

บทที่ 3

ความต้านทานในการแตกร้าว

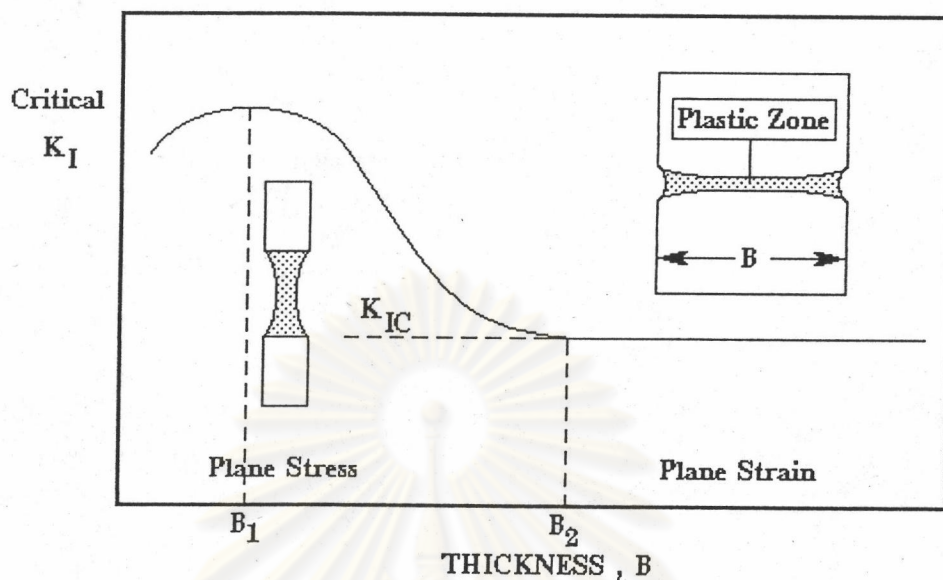
การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าว ภายใต้สภาวะความเค้นระนาบของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr P22 ในบทนี้ได้กล่าวถึง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรอยแตกหัก การทดสอบหาความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นระนาบ ความหมายของ brittle และ ductile ตามมาตรฐาน ASTM E399 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการแตกหัก

(Fracture Mode Transition)

ดังที่ทราบมาในบทที่แล้วว่า ขนาดของบริเวณพลาสติกนั้นขึ้นกับสภาวะของความเค้นที่ปลายของรอยแตกร้าว เมื่อขึ้นทดสอบมีความหนาในทิศทางขนานกับขอบหน้าของรอยแตกร้าว (ทิศทางแกน z) ความเค้น σ_{zz} จะเกิดขึ้นและมีค่าสูงพอที่จะบังคับการเสียรูปในช่วงพลาสติกในทิศทางดังกล่าว ดังนั้นขนาดของบริเวณพลาสติกในกรณีความเค้นระนาบจะมีขนาดเล็กกว่าในกรณีความเค้นระนาบ ขึ้นอยู่กับปริมาตรของวัสดุที่สามารถจะเสียรูปในช่วงของพลาสติกได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก และเนื่องจากปริมาตรดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นทดสอบ เราจะได้ว่าความต้านทานในการแตกร้าว K_C (fracture toughness) เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาดังแสดงในรูปที่ 3.1 (Ewalds and et.al. 1984 : 113)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

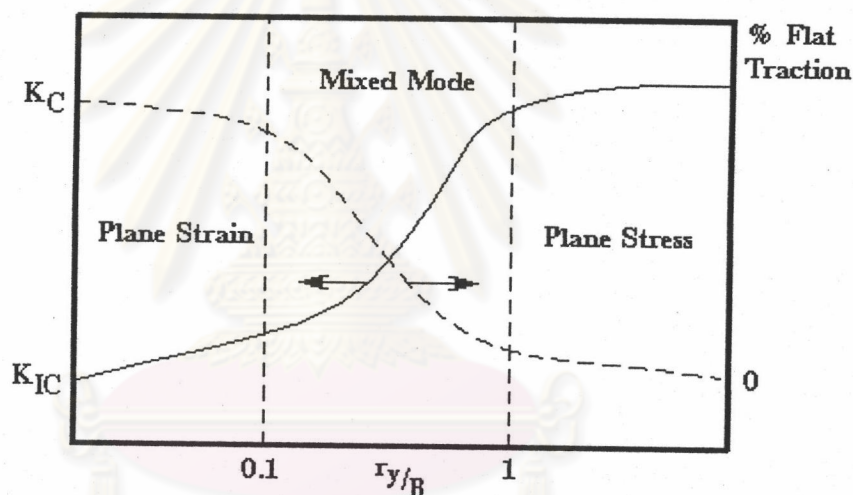


รูปที่ 3.1 แสดงผลความหนาของชิ้นทดสอบต่อค่าความต้านทานในการแตกร้าว

จากรูปจะเห็นว่า เมื่อชิ้นทดสอบมีความหนาน้อย (เช่น B_1) และระดับชั้นการบังคับการเสีรูปร่างในช่วงพลาสติก (degree of plastic constraint) ที่ปลายของรอยแตกร้าวมีค่าต่ำสุดแล้ว จะเกิดเงื่อนไขของความเค้นระนาบขึ้น และวัสดุจะให้ค่า toughness สูงสุด (ถ้าชิ้นทดสอบบางกว่านี้ค่า toughness จะลดลงเนื่องจากไม่มีวัสดุพอที่จะดูดกลืนพลังงานในการเสีรูปร่างช่วงพลาสติก) กลับกันเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดการบังคับการเสีรูปร่างในช่วงพลาสติกมากขึ้น และเกิดเงื่อนไขของความเค้นระนาบขึ้นที่ปลายของรอยแตกร้าวค่า toughness จะลดลงอย่างรวดเร็วไปที่ระดับประมาณ 1 ใน 3 หรือน้อยกว่าค่าที่กรณีความเค้นระนาบ ลักษณะหนึ่งที่สำคัญมากของค่า toughness ที่ลดลงต่ำมากนี้คือ มันจะไม่ลดลงต่อไปอีกแม้ว่าความหนาจะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่านี้เป็นค่าต่ำสุดของ toughness ในการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมใด ๆ ค่าดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นระนาบ K_{IC} (plane strain fracture toughness) สามารถหาค่า K_{IC} นี้ได้จากการทดสอบด้วยการใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาน้อย B_2 ตามรูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีความหนามากกว่า B_2 ก็จะมีค่า toughness เท่านี้เสมอ ดังนั้นเราอาจสรุปได้ว่า ความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นระนาบ K_C (plane stress fracture toughness) สัมพันธ์อยู่กับทั้งรูปทรงทางเรขาคณิตและโครงสร้างโลหะของวัสดุนั้น ในขณะที่ K_{IC} ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโลหะเพียงอย่างเดียว ผลที่ตามมาก็คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการเปรียบเทียบวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกันบนพื้นฐานของระดับค่า

ค่า fracture toughness จะต้องรวมการเปรียบเทียบค่า K_{IC} ด้วย เพราะว่าผลกระทบของความหนาได้ถูกตัดทิ้งไป

เพราะว่าผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานในการแตกร้าว ถูกกระทบกระเทือนโดยผลของบริเวณพลาสติกที่สัมพันธ์กับความหนา เพื่อเป็นการให้ข้อมูลอย่างครบถ้วน เราจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของความเค้นในรูปของ r_y/B การทดลองได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อ $r_y/B \geq 1$ จะเกิดเงื่อนไขของความเค้นระนาบขึ้น และ toughness จะสูงที่ปลายสุดอีกข้างหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.2

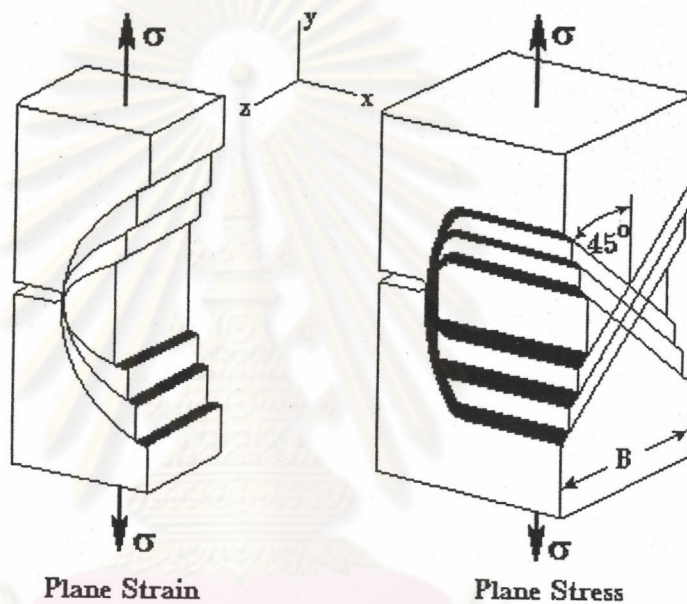


รูปที่ 3.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของความเค้น

เงื่อนไขของความเค้นระนาบจะเกิดขึ้นเมื่อ $r_y/B \leq 1/10$ ไม่ว่าในกรณีใดความหนาที่จำเป็นในการสร้างเงื่อนไขของความเค้นระนาบหรือความเค้นระนาบจะขึ้นอยู่กับความต้านแรงครากของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวควบคุมขนาดของบริเวณพลาสติก r_y ที่ระดับความเข้มของความเค้นใด ๆ

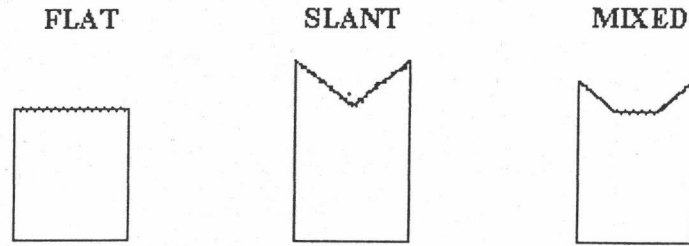
ลักษณะอีกอย่างหนึ่งของความเกี่ยวข้องระหว่างความต้านทานในการแตกร้าวและสถานะของความเค้น จะถูกสังเกตเห็นได้โดยทั่วไปในลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการแตกหัก (fracture mode transition) และ $r_y \geq B$ ระบายของการแตกหักมักจะทำมุม $\pm 45^\circ$ เมื่อเทียบกับแกนของภาระและความหนาดามรูปที่ 3.3 ซึ่งทำให้เราอาจกล่าวได้ว่า ความเสียหายจะเกิดขึ้นบนระนาบที่มี

ความเค้นเฉือน $\sigma_z = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ ระบายที่มีความเค้นเฉือนสูงสุดจะอยู่ในระนาบ xy ดังนั้นจะ
 ดูกลาย ๆ กับว่าระนาบของการแตกหักในกรณีความเค้นเฉือนจะอยู่ระหว่างระนาบของความเค้น
 เฉือนสูงสุด 2 ระนาบ ซึ่งการประกอบกันเข้านี้ทำให้มีแนวโน้มที่รอยแตกจะคงอยู่ในระนาบที่มี
 ความเค้นสูงสุดในภาคตัดสุทธิ



รูปที่ 3.3 แสดง Deformation Mode

การที่เกิดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการแตกหักในวัสดุทางวิศวกรรมจำนวนมากนี้ ทำ
 ให้สามารถคำนวณปริมาณสัมพัทธ์ของพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุในระหว่างขบวนการแตกหัก
 เมื่อพื้นผิวของการแตกหักราบเรียบ แสดงว่าการทดสอบอยู่ในสภาวะความเค้นเฉือนอย่างแน่
 นอนและ fracture toughness ที่หาได้จะมีค่าต่ำ ถ้าการแตกหักเป็นแบบเรียบหรือแบบเฉือนอย่าง
 เดียวแสดงว่าอยู่ในสภาวะความเค้นระนาบจะทำให้ได้ค่า toughness สูงขึ้น เมื่อพื้นผิวการแตกหัก
 เป็นแบบผสมจะได้ค่าของ toughness ที่อยู่ระหว่างค่าทั้งสองข้างต้นอย่างแน่นอน



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของการแตกหักแบบต่าง ๆ

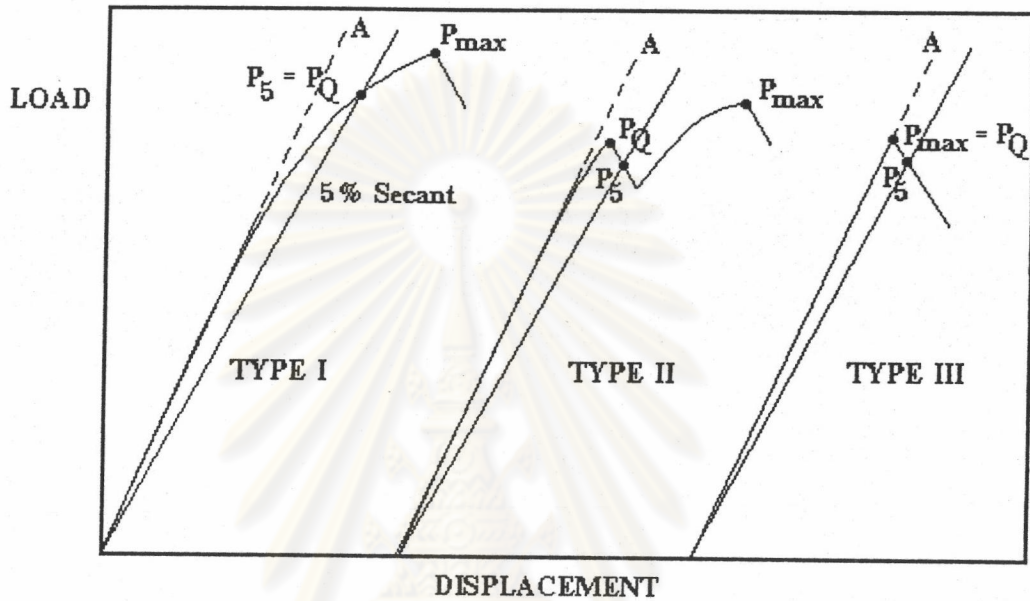
การทดสอบหาความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเครียดระนาบ

ความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเครียดระนาบ K_{IC} (plane strain fracture toughness) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการแตกร้าวและเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของโครงสร้าง และสามารถหาได้จากการทดสอบโดยมีมาตรฐานวิธีการทดสอบของ ASTM E399 “Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials” ซึ่งเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 และได้มีการปรับปรุงแก้ไขเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ขนาดมาตรฐานของชิ้นทดสอบได้ถูกกำหนดด้วยความหนา B เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบอยู่ในสภาวะของความเครียดระนาบและทำให้บริเวณพลาสติก r_y ที่เกิดขึ้นหน้ารอยแตกร้าวมีขนาดเล็กกว่าความหนามาก ๆ ประมาณ $1/50$ เท่า ถ้าบริเวณพลาสติกที่เกิดขึ้นนี้มีขนาดใหญ่มาก ค่า K_{IC} ที่ทดสอบได้จะไม่ตรงกับความเป็นจริง เนื่องจากว่าชิ้นทดสอบไม่ได้อยู่ในสภาวะของความเครียดระนาบตามความต้องการของ ASTM E399 เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดตามข้อกำหนดนี้ เราสามารถทำการตรวจสอบหาความหนาที่เหมาะสมโดยเบื้องต้นได้จาก

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

โดยทำการประมาณค่า K_{IC} ของวัสดุที่จะทำการทดสอบอย่างหยาบ ๆ จากตารางที่ได้ให้ไว้ในมาตรฐาน หรือจะเทียบกับวัสดุอื่นที่ทราบค่า K_{IC} อยู่ก่อนแล้วแต่จะต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน ก่อนทำการทดสอบการแตกร้าวชิ้นทดสอบจะถูกทำให้เกิดรอยแตกร้าวเบื้องต้นก่อน โดยการให้ภาระล้ากระทำจนรอยแตกร้าวมีความยาว a ประมาณ $0.45W$ ถึง $0.55W$ หลังจากนั้นก็จะทำ

การทดสอบโดยให้ชิ้นทดสอบรับภาระดึงแบบ monotonic tension แล้วเกิดการแตกร้าวต่อไปจนแยกออกจากกัน โดยในระหว่างการทดสอบนี้จะมีการบันทึกข้อมูลของภาระและค่าการเคลื่อนตัว Δ (displacement) ตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดง P - Δ curve ที่ได้ในระหว่างการทดสอบ K_{Ic} ตาม ASTM E399

ส่วนที่ไม่เป็นเส้นตรงเกิดจากผลของบริเวณพลาสติกที่หน้ารอยแตกร้าว หรือเกิดจากการขยายตัวของรอยแตกร้าวอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ตามมาตรฐาน ASTM E399 ให้ลากเส้นตรงจากจุดกำเนิดมีความชันเป็น 95% ของเส้นประเพื่อหาภาระ P_Q และความยาวรอยแตกร้าว a สามารถวัดได้ที่ผิวของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก็จะสามารถคำนวณหา K_Q ได้จากความสัมพันธ์นี้

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

ค่า K_Q ที่คำนวณได้จะถือว่าเป็น K_{Ic} ของวัสดุก็ต่อเมื่อ

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

และ

$$P_{max} \leq 1.1P_Q$$

จากเส้นกราฟในรูปที่ 3.5 ทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญขึ้น 2 ข้อ คือ ข้อแรก ะไรคือค่า K_{IC} ที่ชัดเจน (apparent plane strain fracture toughness) ข้อสองคือ ค่าเหล่านี้ถูกต้องหรือไม่ โดยที่ขึ้นทดสอบจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดและความหนามากกว่าจะไม่ให้ค่าของ K_{IC} ที่ต่ำไปกว่าค่านี้ เพราะจะทำให้ค่าที่หาได้ในครั้งแรกหมดความหมายของ K_{IC} ไปทันที Brown และ Strawley ได้ทำการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าวของ high strength alloys หลายชนิด และได้ค้นพบว่า K_{IC} จะมีค่าใช้ได้เมื่อความหนาและความยาวรอยแตกร้าวของชิ้นทดสอบมีค่ามากกว่าค่าน้อยที่สุดค่าหนึ่ง คือ

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

ซึ่ง $(K_{IC}/\sigma_{ys})^2$ สะท้อนให้เห็นความหมายของขนาดบริเวณพลาสติก ดังนั้นถ้าใช้ค่าของบริเวณพลาสติกที่หาได้จาก Irwin เราจะพบว่าเกณฑ์สำหรับเงื่อนไขของความเครียดระนาบได้สะท้อนให้เห็นว่า

$$B, a \geq 50r_y \quad \text{สำหรับกรณีความเครียดระนาบ}$$

หรือ

$$B, a \geq 17r_y \quad \text{สำหรับกรณีความเค้นระนาบ}$$

ในการที่จะหาค่า K_{IC} ให้ได้นั้นเราจำเป็นต้องหาค่าของ K_Q ให้ได้ก่อน ค่าของ K_Q นั้นหาได้จากข้อมูลบน $P - \Delta$ curve การคำนวณค่าของ K_Q นั้นเราสามารถใช้อempirical formula ที่อยู่ในรูปของ

$$\frac{P}{BW^m} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

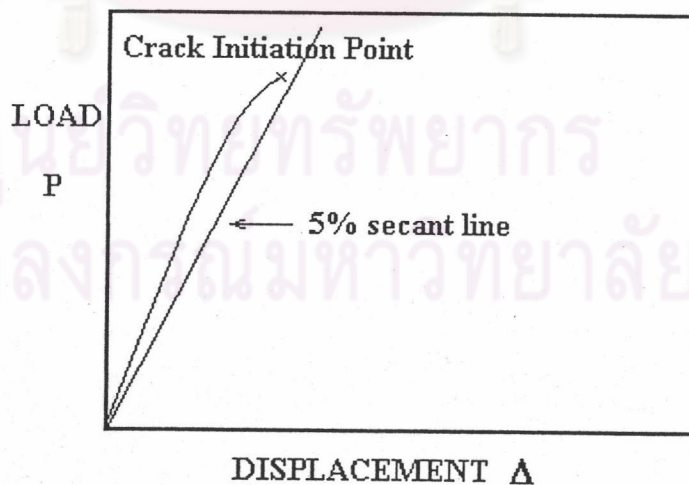
เมื่อ $f(a/W)$ เป็นพหุนามที่หาไว้แล้ว เมื่อได้ค่า K_Q แล้วนำไปแทนในสมการของ Brown และ Strawley ถ้าค่าของ K_Q สอดคล้องตามสมการดังกล่าว $K_Q = K_{IC}$ ASTM E399 ประกอบไปด้วยขบวนการต่อไปนี้ บน $P - \Delta$ curve ลากเส้นตรง OP_5 ผ่านจุดกำเนิดให้ความชันน้อยกว่าความชันของเส้น OA 5% เส้นสัมผัส OA เป็นเส้นที่สัมผัสกับส่วนแรกของเส้นโค้ง การลด

ความชันลง 5% เป็นผลเหมือนกับรอยแตกร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้น 2% จากความยาวเดิม เพื่อเป็นการชดเชยผลของบริเวณพลาสติกที่เกิดขึ้น P_5 คือจุดตัดระหว่างเส้นเอียง OP_5 กับเส้นโค้งของ $P - \Delta$ curve เป็นค่าที่จะใช้ในการคำนวณ K_Q ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ดังต่อไปนี้ ถ้าค่าของภาระที่ทุก ๆ จุดบนเส้นโค้งก่อนที่จะถึงค่า P_5 มีค่าน้อยกว่า P_5 เราใช้ $P_Q = P_5$ (แบบ I) อย่างไรก็ตามถ้ามีค่าภาระสูงสุดเกิดขึ้นก่อนถึงค่า P_5 แล้ว ค่าภาระสูงสุดนั้นเป็น P_Q (แบบ II และ แบบ III) ถ้าค่า K_Q ที่คำนวณได้สอดคล้องตามสมการของ Brown และ Srawley แล้ว $K_Q = K_{IC}$ ถ้าไม่จะต้องทำการทดสอบใหม่กับชิ้นทดสอบที่มีขนาดมากกว่าเดิมและ/หรือมีความยาวของรอยแตกร้าวมากกว่าเดิม

ความหมายของ Brittle และ Ductile ตาม ASTM E399

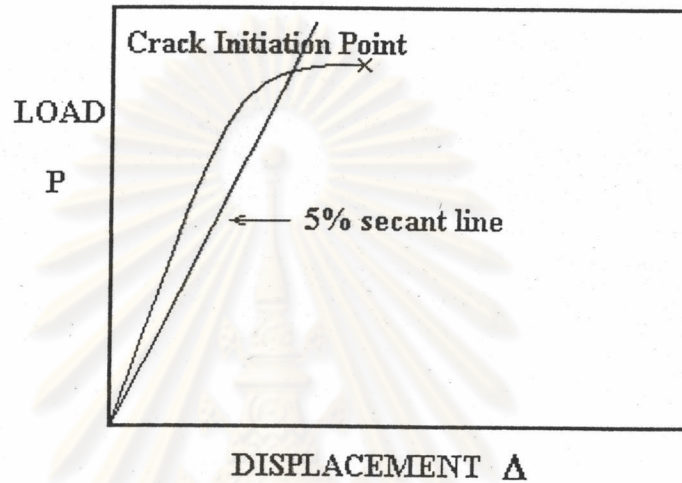
ASTM E399 ได้กำหนดเทอมของ brittle และ ductile ไว้ดังนี้ (Banerjee, 1981 : 345)

1. เมื่อวัสดุได้รับภาระแล้วเกิดบริเวณพลาสติกขึ้นที่หน้ารอยแตกร้าวมีขนาดน้อยกว่า 2% ของความกว้างชิ้นทดสอบ W และรอยแตกร้าวเริ่มยาวขึ้นต่อจากความยาวเดิม (crack initiation) ก่อนจุด P_Q จะถือว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเปราะ (brittle material) การวิเคราะห์ปัญหาของการแตกร้าวจะใช้ทฤษฎีของ LEFM (linear elastic fracture mechanics) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการเกิดรอยแตกร้าวในวัสดุเปราะ

2. เมื่อวัสดุใดรับภาระแล้วเกิดบริเวณพลาสติกขึ้นที่หน้ารอยแตกร้าวมักมีขนาดมากกว่า 2% ของความกว้างชิ้นทดสอบ W นั่นคือ จะเกิดบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่ขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดรอยแตกร้าวลังจุด P_0 จะถือว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเหนียว (ductile material) การวิเคราะห์ปัญหาของการแตกร้าวมักจะใช้ทฤษฎีของ EPFM (elastic plastic fracture mechanics) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดรอยแตกร้าวมในวัสดุเหนียว

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยดังนี้

Keller และคนอื่น ๆ (1977) ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Effect of Specimen Size on J-Integral and Stress - Intensity Factor at the Onset of Crack Extension” วัสดุที่ใช้ในการวิจัย คือ 35NiCrMo16 Steel ทำการทดสอบ J_{IC} โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดต่างกันหลายขนาด (ขนาดของชิ้นทดสอบทุกชิ้นได้ถูกกำหนดด้วยความหนา B ตาม ASTM E813) จากการวิจัยพบว่า K_{IC} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันนั้น K_{IC} ที่ถูกแปลงมาจาก J_{IC} จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความหนาของชิ้นทดสอบ

Morozov (1979) ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Some Problems in Experimental Fracture Mechanics” วัสดุที่ใช้ในการวิจัยคือ D16 Alloy Steel โดยทำการทดสอบกับ C(T)-specimen หลายขนาดและแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกขึ้นทดสอบทุกชิ้นจะถูกกำหนดขนาดต่าง ๆ ด้วยความหนา B นั่นคือที่ความหนาน้อย ๆ ก็จะมีขนาดเล็ก และที่ความหนามาก ๆ จะมีขนาดใหญ่ และกลุ่มที่สองขึ้นทดสอบทุกชิ้นจะมีขนาดของ a , W , $W-a$ คงที่และแปรความหนา B จากผลการวิจัยพบว่า ในกลุ่มแรกค่า K_C จะเพิ่มขึ้นตามความหนาและไป asymptote ที่ความหนาค่าหนึ่งซึ่งเป็นระดับของ K_{IC} ส่วนในกลุ่มที่สองนั้น ค่า K_C จะลดลงตามความหนาและไป asymptote ที่ความหนาเดียวกันกับกลุ่มแรก และในการทดสอบ K_{IC} ตามมาตรฐาน ASTM E399 นั้น เขาได้แนะนำว่า ที่ความหนาน้อย ๆ และอยู่ในสภาวะความเค้นระนาบ การคำนวณ K_{IC} ด้วยภาวะ P_Q จะไม่ใกล้เคียงกับความจริง ควรเปลี่ยนมาใช้ภาวะ P_{max} จะเป็นการเหมาะสมกับสถานการณ์กว่า

Lai และคนอื่น ๆ (1986) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง “Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness” วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยคือ Comsteel En25 ได้ทำการศึกษาผลความหนาของขึ้นทดสอบต่อค่า K_C โดยทำการทดสอบกับขึ้นทดสอบแบบ C(T)-specimen ที่ผ่านขบวนการกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ นำค่า K_C ที่ได้ไปพล็อตเทียบกับ model ของ Tetelman และคนอื่น ๆ กับ model ของ Krafft และคนอื่น ๆ จากผลการวิจัยพบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่คำนวณจาก model มีความสอดคล้องกันที่ 550°C นั่นคือ K_C จะลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นและจะ asymptote กับระดับของ K_{IC} ที่ความหนาหนึ่งซึ่งมีค่าน้อยกว่าความหนาตอนที่ยังไม่ได้ทำ heat treatment มาก

Gurumoorthy และคนอื่น ๆ (1988) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง “Thickness Effects May Not Do What You Think They Do” วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ Alumina 99% โดยทำการทดสอบผลความหนาต่อ K_C จากผลการวิจัยพบว่า ค่า K_C จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น และได้ให้ข้อเสนอแนะต่อไปว่า เกณฑ์ที่ ASTM E399 ได้กำหนดไว้เพื่อใช้ตรวจสอบสภาวะของความเค้นระนาบและเพื่อใช้ยอมรับว่า K_Q ที่ได้เป็นค่า K_{IC} นั้น ตัวเลข 2.5 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์หน้าเทอมภายในวงเล็บสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5