CHAPTER ๓

MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIAL

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

Outlines

-การทดสอบแรงดึงและแรงอัด (The tension and compression test)

-แผนภาพหน่วยแรง-ความเครียด (The stress-strain diagram)

-พฤติกรรมวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ (Stress-strain Behavior of Ductile and Brittle Materials.)

-กฎของฮุค (Hooke ‘s Law)

-พลังงานความเครียด (Strain Energy)

-อัตราส่วนโพซอง (Poisson ‘s Ratio)

-แผนภาพหน่วยแรงเฉือน-ความเครียดเฉือน (The shear stress-strain diagram)

-การวิบัติของวัสดุเนื่องจากการคืบและการล้า (Failure of Materials Due to Creep and Fatigue)

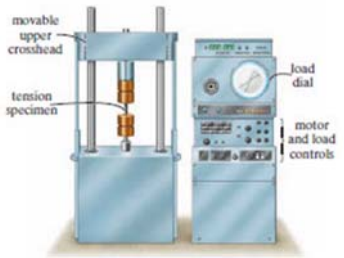
การทดสอบวัสดุ(MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIAL) จะหามาได้จาการทดสอบตัวอย่างทดสอบ(specimen) ของวัสดุในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบวัสดุจะต้องทำตามมาตรฐาน ที่ได้รับการยอมรับทั่วไป เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (มอก.) เป็นต้น

การทดสอบวัสดุ มีสองแบบคือ การทดสอบแรงดึง (tension test) และการทดสอบแรงกดอัด (compression test)

The Tension And Compression Test

การทดสอบวัสดุ มีความสำคัญอย่างมากในทางวิศวกรรมคือ การทดสอบแรงดึง(tension test) ซึ่งมักจะใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง(tensile stress) กับความเครียดดึง(tensile strain) ของวัสดุ

การทดสอบวัสอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญมากในทางวิศวกรรมคือ การทดสอบแรงกดอัด (compression test) ซึ่งขั้นตอนทดสอบจะมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบแรงดึง แต่แรงที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบจะเป็นแรงกดอัด

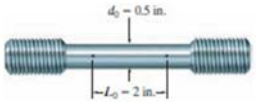


The Tension And Compression Test

The Tension And Compression Test

เตรียมตัวอย่างวัสดุให้มีรูปร่างและขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด จากนั้นทำเครื่องหมายทดสอบ ๒ จุด เพื่อใช้เป็นความยาวเริ่มต้น L_0 โดยให้เส้นตรงเชื่มระหว่าง จุด ๒ จุด นั้นขนานไปกับแนวแกนของตัวอย่างทดทดสอบ

วัด เส้นผ่าศูนย์กลางของ ตัวอย่างทดสอบ D_0 เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ A_0 และวัดความยาวเริ่มต้น L_0



The Tension And Compression Test

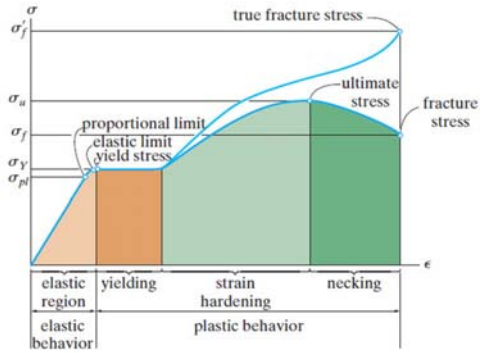
ค่าของหน่วยแรงและความเครียดที่ใช้ในการเขียนแผนภาพ(stress-strian diagram)ชนิดนี้จะหามาได้โดยการใช้ค่าเริ่มต้น ของพื้นที่หน้าตัด A_0 และค่าเริ่มต้นของความยาว L_0 ของตัวอย่างทดสอบ (specimen)

ซึ่งสมการของหน่วยแรง และความเครียดจะอยู่ในรูป

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

The Stress – Strain Diagram



Conventional and true stress-strain diagrams for ductile material (steel) (not to scale)

The Stress – Strain Diagram

พฤติกรรมของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic Behavior) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีแรงกระทำแล้วเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามลักษณะแรงกระทำ แต่เมื่อนำแรงกระทำออก วัสดุจะกลับคืนรูปทรงหรือมีความยาวเท่าเดิม พฤติกรรมการยืนหยุ่นจะเกิดขึ้นใช่ช่วง Linear Elastic ของ stress-strain diagram เท่านั้น ขีดจำกัดของหน่วยแรงส่วนบนจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้น เรียกว่า ขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional Limit) σ_{pl}

ถ้าหน่วยแรงเกินขีดจำกัดของสัดส่วนไปเล็กน้อย วัสดุจะยังคงมีการตอบสนองความยืดหยุ่น และจุดสุดท้ายบน stress-strain diagram ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นนี้จะถูกเรียกว่า elastic limit

The Stress – Strain Diagram

การคราก (Yielding) เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง ทำให้ขีดจำกัดความยืดหยุ่นต่ำลง วัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรเกิดขึ้น (Deform Permanently) หน่วยแรงที่ก่อให้เกิดการครากคือ หน่วยแรงครากหรือจุดคราก (Yield Stress or Yield Point, σ_y)

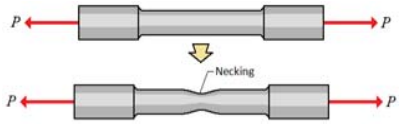
หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะยืดอย่างต่อเนื่องโดยที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงดึง ซึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Plastic)

The Stress – Strain Diagram

การแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening) เมื่อผ่านจุดครากไปยังคงมีแรงกระทำต่อเนื่องและวัสดุจะสามารถต้านทานแรงดึงได้อีกครั้งจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด เรียกว่า หน่วยแรงประลัย (Ultimate Stress, σ_u) และพฤติกรรมนี้ถูกเรียกว่า การแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening)

The Stress – Strain Diagram

การเกิดคอคิด (Necking) คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มลดลงเรื่อยๆในบริเวณที่รับแรงดึงตลอดช่วงบนความยาวทั้งหมด พื้นที่หน้าตัดของช่วงดังกล่าวจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหักของวัสดุที่หน่วยแรงแตกหัก (Fracture Stress, σ_f)

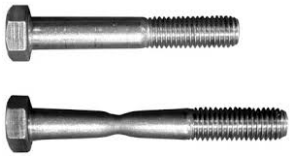


Stress- Strain Behavior of Ductile and Brittle Material

วัสดุเหนียว (Ductile Materials) เป็นวัสดุที่มีค่าความเครียดมากก่อนเกิดหารแตกหัก วัสดุเหนียวนิยมใช้กับงานรับการดูดซับแรงกระแทกถ้าเกิดการรับแรงมากๆ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนเกิดการวิบัติ

ความเหนียวของวัสดุจะได้จากร้อยค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (percent elongation) หรือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction of area) ของวัสดุ เกิดจากความเครียดแตกหักของวัสดุซึ่งแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์

Stress- Strain Behavior of Ductile and Brittle Material



$$\text{Percent elongation} = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} 100\%$$

$$\text{Percent reduction of area} = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} 100\%$$

เมื่อ

L_o = ขนาดความยาวของวัสดุเดิม

L_f = ขนาดความยาวของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ

A_o = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเดิม

A_f = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ

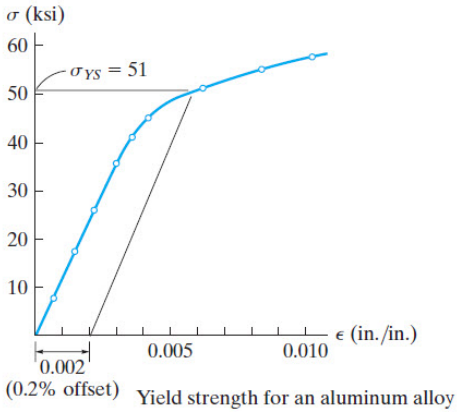
Tensile Test

https://youtu.be/DฝUcGc้kcpcM

Stress- Strain Behavior of Ductile and Brittle Material

พฤติกรรมหน่วยแรง-ความเครียดที่มีความยืดหยุ่นซึ่งจะเกิดการคราก เมื่อหน่วยแรงคงที่จนเกิดคอคิดและแตกหักไปในที่สุด โลหะทุกชนิดมีพฤติกรรมการครากที่คงที่และจะไม่เกิดขึ้นเมื่อพื้นขอบเขตของความยืดหยุ่น เช่น อลูมิเนียม (Aluminum) ไม่มีจุดครากที่ชัดเจน ดังนั้นหาค่าหน่วยแรงคราก (Yielding Stress) ด้วยวิธี *Offset Method* ปกติจะเลือกใช้ความเครียดที่ ๐.๒% (๐.๐๐๒mm/mm) บนแกนของ strain จากนั้น ทำการลากเส้นตรงให้ขนานไปกับส่วนของ stress-strain diagram ในช่วงที่เป็นเส้นตรง จุดที่เส้นตรงดังกล่าวตัดจะเรียกว่า จุดคราก (Yielding Point)

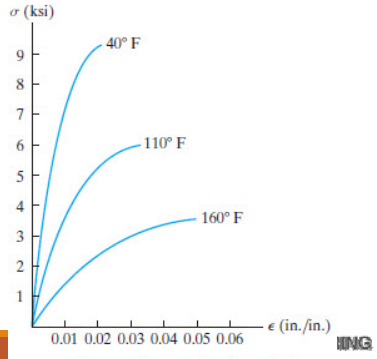
Stress- Strain Behavior of Ductile and Brittle Material



Yield strength for an aluminum alloy

Stress- Strain Behavior of Ductile and Brittle Material

วัสดุเปราะ (Brittle Materials) คือ วัสดุที่มีจุดครากต่ำหรือไม่มีจุดคราก ไม่มีจุดของหน่วยแรงแตกหักของแรงดึง (Tensile Fracture Stress) ที่ชัดเจนและมีกำลังรับแรงดึงได้ต่ำมากเมื่อเทียบกับแรงกดอัด ถ้าโดนดึงจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กมากบนผิววัสดุ นอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจะแข็งแต่เปราะ ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุจะอ่อนและเหนียวมากขึ้น



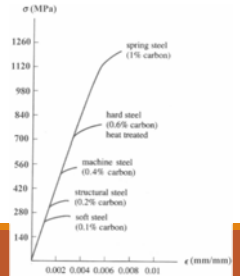
$\sigma-\epsilon$ diagrams for a methacrylate plastic

Hooke's Law

ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายในขอบเขตของการยืดหยุ่น การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเป็นสัดส่วนกับความเครียด ซึ่งค้นพบโดย Robert Hooke ในปี ค.ศ.๑๖๗๖ จึงเรียกว่า
กฎของฮุค

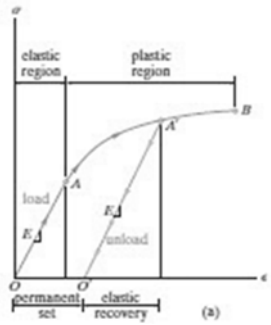
$$\sigma = E\varepsilon$$

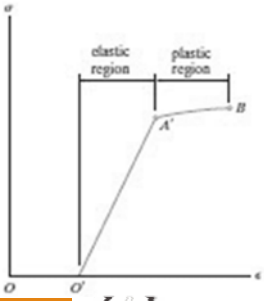
ในปี ค.ศ.๑๘๐๗ Thomas Young ได้ค้นพบ Modulus of Elasticity or Young's Modulus (***E***) เป็นค่าความชันของ Stress-Strain Curve มีหน่วยเดียวกันกับหน่วยแรง ค่า Modulus of Elasticity ของเหล็กมีค่าประมาณ ๒๐๐ GPa



Hooke's Law

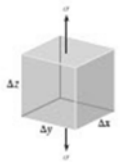
การแข็งตัวที่เกิดจากความเครียด (Strain Hardening) ถ้าเป็นวัสดุเหนียว เมื่อถูกแรงดึงกระทำผ่านจุดครากถึงช่วงพลาสติกแล้วปล่อยแรงกระทำนั้นออก วัสดุจะมีการคืนตัวสู่สภาวะสมดุลจากจุด *A′* ไปยังจุด *O′* โดยที่การคืนตัวเป็นแบบยืดหยุ่น(Elastic) และวัสดุจะยังคงมีความเครียดพลาสติก (Plastic strain) คงเหลืออยู่ในตัววัสดุเท่ากับ *OO′* ซึ่งเรามักเรียกความเครียดพลาสติกนี้ว่า Permanent set





พลังงานความเครียด (Strain Energy)

เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงภายนอกจนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง วัสดุจะเก็บสะสมพลังงานไว้ภายในเนื้อของวัสดุ พลังงานดังกล่าวสัมพันธ์กับความเครียด จึงเรียกว่า พลังงานความเครียด จะเกิดขึ้นจากค่าหน่วยแรงในแนวแกน ใช้ระบุความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงาน



พลังงานความเครียด (Strain Energy)

พลังงานความเครียดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร คือ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียด

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{1}{2}\sigma\epsilon$$

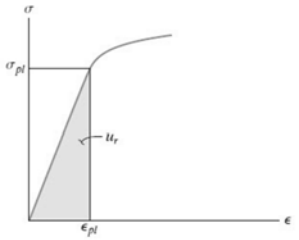
พฤติกรรมของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น สามารถใช้กฎของฮุคได้ $\sigma = E\varepsilon$ สามารถแสดงความหนาแน่นของพลังงานความเครียดในรูปแบบหน่วยแรงตามแนวแกน จะได้

$$u = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E}$$

พลังงานความเครียด (Strain Energy)

โมดูลัสของรีซิเลียน (Modulus of Resilience) หน่วยแรง σ ถึงขีดจำกัด (เท่ากับ Proportional Limit) สัดส่วนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดจะเรียกว่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สามารถบอกถึงการดูดซับพลังงานโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบถาวร

$$u = \frac{1}{2}\sigma_{pl}\varepsilon_{pl} = \frac{1}{2}\frac{\sigma_{pl}^{\ 2}}{E}$$

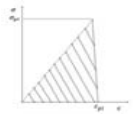


Modulus of resilience u_r

พลังงานความเครียด (Strain Energy)

โมดูลัสของความเหนียว (Modulus of Toughness) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัสดุ มีสัญลักษณ์ คือ u_t เป็นค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียดของวัสดุที่ก่อนเกิดการวิบัติ วัสดุที่มีค่าโมดูลัสความเหนียวมากจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งจะเป็นการสัญญาณเตือนก่อนวัสดุเกิดการวิบัติ และประมาณค่าได้จาก

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

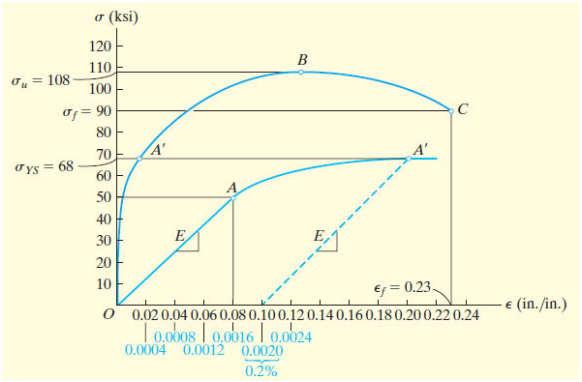


Modulus of Resilience

Modulus of Toughness

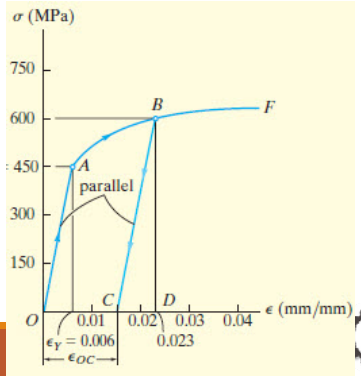
Example ๑

A tension test for a steel alloy results in the stress-strain diagram. Calculated modulus of elasticity and the yield strength based on a ๐.๒% offset. Identify on the graph the ultimate stress and the fracture stress.



Example ๒

The stress-strain diagram for an aluminum alloy that is used for making aircraft. If a specimen of this material is stressed to ๖๐๐ MPa , Determine the permanent strain that remains in the specimen when the load is release. Also , find the modulus of resilience both before and after the load application.



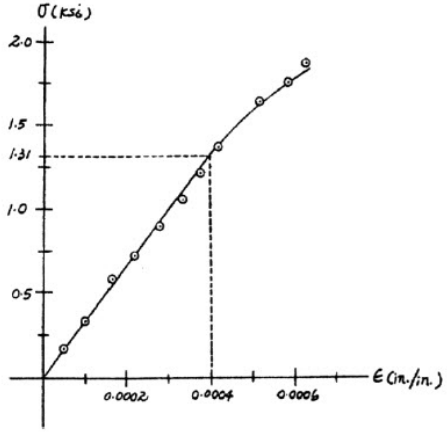
Example ๓

A concrete cylinder having a diameter of ๖.๐๐ in. and gauge length of ๑๒ in. is tested in compression. The result of the test are reported in the table as load versus contraction. Draw the stress-strain diagram and determine approximately the modulus of elasticity.

Load (kip)	Contraction (in.)
0	0
5.0	0.0006
9.5	0.0012
16.5	0.0020
20.5	0.0026
25.5	0.0034
30.0	0.0040
34.5	0.0045
38.5	0.0050
46.5	0.0062
50.0	0.0070
53.0	0.0075

Example ๓ Cont'd

Stress (ksi)	Strain (in./in.)
๐	๐
๐.๑๗๗	๐.๐๐๐๕
๐.๓๓๖	๐.๐๐๐๑๐
๐.๕๘๔	๐.๐๐๐๑๖๗
๐.๗๒๕	๐.๐๐๐๒๑๗
๐.๙๐๒	๐.๐๐๐๒๘๓
๑.๐๖๑	๐.๐๐๐๓๓๓
๑.๒๒๐	๐.๐๐๐๓๗๕
๑.๓๖๒	๐.๐๐๐๔๑๗
๑.๖๔๕	๐.๐๐๐๕๑๗
๑.๗๖๘	๐.๐๐๐๕๘๓
๑.๘๗๔	๐.๐๐๐๖๒๕

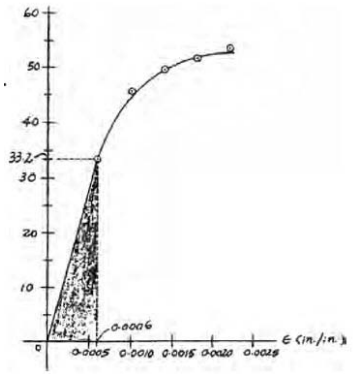


Example ๔

Data taken from a stress-strain test for a ceramic are given in the table. The curve is linear between the origin and the first point. Plot diagram and determine the modulus of elasticity , modulus of the resilience and modulus of toughness. The rupture stress is ๕๓.๔ ksi

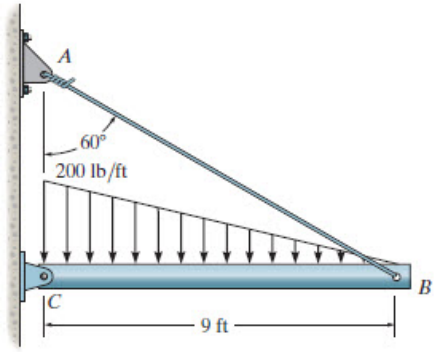
σ (ksi)	ϵ (in./in.)
0	0
33.2	0.0006
45.5	0.0010
49.4	0.0014
51.5	0.0018
53.4	0.0022

Example ๔ Cont'd



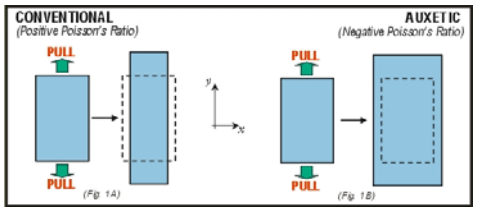
Example ๕

The strut is supported by a pin at C and A-๓๖ steel guy wire AB. If the wire have a diameter of ๐.๒ in. determine how much it stretch when the distributed the load acts on the strut.



Poisson's Ratio

เมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระทำของแรง คือถ้าแรงกระทำเป็นแรงกดอัดจะทำให้วัสดุมีความยาวลงตามแนวแรงที่กระทำ และด้านกว้างของวัสดุจะถูกขยายใหญ่ขึ้น ในทำนองเดียวกันถ้าแรงกระทำเป็นแรงดึงจะทำให้วัสดุมีความยาวที่เพิ่มขึ้นตามแนวแรงที่กระทำ และด้านกว้างก็จะเล็กลง



Poisson's Ratio

$$\varepsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \qquad \varepsilon_{lat} = \frac{\delta'}{L}$$

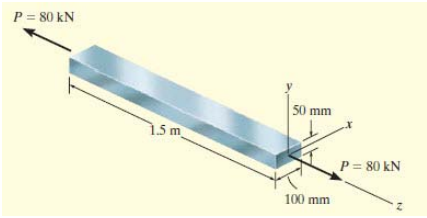
ในปี ค.ศ.๑๘๐๐ นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ S.D. Poisson ค้นพบว่าในช่วง Elastic Range อัตราส่วนของ δ และ δ' จะคงที่ จะเรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, υ) และมีค่าเฉพาะสำหรับแต่ละวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติเหมือนกัน (Homogeneous and Isotropic)

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}}$$

วัสดุในอุดมคติที่ไม่มีการเคลื่อนตัวเมื่อถูกทำให้ยืดหรือหดจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับศูนย์ สำหรับของแข็งที่ไม่มีช่องว่างภายในจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองอยู่ระว่าง ๐.๒๕ ถึง ๐.๓๓ และค่าอัตราส่วนปัวซองที่มากที่สุด คือ ๐.๕ ดังนั้น $0 \le \upsilon \le 0.5$

Example ๖

A bar mode of A๓๖ steel has the dimension as shown in figure. If an axial force of P = ๘๐ kN is applied to the bar , determine the change in its length and the change in the dimension of its cross section after applying the load. The material behaves elastically. (E_{st} = ๒๐๐ GPa , ν_{st} = ๐.๓๒)



Example ๖ Cont'd

σ_z = Pa

ε_z = mm/mm.

The axial of elongation of the bar is therefore

δ_z = μm.

$\varepsilon_x = \varepsilon_y$ = μm. / m.

δ_x = μm.

δ_y = μm.

The Shear Stress-Strain Diagram

ชิ้นส่วนของวัสดุถูกกระทำด้วยแรงเฉือน (Pure Shear) จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่เป็นท่อกลวงบางและกระทำด้วยแรงบิด เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือน แล้ววาดแผนภาพหน่วยแรงเฉือน-ความเครียดเฉือน วัสดุจะแสดงพฤติกรรมความยืดหยุ่นเชิงเส้น คือ ขีดจัดของสัดส่วน (Proportional Limit, τ_{pl}) และ การแข็งตัวจนจากความเครียดจะเกิดขึ้นจนถึงหน่วยแรงปะลัย (Ultimate Shear Stress, τ_u) และวัสดุเริ่มศูนย์เสียแรงเฉือนจนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ τ_f

The Shear Stress-Strain Diagram

การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง มีแรงเฉือนในลักษณะของค่าหน่วยแรงเฉือนกระทำ τ จนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งวัดได้จากค่าความเครียดเฉือน โดยปกติวัสดุทางวิศวกรรมจะมีลักษณะเป็นไปตามกฎของฮุค

$$\tau = G\gamma$$

เมื่อ

τ =ค่าหน่วยแรงเฉือน

γ =ค่าความเครียดเฉือน

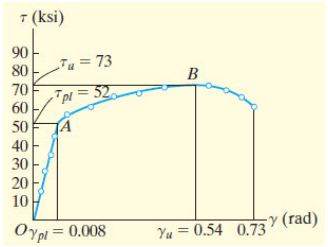
G =โมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงเฉือนหรือโมดูลัสความแข็งเกร็ง $\frac{\tau_{pl}}{\gamma_{pl}}$

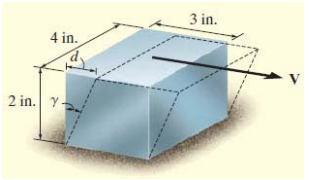
$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)}$$

Institute of ENGINEERING

Example ๗

A specimen of titanium alloy is tested in torsion and the shear stress-strain diagram. Determine the shear modulus *G* , the proportional limit , and the ultimate shear stress. Also determine the maximum distance d that the top of a block of this material could be displaced horizontally if the material behaves elastically when acted upon by a shear force **V**. What is the magnitude of **V** necessary to cause this displacement?





Institute of ENGINEERING

Example ๗ Cont'd

G =

rad = ksi

τ_{pl} = ksi

τ_u = ksi

Maximum elastic displacement and shear force

tan θ =

tan (0.008) = 0.008 = d /2

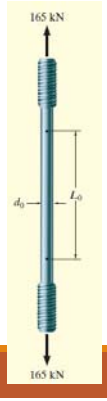
d = in.

V = kip

Institute of ENGINEERING

Example ๘

An aluminum specimen has a diameter of d_o = ๒๕ mm and a gauge length of L_o = ๒๕๐ mm. If a force of ๑๖๕ kN elongates the gauge length ๑.๒๐ mm. , Determine the modulus of elasticity. Also determine by how much the force causes the diameter of the specimen to contract. Take G_{al} = ๒๖ GPa and σ_Y = ๔๔๐ MPa.



Institute of ENGINEERING

Example ๘ Cont'd

σ = MPa.

ε = mm./mm.

Since $\sigma < \sigma_Y$ the material behaves elastically. The modulus of elasticity is therefore

E_{al} = GPa.

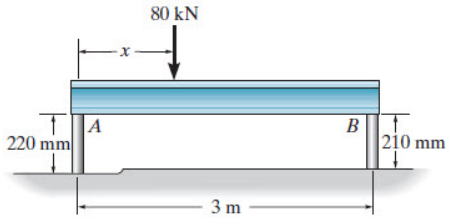
Contraction diameter

ν =

ν = mm./mm.

Example ๙

The rigid beam rests in the horizontal position on two ๒๐๑๔-T๖ aluminum cylinders having the unloaded lengths If each cylinders has a diameter of ๓๐ mm. determine the placement x of the applied ๘๐ kN load so that the beam remain horizontal. What is the new diameter of cylinder A after the load is applied ν = ๐.๓๕



Creep การคืบ

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องจนเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด

เมื่อการคืบมีความสำคัญ วัสดุจะต้องออกแบบเพื่อต้านทานการค้างงที่เกิดขึ้นจาดความเครียดที่กำหนดไว้ภายในระยะเวลาที่ต้องการให้ชิ้นส่วนนั้นคงมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่พอใจ ดังนั้นการออกแบบชิ้นส่วนที่ถูกกระทำด้วยการคืบ จะเรียกว่า กำลังของการคืบ (Creep Strength) ค่านี้แทนหน่วยแรงเริ่มต้นสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดโดยปราศจากการเกิดความเครียด กำลังของการคืบจะแปรค่าตามอุณหภูมิ

Fatigue การล้า

การที่วัสดุถูกกระทำด้วยหน่วยแรงหรือความเครียดแบบซ้ำๆ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือวิบัติไปในที่สุด การวิบัติจะเกิดขึ้นได้แม้หน่วยแรงที่จุดนั้นมีค่าต่ำหว่าหน่วยแรงครากของวัสดุ มักจะเกิดขึ้นใน โลหะที่มีการเชื่อมต่อกัน เพลา และส่วนอื่นๆ