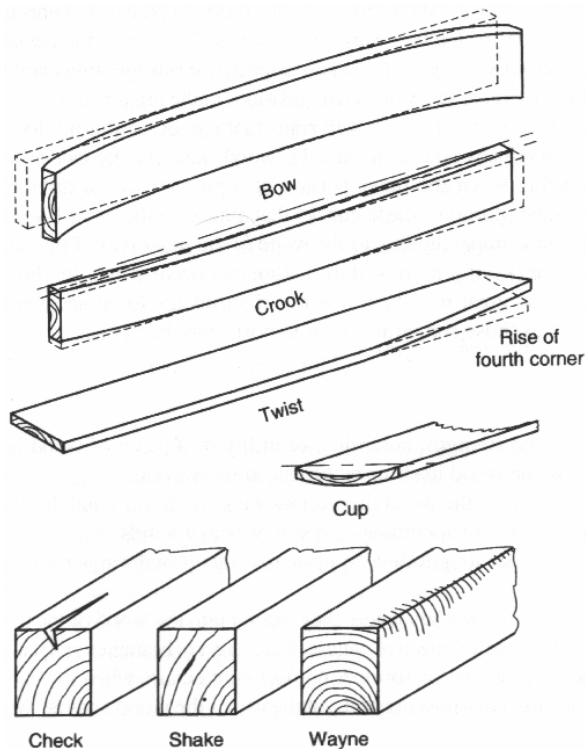
check คือรอยแตกตามความยาวของไม้ตัดข้ามวงปี เนื่องมาจากการแห้งตัวที่ไม่สม่ำเสมอของไม้

ตาไม้ (knots) เป็นส่วนที่ต้นไม้แตกแขนงออกมาจากลำต้นหรือจากกิ่ง ผลกระทบของตาไม้ต่อคุณสมบัติของไม้ขึ้นอยู่กับการนำไม้ไปใช้งานและตำแหน่งและขนาดของตาไม้ โดยทั่วไปแล้ว ตาไม้จะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงกดอัดของโครงสร้างไม้ แต่จะมีผลเป็นอย่างมากถ้าตาไม้อยู่ในส่วนของคานที่ต้องรับแรงดึง

pitch pocket เป็นช่องว่างระหว่างวงปีของไม้และมียางไม้อยู่

wayne เป็นพื้นที่ซึ่งไม้ถูกตัดออกมาใกล้กับเปลือกไม้มากไป ซึ่งจะทำให้มีรอยของเปลือกไม้ปรากฏอยู่

นอกจากนั้นแล้ว การหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอในการอบหรือตากไม้ให้แห้งอาจจะทำให้เกิดการบิดงอของแผ่นไม้ได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 6-8



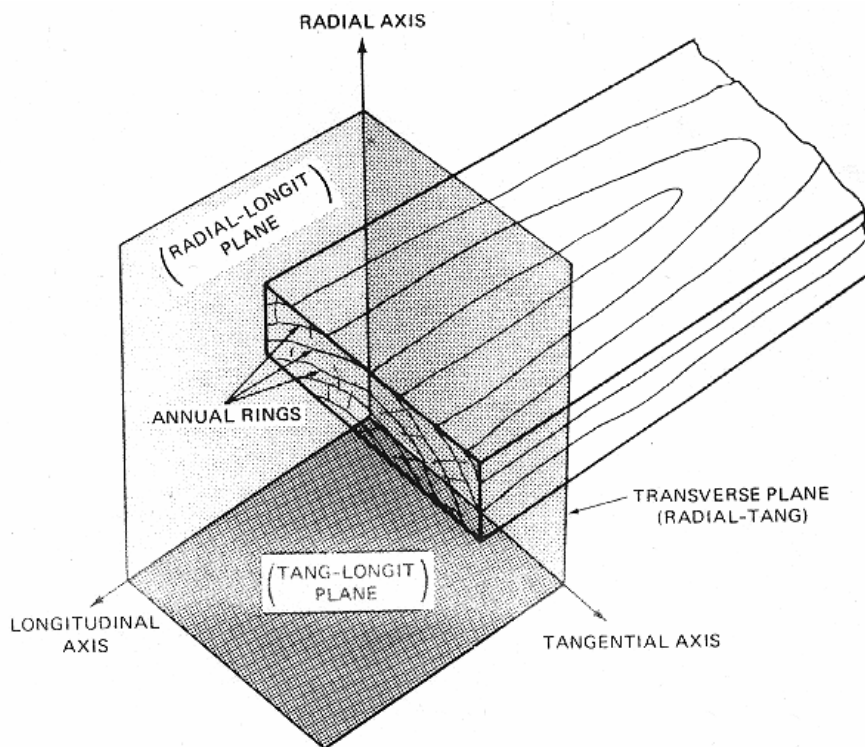
รูปที่ 6-8 ตำหนิแบบต่างๆ ของไม้

### 6.4.2 คุณสมบัติของไม้

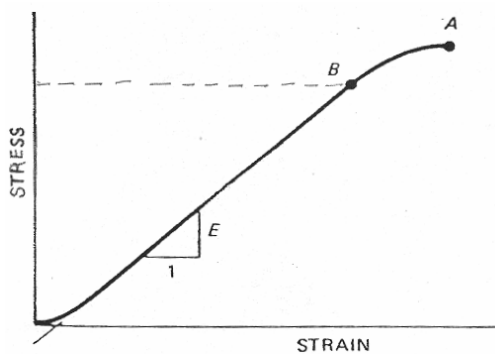
ไม้เป็นวัสดุแบบ orthotropic material ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล เช่น กำลัง (strength), โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity), และ Poisson's ratio เป็นต้น ที่แตกต่างกันในแกนตั้งฉากหลัก 3 แกนคือ ใน

แนวแกน (longitudinal) ของต้นไม้ ในแนวรัศมี (radial) ของหน้าตัดและในแนวเส้นสัมผัส (tangential) ของวงปี ดังที่แสดงในรูปที่ 6-9

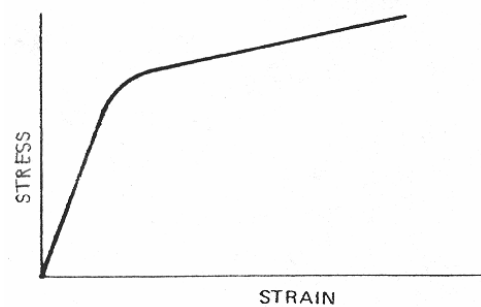
รูปที่ 6-10 แสดง compressive stress-strain diagram ของไม้ในแนวขนานเส้นไม้และในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้ (ซึ่งไม่ได้อยู่บน scale เดียวกัน) เราจะเห็นได้ว่า ไม้มี stress-strain curve ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางการทดสอบ เมื่อไม้ถูกแรงกดอัดในแนวขนานเส้นไม้แล้ว stress-strain curve จะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับวัสดุเปราะ แต่เมื่อไม้ถูกแรงกดอัดในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้แล้ว stress-strain curve จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับวัสดุเหนียว แต่ในทั้งสองกรณี ไม้ไม่มีจุดคกลาก (yielding point) ที่ชัดเจน ดังนั้น จุด proportional limit มักจะถูกใช้เพื่อกำหนดกำลังรับแรงในช่วงยืดหยุ่นของไม้ (elastic strength)



รูปที่ 6-9



a.) ขนานไปกับเส้นไม้



b.) ตั้งฉากกับเส้นไม้

รูปที่ 6-10 compressive stress-strain diagram ของไม้ในแนวขนานเส้นไม้และในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้

## กำลังของไม้

เนื่องจากเนื้อไม้มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเส้นไม้ที่มีการจับตัวกันอย่างเหนียวแน่น ดังนั้น เมื่อไม้ถูกกระทำโดยแรงในแนวขนานกับเส้นไม้แล้ว เส้นไม้ที่แข็งแรงที่สุดจะเป็นตัวรับแรงดังกล่าว แต่เมื่อแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้แล้ว เส้นไม้ที่อ่อนแอที่สุดจะร่วมกับเส้นไม้ที่แข็งแรงที่สุดในการรับแรงกระทำ ดังนั้น ไม้จะมีกำลังรับแรงดึงและแรงกดอัดในแนวขนานเส้นไม้มากกว่าในแนวตั้งฉากกับเส้น

### กำลังรับแรงดึงของไม้

กำลังรับแรงดึงของไม้ในแนวขนานเส้นไม้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวตั้งฉาก (บางกรณีถึง 3 เท่า) และกำลังรับแรงเฉือนมาก ดังนั้น ไม้มักจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและแรงกดอัด โดยเฉพาะในบริเวณที่มีหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) เกิดขึ้น เช่น ที่จุดเชื่อมต่อ เป็นต้น

แรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้จะทำให้เส้นไม้แยกตัวออกจากกัน ดังนั้น กำลังรับแรงดึงของไม้ในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้จะมีค่าน้อยมากคือประมาณ 1 ใน 10 ของกำลังรับแรงดึงในแนวขนานเส้นไม้เท่านั้น

### กำลังรับแรงกดอัดของไม้

เมื่อไม้ถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวขนานกับเส้นไม้แล้ว เส้นไม้ที่แข็งแรงที่สุดจะเป็นตัวรับแรงดังกล่าว แต่เมื่อแรงกดอัดกระทำในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้แล้ว เส้นไม้ที่แข็งแรงที่สุดและอ่อนแอที่สุดจะร่วมกันในการรับแรง ดังนั้น กำลังรับแรงกดอัดของไม้ในแนวขนานเส้นไม้จะมีค่าประมาณ 3 ของกำลังรับแรงกดอัดของไม้ในแนวตั้งฉากกับเส้น

การวิบัติของไม้ในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้เนื่องจากแรงกดอัดจะเป็นการวิบัติในรูปของการอัดแตก (crushing) ของเส้นไม้ตรงจุดที่แรงกดอัดกระทำ แต่การวิบัติของไม้ในแนวขนานกับเส้นไม้เนื่องจากแรงกดอัดจะเป็นการวิบัติที่เกิดจากการ โกงเตาะของเส้นไม้ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นรอยแตกในแนวขนานเส้น

### กำลังรับแรงดัดและความแกร่งของไม้

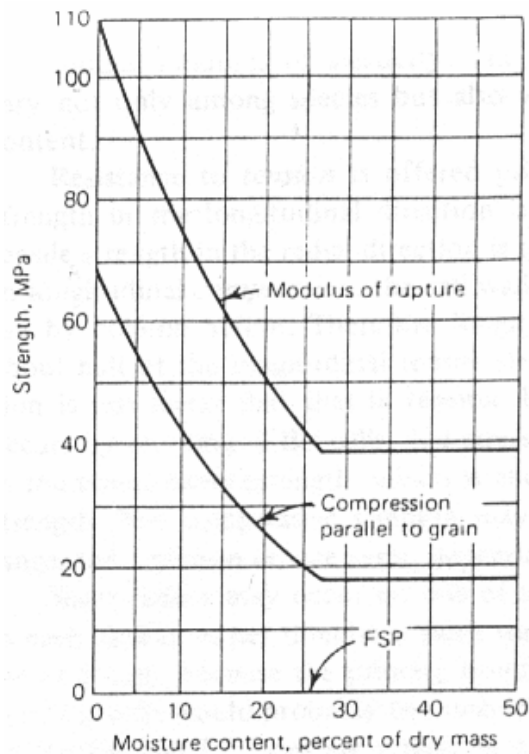
เมื่อคานไม้ถูกกระทำโดยโมเมนต์ดัด (bending moment) แล้ว ปัจจัยที่เราจำเป็นต้องพิจารณาในการหาลำกำลังรับแรงดัดของคานไม้คือ กำลังรับแรงดึงหรือกำลังรับแรงกดอัดของไม้ในแนวขนานเส้นไม้และกำลังรับแรงเฉือนของไม้ในแนวขนานเส้นไม้ โดยทั่วไปแล้ว คานไม้จะมีอัตราส่วนของระยะช่วง span ต่อความลึกที่มากกว่า 10 ดังนั้น คานไม้มักจะวิบัติเนื่องจากแรงดึงหรือแรงกดอัดในแนวขนานเส้นไม้มากกว่าการวิบัติโดยแรงเฉือนในแนวขนานเส้นไม้ แต่ถ้าคานไม้เป็นคานที่มีอัตราส่วนของระยะช่วง span ต่อความลึกที่น้อยกว่า 10 แล้ว คานดังกล่าวอาจจะวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในแนวขนานเส้น

ความแกร่งของไม้มีความสำคัญมากในการออกแบบคาน เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบกำหนดให้ค่าการโก่งตัวสูงสุดของคานไม้มีค่าไม่เกิน  $1/360$  ของระยะช่วง span ของคาน ดังนั้น ไม้ที่มีความแกร่งสูงจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานมากกว่าไม้ที่มีความแกร่งต่ำ โดยทั่วไปแล้ว ไม้ที่มีความแกร่งสูงกว่าจะเป็นไม้ที่มีเนื้อแน่นมากกว่าไม้ที่มีความแกร่งต่ำกว่า

ตารางที่ 6-2 แสดงคุณสมบัติทางกลของไม้ชนิดต่างๆ ที่มักพบเห็นในประเทศไทย

## ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังและความแกร่งของไม้

1. ชนิดของไม้
2. ปริมาณความชื้น - ปริมาณความชื้นของไม้ในสภาพสดจะอยู่ประมาณ 35-55% ความชื้นของไม้ที่นำมาใช้โดยทั่วไปควรมีค่าไม่เกิน 19% เมื่อไม้มีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ cellulose/lignin ของเสี้ยนไม้มีความอ่อนตัวลง ซึ่งจะทำให้ไม้มีกำลังและความแกร่งลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 6-11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลของปริมาณความชื้นต่อกำลังและความแกร่งของต้นสน Sitka นอกจากนั้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงความชื้นในไม้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของไม้และทำให้เกิดการบิดงอของไม้ได้อีกด้วย
3. ความถ่วงจำเพาะ - กำลังและความแกร่งของไม้ขึ้นอยู่กับปริมาณ cellulose ในไม้ ดังนั้น เมื่อไม้มีปริมาณความชื้นที่เท่ากันแล้ว ไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าจะมีกำลังและความแกร่งมากกว่า ไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า
4. ระยะเวลาในการกระทำของแรง - ถ้าไม้ถูกกระทำโดยแรงที่มีค่าสูงพอและเป็นระยะเวลานานแล้ว ไม้จะเกิดการวิบัติโดยการคืบ (creep) ขึ้นได้ จากการทดสอบคานไม้ภายใต้การกระทำของแรงในลักษณะดังกล่าวพบว่า คานไม้อาจจะวิบัติที่ค่าน้อยแรงเพียง 50% ของกำลังประลัย (ultimate strength) ของไม้ที่ได้รับการทดสอบในเวลาที่ยาว
5. ลักษณะ ขนาด และตำแหน่งของตำหนิในไม้



รูปที่ 6-11 ผลของปริมาณความชื้นต่อกำลังและความแกร่งของต้นสน Sitka

ตารางที่ 6-2 คุณสมบัติทางกลของไม้ชนิดต่างๆ ที่มักพบเห็นในประเทศไทย

ชนิด	ประเภท	ความ ถ่วงจำเพาะ	หน่วยแรงคดที่ จุด P.L. และ หน่วยแรงดึง ขนานเส้น (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of Elasticity (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงคด ที่จุด P.L. (kg/cm <sup>2</sup> )		หน่วยแรง เฉือนประลัย ขนานเส้น (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงคด ที่ยอมให้ (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of Elasticity โดยประมาณ (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงคด ที่ยอมให้ (kg/cm <sup>2</sup> )		หน่วยแรงเฉือน ขนานเส้นที่ ยอมให้ (kg/cm <sup>2</sup> )
					ขนานเส้น	ขวางเส้น				ขนานเส้น	ขวางเส้น	
กะท้อน	ไม้เนื้อ อ่อนมาก	0.57	485	74,927	194	77	66	60	78,900	45	12	6
จำปาป่า		0.51	553	76,102	279	71	157					
ยางขาว		0.70	612	89,929	312	65	161					
กะบาก	ไม้เนื้อ อ่อน	0.74	770	105,017	217	62	80	80	94,100	60	16	8
ยางแดง		0.76	739	113,651	367	65	166					
สัก		0.62	641	81,573	327	80	134					
อินทนิล		0.65	697	92,720	340	77	157					
ตะเคียนทอง	ไม้เนื้อ แข็งปาน	0.77	816	104,940	354	116	123	100	112,300	75	22	10
ตะแบก		0.72	808	112,556	374	105	175					
มะค่าแต้		0.99	954	125,805	357	231	208					
ยูง		0.75	806	120,586	364	68	174					
แดง	ไม้เนื้อ แข็ง	1.05	1193	153,129	538	219	120	120	136,300	90	30	12
เต็ง		1.07	924	115,464	443	184	146					
ประดู่		0.82	1163	128,448	495	201	164					
มะค่าโมง		0.85	996	101,721	463	121	167					
รัง		1.15	1108	153,607	496	182	176					
สักขี้ควาย		0.88	1063	131,968	467	184	146					
เขลียง	ไม้เนื้อ แข็งมาก	1.10	1206	197,795	725	267	235	150	189,000	110	40	15
ตีนนก		0.99	1283	181,021	482	225	208					
บุนนาค		1.12	1519	230,689	519	211	129					

### 6.4.3 มาตรฐานการทดสอบ

ในการออกแบบ โครงสร้างไม้ เราจะต้องทราบคุณสมบัติทางกลของไม้ดังต่อไปนี้

1. กำลังรับแรงกดอัดขนานเส้น (compressive strength parallel to the grain)
2. โมดูลัสยืดหยุ่นขนานเส้น (modulus of elasticity parallel to the grain)
3. กำลังรับแรงดึงขนานเส้น (tensile strength parallel to the grain)
4. กำลังรับแรงกดอัดตั้งฉากเส้น (compressive strength perpendicular to the grain)
5. กำลังรับแรงดัด (modulus of rupture หรือ bending strength)
6. กำลังรับแรงดึงในแนวแกน (longitudinal shear strength หรือ horizontal shear)
7. โมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus)

ซึ่งเราจะทดสอบหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐานต่อไปนี้

1. ASTM D143: Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber
2. ASTM D198: Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes

### 6.4.4 ข้อดีและข้อเสียในการใช้ไม้ในการก่อสร้าง

#### ข้อดี

1. ความสวยงาม
2. ความง่ายในการก่อสร้างและนำมาใช้ใหม่
3. อัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง
4. ป้องกันไม่ให้ความร้อนไหลเข้า-ออกโครงสร้างได้ดี
5. ทนทาน ถ้าโครงสร้างไม้ได้รับการออกแบบ ก่อสร้าง และดูแลรักษาที่เหมาะสม

#### ข้อเสีย

1. คุณสมบัติที่ไม่แน่นอน - คุณสมบัติของไม้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของไม้ จากส่วนหนึ่งของต้นไม้ไปยังอีกส่วนหนึ่ง และจากพื้นที่ที่ต้นไม้เติบโต
2. การตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อม - อุณหภูมิและความชื้นจะทำให้ไม้มีการเปลี่ยนแปลงกำลัง ความแกร่ง และขนาด
3. มีพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา - ถ้าไม้ถูกกระทำโดยแรงที่มีค่าสูงพอและเป็นระยะเวลานานแล้ว ไม้จะเกิดการวิบัติโดยการคืบ (creep) ได้ง่าย
4. ผุกร่อนได้ง่าย - ถ้าโครงสร้างไม้ไม่ได้รับการดูแลรักษาที่ดี

### 6.5 อิฐดินเผา (brick)

อิฐดินเผาเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ชนิดหนึ่ง ซึ่งได้มาจากการเผาดินเหนียวที่มีความชื้นประมาณ 10-30 % ในเตาเผาอิฐที่อุณหภูมิที่สูงประมาณ 1000 °C เป็นเวลานานพอสมควร (40 ถึง 150 ชั่วโมง) จนกระทั่งเมื่อดินเหนียวเกิดการหลอมตัวและยึดติดกันอย่างแน่นหนา

อิฐดินเผาจะถูกแบ่งออกเป็นอิฐดินเผาตัน (solid brick) และอิฐดินเผากลวง (hollow brick) โดยมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำนิยามของอิฐดินเผาตันและอิฐดินเผากลวงไว้ดังนี้ อิฐดินเผาตันเป็นอิฐที่มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิในการรับแรงแบกทานในทุกๆ ระบายที่ขนานกับพื้นที่รับแรงดังกล่าวที่ไม่น้อยกว่า 75% ส่วนอิฐดินเผากลวงจะมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิดังกล่าวอยู่ระหว่าง 40%-75% การที่อิฐดินเผามักจะมีรูกลวงนั้นก็เพื่อที่จะทำให้อิฐถูกเผาได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะเป็นผลทำให้อิฐมีกำลังรับแรงต่างๆ ที่สูงขึ้น

ในการก่อสร้างโครงสร้างอิฐก่อ (masonry structure) อิฐดินเผา (masonry brick) จะถูกจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ และใช้ปูนก่อ (mortar) (ซึ่งได้จากการผสมปูนซีเมนต์ผสม ทราย และน้ำ หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ) เป็นตัวประสานก้อนอิฐดินเผาต่างๆ เข้าด้วยกัน ดังนั้น อิฐก่อในลักษณะนี้จะถูกออกแบบให้รับแต่แรงกดอัดเท่านั้น เนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำมาก ถ้าอิฐก่อถูกเสริมด้วยเหล็กแล้ว เราจะเรียกอิฐก่อดังกล่าวว่า อิฐก่อเสริมเหล็ก (reinforced masonry) ซึ่งจะมีความสามารถในการรับแรงกดอัดและแรงดึงที่ดี และเป็นรูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสหรัฐอเมริกา

โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อจะขึ้นอยู่กับอิฐดินเผา ปูนก่อ และวิธีการก่อสร้างเป็นหลัก ในที่นี้เราจะสนใจเฉพาะคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเผาเท่านั้น

### 6.5.1 คุณสมบัติของอิฐดินเผา

อิฐดินเผาเป็นวัสดุเปราะที่มีกำลังรับแรงกดอัดที่ค่อนข้างสูงและมีกำลังรับแรงดึงต่ำ โดย ASTM C62 ได้แบ่งอิฐดินเผาที่ใช้ในการก่อสร้างออกเป็น 3 เกรดคือ

1. severe weathering หรือ SW เป็นอิฐดินเผาที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 20.7 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน
2. moderate weathering หรือ MW เป็นอิฐดินเผาที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ปานกลางและมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 17.3 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน
3. no weathering หรือ NW เป็นอิฐดินเผาที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำ มักใช้ภายในอาคาร และมีกำลังรับแรงกดอัดไม่น้อยกว่า 10.3 MPa จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอิฐดินเผาอย่างน้อย 5 ก้อน

#### กำลังรับแรงกดอัด

กำลังรับแรงกดอัดของอิฐดินเผาขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียวที่ใช้ในการผลิต กรรมวิธีการผลิต และระดับการที่ดินเหนียวถูกเผา โดยทั่วไปแล้ว กำลังรับแรงกดอัดของอิฐดินเผาจะมีค่าสูงกว่าที่ได้กำหนดโดย ASTM มาก และสำหรับอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดเดียวกันและกรรมวิธีการผลิตที่เหมือนกันแล้ว อิฐที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าและเป็นเวลานานกว่าจะเป็นอิฐที่มีกำลังสูงกว่า

#### เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอิมมัตว

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอิมมัตวเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความคงทนแข็งแรงและกำลังของอิฐดินเผา เนื่องจากถ้าอิฐมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอิมมัตวที่ต่ำแล้ว อิฐดังกล่าวจะมีความพรุนน้อยกว่าอิฐที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอิมมัตวที่สูงกว่า



โดยทั่วไปแล้ว อิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดเดียวกันและกรรมวิธีการผลิตที่เหมือนกันแล้ว อิฐที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าและเป็นเวลานานกว่าจะเป็นอิฐที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การอิมตัวต่ำกว่า

### อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น

รูพรุนที่อยู่ในอิฐดินเผาจะทำหน้าที่ดูดซึมน้ำโดยเฉพาะจากปูนก่อเข้าสู่อิฐ การดูดซึมน้ำดังกล่าวจะมีผลต่อความสมบูรณ์ของแรงยึดเหนี่ยว (bond) ที่เกิดขึ้นระหว่างอิฐและปูนก่อและจะมีผลทำให้น้ำซึมผ่านรอยต่อของอิฐและปูนก่อได้ง่าย จากการทดสอบพบว่า ถ้าอิฐก่อมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่า 30 g/min ต่อพื้นที่หน้าตัดของอิฐ 194 cm<sup>2</sup> แล้ว อิฐดินเผาดังกล่าวจะต้องถูกทำให้มีการอิมตัวแบบผิวแห้งก่อนที่จะนำไปก่อเป็นอิฐก่อ ทั้งนี้เนื่องจากว่า อิฐดินเผาดังกล่าวจะดูดน้ำจากปูนก่อมากจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอิฐและปูนก่อมีค่าต่ำ

### 6.5.2 มาตรฐานการทดสอบ

ASTM C67: Methods of sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.

ASTM C109: Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar.

ASTM C190: Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortar.

ASTM C1072: Method for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength.

ASTM E518: Test Methods for Flexural Bond Strength of masonry.

### 6.5.3 ข้อดีและข้อเสียในการใช้อิฐก่อในการก่อสร้าง

#### ข้อดี

1. มีความแข็งแรงและคงทน
2. มีความทึบเสียงสูง
3. มีความต้านทานต่อไฟไหม้สูง
4. เก็บรักษาอุณหภูมิภายในตัวโครงสร้างได้ดี
5. มีความสวยงามเนื่องจากสามารถที่จะนำมาก่อสร้างให้มีรูปแบบใดๆ ได้
6. มีราคาค่อนข้างถูกและค่าบำรุงรักษาต่ำ
7. ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมมากเท่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น คอนกรีตและเหล็ก

#### ข้อเสีย

1. การวิเคราะห์และออกแบบที่ต้องการรายละเอียดที่สูงและถูกต้อง
2. การก่อสร้างโครงสร้างอิฐก่อต้องใช้ฝีมือแรงงานที่มีคุณภาพสูง

### 6.6 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นวัสดุที่เป็นโลหะที่ไม่เป็นจำพวกเดียวกับเหล็ก (nonferrous metal) ที่มีกำลังค่อนข้างสูง มีน้ำหนักเบา และนำมาหล่อเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย อลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของลมฟ้าอากาศได้ดี แต่จะถูกกัดกร่อนโดย alkaline และกรดบางชนิดได้ง่าย ดังนั้น อลูมิเนียมที่นำมาใช้ในงาน

ก่อสร้างจะอยู่ในสถานะของโลหะผสม (alloy) ซึ่งได้จากการผสมโลหะชนิดอื่นๆ เช่น ทองแดงหรือ magnesium เป็นต้น เข้ากับอลูมิเนียม และผ่านกรรมวิธีที่ทำให้ความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้โลหะผสมอลูมิเนียม (aluminum alloy) ที่มีความแข็งแรงสูงมาก

การผลิต aluminum alloy ทำได้โดยทั้งการหล่อและการผ่านกรรมวิธีทางกล เช่น การรีดร้อน (hot-rolling), การรีดเย็น (cold-rolling), extrusion, การดึง (drawing) และการตี (forging) เป็นต้น อลูมิเนียมที่เป็นแผ่นและมีหน้าตัดรูปร่างต่างๆ จะได้จากการทำรีดร้อน (hot-rolling) ขณะที่ aluminum alloy ยังร้อนแดงอยู่ จากนั้น อลูมิเนียมที่เป็นแผ่นจะถูกทำให้บางลงได้โดยการทำรีดเย็น (cold-rolling) การผลิต aluminum alloy แบบ extrusion เป็นการดึง aluminum alloy ที่ยังร้อนอยู่ผ่านแม่แบบ ส่วนการผลิต aluminum alloy แบบ drawing เป็นการดึง aluminum alloy ที่เย็นตัวแล้วผ่านแม่แบบ ส่วนการผลิต aluminum alloy แบบ forging เป็นการให้ความร้อนแก่ aluminum alloy แล้วทำการตีหรือกดอัดให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ

aluminum alloy ที่ผ่านกรรมวิธีทางกลแบบเย็น (cold-working) เช่น drawing เป็นต้น จะมีความแข็งแรงและกำลังมากขึ้น ส่วน aluminum alloy ที่ผ่านกรรมวิธีที่ทำให้ความร้อน เช่น annealing เป็นต้น จะมีหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่อยู่ใน aluminum alloy ลดลง

สมาคม aluminum แห่งอเมริกาได้กำหนดการเรียก aluminum alloy โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว สำหรับ aluminum alloy ที่ผ่านกรรมวิธีทางกล (wrought alloy) และใช้ตัวเลข 3 ตัวสำหรับอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ผ่านกรรมวิธีหล่อ (cast alloy) สำหรับ aluminum alloy ที่ผ่านกรรมวิธีทางกล เลขตัวแรกจะแสดงถึงโลหะผสมหลักโดยที่

- 1 หมายถึงอลูมิเนียมที่ไม่ถูกผสมโดยโลหะผสมอื่นๆ เลย
- 2 หมายถึงอลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นโลหะผสม
- 3 หมายถึงอลูมิเนียมที่มี manganese เป็นโลหะผสม
- 4 หมายถึงอลูมิเนียมที่มี silicon เป็นโลหะผสม
- 5 หมายถึงอลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียม เป็นโลหะผสม
- 6 หมายถึงอลูมิเนียมที่มี manganese และ silicon เป็นโลหะผสม
- 7 หมายถึงอลูมิเนียมที่มีสังกะสีเป็นโลหะผสม

และตัวเลข 3 ตัวสุดท้ายจะบ่งบอกถึงข้อมูลจำเพาะของโลหะผสมและจะตามด้วยเครื่องหมาย hyphen ตัวอักษรหนึ่งตัวและตัวเลขอีก 2 หลัก เช่น 6061-T6 ซึ่งเป็น aluminum alloy ที่ผ่านกรรมวิธีทางกลที่มี manganese และ silicon เป็นโลหะผสม เป็นต้น

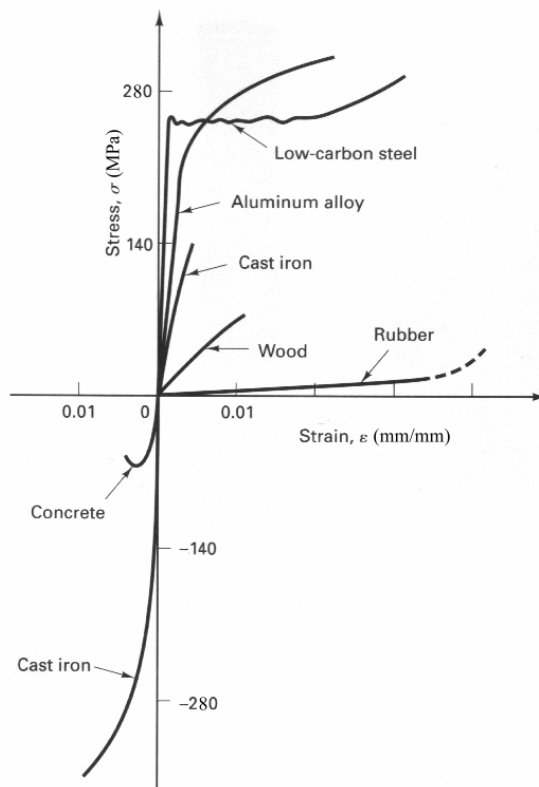
ในงานก่อสร้าง aluminum alloy มักจะถูกใช้ในส่วนของโครงสร้างรองมากกว่าในส่วนโครงสร้างหลัก เช่น ใช้เป็นกรอบประตูและกรอบหน้าต่าง เป็นต้น ตารางที่ 6-3 แสดงตัวอย่าง aluminum alloy ที่ใช้ในงานก่อสร้าง

### 6.6.1 คุณสมบัติทางกลของ aluminum alloy

รูปที่ 6-12 แสดง stress-strain curve ของ aluminum alloy เปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น เหล็กเหนียว เหล็กหล่อ และไม้ เป็นต้น ภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า aluminum alloy เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่สูงและมีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว สามารถยืดตัวได้ก่อนข้างสูงก่อนที่จะเกิดการวิบัติ aluminum alloy ไม่มีจุดคลาก (yielding point) ที่ชัดเจน โดยทั่วไปแล้ว เราจะหาหน่วยแรงคลาก (yielding stress) ของ aluminum alloy ได้โดยใช้วิธี 0.2% offset ตารางที่ 6-3 แสดงคุณสมบัติทางกลของ aluminum alloy บางชนิดที่น่าสนใจ

ตารางที่ 6-3 ตัวอย่าง aluminum alloy ที่ใช้ในงานก่อสร้าง

Application	Alloy Number	Product
Curtain Wall	3003-H14	Sheet
Door Frame	6063-T5, 6063-T6	Extrusion
Railing	6063-T5, 6061-T83	Extrusion
Roofing	Special Roofing Alloy	Sheet
Structural Shapes	2014-T6, 6061-T6	Extrusion or Rolled shape
Windows	6063-T5, 6063-T6, 6061-T6	Extrusion



รูปที่ 6-12 stress-strain curve ของ aluminum alloy เปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ

## 6.7 พลาสติกเสริมไฟเบอร์ (fiber-reinforced plastic)

fiber-reinforced plastic หรือ FRP เป็นวัสดุประกอบ (composite material) ที่ประกอบด้วยไฟเบอร์ (fiber) ที่มีกำลังและความแข็งแรงสูงถูกยึดเหนี่ยวด้วยโพลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) โดยที่ fibers และ matrix ยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของ FRP ที่ได้จะแตกต่างกับคุณสมบัติของตัว fibers และ matrix เองอย่างเด่นชัด ในลักษณะดังกล่าว FRP จะมีลักษณะที่เหมือนกับคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete) ซึ่งเหล็กซึ่งมีกำลังรับแรงดึงสูงจะถูกเสริมให้กับคอนกรีตซึ่งมีกำลังรับแรงดึงต่ำ ในส่วนของโครงสร้างที่ต้องรับแรงดึง

ตารางที่ 6-3 คุณสมบัติทางกลของ aluminum alloy บางชนิดที่น่าสนใจ

	Approximate composition, percent	Tensile yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Tensile modulus of elasticity, MPa	Elongation in 50 mm, percent	Shear strength, MPa
Aluminum						
Sand cast, 1100-F	Al 100	40	75	60	22	-
Annealed sheet, 1100-O		35	90	70	35	-
Aluminum Alloy 2024						
Temper O	Al 93, Cu 4.5,	75	185	73	20	125
Temper T36	Mg 1.5, Mn 0.6	395	495	73	13	290
Aluminum Alloy 2014						
Temper O	Al 93, Cu 4.4, Si 0.8 Mn 0.8,	95	185	73	18	125
Temper T6	Mg 0.4	415	485	73	13	290

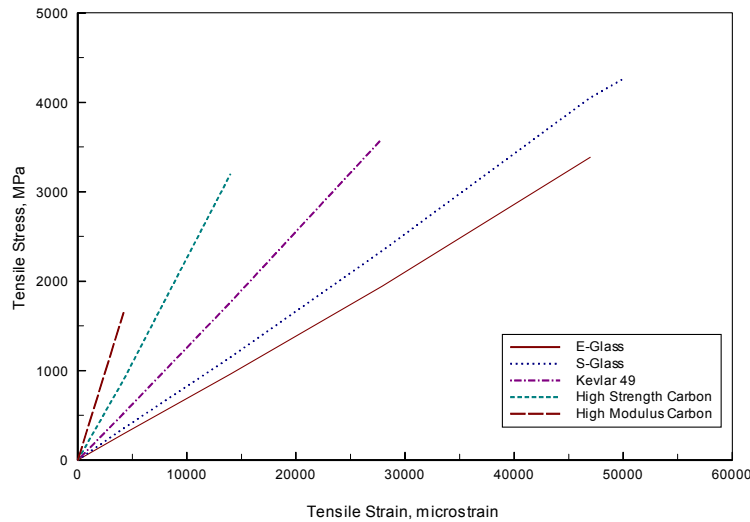
### 6.7.1 fiber

ไฟเบอร์ (fiber) เป็นองค์ประกอบหลักของพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP) ซึ่งทำหน้าที่รับแรงกระทำส่วนใหญ่ที่กระทำต่อ FRP และโดยปกติแล้ว fiber ที่อยู่ใน FRP จะมีปริมาณมากกว่าเมทริกซ์ (matrix) ชนิดของ fiber มักจะถูกนำมาใช้คือ ไคคาร์บอน (carbon fiber) ไคแก้ว (glass fiber) ไคโบลอน (boron fiber) และ ไคเคฟลาร์ (kevlar fiber)

รูปที่ 6-13 แสดงถึง stress-strain diagram ของ fiber ชนิดต่างๆ ภายใต้อันตรึงจากรูป เราจะเห็นได้ว่า

1. fiber เป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงจุดวิบัติ
2. fiber มีกำลังรับแรงดึงที่สูงมาก (เกินกว่า 1500 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเหนียว ซึ่งมีค่าหน่วยแรงประลัย (ultimate stress) อยู่ประมาณ 700 MPa

3. fiber มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่น้อยกว่าเหล็กเหนียว โดยจะมีค่าประมาณ 1/3 เท่าของเหล็กเหนียวเท่านั้นในกรณีของ glass fiber และ 1 เท่าของเหล็กเหนียวในกรณีของ carbon fiber
4. fiber โดยเฉพาะ glass fiber และ kevlar fiber มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ คือ ประมาณ 45000 microstrain ซึ่งแสดงว่า fiber มีความเหนียว (ductility) ที่ค่อนข้างสูง



รูปที่ 6-13 stress-strain diagram ของ fiber ชนิดต่างๆ ภายใต้แรงดึง

glass fiber โดยเฉพาะ E-glass fiber จะเป็น fiber ที่นิยมนำมาใช้มากในการทำ FRP สำหรับสำหรับงานก่อสร้างต่างๆ ไป เนื่องจากมีราคาถูกและหาง่าย ตารางที่ 6-4 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของ E-glass fiber

ตารางที่ 6-4 คุณสมบัติที่สำคัญของ E-glass fiber

Properties	E-glass
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,550
Tensile Strength (MPa)	3,450
Tensile Modulus (GPa)	72.45
Poisson's Ratio	0.22
Shear Modulus(GPa)	29.95
Elongation to Break (%)	4.8

### 6.7.2 matrix

เมตริกซ์ (matrix) ที่ใช้ในพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP) จะทำหน้าที่ดังนี้

1. เป็นตัวเชื่อมยึด เพื่อที่จะถ่ายแรงที่เกิดขึ้นใน fiber เส้นหนึ่งไปยัง fiber เส้นอื่นๆ
2. เป็นที่รองรับทางด้านข้าง (lateral support) ให้กับ fiber
3. เป็นตัวป้องกัน fiber จากการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อม

matrix ที่ใช้ในการผลิต FRP จะเป็น thermosetting plastic ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นจะเกิดจากพันธะทางเคมีที่ไม่สามารถทำให้อ่อนตัวลงได้โดยใช้ความร้อน thermosetting plastic ที่นิยมใช้ในการผลิต FRP สำหรับงานก่อสร้างมีอยู่ 2 ชนิดคือ polyester และ vinyl ester ซึ่งมีคุณสมบัติที่อุณหภูมิห้อง ดังที่แสดงในตารางที่ 6-5

ตารางที่ 6-5 คุณสมบัติที่อุณหภูมิห้องของ polyester และ vinyl ester

Property	Polyester	Vinyl ester
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1130	1120
Tensile Strength (MPa)	77.28	81.42
Tensile Modulus (GPa)	3.24	3.38
Flexural Strength (MPa)	122.82	133.86
Flexural Modulus (GPa)	3.18	3.10
Poisson's Ratio	0.35	0.33
Shear Modulus (Gpa)	1.17	1.28
Elongation to Break (%)	4.2	4.5

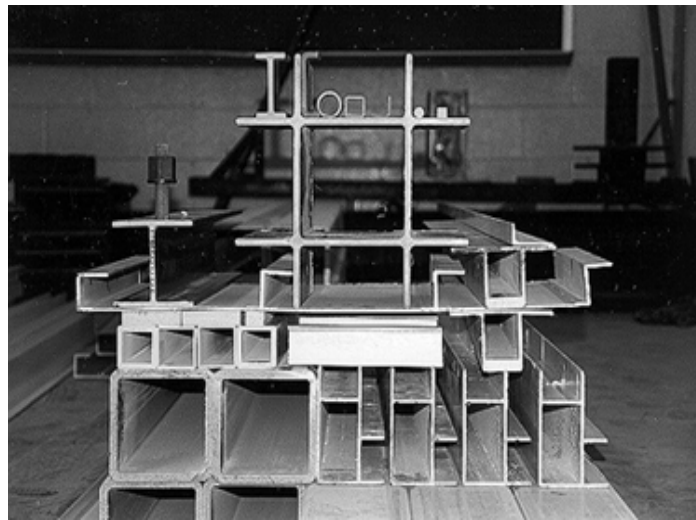
### 6.7.3 วิธีการผลิต FRP composite

pultrusion เป็นขบวนการผลิตที่นิยมใช้ในการผลิตพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP) สำหรับงานก่อสร้าง เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีหน้าตัดรูปต่างๆ เช่น ทรงกลมตัน ท่อกลวง สี่เหลี่ยมกลวง (box) I และ wide-flange เป็นต้น ดังที่แสดงในรูปที่ 6-14

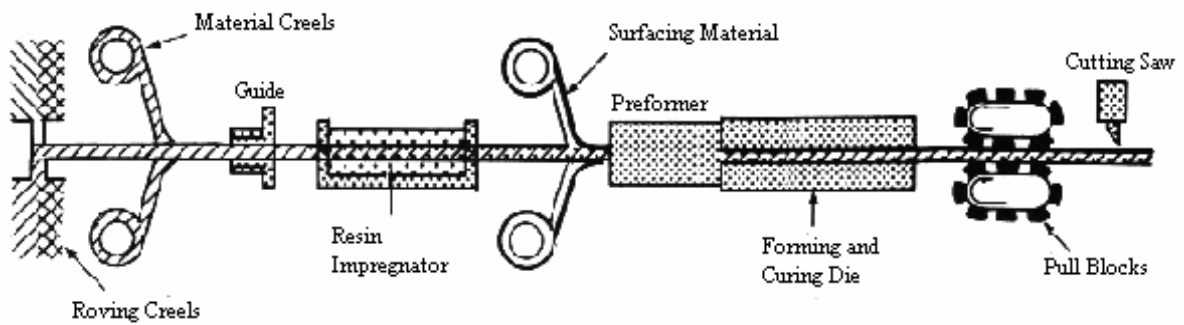
ขบวนการผลิตแบบ pultrusion เป็นขบวนการผลิต FRP อย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหน้าตัดที่คงที่ตลอดความยาวของ FRP โดยมีขั้นตอนการทำงานแบบพื้นฐาน ดังที่แสดงในรูปที่ 6-15

โดยทั่วไปแล้ว การจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ (fiber) ในการผลิตจะมีลักษณะที่สมมาตรกับระนาบที่อยู่กึ่งกลางความหนาของ FRP ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6-16 โดยที่ผิวบนและผิวล่างจะทำด้วย surface veil ซึ่งเป็นชั้นที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและมีการยึดตัวได้สูง แต่มีกำลังต่ำ ถัดมาจะเป็นชั้น continuous strand mat ที่มี fiber วางอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกัน โดยจะอยู่ในแนวแกนและแนวขวางของหน้าตัดของ FRP ซึ่ง continuous strand mat จะเป็นชั้นที่ทำให้ FRP มีกำลังและความแกร่งทั้งในแนวแกนและแนวขวาง ส่วนชั้น

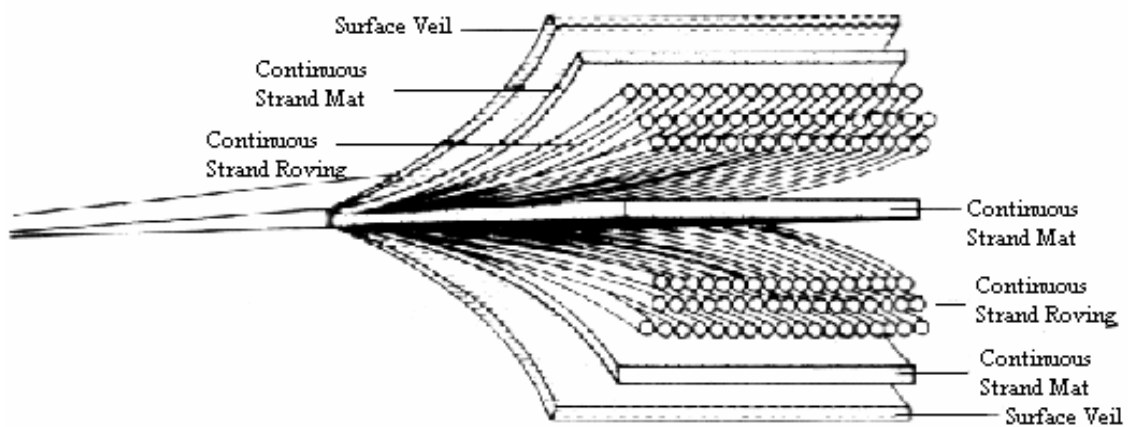
ถัดไปจะเป็นชั้นของ continuous strand roving ซึ่งมี fiber วางอยู่ในแนวแกนของ FRP เท่านั้น ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ให้กำลังและความแกร่งในแนวแกนกับ FRP มากที่สุด



รูปที่ 6-14 หน้าตัดรูปต่างๆ ของพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP)



รูปที่ 6-15 แผนภาพของขบวนการผลิตแบบ pultrusion



รูปที่ 6-16 ตัวอย่างการจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ (fiber)

#### 6.7.4 มาตรฐานการทดสอบ

ASTM ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP) ไว้ดังนี้

ASTM D3039 - Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

ASTM D3410 - Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.

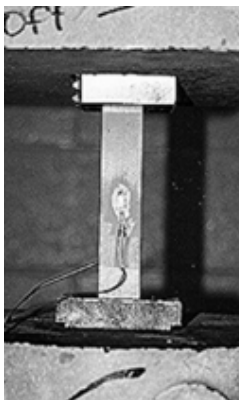
ASTM D790 - Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating materials.

ASTM D2344 - Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by Short Beam Method.

เนื่องจากคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมของ FRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของ fiber ดังนั้น ในการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกตัดทั้งในแนวนาน (lengthwise หรือ LW) และทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการวางตัวหลักของ fiber (crosswise หรือ CW)

#### การทดสอบแรงดึง (tension test)

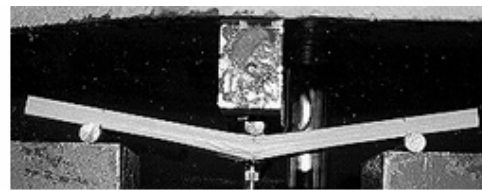
การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039-95 ดังที่แสดงในรูปที่ 6-17 ก โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus of elasticity) ค่าหน่วยแรงดึงประลัย (tensile ultimate stress) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) จากการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบที่ตัดในทิศทาง LW และการทดสอบแรงดึงเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเฉือนในระนาบ (in-plane shearing modulus of elasticity) โดยการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ตัดในทิศทางทำมุม  $10^\circ$  กับทิศทาง LW



ก.) การทดสอบแรงดึง



ข.) การทดสอบแรงอัด



ค.) การทดสอบแรงตัด



ง.) การทดสอบหา interlaminar shear strength

รูปที่ 6-17 ตัวอย่างการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของ FRP



### การทดสอบแรงอัด (compression test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus of elasticity) และหน่วยแรงอัดประลัย (compressive ultimate stress) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 695-95 ดังที่แสดงในรูปที่ 6-17x โดยทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ตัดในทิศทาง LW และในทิศทาง CW

### การทดสอบแรงดัด (flexural test)

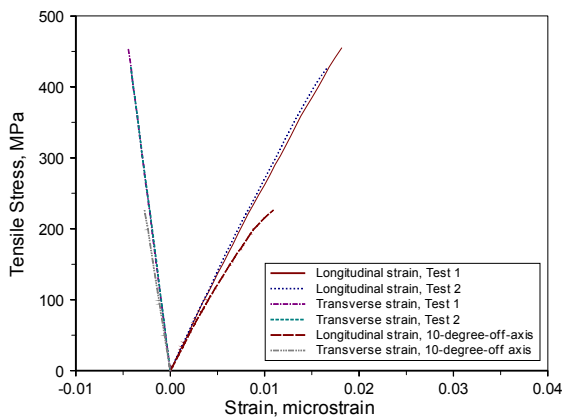
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus of elasticity) และค่าหน่วยแรงดัดประลัย (flexural ultimate stress) ตามมาตรฐาน ASTM D 790-92 ดังที่แสดงในรูปที่ 6-17ค จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ตัดในทิศทาง LW

### การทดสอบหา interlaminar shear strength

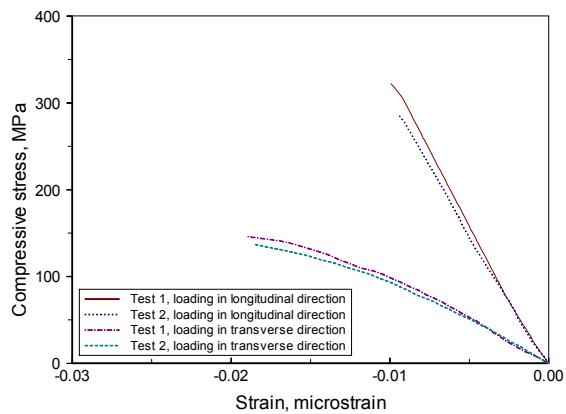
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2344-95 ดังที่แสดงในรูปที่ 6-17ง จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ตัดในทิศทาง LW

### 6.7.5 คุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRP)

รูปที่ 6-18ก และรูปที่ 6-18ข แสดง stress-strain diagram ของ FRP จากการทดสอบแรงดึงและแรงกดอัด ตามลำดับ ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า FRP เป็นวัสดุประาะที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนเกือบถึงจุดวิบัติและการวิบัติของวัสดุจะเป็นแบบแตกหักฉับพลัน อย่างไรก็ตาม วัสดุชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ โดยค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่ามากกว่า 0.010



ก.) การทดสอบแรงดึง



ข.) การทดสอบแรงอัด

รูปที่ 6-18 stress-strain diagram ของ FRP จากการทดสอบแรงดึงและแรงกดอัด

ตารางที่ 6-6 แสดงคุณสมบัติทางกลของ FRP ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้าง A36 จากตารางจะเห็นได้ว่า คุณสมบัติทางกลของ FRP ในทิศทาง LW จะมีค่ามากกว่าคุณสมบัติทางกลของตัวอย่างทดสอบในทิศทาง CW ซึ่งแสดงว่า FRP เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (orthotropic material)

นอกจากนั้นแล้ว เราจะเห็นได้ว่า หน่วยแรงดึงประลัย (ultimate tensile stress) และหน่วยแรงคดประลัย (ultimate flexural stress) ของ FRP จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าดังกล่าวของเหล็กโครงสร้าง และมีค่าสูงกว่า yielding stress ของเหล็กโครงสร้าง แต่หน่วยแรงกดอัดประลัย (ultimate compressive stress) ของ FRP มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวของเหล็กโครงสร้าง นอกจากนั้นแล้ว โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของ FRP มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวของเหล็กโครงสร้างถึง 7 เท่าในทิศทาง LW 26 เท่าในทิศทาง CW และ 15.2 เท่าเมื่อตัวอย่างทดสอบถูกกระทำโดยแรงคด ซึ่งการที่ FRP มีหน่วยแรงดึงประลัย (ultimate flexural stress) ที่ค่อนข้างสูงแต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่อนข้างต่ำนี้จะเป็นผลทำให้การแอ่นตัวของโครงสร้างควบคุมการออกแบบโครงสร้างพลาสติกเสริมใยแก้ว (FRP)

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่างชั้น (interlaminar shear strength) ของ FRP กับกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กโครงสร้างแล้ว จะเห็นได้ว่า FRP มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่าเหล็กโครงสร้างมาก ดังนั้น ในการออกแบบโครงสร้าง FRP เราควรตรวจสอบค่าหน่วยแรงเฉือนด้วย นอกจากนั้นแล้ว จากผลการทดสอบหา shear modulus of elasticity จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของ flexural modulus of elasticity (E) ต่อ shear modulus of elasticity (G) ของ FRP และของเหล็กโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 4.05 และ 2.67 ตามลำดับ ดังนั้น ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง FRP จะถูกกระทบจากแรงเฉือนมากกว่าโครงสร้างเหล็ก และค่า G ของ FRP จะไม่สามารถคำนวณหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของ E และ Poisson ratio ( $\nu$ ) ในรูปของสมการ  $G = 0.5 E / (1 + \nu)$  ดังเช่นที่ใช้ในเหล็กโครงสร้าง

ตารางที่ 6-6 คุณสมบัติทางกลของ FRP และของเหล็กโครงสร้าง

คุณสมบัติทางกล	พลาสติกเสริมใยแก้ว	เหล็กโครงสร้าง A36
Ultimate tensile stress, LW	445.42 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
Tensile modulus of elasticity, LW	26.26 GPa	200 GPa
Ultimate compressive stress, LW	308.46 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
Ultimate compressive stress, CW	143.33 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
Compressive modulus of elasticity, LW	32.60 GPa	200 GPa
Compressive modulus of elasticity, CW	7.69 GPa	200 GPa
Ultimate flexural stress, LW	422.57 MPa	250 MPa
Flexural modulus of elasticity, LW	13.15 GPa	200 GPa
Shear modulus of elasticity, LW	3.25 GPa	75 GPa
Interlaminar Shear Stress, LW	23.64 MPa	125 MPa
Poisson ratio, LW	0.263	0.32
Density	1849.5 kg/m <sup>3</sup>	7852 kg/m <sup>3</sup>

สุดท้าย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของวัสดุทั้งสอง จะเห็นได้ว่า FRP เบากว่าเหล็ก โครงสร้าง 4.2 เท้า ซึ่งทำให้การก่อสร้างโครงสร้าง FRP ทำงานกว่าเหล็กโครงสร้างมาก และอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักของ FRP มีค่ามากกว่าของเหล็กโครงสร้าง 4.5 เท้า

#### 6.7.6 ข้อดีและข้อเสียในการใช้ FRP ในการก่อสร้าง

##### ข้อดี

1. FRP มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูงกว่าเหล็กโครงสร้าง 4.5 เท้า
2. FRP เบากว่าเหล็กโครงสร้าง 4.2 เท้า
3. FRP เหมาะที่จะใช้ในโครงสร้างที่ถูกกัดกร่อนสูง เช่น โรงงานสารเคมีและโรงงานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น
4. FRP เหมาะที่จะใช้ในโครงสร้างที่ต้องการการนำความร้อนที่ต่ำและไม่นำไฟฟ้า เช่น เสาไฟฟ้า เป็นต้น
5. FRP เหมาะที่จะใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความโปร่งใสต่อสนามแม่เหล็ก เช่น เสาส่งสัญญาณวิทยุ-โทรทัศน์และหอคอยเรดาร์ เป็นต้น

##### ข้อเสีย

1. FRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 1/10 ของเหล็กโครงสร้างเท่านั้น ทำให้การออกแบบถูกควบคุมโดยการโก่งตัวของโครงสร้างเป็นหลัก
2. FRP เป็นวัสดุแบบ anisotropic และ nonhomogeneous ทำให้การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง FRP มีความยุ่งยาก
3. FRP มีค่า shear modulus ต่ำ - ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง FRP จะถูกกระทบจากแรงเฉือนมากกว่าโครงสร้างเหล็กและจะต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง FRP ด้วย
4. คุณสมบัติทางกลของ FRP มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



## หนังสืออ้างอิง

1. Davis, H.E., Troxell, G.E., and Hauck, G.F.W., “Testing of Engineering Materials,” 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, 1982
2. Hibberler, R.C., “Mechanics of materials,” 3<sup>rd</sup> Ed., Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1997
3. Gere, J.M., “Mechanics of materials,” 4<sup>th</sup> Ed., PWS Publishing, Boston, MA, 1997
4. Popov, E.P., “ Engineering Mechanics of Solids, “ International Ed., Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1999
5. Dowling, N.E., “ Mechanical Behavior of Materials, “ 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1999
6. “ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา” คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2540

