

การออกแบบคลิปเกจ และการประยุกต์ใช้กับการทดสอบการแตกหัก Clip Gage Design and Application to Fracture Testing

ยอติย หมวกงาม¹ และจิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย²

¹ นิสิตปริญญาโท

² ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การแตกหัก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

โทร 02-2186636 โทรสาร 02-2522889 E-mail : jirapong_joe_K@hotmail.com

Yodying MOUKNGAM¹ and Jirapong KASIVITAMNUAY²

¹ Graduate Student

² Fracture Mechanics Research Laboratory, Mechanical Engineering Department

Chulalongkorn University, Phayathai Rd. Bangkok, 10330

Tel: 02-2186636 Fax: 02-2522889 E-mail: jirapong_joe_K@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยออกแบบคลิปเกจสำหรับวัดระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบในการทดสอบการแตกหัก และออกแบบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจที่ใช้ไมโครมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ปรับระยะ คลิปเกจทำจากอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 และมีลักษณะเป็นคานาคู่สำหรับหนีบกั้นชิ้นงานทดสอบ ที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของคานาคลิปเกจติดเกจความเครียดสำหรับวัดความเครียดของคานาเมื่อมีการแอ่นตัว คานาของคลิปเกจถูกออกแบบให้มีหน้ากว้างลดลงเมื่อระยะห่างจากปลายด้านที่ยึดมากขึ้นด้วยเงื่อนไขความเครียดคงที่ คลิปเกจที่ออกแบบถูกนำไปใช้ในการทดสอบการแตกหัก 3 ประเภท คือ 1) การวัดคอมพลายเอนซ์ 2) การวัดความต้านทานการแตกหัก K_{Ic} และ 3) การวัดอัตราการเติบโตของรอยร้าว ชิ้นงานทดสอบที่ใช้คือ แบบ CT มีความกว้าง 50.8 มม ความหนา 25.4 มม ทำจากอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 การทดสอบทำในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง ความแม่นยำของผลลัพธ์ตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกับผลเฉลยในมาตรฐาน ASTM หรือผลการทดสอบจากต่างวิธี ผลการทดสอบพบว่าคลิปเกจที่สร้างมีความแม่นยำ และความไวเพียงพอในการทดสอบทั้ง 3 ประเภท

Abstract

This research designed a clip gage for measuring the crack mount opening displacement in fracture testing and designed a calibrator using a micrometer head as displacement adjuster. The clip gage was made from an aluminium alloy 7076-T651. It has two arms for attaching to the specimen. On the top and the bottom surfaces of each arm, there have strain gages for sensing strains due to deflection. The clip gage's arm becomes narrower as the distance from the fixed-end increases to achieve the uniform strain condition. The developed clip gage was applied to 3 types of fracture testing:- 1) compliance measurement 2) K_{Ic} fracture toughness measurement and 3) fatigue crack growth rate measurement. The specimens used in the test were CT-typed

made from aluminium alloy 7075-T651 having a width of 50.8 mm. and a thickness of 25.4 mm. The tests were conducted in an air environment at a room temperature. Test results were validated with ASTM's solution or results from another test method. It was found that the developed clip gage has enough accuracy and sensitivity for these 3 types of fracture testing.

1. บทนำ

สมบัติการแตกหัก (fracture property) ของวัสดุ เป็นข้อมูลหลักสำหรับการประเมินสภาพชิ้นส่วนที่ตรวจพบรอยร้าวว่าสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพหรือไม่ และได้กำหนดเพียงใด สมบัติการแตกหักที่ต้องการคือ 1) ความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) และ 2) อัตราการเติบโตของรอยร้าว (crack growth rate) ข้อมูลการทดสอบที่ใช้วิเคราะห์หาความต้านทานการแตกหัก และคำนวณหาความยาวรอยร้าวในขณะทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว คือ 1) ระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าว (crack mount opening displacement) [1] หรือตามแนวภาวะที่กระทำ [2] และ 2) ภาวะที่กระทำต่อชิ้นงาน การวัดระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงานทดสอบใช้เครื่องมือที่เรียกว่า "คลิปเกจ (clip gage)" ติดตั้งเข้ากับชิ้นงานทดสอบตรงจุดที่ต้องการวัดระยะเคลื่อนตัว คลิปเกจที่นิยมใช้ คือ คลิปเกจคานาคู่ (double-cantilevered type) ที่ใช้เกจความเครียด (strain gage) ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของระยะแอ่นตัว (deflection) ของคานาคลิปเกจ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างคลิปเกจคานาคู่ที่นิยมใช้ในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก โดยคลิปเกจในรูปมีความกว้างของคานาคลิปเกจคงที่ (ต่อไปจะเรียกว่าคลิปเกจคานาคู่ตรง)

วิธีออกแบบคลิปเกจคานาคู่ตรง ซึ่งกล่าวในเอกสารอ้างอิง [4] เริ่มจากการเขียนความสัมพันธ์ของ ความไว (sensitivity) และพิสัยการวัด (range) ในรูปของตัวแปรบอกมิติของคานาคลิปเกจ และกำหนดขนาดแรงหนีบที่เหมาะสมของคลิปเกจกับชิ้นงาน จากนั้นจึงแปรค่าตัวแปรบอกมิติจนกระทั่งคลิปเกจมี ความไว และพิสัยการวัดเพียงพอตามที่ต้องการ การหาผลเฉลยด้วยวิธีนี้จะซับซ้อนขึ้นถ้าคานาคลิปเกจมีรูปร่าง

ซับซ้อนขึ้น หรือจำนวนเงื่อนไขบังคับในการออกแบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความไวของคลิปปีกนกคานคู่ตรงยังต่ำลงเนื่องจากไม่สามารถติดเกจความเครียด ณ ตำแหน่งที่ความเครียดมีค่าสูงสุดได้ ข้อจำกัดประการหลังนี้แก้ไขได้โดยออกแบบให้คานคลิปปีกนกบริเวณที่จะติดเกจความเครียดยาวลงเมื่อห่างจากปลายตรึงมากขึ้น (รูปที่ 2) ด้วยเงื่อนไขความเครียดที่ระยะใด ๆ จากปลายตรึงมีค่าคงที่ ในที่นี้เรียก คลิปปีกนกแบบนี้ว่า คลิปปีกนกคานคู่เรียว (tapered double cantilever clip gage)

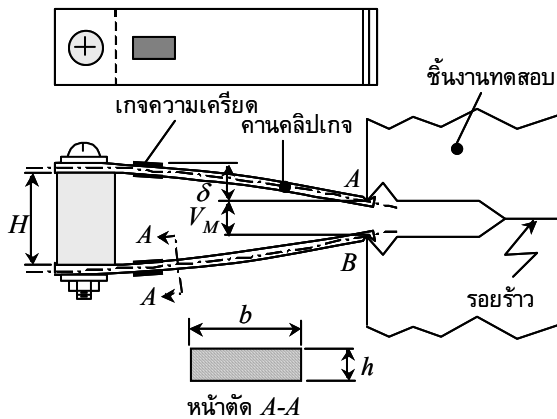
งานวิจัยนี้ ออกแบบคลิปปีกนกคานคู่เรียวโดยใช้ระเบียบวิธีออกแบบขั้นเหมาะสมที่สุด (optimum design) และนำไปใช้ในการทดสอบหา 1) คอมพลายแอนซ์ (compliance) 2) ความต้านทานการแตกหัก K_{Ic} และ 3) อัตราการเติบโตของรอยร้าว (fatigue crack growth rate)

2. ทฤษฎี

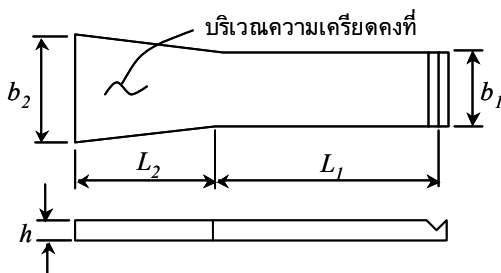
ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการการทำงานของคลิปปีกนก และสมการที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 หลักการทำงาน

พิจารณารูปที่ 1 ในรูปแสดงคลิปปีกนกคานคู่ขณะติดตั้งกับชิ้นงานทดสอบที่ปากรอยร้าว (จุด A และ B) ในขณะนั้นคานคลิปปีกนกมีระยะแอนตัวเริ่มต้นค่าหนึ่ง เมื่อชิ้นงานทดสอบรับภาระ ความกว้างของปากรอยร้าวและระยะแอนตัวของคานคลิปปีกนกจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกัน เกจความเครียดที่ติดอยู่จะตรวจจับความเครียดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระยะแอนตัว ความสัมพันธ์ (ที่แท้จริง) ระหว่างความเครียดที่อ่านได้ และระยะแอนตัวที่เกิดขึ้นหาได้จากการสอบเทียบ



รูปที่ 1 คลิปปีกนกคานคู่ที่ติดตั้ง ณ ปากรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2 คานของคลิปปีกนกคานคู่เรียว และตัวแปรบอมิติ

2.2 สมการออกแบบ

สมการที่ใช้ในการออกแบบคลิปปีกนกคานคู่เรียว มีดังนี้

ก) ความเค้นที่เกิดขึ้นบนคานคลิปปีกนกในช่วงสี่เหลี่ยมคางหมู σ

การออกแบบกำหนดให้ความเค้นในบริเวณนี้มีค่าคงที่ ความเค้นบริเวณนี้จึงมีค่าเท่ากับความเค้น ณ จุดที่ความกว้างของคานเริ่มคงที่ ดังนั้น

$$\sigma = \frac{6FL_1}{b_1h^2} \quad (1)$$

โดย F คือ แรงที่คลิปปีกนกหนีขึ้นงาน

b_1, h, L_1 คือ ความกว้าง ความหนา และความยาว ของคานคลิปปีกนก (ดูรูปที่ 2 ประกอบ)

เนื่องจากคลิปปีกนกถูกนำไปใช้ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว ดังนั้นจะต้องออกแบบภายใต้เกณฑ์การล้าด้วย ถ้า F_a และ F_m คือ แอมพลิจูดภาระ (load amplitude) และ ภาระเฉลี่ย (mean load) ตามลำดับแล้ว จากสมการที่ (1) จะได้ แอมพลิจูดความเค้น σ_a และความเค้นเฉลี่ย σ_m ที่เกิดขึ้นบนคานคลิปปีกนก คือ

$$\sigma_a = \frac{6F_aL_1}{b_1h^2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{6F_mL_1}{b_1h^2} \quad (3)$$

ขีดจำกัดความทนทาน (endurance limit) ของวัสดุภายใต้ภาระล้าที่มีความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์โดยวิธีของ Goodman คือ

$$\sigma_e = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right) \sigma_{e0} \quad (4)$$

โดย σ_u คือ ความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate strength) ของวัสดุ (ที่ทำคลิปปีกนก)

σ_{e0} คือ ขีดจำกัดความทนทานกรณีความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

ข) ความเครียดที่เกิดขึ้นบนคานคลิปปีกนกในช่วงสี่เหลี่ยมคางหมู ϵ จากกฎของฮุก (Hooke's law) และสมการที่ (1) จะได้

$$\epsilon = \frac{6FL_1}{Eb_1h^2} \quad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน แอมพลิจูดความเครียด ϵ_a และความเครียดเฉลี่ย ϵ_m ของคานคลิปปีกนก คือ

$$\epsilon_a = \frac{6F_aL_1}{Eb_1h^2} \quad (6)$$

$$\epsilon_m = \frac{6F_mL_1}{Eb_1h^2} \quad (7)$$

ค) ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของตัวแปร b_1 กับตัวแปร b_2

ความเครียดในช่วงสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อความกว้างของคานคลิปปีกนกสัมพันธ์กันตามสมการต่อไปนี้

$$b_2 = b_1 \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) \quad (8)$$

ง) ระยะแอนตัวของคานคลิปปเก ณ จุดที่หนีบชิ้นงานทดสอบ δ

$$\delta = \frac{12F}{Eh^3b_1} \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2L_2 + \frac{L_1L_2^2}{2} \right) \quad (9)$$

จ) ความไวของคลิปปเก S

นิยามคือ อัตราส่วนของความเครียดที่ตำแหน่งของเกจความเครียดต่อระยะแอนตัวของคานคลิปปเก(ทั้งคู่) 2δ ดังนั้น

$$S = \frac{\varepsilon}{2\delta} \quad (10)$$

แทนสมการที่ (5) และ (9) ลงในสมการที่ (10) จะได้ความไวของคลิปปเกในรูปของตัวแปรบอกมิติของคานคลิปปเกดังต่อไปนี้

$$S = \frac{3}{2} \frac{h}{(2L_1^2 + 6L_1L_2 + 3L_2^2)} \quad (11)$$

ฉ) พิสัยใช้งานของคลิปปเก δ_r

เนื่องจากคลิปปเกยึดกับชิ้นงานทดสอบด้วยแรงหนีบจากการแอนตัวของคานคลิปปเก เมื่อชิ้นงานรับภาระดึงระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นทำให้แรงหนีบลดลง ในทางทฤษฎีคลิปปเกสามารถหนีบกับชิ้นงานได้จนกระทั่งแรงหนีบลดลงเหลือศูนย์ แต่ทว่าในความเป็นจริง คลิปปเกจะโยกคลอนก่อนที่แรงหนีบจะเหลือศูนย์ ดังนั้นแรงหนีบต่ำสุดจึงเป็นตัวกำหนดพิสัยใช้งานของคลิปปเก จากสมการที่ (4) จะได้

$$\delta_r = \frac{12(F_{\max} - F_{\min})}{Eh^3b_1} \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2L_2 + \frac{L_1L_2^2}{2} \right) \quad (12)$$

โดย $F_{\max}$, $F_{\min}$ คือ แรงหนีบสูงสุด และต่ำสุด ตามลำดับ

ช) ระยะห่างระหว่างคานคลิปปเก [หรือความสูงของตัวตั้งระยะ (spacer)] H

จากรูปที่ 1 จะได้

$$H = V_M + 2\delta_{\max} - h \quad (13)$$

โดย $\delta_{\max}$ คือ ระยะแอนตัวสูงสุด (แรงหนีบมีค่าเท่ากับ $F_{\max}$)

3. การออกแบบ

3.1 ลักษณะจำเพาะของคลิปปเก

ลักษณะจำเพาะ (specification) ที่ต้องกำหนดในการออกแบบคือ พิสัย และความไว ซึ่งขึ้นกับขนาดของชิ้นงานทดสอบ, ชนิดวัสดุที่ใช้ทำคลิปปเก, ชนิดการทดสอบ, ความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบด้วยมิเตอร์วัดความเครียด (strain meter) และการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) งานวิจัยนี้ ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ compact tension (CT) ทำจากอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ W เท่ากับ 50.8 มม ความหนา B เท่ากับ 25.4 มม (รูปที่ 3)

ก) การคำนวณความไวที่ต้องการ S_d

ความไวของคลิปปเกที่ต้องการคำนวณจากเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงความเครียดที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้กับเมื่อระยะแอนตัวที่ปลายคลิปปเกเปลี่ยนไปเท่ากับค่าที่กำหนดค่าหนึ่ง จากสมการที่

(10) สามารถเขียนความไวของคลิปปเกได้ใหม่ในรูปของการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

$$S = \frac{\Delta\varepsilon}{2(\Delta\delta)} \quad (14)$$

โดย $\Delta\delta$ คือ การเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนตัว

$\Delta\varepsilon$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดที่สามารถตรวจวัดได้

จำนวนเกจความเครียดที่ใช้คือ 4 อัน โดยต่อเป็นวงจรบริดจ์เต็ม (full bridge) ที่มีตัวประกอบบริดจ์ (bridge factor) เท่ากับ 4 ดังนั้น $\Delta\varepsilon$ สามารถหาได้จากเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\Delta\varepsilon \geq \frac{\Delta E_{A/D}}{G \cdot GF \cdot V_{\text{supply}}} \quad (15)$$

โดย $\Delta E_{A/D}$ คือ ความละเอียดของการแปลงสัญญาณ (โวลต์)

G คือ อัตราขยายสัญญาณของชุดเครื่องมือวัด

GF คือ แฟคเตอร์เกจ (gage factor)

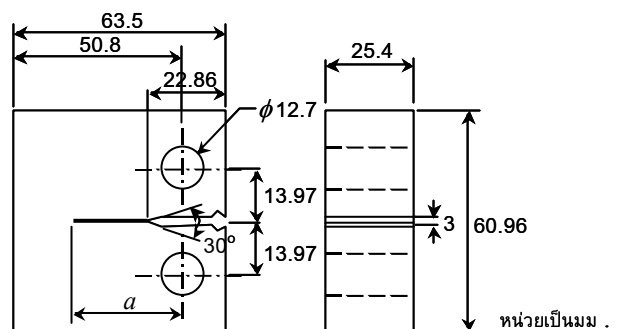
V_{supply} คือ แรงดันที่ป้อนวงจรเกจ (โวลต์)

ความละเอียดของการ์ด A/D ที่ใช้คือ 12 บิต และมีพิสัยการวัดเท่ากับ ± 10 โวลต์ ดังนั้น $\Delta E_{A/D}$ มีค่าเท่ากับ $20/2^{12} = 4.883$ มิลลิโวลต์ อัตราขยายสัญญาณของมิเตอร์วัดความเครียด และการ์ด A/D เท่ากับ 50 และ 8 เท่า ดังนั้น G มีค่าเท่ากับ 400 เท่า เกจความเครียดที่เลือก มีค่า GF เท่ากับ 2.10 และ V_{supply} มีค่าเท่ากับ 4 โวลต์ แทนค่าลงในสมการที่ (15) จะได้ค่าต่ำสุดของ $\Delta\varepsilon$ เท่ากับ $2 \mu\varepsilon$

พิสัยของระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว ΔV_M มีค่าต่ำสุดเมื่อทดสอบที่ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range) ΔK ต่ำสุด และความยาวรอยร้าวต่ำสุด ในที่นี้กำหนด ค่าต่ำสุดของ ΔK เท่ากับ $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ซึ่งเท่ากับค่าพิสัยของตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม (threshold stress intensity factor range) ของวัสดุนี้ [5] และความยาวรอยร้าว a เท่ากับ 13.16 มม ซึ่งเป็นความยาวรอยร้าวเริ่มต้นในการทดสอบ พิสัยของระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว ΔV_M คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [1]

$$\Delta V_M = \frac{19.75 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \Delta K \sqrt{W}}{(1-\alpha)^{\frac{1}{2}} (2+\alpha)} \cdot \frac{g(\alpha)}{f(\alpha)} \quad (16)$$

$$f(\alpha) = 0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4$$



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแบบ Compact Tension (CT)

$$g(\alpha) = 0.5 + 0.192\alpha + 1.385\alpha^2 - 2.919\alpha^3 + 1.842\alpha^4$$

โดย $\alpha = a/W$

E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น (สำหรับวัสดุที่ใช้ คือ 68 GPa)

แทนค่าที่กำหนดลงในสมการที่ (16) จะได้ ΔV_M เท่ากับ 0.0516 มม
กำหนดจำนวนจุดข้อมูลที่ต้องการคือ 20 จุด ดังนั้น $2\Delta\delta$ จะมีค่าเท่ากับ
 $0.0516/20 = 0.00258$ มม ดังนั้น ความไวที่ต้องการคือ

$$S_d = \frac{2 \times 10^{-6}}{2.6 \times 10^{-3}} = 7.7 \times 10^{-4} \text{ มม}^{-1}$$

ข) การคำนวณพิสัยใช้งานที่ต้องการ δ_d

กำหนดพิสัยใช้งานที่ต้องการให้เท่ากับ ระยะแฉกตัวที่ปลายคลิป
เกจในสภาวะทดสอบที่ ΔK มีค่าสูงสุด และความยาวรอยร้าวมากที่สุด
ในที่นี้กำหนด ค่าสูงสุดของ ΔK เท่ากับ $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ซึ่งเท่ากับค่า
ความต้านทานการแตกหักของวัสดุที่เลือก [5] และความยาวรอยร้าว a
เท่ากับ $0.8W = 40.6$ มม ซึ่งถือว่าครอบคลุมช่วงการเก็บข้อมูลความ
ยาวรอยร้าว เมื่อแทนค่าที่กำหนดลงในสมการที่ (16) จะได้ ΔV_M เท่า
กับ 0.8 มม ดังนั้น กำหนดพิสัยใช้งานที่ต้องการคือ

$$\delta_d = 1 \text{ มม}$$

3.2 การคำนวณมิติของคลิปเกจ

การคำนวณมิติของคลิปเกจใช้วิธีการออกแบบขั้นเหมาะสมที่สุด
โดยเริ่มจากการกำหนด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และ
ฟังก์ชันบังคับ (constraint function) แล้วหาคำตอบโดยใช้โปรแกรม
สำเร็จรูป MathCad TM

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดคือ ต้องการให้คลิปเกจมีปริมาตร V
น้อยที่สุด จากรูปที่ 2 จะได้

$$V = hb_1L_1 + \frac{1}{2} \left(b_1 + \frac{b_1}{L_1}(L_1 + L_2) \right) L_2 h \quad (17)$$

ฟังก์ชันบังคับ มีดังนี้:-

ก) ความเค้นสูงสุดของคานคลิปเกจมีค่าไม่เกิน 75 เปอร์เซนต์ ของ

ความเค้นคราก (yield stress) σ_y

$$\sigma_{\max} \leq 0.75\sigma_y \quad (18)$$

สำหรับงานวิจัยนี้ วัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจคือ อะลูมิเนียมผสม 7075-T651
ซึ่งมี σ_y เท่ากับ 461 MPa [5]

ข) พิสัยการวัดจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับพิสัยใช้งานที่ต้องการ

$$\delta_r \geq \delta_d \quad (19)$$

ในที่นี้กำหนด แรงหนีบสูงสุด และต่ำสุด เท่ากับ 31.7 นิวตัน [4] และ
10 นิวตัน (ใช้ดุลพินิจ) ตามลำดับ

ค) ความไวจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับความไวที่ต้องการ

$$S \geq S_d \quad (20)$$

ง) คานคลิปเกจต้องไม่เสียหายเนื่องจากการล้า

แอมพลิจูดความเค้นจะต้องไม่เกินขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ
ที่ทำคลิปเกจ

$$\sigma_a \leq \sigma_e \quad (21)$$

สำหรับอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 σ_{e0} เท่ากับ 160 MPa ที่อายุ
ความล้า 10^7 รอบ [5]

จ) เกจความเครียดต้องไม่เสียหายเนื่องจากการล้า

หมายความว่า แอมพลิจูดความเครียดจะต้องไม่เกินขีดจำกัดความ
ทนทาน (ในรูปของความเครียด) ของวัสดุที่ทำเกจความเครียด แต่เนื่อง
จากไม่ทราบ σ_u ของวัสดุที่ทำเกจความเครียด จึงละเลยผลของ
ความเครียดเฉลี่ย ดังนั้นเกณฑ์การออกแบบจึงอยู่ในรูป

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{e0} \quad (22)$$

โดย ε_{e0} คือ ขีดจำกัดความทนทานของเกจความเครียดที่ความเครียด
เฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (ผู้ผลิตกำหนดที่ $1,500 \mu\varepsilon$ ที่อายุ 10^7 รอบ)

ฉ) ความกว้างของคานคลิปเกจ

$$8 \leq b_1 \leq 25 \text{ (มม)} \quad (23)$$

ขอบเขตล่างกำหนด (โดยดุลพินิจ) จากเงื่อนไขว่า คลิปเกจต้อง
หนีบชิ้นงานได้อย่างมั่นคง (ไม่พลิก) ส่วนขอบเขตบนกำหนดจากความ
หนาของชิ้นงานทดสอบ

ช) ความหนาของคานคลิปเกจ

$$1 \leq h \leq 1.5 \text{ (มม)} \quad (24)$$

ขอบเขตล่างกำหนดจาก ความแม่นยำในการสร้าง ชิ้นงานวิจัยนี้ใช้
วิธีตัดด้วยลวด (wire cut) ส่วนขอบเขตบนกำหนดจากเงื่อนไขว่าคลิป
เกจต้องติดตั้งกับชิ้นงานได้สะดวก กล่าวคือ คานคลิปเกจ (บนและล่าง)
ต้องสามารถถอดปากรอยบาก (notch) ได้ ชิ้นงานทดสอบที่ใช้มีรอย
บากกว้าง 3 มม (ดูรูปที่ 3 ประกอบ)

ซ) ความยาวของคานคลิปเกจ

$$L_1 \geq 20 \text{ (มม)} \quad (25ก)$$

$$L_2 \geq 13 \text{ (มม)} \quad (25ข)$$

$$\frac{L_1}{L_2} \geq 1.5 \quad (25ค)$$

ขอบเขตล่างของ L_1 กำหนดจากเงื่อนไขว่า ผู้ใช้มีพื้นที่เพียงพอ
สำหรับบีบคานคลิปเกจด้วยนิ้วชี้และนิ้วหัวแม่มือได้สะดวก ขอบเขต
ล่างของ L_2 กำหนด (โดยดุลพินิจ) จากเงื่อนไขว่า ต้องมีขนาดมากกว่า
ความยาวฐานของเกจความเครียด งานวิจัยนี้เลือกใช้เกจความเครียด
120 โอห์ม มีขนาดฐานเท่ากับ $2.8 \times 9.4 \text{ มม}^2$ (ขนาดกริด $5 \times 1.4 \text{ มม}^2$)
อัตราส่วนระหว่างความยาวทั้งสองมีไว้เพื่อคุมสัดส่วนให้ดูสวยงาม

ฅ) ระยะห่างระหว่างคานคลิปเกจ

$$H \geq 5 \text{ (มม)} \quad (26)$$

ขอบเขตล่างของ H กำหนด (โดยดุลพินิจ) จากเงื่อนไขว่า รอยบัดกรี
และสายไฟที่อยู่ระหว่างคานคลิปเกจต้องไม่สัมผัสกันขณะที่คานคลิป-

เกจแอ่นตัวมากที่สุด เพื่อป้องกันการลัดวงจร และขัดขวางการแอ่นตัวของคานคลิปเกจ ซึ่งจะทำให้ผลการวัดผิดพลาด

ผลเฉลยจากระเบียบวิธีออกแบบชิ้นเหมาะสมที่สุด คือ $b_1 = 8$ มม, $h = 1.48$ มม, $L_1 = 20$ มม และ $L_2 = 13$ มม ถ้าแทนผลเฉลยที่ได้ลงในสมการที่ (8), (11), (12) และ (13) จะได้ $b_2 = 13.2$ มม, $S = 7.7 \times 10^{-4}$ มม⁻¹, $\delta_r = 2.8$ มม และ $H = 5.6$ มม ตามลำดับ

3.3 การออกแบบชิ้นส่วนอื่น ๆ

ส่วนอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การออกแบบแผ่นป้องกันเกจ ความเครียด การออกแบบทางเดินสายไฟเพื่อให้ดูเรียบร้อย การเลือกขนาดของสลักเกลียวและแหวนรองที่เหมาะสม รูปที่ 4 แสดงคลิปเกจคานคู่รีเวียที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

4. การสอบเทียบ

คลิปเกจที่สร้างถูกสอบเทียบโดยเครื่องสอบเทียบคลิปเกจ (clip gage calibrator) งานวิจัยนี้ออกแบบเครื่องมือนี้เอง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องสอบเทียบนี้โดยสรุป จากนั้นจะกล่าวถึงผลการสอบเทียบทั้งในส่วนของเครื่องสอบเทียบ และส่วนของคลิปเกจคานคู่รีเวีย

4.1 เครื่องสอบเทียบคลิปเกจ

เครื่องสอบเทียบคลิปเกจที่สร้าง แสดงอยู่ในรูปที่ 5 จากรูปชิ้นส่วนของเครื่องมือมีดังนี้:- ฐานเครื่อง, แท่นรอง, ไมโครมิเตอร์ และตัวจับคลิปเกจ ตัวจับคลิปเกจอันแรกยึดแน่นกับก้านไมโครมิเตอร์ ขณะที่ตัวจับอีกอันยึดแน่นกับเพลาคูซึ่งอยู่กับที่ คลิปเกจจะถูกหนีบไว้ระหว่างตัวจับทั้งสอง ดังนั้นระยะเคลื่อนตัวเชิงเส้นที่เกิดจากการหมุนไมโครมิเตอร์จะเท่ากับระยะเคลื่อนตัวของตัวจับคลิปเกจ

4.2 การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบคลิปเกจ

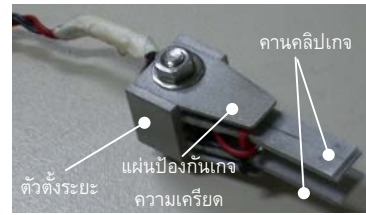
วัตถุประสงค์ของการสอบเทียบคือ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่อ่านจากไมโครมิเตอร์กับระยะที่ตัวจับคลิปเกจเคลื่อนที่ การสอบเทียบใช้เกจบล็อก (gage block) เป็นระยะอ้างอิง โดยวางไว้ระหว่างตัวจับคลิปเกจ จากนั้นหมุนด้ามไมโครมิเตอร์จนกระทั่งตัวจับคลิปเกจแตะกับเกจบล็อก แล้วอ่านค่าที่ด้ามไมโครมิเตอร์ ทำเช่นนี้ซ้ำแต่เปลี่ยนขนาดเกจบล็อกจนกระทั่งถึงพิสัยการวัดของเครื่องมือ การสอบเทียบทำทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำค่าที่อ่านมาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนตัวของตัวจับคลิปเกจ δ_{clip} และระยะที่อ่านจากไมโครมิเตอร์ δ_m จากการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด คือ

$$\delta_{clip} = 1.00013\delta_m \quad (\text{มม}) \quad (27)$$

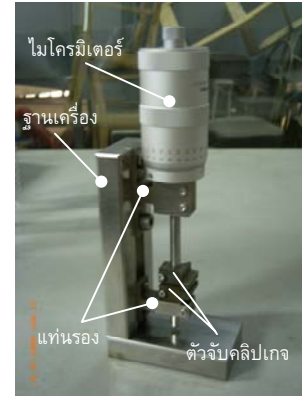
โดยมีความผิดพลาดจากความเป็นเชิงเส้น (linearity error) ไม่เกิน 3.1 ไมครอน (มาตรฐาน [1] กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.5 ไมครอน)

4.3 การสอบเทียบคลิปเกจ

วัตถุประสงค์ของการสอบเทียบคือ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจ การสอบเทียบทำโดยหนีบคลิปเกจกับเครื่องสอบเทียบ จากนั้นหมุนก้านไมโครมิเตอร์เพื่อแปรค่าระยะแอ่นตัวของคลิปเกจ อ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากมิเตอร์วัดความเครียด ทำเช่นนี้ซ้ำจนถึงพิสัยการวัดของคลิปเกจ การสอบเทียบทำทั้งหมด 5 ครั้ง แต่ละครั้งจะถอดคลิปเกจจากตัวจับแล้วใส่



รูปที่ 4 คลิปเกจคานคู่รีเวีย



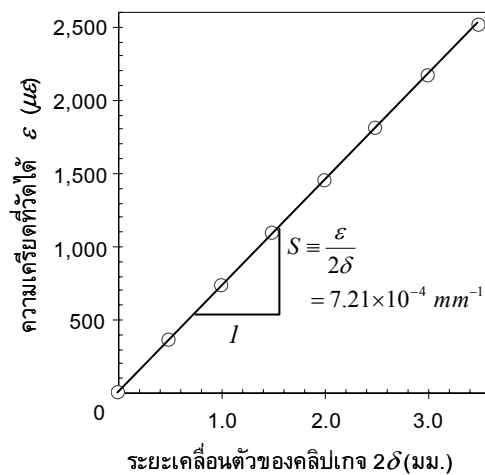
รูปที่ 5 เครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ (วางตั้ง)

กลับเข้าที่เดิม ความเครียดที่วัดได้จากการสอบเทียบแต่ละครั้งจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย ผลการสอบเทียบแสดงอยู่ในรูปที่ 6 จากรูปความชันของกราฟคือความไวที่แท้จริงของคลิปเกจ ซึ่งเท่ากับ 7.21×10^{-4} มม⁻¹ โดยมีความผิดพลาดจากความเป็นเชิงเส้นไม่เกิน 9.2 ไมครอน (มาตรฐาน [1] กำหนดไว้ไม่เกิน 2.5 ไมครอน เมื่อสอบเทียบกับเครื่องสอบเทียบที่ได้รับการรับรอง)

5. การประยุกต์ใช้งาน และการวิเคราะห์ผล

5.1 การทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงาน

คอมพลายแอนซ์ C คือ อัตราส่วนของระยะเคลื่อนตัวต่อภาระ ในที่นี้ ต้องการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ที่ตำแหน่งปากรอยร้าว การทดสอบทำโดยการดึงชิ้นงานที่มีรอยร้าว และบันทึกข้อมูลภาระ-ระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว ส่วนกลับของความชันของกราฟ คือ ค่าคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานที่ความยาวรอยร้าว นั้น ๆ



รูปที่ 6 ผลการสอบเทียบคลิปเกจ

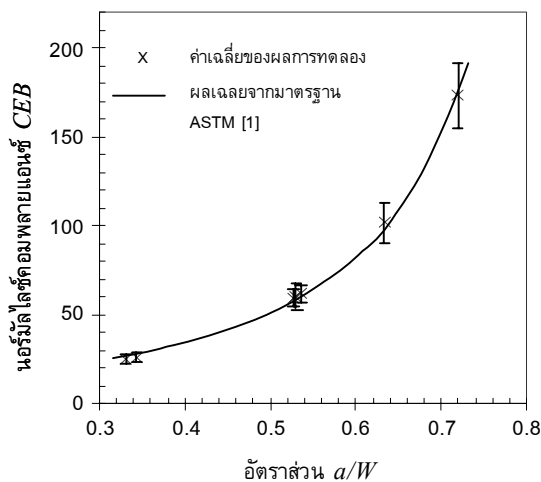
รูปที่ 7 แสดงผลการวัดคอมพลาเยนซ์ของชิ้นงานทดสอบที่มีความยาวรอยร้าวต่างกัน และแสดงขอบเขตข้อมูลในระดับความมั่นใจ 95 เปอร์เซนต์ จากรูปค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบใกล้เคียงกับผลเฉลี่ยของ ASTM โดยมีความคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 5.1 เปอร์เซนต์

5.2 การทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก K_{Ic}

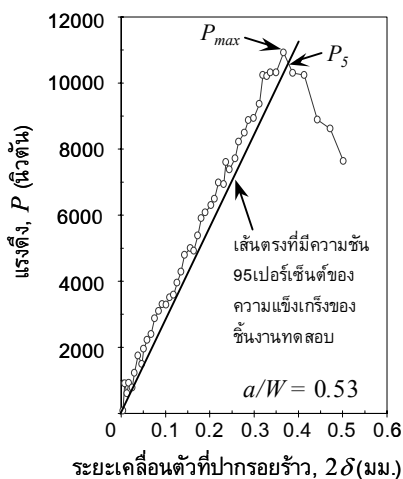
การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM E399 [1] รูปที่ 8 แสดงข้อมูลการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูล การทดสอบทำทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ค่า K_{Ic} เท่ากับ 20.43, 20.10 และ 20.21 $MPa\sqrt{m}$ ซึ่งค่าเฉลี่ยคือ 20.25 $MPa\sqrt{m}$ ค่าที่ได้แตกต่างจากค่า K_{Ic} ในเอกสารอ้างอิง [5] (24 $MPa\sqrt{m}$) เล็กน้อย สาเหตุน่าจะมาจากการรวมวิธีการผลิตวัตถุที่ดูไม่เหมือนกันมากกว่าจะมาจากความผิดพลาดของข้อมูล หรือเครื่องมือวัด

5.3 การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

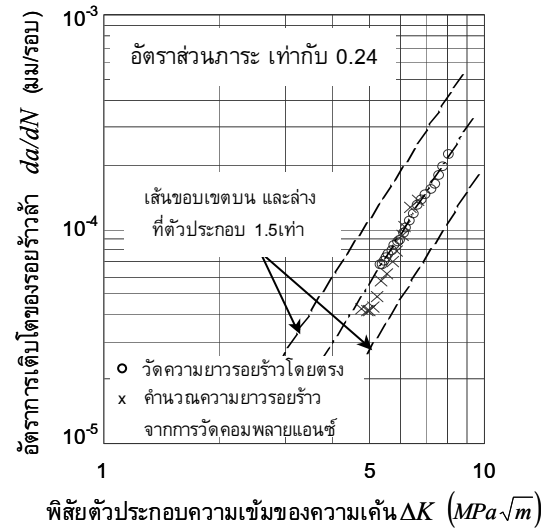
การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM E647 [3] พิสัยภาระที่ใช้คือ 4,780 นิวตัน และอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.24 ในการทดสอบ ข้อมูลระยะเคลื่อนตัวที่คลิบเกจวัดจะถูกบันทึกตามระยะเวลาที่กำหนด ข้อมูลภาระ-ระยะเคลื่อนตัว ที่รอบภาระใด ๆ จะถูกนำมาหาคอมพลาเยนซ์และความยาวรอยร้าวที่รอบภาระนั้นต่อไปโดยใช้ความสัมพันธ์ในรูป



รูปที่ 7 ผลการทดสอบหาคอมพลาเยนซ์ของชิ้นงาน



รูปที่ 8 กราฟแรง-ระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว



รูปที่ 9 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าว

ที่ 7 ข้อมูลความยาวรอยร้าวที่จำนวนรอบภาระต่าง ๆ จะถูกนำมาคำนวณหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว ผลการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 9 โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดความยาวรอยร้าวโดยตรง เนื่องจากผลการทดสอบที่ใช้คลิบเกจอยู่ภายในขอบเขตตัวประกอบ 1.5 เท่า (ซึ่งยอมรับในทางปฏิบัติ) ของผลการทดสอบที่วัดโดยตรง จึงสรุปได้ในเชิงคุณภาพว่าผลลัพธ์ของสองวิธีนี้ไม่ต่างกัน

6. สรุป

งานวิจัยออกแบบคลิบเกจคานคู่เรียวโดยใช้วิธีออกแบบขั้นเหมาะสมที่สุด การหาผลเฉลยจึงทำได้อย่างรวดเร็ว ความแม่นยำของ คลิบเกจ และเครื่องสอบเทียบคลิบเกจที่สร้างขึ้น ยังมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน [1] ยอมรับ อย่างไรก็ดี ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับใช้งาน องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางออกแบบคลิบเกจรูปแบบอื่น ๆ หรือดัดแปลงให้มีพิสัยการวัด และความไวที่เหมาะสมกับการใช้งานประเภทอื่น เพื่อช่วยลดการนำเข้าเครื่องมือของต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM E399-90. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. ASTM, 1992.
- [2] ASTM E813-89a. Standard test method for J_{Ic} . A measure of fracture toughness. ASTM, 1992.
- [3] ASTM E647-95a. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. ASTM, 1995.
- [4] Douglas, M.F., Raymond, T.B. and Srawley, J.E. Design and use of displacement gage for crack-extension measurements. NASA TND-3724, November 1966.
- [5] Dowling, N.E. Mechanical behavior of materials. Prentice-Hall, 1993.