

หลักการพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหัก

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

ในการใช้งานของชิ้นส่วนและโครงสร้างทางวิศวกรรมไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงรอยร้าว (crack) ที่เกิดขึ้นภายในได้ เนื่องจากทฤษฎีกลศาสตร์ของแข็ง (solid mechanics) ต่างๆ ที่ใช้กันมา มีสมมุติฐานว่าวัสดุมีความต่อเนื่องและการที่เกิดรอยร้าวขึ้นในวัสดุหมายถึงวัสดุนั้นเกิดการไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ขึ้น ซึ่งการที่มีรอยร้าวในชิ้นงานทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์สภาวะของความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานบริเวณรอบๆ รอยร้าวได้ด้วยเหตุนี้ทฤษฎีทางกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics) จึงได้เกิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาคำวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในชิ้นส่วนและโครงสร้างที่มีรอยร้าว โดยอาศัยพื้นฐานจาก theory of elasticity และ theory of plasticity โดยที่กลศาสตร์การแตกหักได้กล่าวถึง การวิเคราะห์สภาวะของความเค้นที่บริเวณรอยร้าวและเงื่อนไขของการเกิดความเสียหายอันเนื่องจากการเติบโตของรอยร้าว เนื่องจากการวิเคราะห์ของกลศาสตร์การแตกหักในช่วงแรกอาศัยพื้นฐานของ theory of elasticity จึงมีชื่อว่า Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) ในปัจจุบันนี้ LEFM มีประโยชน์ในการวิเคราะห์

1. ประเมินและคาดการณ์ อายุและระยะเวลาการใช้งานของชิ้นงานที่มีรอยร้าวเกิดขึ้นโดยวิเคราะห์จากอัตราการเติบโตของรอยร้าว (crack growth rate) จนกระทั่งเกิดความเสียหาย (failure) ของชิ้นงานเมื่อการเติบโตของรอยร้าว (crack propagation) ถึงสภาวะวิกฤติ

2. นำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมเช่น

- การใช้ LEFM ในการคำนวณและออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรมได้อย่างคุ้มค่า (optimum design)

- การนำ LEFM ไปประยุกต์ในส่วนหนึ่งของการวางแผนซ่อมบำรุง

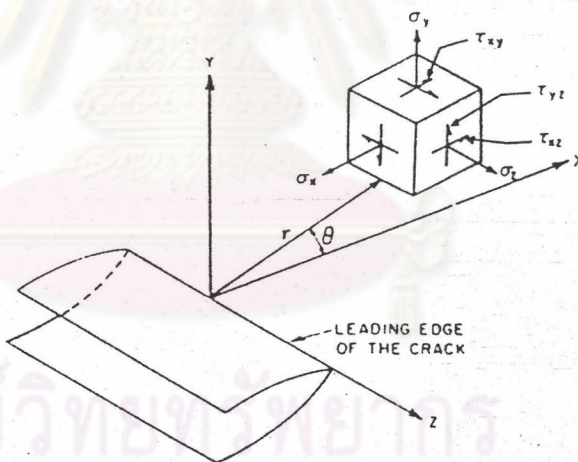
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของรอยร้าว

จากหลักการของ LEFM ได้กล่าวไว้ว่าสภาวะของความเค้น บริเวณรอบรอยร้าว ขึ้นอยู่กับความยาวรอยร้าว (crack length) ความเค้น(stress) และลักษณะรูปร่าง(geometry) ของชิ้นงานที่พิจารณา(ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดจำกัด)จากแนวความคิดของ Griffith ซึ่งต่อมาได้ถูกพัฒนาโดย Irwin ซึ่งนำไปใช้ในการนิยามถึง ตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญมากในการวิเคราะห์ทาง LEFM นั่นคือ stress intensity factor (K)

Irwin ได้แสดงให้เห็นว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอบรอยร้าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ stress tensor (σ_{ij}) ดังสมการที่ 1

$$\sigma_{ij} = r^{-1/2} \left\{ K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta) + \dots \right\} \quad (1)$$

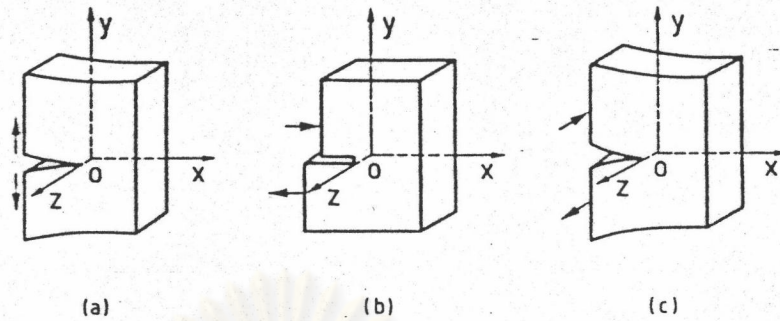
โดย r, θ คือ พิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) ซึ่งใช้กำหนดตำแหน่งพิกัดของรอยร้าว ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงระบบพิกัด(coordinate system)ของรอยร้าว

K_I, K_{II}, K_{III} คือ stress intensity factor ที่สอดคล้องกับลักษณะพื้นฐานของการเกิดรอยร้าว ดังรูปที่ 2.2

$f_{ij}^I(\theta), f_{ij}^{II}(\theta), f_{ij}^{III}(\theta)$ คือฟังก์ชันแสดงการกระจายของความเค้น (stress distribution function) สำหรับ mode I, II และ III ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะพื้นฐานของรอยร้าว

(a) รอยร้าวลักษณะที่ 1 (opening mode) (b) รอยร้าวลักษณะที่ 2 (sliding mode) (c) รอยร้าวลักษณะที่ 3 (tearing mode)

K_I = stress intensity factor สำหรับ ลักษณะที่ 1 ซึ่งเรียกว่า opening mode (mode I)

K_{II} = stress intensity factor สำหรับ ลักษณะที่ 2 ซึ่งเรียกว่า sliding mode (mode II)

K_{III} = stress intensity factor สำหรับ ลักษณะที่ 3 ซึ่งเรียกว่า tearing mode (mode III)

ลักษณะพื้นฐานทั้ง 3 แบบ สามารถที่จะอธิบายลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปได้อย่างเพียงพอแม้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นลักษณะของรอยร้าวที่เป็นลักษณะผสม (mixed mode) ระหว่างลักษณะพื้นฐานข้างต้นแต่ในทาง LEFM มักศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในรอยร้าวแบบที่ 1 เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นลักษณะพื้นฐานที่รุนแรงและชัดเจนกว่าแบบอื่น ดังนั้นสมการของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอบรอยร้าวจึงลดรูปแบบเป็นสมการที่ 2

$$\sigma_{ij} = r^{-1/2} \{K_I f_{ij}(\theta) + \dots\} \quad (2)$$

จากหัวข้อที่ 2.4 จะได้ความเค้นในปัญหาเชิงระนาบ (2 dimensional problem) สำหรับลักษณะรอยร้าวแบบที่ 1 (mode I) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I \cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นของ Westergaard

Westergaard ได้วิเคราะห์ความเค้นที่เกิดในปัญหาเชิงระนาบ (2-dimensional problem) ขึ้นโดยใช้หลักการของ จำนวนเชิงซ้อน (complex variable) ประยุกต์เข้ากับ theory of elasticity โดยสมมุติ ฟังก์ชันของความเค้น (stress function) ϕ_I โดยที่

$$\begin{aligned} \phi_I &= \operatorname{Re} \bar{Z}_I + y \operatorname{Im} \bar{Z}_I \\ \text{และ} \quad \bar{Z}_I &= d\bar{Z}_I / dz, \quad Z_I = dZ / dz \\ z &= x + iy \end{aligned}$$

subscript I แสดงถึงลักษณะรอยร้าวแบบที่ 1 (opening mode) จากข้างต้น เมื่อนำไปประยุกต์ใน theory of elasticity จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \sigma_{xx} &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \end{aligned}$$

เมื่อเขียนในรูปของ ฟังก์ชันความเค้น (stress function) ของ Westergaard จะได้ความเค้นต่าง ๆ ดังนี้

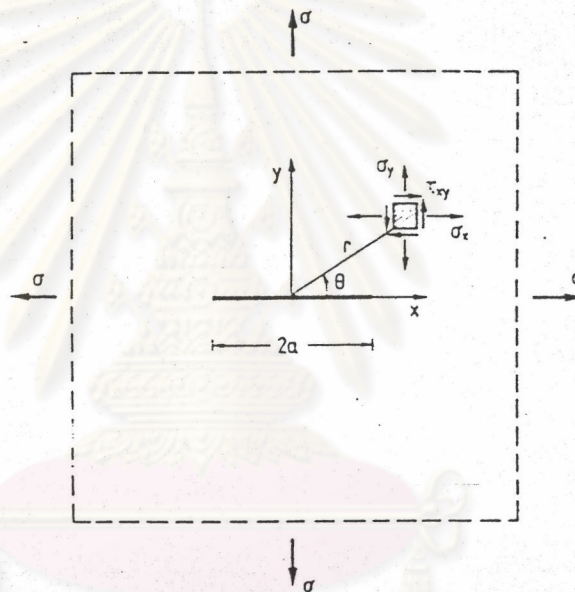
$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \operatorname{Re} Z_I - y \operatorname{Im} Z_I \\ \sigma_{yy} &= \operatorname{Re} Z_I + y \operatorname{Im} Z_I \\ \tau_{xy} &= -y \operatorname{Re} Z_I \\ Z_I &= dZ_I / dz \end{aligned}$$

การวิเคราะห์แบ่งตามลักษณะของภาระซึ่งกระทำ (mode of loading) ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเพียงแบบที่ 1 ซึ่งเป็นลักษณะของภาระที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น

การวิเคราะห์รอยร้าวลักษณะที่ I (Opening mode)

จากหลักการของจำนวนเชิงซ้อน (complex variables) ข้างต้นมักจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงระนาบ (2-dimensional problem) ของวัสดุซึ่งมีรอยร้าว Westergard ได้ทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันความเค้น (stress function) และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของรอยร้าวลักษณะที่ I (opening mode) ได้ดังนี้

สมมุติว่ากำลังพิจารณาปัญหาของ แผ่นวัสดุที่มีขนาดใหญ่มาก (infinite plate) เมื่อเทียบกับรอยร้าวความยาว $2a$ ที่เกิดขึ้นในแผ่นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงสภาวะของความเค้นที่ของรอยร้าว $2a$ ใน infinite plate

สามารถเขียนฟังก์ชันของความเค้น, ϕ ในรูปของ

$$\phi = \frac{\sigma_0}{\sqrt{z^2 - a^2}}$$

โดยมีเงื่อนไขของ boundary conditions เป็น

$$\sigma_{yy} = 0 \text{ เมื่อ } -a < x < +a$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_0 \text{ เมื่อ } x \rightarrow \infty$$

$$\sigma_{yy} \rightarrow \infty \text{ เมื่อ } x = \pm a$$

และ

$$Z_I = \frac{\sigma_0 z}{\sqrt{z^2 - a^2}}$$

(Z_I เป็น ฟังก์ชันความเค้นของ Westergaard สำหรับรอยร้าวลักษณะที่ I)

เพื่อความสะดวกจึงใช้ปลายรอยร้าวเป็น origin ของพิกัดโดย $\xi = z - a = re^{i\theta}$ จะได้

ฟังก์ชันของความเค้นเป็น

$$Z_I(\xi) = \frac{\sigma_0(a + \xi)}{\sqrt{(a + \xi)^2 - a^2}}$$

เนื่องจาก $\xi \ll a$ จะได้ว่า

$$Z_I(\xi) = \frac{\sigma_0 a}{\sqrt{2a\xi}} = \frac{\sigma_0 \sqrt{a}}{\sqrt{2\xi}}$$

หรือเขียนอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$Z_I(\xi) = \sigma_0 \frac{\sqrt{\pi a} e^{-i\theta/2}}{\sqrt{2\pi r}}$$

จากข้างต้นจะทำให้สามารถคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอบรอยร้าวได้

เนื่องจาก $\xi \ll a$ และ $r \ll a$

จาก

$$Z_I'(\xi) = -\sigma_0 \sqrt{a} / 4\xi^{3/2}$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I \cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

สำหรับวัสดุซึ่งมีความหนาไม่มากสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุจะเป็น plane stress ($\sigma_z=0$) และสำหรับวัสดุที่ค่อนข้างหนาสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุจะเป็น plane strain ($\epsilon_z=0$ โดยที่ $\sigma_z = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$)

ในเชิงคณิตศาสตร์บริเวณปลายรอยร้าว ($r=0, \theta=0$) ถือว่าเป็น singularity ซึ่งจะไม่สามารถกล่าวถึงสภาวะของความเค้นที่จุดนี้ ($\sigma \rightarrow \infty$) ซึ่งสำหรับบริเวณรอบรอยร้าวจากรูปแบบข้างต้น (สมการที่ 1 และ 2) จะเห็นได้ว่า σ_y มีค่าขึ้นอยู่กับ K_I เท่านั้นจึงกล่าวได้ว่า K_I เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสภาวะของความเค้นได้ด้วย

จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถนิยาม K_I (stress intensity factor สำหรับลักษณะที่ 1) ได้เป็น

$$K_I = \lim_{(r, \theta = 0)} \sigma_{yy} \sqrt{\pi r}$$

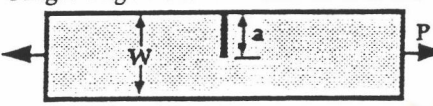
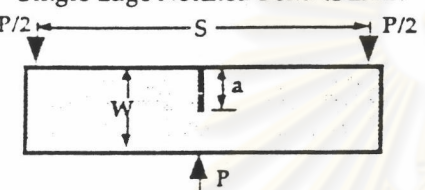
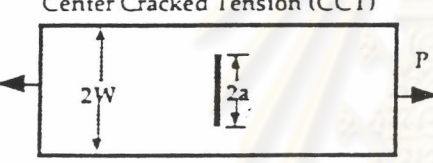
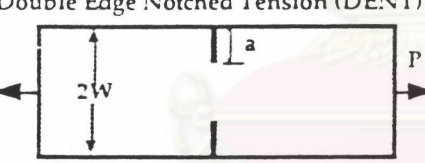
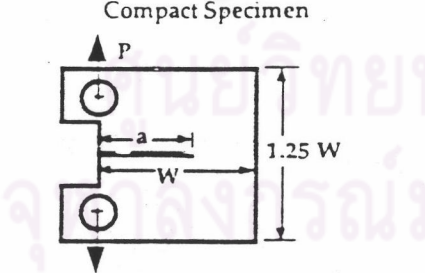
ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของวัสดุซึ่งคำนวณได้คือ nominal stress (σ_0) จากแนวความคิดที่ได้จากการวิเคราะห์ σ_y บริเวณรอบรอยร้าวข้างต้นจึงมีความพยายามที่จะใช้ค่า stress intensity factor (K) ในการแสดงถึงความรุนแรงของสภาวะความเค้นของรอยร้าวโดยใช้ตัวแปรที่ทราบค่าได้คือ nominal stress (σ_0) และความยาวรอยร้าว (a) ซึ่งแสดงได้ในรูปของ

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot f(a/w) \quad (\text{MPa}\sqrt{m}) \quad (3)$$

σ_0 = nominal stress

$f(a/W)$ = ปัจจัยอันเนื่องมาจากรูปร่างของชิ้นงานที่พิจารณาแสดงใน

รูปที่ 2.4

GEOMETRY	$f(a/W)$
<p>Single Edge Notched Tension (SENT)</p> 	$\frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right]$
<p>Single Edge Notched Bend (SENB)</p> 	$\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W} \right) - 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right]$
<p>Center Cracked Tension (CCT)</p> 	$\sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec \frac{\pi a}{2W}} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$
<p>Double Edge Notched Tension (DENT)</p> 	$\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \left[1.122 - 0.561 \left(\frac{a}{W} \right) - 0.205 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 0.471 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 0.190 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$
<p>Compact Specimen</p> 	$\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$

รูปที่ 2.4 แสดงค่า $f(a/W)$ ของspecimen (Anderson, 1991) ที่นิยมใช้ในการทดสอบ fracture toughness

ภายใต้เงื่อนไขของ plane strain ความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $K_I \rightarrow K_{IC}$ ซึ่งเกิดจาก combination ของความเค้น (σ_0) และความยาวของรอยร้าว (a) จากสมการที่ 3 การวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดยังเป็นการพิจารณาสถานะของความเค้นซึ่งเป็น elastic stress จากความสัมพันธ์ของความเค้นบริเวณรอบรอยร้าวจะเห็นว่า ความเค้น เป็นฟังก์ชันของ $1/\sqrt{r}$ เมื่อ r มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (บริเวณปลายรอยร้าวรัศมีของ notch จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์) จะได้ค่าของความเค้นเป็นอนันต์ ซึ่งจากการทดลองสำหรับวัสดุใด ๆ จะพบว่าเป็นไปไม่ได้เนื่องจาก ถ้าความเค้นมีค่ามากเกินไป yield strength จะเกิดความเสียหายขึ้นในชิ้นงาน นั้นแสดงถึงว่าบริเวณรอบรอยร้าวจริง ๆ แล้วความเค้นไม่ได้มีค่าเป็นอนันต์ Irwin จึงได้เสนอแนวความคิดของ elastic-plastic fracture mechanics (EPFM) ซึ่งคำนึงถึงผลของ plastic zone ที่เกิดขึ้นรอบรอยร้าว แต่อย่างไรก็ตามหลักการของ LEFM ก็ยังคงใช้ได้ดีในการวิเคราะห์เมื่อขนาดของ plastic zone มีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับความยาวรอยร้าวและขนาดอื่นๆของชิ้นงานที่พิจารณา

ความสัมพันธ์ของ fracture toughness ความเค้น และ ความยาวรอยร้าว

จากความสัมพันธ์ของความเค้นตามสมการที่ 1 และ 2 จะเห็นว่า distribution ของความเค้นมีลักษณะเฉพาะแต่ละแบบ และไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีขนาดเปลี่ยนแปลงตาม K และ a เท่านั้น (ในวัสดุที่มีรูปร่างจำกัด K จะขึ้นกับลักษณะของรูปทรงที่พิจารณา)

จากหลักการของ LEFM ความสัมพันธ์พื้นฐานสมการที่ 3 ได้แสดงถึงตัวแปรพื้นฐานและความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นและความยาวรอยร้าวในโครงสร้างหรือชิ้นงานซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการเกิดความเสียหาย(การแตกหัก)ขึ้นซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

1. Fracture Toughness (K_{IC}) ของวัสดุ

fracture toughness ของวัสดุ หมายถึง ความสามารถในการรับภาระ ของชิ้นงานที่มีรอยร้าวซึ่งในการพิจารณาตามหลักการของ linear elastic fracture mechanics (LEFM) จะทำการวิเคราะห์ความเสียหายและนิยาม Fracture Toughness ของวัสดุโดยใช้ critical stress intensity Factor (K_{IC}) ซึ่งก็แยกแยะออกเป็นอีกหลายลักษณะตามสภาวะของการทำการทดสอบ เช่น

K_{IC} คือ stress intensity factor ภายใต้สภาวะของการทดสอบที่เป็น plane strain

K_{IC} คือ stress intensity factor ภายใต้สภาวะของการทดสอบที่เป็น plane stress

K_{ID} คือ stress Intensity factor ภายใต้สภาวะของการทดสอบที่เป็น dynamic

2.ขนาดความยาวรอยร้าว (a)

การแตกหักของวัสดุมักจะมีจุดเริ่มต้นซึ่งเกิดขึ้นในชิ้นงานจากความบกพร่อง(defect)หรือความไม่ต่อเนื่องของวัสดุชิ้นงานที่ใช้งาน เช่น รอยร้าว(crack)หรือ รูพรุน(porosity) ขนาดเล็กมากที่สุดที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม ความไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดขึ้นในระดับของ grain ความบกพร่องซึ่งเกิดขึ้นขณะทำการผลิต ขึ้นรูป หรือ ผ่านกระบวนการทางกล ฯลฯ ล้วนแล้วแต่เป็นต้นเหตุของ รอยร้าวได้ทั้งสิ้น (อาจจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่เรียกว่า macrocrack หรืออาจจะเล็กมากซึ่งเรียกว่า microcrack รอยร้าวต่าง ๆ เหล่านี้สามารถขยายตัวต่อไปได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น มีการกัดกร่อน (corrosion) ภายใต้ภาระซึ่งทำให้เกิดความล้า (fatigue load) ซึ่งเมื่อความยาวรอยร้าวนี้มากขึ้น ก็จะทำให้ความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานลดน้อยลงจนกระทั่ง เมื่อรอยร้าวมีค่ามากถึงความยาววิกฤติ(critical crack length)ภายใต้ภาระขณะนั้น ก็จะทำให้โครงสร้างหรือชิ้นงานนั้นไม่สามารถรับภาระต่อไปอีกได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นทันที

3 ระดับความเค้น (σ)

ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานก็เป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้เกิดความเสียหายสำหรับวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความยาวรอยร้าวค่าหนึ่งซึ่งนัยซึ่งตกอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าสูงจะมีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานซึ่งตกอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าต่ำ เนื่องจากชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าสูงจะมีค่า stress intensity factor (K) เข้าใกล้ critical fracture toughness (K_{IC}) มากกว่าชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าต่ำซึ่งในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ใช้งานภายใต้ความเค้นสูงก็ต้องมีความรอบคอบมากยิ่งขึ้นด้วย

กล่าวโดยสรุปก็คือ combination ของความเค้นและความยาวของรอยร้าว จะก่อให้เกิดความเสียหายก็ต่อเมื่อ $K_I = K_{IC}$ จะเห็นว่าสำหรับชิ้นงานภายใต้ความเค้นที่มีค่าต่ำแต่มีรอยร้าวที่ยาวมากก็อาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ หรือ ในทางกลับกัน สำหรับชิ้นงานภายใต้ความเค้นที่มีค่าสูงแต่มีรอยร้าวขนาดสั้นก็อาจเกิดความเสียหายขึ้นได้เช่นกัน

การวิเคราะห์ความเสียหายโดยหลักการของ LEFM

ในการวิเคราะห์ทาง LEFM ตัวแปรพื้นฐานข้างต้น (K , a , σ) การพิจารณาการเกิดความเสียหายในการวิเคราะห์ของ LEFM มักใช้เงื่อนไข ดังนี้ คือสำหรับการแตกหักแบบที่ I (mode I) เมื่อ combination ของตัวแปรพื้นฐาน a, σ, K ทำให้เกิดสภาวะวิกฤติ ($K = K_{IC}$ โดย K_{IC} คือ toughness ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ) นั้นหมายถึงเกิดการแตกหักของชิ้นงานขึ้นอย่างฉับพลันแม้ว่าเมื่อชิ้นงานนั้นอยู่ภายใต้ภาระที่มีขนาดน้อยมาก แต่มีความยาวรอยร้าวถึงค่าวิกฤติ ซึ่งทำให้ $K = K_{IC}$ ซึ่ง K_{IC} หรือ

fracture toughness ของวัสดุจะได้รับการทดสอบ โดยถูกกำหนดตามการทดสอบมาตรฐาน ASTM E399 ซึ่งเป็นแนวทางการทดสอบค่า plane strain fracture toughness ของวัสดุประเภทโลหะ

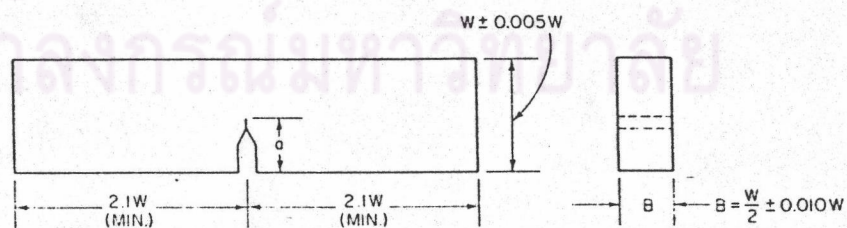
การทดสอบหาค่า fracture toughness

การทดสอบ plane strain fracture toughness (K_{IC}) ซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุ ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานเช่นเดียวกับการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุ เช่น การทดสอบแรงดึง (tensile test) การทดสอบความแข็ง (hardness test) ฯลฯ โดยการทดสอบมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุของอเมริกา ASTM (American Society for Testing and Materials) ตาม ASTM E-399 ซึ่งมีการทดสอบมาตรฐานที่คล้ายกันอื่น ๆ อีกเช่น มาตรฐานอังกฤษ (British Standard) BS5447 ส่วนใหญ่จะมีวิธีการที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการวิจัยนี้ยึดถือตาม ASTM E-399 เป็นหลักซึ่งได้กำหนดขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาค่า (K_{IC}) ไว้อย่างชัดเจน

Strawley และ Brown ได้ทำการศึกษาทดสอบ K_{IC} ของวัสดุไว้หลายกรณี การทดสอบ K_{IC} สามารถทดสอบโดยใช้ชิ้นงานทดสอบได้ 3 ลักษณะคือ

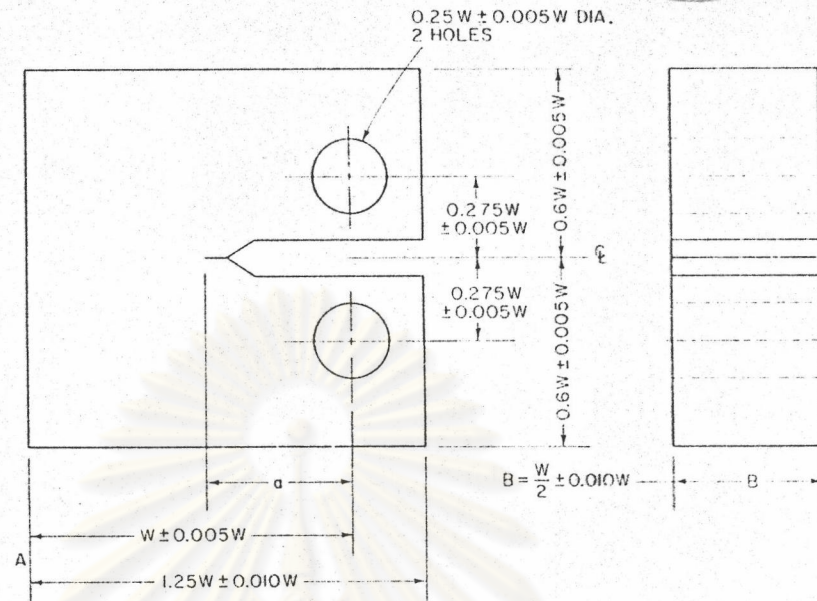
1. compact - tension specimen (C-T specimen)
2. three point bend specimen
3. C-shaped specimen
4. disk-shaped compact specimen

ในที่นี้จะกล่าวถึง compact - tension (C-T) specimen และ three point bend specimen เท่านั้น เพราะเป็นรูปร่างชิ้นทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบโดยทั่วไป ทั้ง 4 ชนิดเป็นการทดสอบที่นิยมกันแพร่หลาย ดังในรูปที่ 2.5

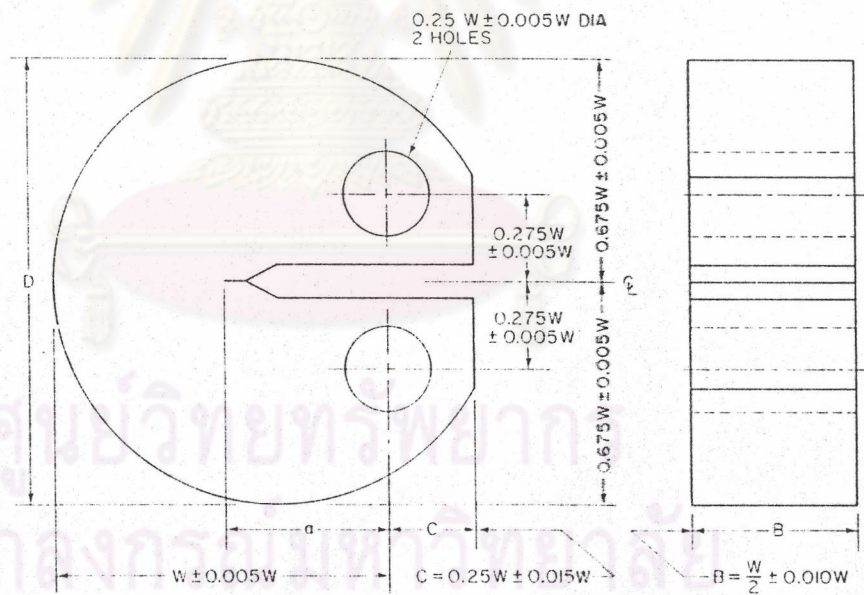


(a) three point bend specimen

รูปที่ 2.5 แสดง specimen ที่นิยมใช้ในการทดสอบ fracture toughness (K_{IC})



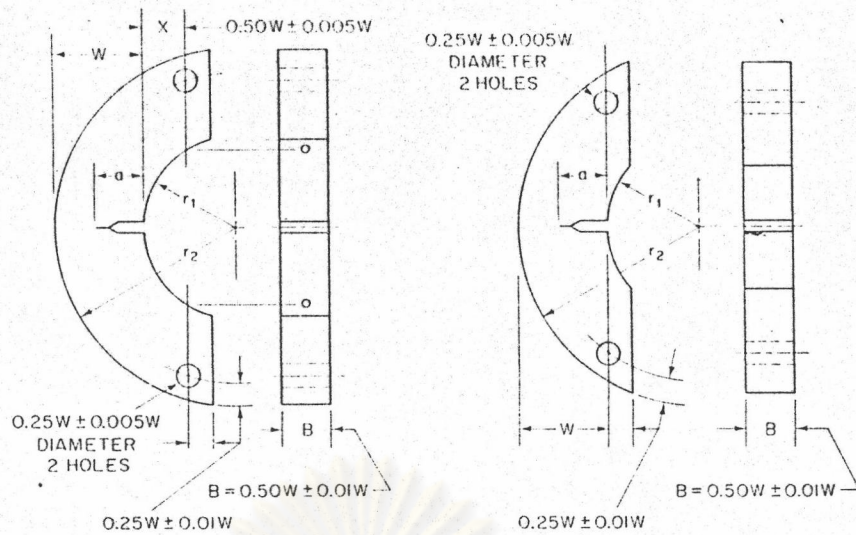
(b) compact-tension(C-T) specimen



(c) arc-shaped specimen

รูปที่ 2.5 แสดงรูปร่างspecimen(Barsom และ Rolfe, 1987) ที่นิยมใช้ในการทดสอบ fracture toughness(K_{Ic})

(a) three point bend specimen (b) compact-tension specimen (c) arc-shaped specimen



(d) disk-shaped compact specimen

รูปที่ 2.5 แสดงรูปร่างspecimen(Barsom และ Rolfe, 1987) ที่นิยมใช้ในการทดสอบfracture toughness(K_{IC})

ในการทดสอบแบบ C-T specimen มักนิยมใช้ค่า W เป็นสองเท่าของ B (ความหนา) ในกรณีที่ขนาดดังกล่าวไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้ ให้พิจารณาเลือกชิ้นทดสอบขนาดอื่นโดยศึกษารายละเอียดจาก ASTM E399

ในการทดสอบแบบ three point bend specimen มักนิยมใช้ค่า W เป็นสี่เท่าของ B หรืออย่างน้อยเท่ากับ B

ในการทดสอบ แบบ Compact-tension specimen มักนิยมใช้ค่า W เป็นสี่เท่าของ B หรืออย่างน้อยสองเท่าของ B

K สำหรับ bend specimen(Broek, 1986)

$$\frac{PS}{BW^{3/2}} \left[\begin{array}{l} 2.9\left(\frac{a}{w}\right)^{1/2} - 4.6\left(\frac{a}{w}\right)^{3/2} + 21.8\left(\frac{a}{w}\right)^{5/2} - 37.6\left(\frac{a}{w}\right)^{7/2} \\ + 38.7\left(\frac{a}{w}\right)\frac{a}{2} \end{array} \right]$$

และสำหรับ C-T specimen(Broek, 1986)

$$\frac{P}{BW^{1/2}} \left[\begin{array}{l} 29.6\left(\frac{a}{w}\right)^{1/2} - 185.5\left(\frac{a}{w}\right)^{3/2} + 655.7\left(\frac{a}{w}\right)^{5/2} - 1017\left(\frac{a}{w}\right)^{7/2} \\ + 639\left(\frac{a}{w}\right)^{9/2} \end{array} \right]$$

สำหรับ $0.45 < \left(\frac{a}{W}\right) < 0.55$ ซึ่งเป็นช่วงของความยาวรอยร้าวที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM E399 นอกจากนี้ Srawley ได้เสนอการประมาณค่า K สำหรับ $\frac{a}{W}$ ที่ใช้ได้กว้างขึ้น ($0.2 < a/W < 1$) ดังนี้ สำหรับ bend specimen (Broek, 1986)

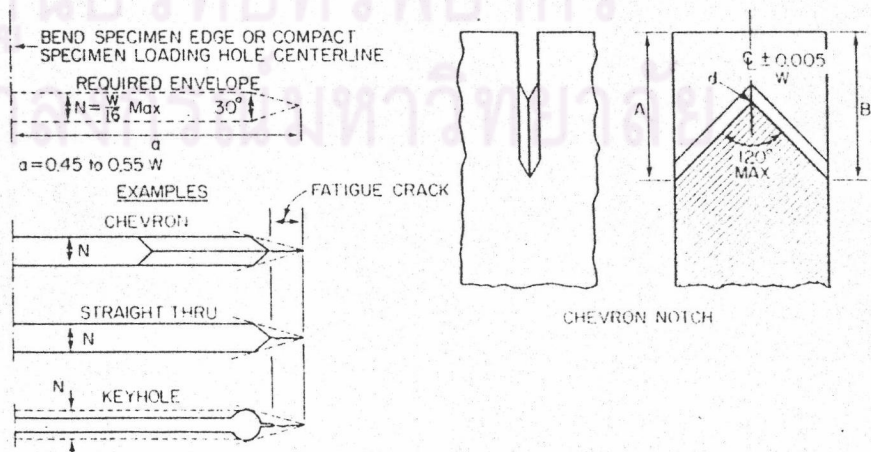
$$K = \frac{PS}{BW^{3/2}} \frac{\left(3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)(2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2\left(1 + 2\left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{3/2}\right)}$$

สำหรับ C-T specimen (Broek, 1986)

$$K = \frac{P}{BW^{1/2}} \times \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

สมการของ Srawley เป็นที่นิยมมากกว่าเพราะใช้ได้กับชิ้นงานทดสอบซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงที่กว้างมากกว่า

ชิ้นงานทดสอบจะมีการสร้างรอยร้าว (precrack) ขึ้นเพื่อเป็นการสร้างสภาวะของชิ้นงานที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น รอยร้าวดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นต่อจากปลาย notch โดย fatigue load ซึ่งจะทำให้เกิดรอยร้าวจนกระทั่งได้ความยาวของรอยร้าวตามที่ต้องการ มีการสร้าง notch แบบต่าง ๆ เพื่อที่จะกระตุ้นและส่งเสริมให้รอยร้าวที่เกิดโดย fatigue load มีลักษณะเป็นเส้นตรง เช่น Chevron notch ดังรูปที่ 2.6



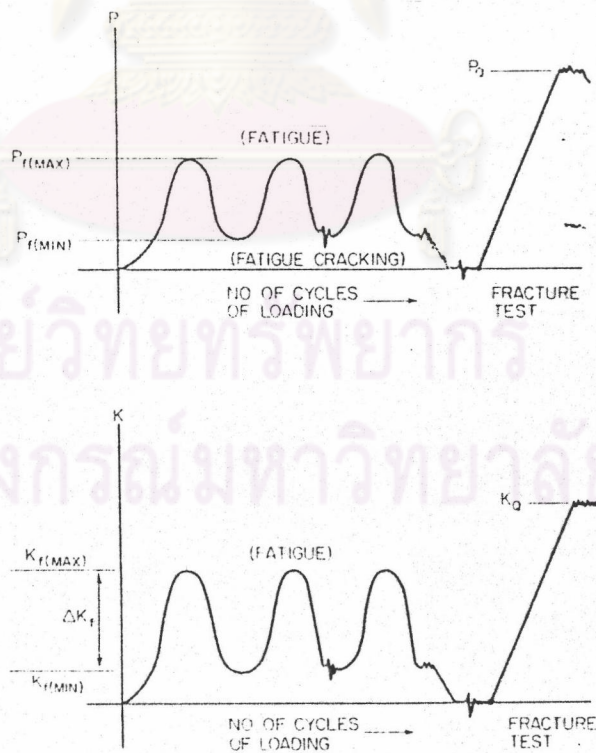
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของ notch (Barsom และ Rolfe, 1987) แบบต่างๆที่ใช้สำหรับ specimen

ขั้นตอน precrack มักนิยมใช้ fatigue load ที่มีลักษณะเป็น sinusoidal load ที่ความถี่สูงๆซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะรอยร้าวจะโตค่อนข้างเร็ว ในปัจจุบันมีเครื่องทดสอบที่เป็น servomechanism ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะมีความสะดวกในการควบคุมการทดสอบ

จากสมมุติฐานของ LEFM เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิด plastic zone ที่มีขนาดโตซึ่งจะทำให้ fracture toughness(K) ไม่ได้เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสภาวะความเค้นที่แท้จริงของวัสดุซึ่งหมายถึงมีความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ด้วยLEFM ดังนั้นในขั้นตอน precrack จึงต้องให้สอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้คือ

- ขนาดของ plastic zone ซึ่งเกิดจาก precrack จะต้องมีความเล็กเมื่อเทียบกับขนาดอื่นๆของชิ้นทดสอบ

- K_{max} ของ fatigue load ที่ใช้ precrack จะต้องมีความน้อยกว่า toughness(K_{IC}) ที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของภาระที่ใช้ในการสร้าง precrack

จากเงื่อนไขข้างต้นทำให้ต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากในการเลือก fatigue load ให้พอเหมาะในการทดสอบซึ่งถ้าใช้ fatigue load ขนาดต่ำเกินไปอาจจะทำให้ใช้เวลานานในการทดสอบหรืออาจไม่สามารถสร้างรอยร้าวให้เกิดขึ้นได้ ในทางกลับกันหากใช้ fatigue load ที่มีค่าสูงก็อาจจะทำให้เกิด plastic zone มีขนาดโตเกินไปซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ด้วย LEFM

ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ

เงื่อนไขของชิ้นงานที่ใช้ในการทำการทดสอบ fracture toughness (K_{IC}) ก็คือ

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W-a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

ดังนั้นก่อนเริ่มทำการทดสอบจริงนั้นต้องมีการประมาณ K_{IC} เพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานทดสอบโดยประมาณ การกำหนดขนาดชิ้นงานที่ใช้ในทดสอบเพื่อให้เกิดสภาวะของ plane strain บริเวณรอยร้าวและเพื่อให้การวิเคราะห์โดยใช้ K ยังคงใช้งานได้อย่างสมเหตุผล ขนาดของความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีขนาดใหญ่กว่า plastic zone มาก (ตามหลักการของ Linear Elastic Fracture Mechanics) ไม่เช่นนั้นเมื่อทำการทดสอบอาจเป็นสภาวะ plane stress ซึ่งโดยปกติมักเกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งถ้าขนาดชิ้นงานมีขนาดใหญ่เพียงพอสภาวะของวัสดุชิ้นงานที่นำมาทดสอบส่วนใหญ่ยังคงเป็น plane strain อยู่ และเมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว จึงนำค่า K_Q ที่ทดสอบได้มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ (ความหนา, B , ความยาวรอยร้าว, a) เพื่อเป็นการยืนยันว่าสอดคล้องตามเงื่อนไขของ plane strain fracture toughness ซึ่งถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวแสดงว่า K_Q ไม่สามารถเป็น K_{IC} ของวัสดุชิ้นทดสอบนั้นได้ต้องมีการเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานทดสอบและดำเนินการทดสอบจนกระทั่งได้ K_Q สอดคล้องตามเงื่อนไข plane strain fracture toughness ซึ่งแสดงว่า

$$K_Q = K_{IC}$$

จากการคำนวณและทดลองขนาดของชิ้นงานทดสอบต้องมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับ plastic zone ซึ่งมีขนาดประมาณ $2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$

นอกจากความหนาของชิ้นงานการทดสอบตามมาตรฐาน ได้กำหนดเกี่ยวกับขนาดความยาวรอยร้าวไว้เช่นกันว่าต้องมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับ plastic zone นั่นคือ

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

และ

$$W-a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

กล่าวโดยสรุปก็คือเพื่อให้การวิเคราะห์โดยหลักการของLEFMมีความแม่นยำจากการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่า ขนาด มิติ ของชิ้นงาน (ความหนา B, ความยาวรอยร้าว, (a), ligament (W-a) จะต้องมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับ plastic zone และขนาดของชิ้นงานจะมีสัดส่วนกับความหนา (B) ดังรูปที่ 5

$$\text{ชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน } (W-a), a, B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

โดยทั่วไปมักกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบดังนี้

$$W = 2a, 2B = W$$

$$L = 4W \text{ (สำหรับ bend specimen)}$$

$$L = 1.2W \text{ (สำหรับ C-T specimen)}$$

รายละเอียดของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบศึกษาได้จากมาตรฐานการทดสอบของ ASTM E399(1990)

ขั้นตอนการทดสอบ fracture toughness (K_{IC})

ขั้นตอนการทดสอบ K_{IC} สรุปได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดศึกษาได้จาก ASTM E399,1990)

1. กำหนดขนาดของชิ้นทดสอบโดยมีเงื่อนไขคือ

$$a = \text{ความยาวรอยร้าว} \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$B = \text{ความหนาของชิ้นทดสอบ} \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W = \text{ความกว้างของชิ้นทดสอบ} \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W-a = \text{ligament ของชิ้นงานทดสอบ} \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

2. เลือกชนิดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ

จาก ASTM E399(1990) ได้กำหนดชนิดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบไว้หลายชนิดคือ

three point bending specimen ดังรูปที่ 2.5(a)

compact-tension specimen ดังรูปที่ 2.5(b)

arc-shaped specimen ดังรูปที่ 2.5(c)

disk-shaped compact specimen ดังรูปที่ 2.5(d)

compact-tension (C-T) specimen และ three point bend specimen เป็นชิ้นทดสอบที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบ ส่วน arc-shaped specimen นิยมใช้ทดสอบวัสดุ ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) เช่น pressure vessel หรือ pipe เป็นต้น disk-shaped compact specimen มักใช้กับชิ้นงานทดสอบซึ่งถูกขึ้นรูปทางกล (machined) จากวัสดุที่มีรูปร่างเป็น circular blank เช่น round bar เป็นต้น

3. การจำลองรอยร้าวขึ้นในชิ้นทดสอบโดย fatigue

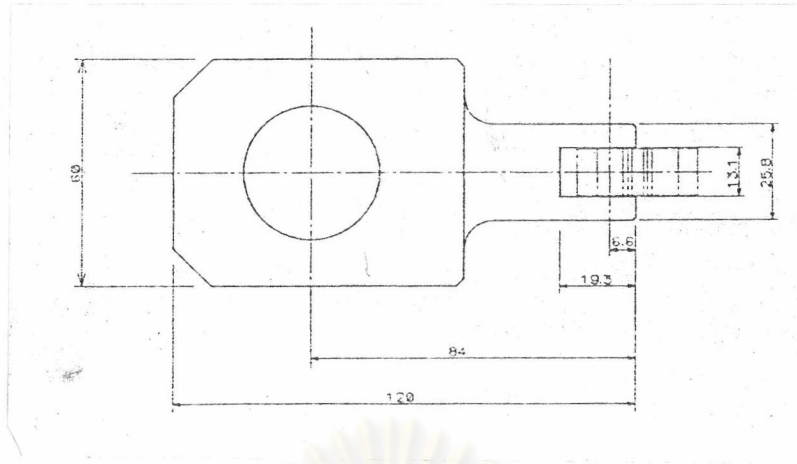
เนื่องจาก notch ที่สร้างขึ้นในชิ้นทดสอบยังจัดว่ามี root radius ไม่เป็นศูนย์จึงต้องมีการสร้างรอยร้าวจริงให้เกิดขึ้นโดย fatigue ซึ่งรูปแบบของ notch มีหลายแบบดังรูป ASTM(1990)ได้แนะนำว่า chevron notch จะให้รอยร้าวที่เป็นระนาบและตรงในขณะที่แบบอื่นก็สามารถทำได้ถ้าปลาย notch มี root radius ซึ่งน้อยมาก เช่น notch ซึ่งสร้างจากการใช้ EDM หรือ wire cut

การสร้างรอยร้าวโดย fatigue มีเงื่อนไขคือต้องไม่สร้างบริเวณ plastic zone โทมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ fracture toughness ที่วัดได้ไม่ใช่ plane strain fracture toughness ของวัสดุ ลักษณะของ fatigue load และการทดสอบ K_{Ic} ต้องมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 คือ

$K_{f(max)}$ Stress intensity factor ซึ่งมีค่าสูงสุดของ fatigue load ($K_{f(max)}$) จะต้องมีค่าน้อยกว่า $0.6 K_{Ic}$ Stress intensity factor จากการทดสอบ fracture toughness หรือก็คือ ภาระสูงสุดของ fatigue load จะต้องน้อยกว่า 60% ของภาระ P_{Ic} ซึ่งได้จากการทดสอบ fracture toughness

4. Fixture และ Displacement gauge

ASTM E399(1990) ได้ระบุถึงลักษณะของ fixture ซึ่งใช้ในการทดสอบไว้รายละเอียดโดยต้องไม่มีการเอียงศูนย์ (misalignment) และต้องมีความเสียดทานน้อยที่สุดลักษณะ fixture ที่ได้มาตรฐานดังรูปที่ 2.8



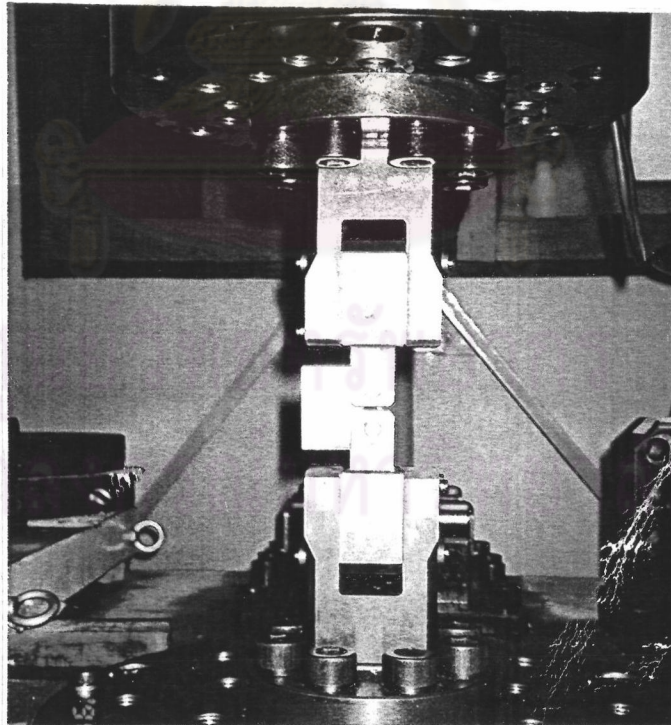
รูปที่ 2.8 แสดง fixture มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM E399(1990) ได้ระบุถึงการวัด displacement โดยให้ใช้ linear displacement gauge ทำการวัดการขจัดสัมพัทธ์ของสองตำแหน่งซึ่งอยู่ตรงกันข้ามและสมมาตรกันกับระนาบของรอยร้าวโดย displacement gauge จะต้องกระชับแน่นกับจุดที่วัดทั้งสองจุดตลอดเวลาในขณะที่ทำการทดสอบ

5. ขั้นตอนการทดสอบ

5.1) เตรียมการทดสอบ โดยจัดชิ้นทดสอบ, fixture, displacement gauge ให้ถูกต้องดัง

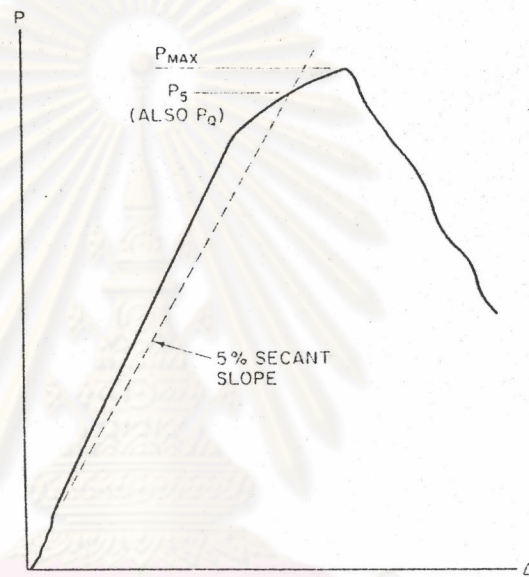
รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ถูกต้อง

5.2) เริ่มดึงขึ้นทดสอบด้วยอัตราการเพิ่มภาระอย่างสม่ำเสมอ (ASTM E399,1990 ได้ระบุถึงอัตราการเพิ่มภาระที่เหมาะสม) จนกระทั่งภาระไม่เพิ่มขึ้น

5.3)จากการเพิ่มของภาระขึ้นอย่างสม่ำเสมอจะทำให้การขจัดซึ่งวัดโดย displacement gauge มีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการขจัดที่ขณะใดๆ จะเป็นดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ K_{Ic} ต่อไปหรือเพิ่มภาระจนกระทั่งเกิดจุดที่ภาระมีค่าสูงสุด

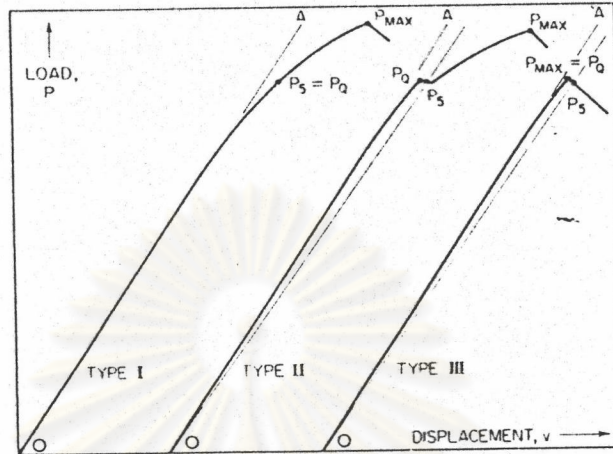


รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการขจัดที่ได้จากการทดสอบ

ในขณะที่ทำการทดสอบ K_{Ic} ของวัสดุ จะมีการวัดค่าระหว่าง ภาระ (load) และ COD (Crack Opening Displacement) โดยใช้ COD gauge ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงการวัด การขจัดของระยะความกว้างของรอยร้าว เมื่อระยะมีการเปลี่ยนแปลง COD gauge จะส่งสัญญาณไปยังเครื่องควบคุม เช่นเดียวกับ load sensor ซึ่งจะทำให้ได้ diagram แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระ (load) และ COD ที่ขณะเวลาต่าง ๆ กัน

ASTM(1990)กำหนดหลักการหา P_Q เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณโดยแยกตามลักษณะของความสัมพันธ์ P-COD ดังนี้ จากการทดลองเป็นจำนวนมาก จึงได้มีการกำหนดเงื่อนไขของ P_Q คือ กำหนดจากความชัน 95%ของ ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง(OA)โดยการลากเส้นความชันที่น้อยกว่าเส้น OA 5% จะได้ P_5 บนแผนภาพและกำหนดในกรณีที่ไม่มีความชันของ P ใดๆ ที่มากกว่า P_5 ในช่วง OA' ดังนั้น $P_5 = P_Q$ ซึ่งมีความชัน P ใดๆ ในช่วง OA' ซึ่งมากกว่า P_5 ให้ใช้ $P_{max} = P_5$ ในการวิเคราะห์

fracture toughness ลักษณะความสัมพันธ์ P-COD ที่พบจากการทำทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของภาวะและการขจัดที่พบมากในการทดสอบ

ชนิดที่ I = $P_5 = P_0$

ชนิดที่ II = $P_{max} = P_0$ (พิจารณาจุดที่เกิด pop-in)

ชนิดที่ III = $P_{max} = P_0$

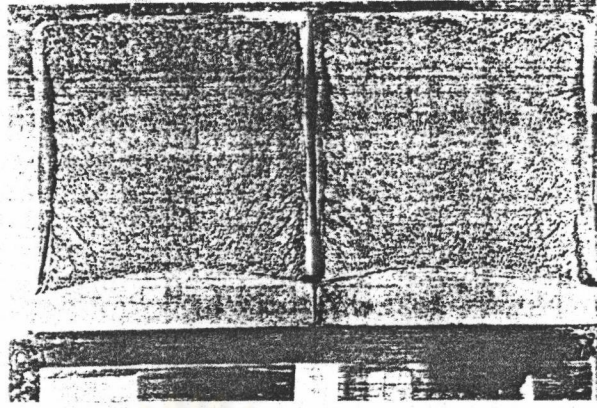
จะสังเกตเห็นว่า ทั้ง 3 ชนิดจะมีลักษณะพฤติกรรมของความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear behavior) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นของวัสดุโดยทั่วไป

6. การวัดความยาว precrack ที่ใช้ในการคำนวณ K_{IC}

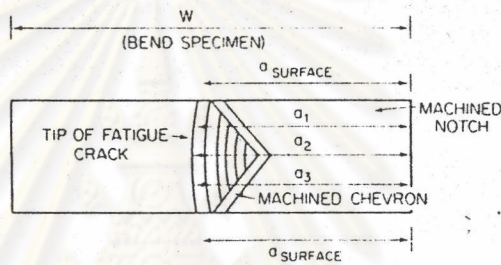
ในการทดสอบ เมื่อเกิดการแตกหักขึ้นแล้วส่วนที่เป็น fatigue crack จะแตกต่างจากส่วนอื่นชัดเจน (มีการสะท้อนแสงแตกต่างกันชัดเจน) ดังรูปที่ 2.12 ตามมาตรฐานได้กำหนดความยาวรอยร้าวที่ใช้การคำนวณคือ a โดย

$$a = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3)$$

ดังรูปที่ 2.13 และได้กำหนดไว้ว่า ค่าแตกต่างระหว่าง a และ a_1, a_2, a_3 ต้องไม่เกิน 5%



รูปที่ 2.12 แสดงผิว specimen ภายหลังจากทดสอบแสดงส่วนที่เป็น fatigue crack ชัดเจน



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดความยาวรอยร้าวจากผิวการแตกหักของ specimen

ในขณะที่ precrack จะต้องพยายามให้รอยร้าวโตในอัตราเท่าๆกันตลอดความหนาขึ้นทดสอบซึ่งหากเกิดปัญหาการโตของรอยร้าวมีความแตกต่างกันมากจะต้องทำการแก้ไขให้ได้ตามเงื่อนไขก่อนที่จะทำการทดสอบต่อไป

นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างความยาวรอยร้าวที่ผิวขึ้นทดสอบ และ a จะต้องไม่เกิน 10% และความยาวรอยร้าวต้องห่างจาก notch มากกว่า $0.05 a$ หรือ 1.3 mm ขึ้นกับว่าค่าใดน้อยกว่าเพื่อที่จะให้ได้รอยร้าวที่สอดคล้องกับมาตรฐาน ค่าสูงสุดของ stress intensity factor ขณะ fatigue load ต้องไม่เกิน 60% ของ K_{IC} เพื่อให้ได้ค่าที่ยอมรับดังในรูปที่ 5 ซึ่งถ้าขณะ fatigue load ทำให้เกิด stress intensity factor สูงเกินไปจะทำให้อยู่ในช่วงที่ไม่เป็น plane strain fracture toughness.

7.คำนวณ K_{IC} (K_{IC})

จาก P_Q ที่ได้และความยาวรอยร้าวที่ได้สามารถคำนวณ K_{IC} ได้ดังนี้

สำหรับ three point bend specimen

$$K_{IC} = \frac{P_Q S}{B.W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

ถือว่าผลการทดสอบเพื่อหาค่า fracture toughness โดย LEFM ที่ได้เชื่อถือได้และ K_Q (จากการทดสอบ) = K_{IC} (ของวัสดุที่พิจารณา) ซึ่งถ้าเงื่อนไขข้างต้นไม่เป็นจริงถือว่า $K_Q \neq K_{IC}$ ซึ่งต้องทำการเปลี่ยนขนาดชิ้นทดสอบเพื่อทำการทดสอบใหม่



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย