

ผลของรูปแบบและขนาดรูเจาะที่มีต่อการชะลอการร้าวความล้าในเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัด

Effect of Stop-hole Arrangement and Diameter on Crack Growth Retardation of Steel Plate under Flexural Loading

สัจจา จันทรักษา ดนัย สุขพลับพลา และ ปิยะ โชติกไกร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
E-mail: satja.j@ku.th, danai3010@hotmail.com, fengpyc@ku.ac.th



บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลรูปแบบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะแบบเดี่ยว รูเจาะแบบคู่ และรูเจาะแบบขนานข้างที่มีต่อการยืดอายุความล้าของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดัดนอกระนาบ ผลของรูปแบบการเจาะรูที่มีต่อการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้รับการทดสอบในตัวอย่างแผ่นเหล็กจำนวนหกตัวอย่าง ที่มีรอยร้าวทะลุความหนากลางแผ่นเหล็กภายใต้อัตราส่วนความเค้น -1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว และความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะ ผลการทดลอง และการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเจาะรูสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้แรงดัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาการสัมผัสของผิวรอยร้าวให้ตัวประกอบความเข้มของความเค้น และทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้อย่างเหมาะสม ความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสำหรับขนาดรูเจาะที่เท่ากันรูเจาะแบบขนานข้างให้ความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะต่ำสุด และมีอายุความล้าของรอยร้าวออกจากรูเจาะมากกว่ารูเจาะแบบคู่และแบบเดี่ยว ตามลำดับ ตำแหน่งรูเจาะแบบขนานข้างที่มีระยะระหว่างปลายรอยร้าวและจุดศูนย์กลางรูเจาะเท่ากับ -0.25 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวได้สูงสุด



คำสำคัญ:

การชะลอการขยายตัวของรอยร้าว; รอยร้าวความล้า; ไฟไนต์เอลิเมนต์; รูเจาะ; ตำแหน่งรูเจาะ



Abstract

This paper presents the effects of stop-hole arrangement and diameter (D) of a single stop-drill hole (SDH), double SDH, and crack flank holes (CFH) on the fatigue life



extension of steel plate under out-of-plane flexural loading. The effect of stop-hole configurations on fatigue crack retardation was experimentally investigated on six steel plate specimens with a central through-thickness crack and a stress ratio (R) of -1. Finite element models were developed to evaluate the stress intensity factor at crack tips and the stress concentration around SDH. The experimental and analytical results showed that SDH effectively retarded the propagation of fatigue cracks under flexural loading. The finite element models considering crack surface interference provided a reasonable estimate of the stress intensity factor at crack tips and a prediction of the crack growth direction. The stress concentration around stop holes decreased with an increase in D . For the same D , CFH gave the lowest stop-hole stress concentration, which provided the longest fatigue life initiation from the drilled hole, followed by double SDH and single SDH, respectively. The CFH with a distance between the crack tip and center of the drilled holes of $-0.25D$ provided the most significant fatigue crack retardation.

Keywords: crack growth retardation; fatigue crack; finite element; stop-drill hole; stop-hole location

1. บทนำ

โครงสร้างเหล็กเมื่อมีแรงกระทำซ้ำซ้อนอาจเกิดรอยร้าวความล้าจากตำแหน่งที่มีความเค้นหนาแน่น (Stress Concentration, K_t) สูง รอยร้าวจะมีการขยายความยาว และความลึกตามจำนวนรอบของแรงกระทำจนอาจกลายเป็นรอยร้าวทะลุความหนา (through-thickness crack) ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนัก และความปลอดภัยในการใช้โครงสร้างสำหรับโครงสร้างที่ไม่สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนทดแทนหรือเสริมกำลังได้ทันทีหลังจากการตรวจพบรอยร้าวจะมีความจำเป็นต้องชะลอหรือหยุดการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้น การเจาะรู (stop drill hole, SDH) เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการชะลอ หรือ

หยุดการขยายตัวของรอยร้าวความล้าด้วยการเปลี่ยน stress singularity ที่ปลายรอยร้าวให้กลายเป็นรอยบาก (notch) [1] การเกิดรอยร้าวใหม่ออกจากรูเจาะจะต้องอาศัยจำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น การเจาะรูจึงช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ โดยประสิทธิภาพของการเจาะรูในการยืดอายุความล้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาด และตำแหน่งของรูเจาะ ขนาดของรอยร้าว ประเภทแรงกระทำ และความเค้นคงค้างรอบรูเจาะ ในอดีตได้มีการศึกษา รูปแบบการเจาะรูชะลอความล้าในทางปฏิบัติของสะพานเหล็กที่บริเวณคานขวาง ผังของสัน (Wall Ribs) และเอวของคานเหล็ก [2-4] และการศึกษา

ประสิทธิภาพของการเจาะรูหนึ่งรู [5] และหลายรู [6-8] ในการชะลอรอยร้าวความล้าภายใต้แรงดึงในห้องปฏิบัติการ

การเจาะรูแบบหนึ่งรู หรือ Single SDH เป็นการเจาะรูเดียวที่บริเวณปลายรอยร้าว โดยอาจมีตำแหน่งของรูเจาะที่ปลายรอยร้าว หรือเยื้องปลายรอยร้าว การเจาะรูเยื้องปลายรอยร้าวนอกจากจะสามารถช่วยยืดอายุความล้าแล้ว ยังช่วยเบี่ยงเบนทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้ Hu *et al.* [9] ศึกษาผลของขนาด ตำแหน่ง และรูปร่างของ Single SDH ในการยืดอายุความล้าของตัวอย่าง Compact Tension Specimen (CT) ด้วยการเจาะรูเยื้องจากปลายรอยร้าว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขนาดรูเจาะช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของรอยร้าวและยืดอายุความล้าได้มากขึ้น โดยรูเจาะวงรีมีประสิทธิภาพในการยืดอายุความล้าได้ดีกว่ารูเจาะวงกลม Song and Shieh [10] แสดงให้เห็นว่าอายุความล้าของตัวอย่างทดสอบ CT ที่มีการเจาะรูแบบ Single SDH ที่ตำแหน่งปลายรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นตามขนาดรูเจาะ วิธีการเจาะรูแบบ single SDH ที่ตำแหน่งปลายรอยร้าวมีประสิทธิภาพในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้แรงดึงตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว (mode 1) แรงเฉือนบนระนาบรอยร้าว (mode 2) และภายใต้แรงกระทำในหลายทิศทาง (mixed mode) [11] Razavi *et al.* [12] ศึกษาผลของขนาด และตำแหน่งรูเจาะแบบ Double SDH ซึ่งเป็นการเจาะรูสองรูที่มีขนาดเท่ากัน ซ้อนทับกันบนปลายรอยร้าวที่มีต่ออายุความล้าของเหล็กกำลังสูงภายใต้แรงดึงกระทำตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า รูเจาะแบบ Double SDH

สามารถยืดอายุความล้าได้ดีกว่าการเจาะรูแบบ Single SDH ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยระยะเยื้องระหว่างระนาบรอยร้าว และจุดศูนย์กลางรูเจาะเท่ากับ 0.75 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสามารถยืดอายุความล้าได้สูงสุด และอายุความล้าเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ การชะลอการขยายตัวของรอยร้าวด้วยการเจาะรูสองรูขนาดด้านข้างกับแนวการขยายตัวของรอยร้าว หรือรูเจาะแบบ Crack Flank Holes (CFH) ภายใต้แรงดึงตั้งฉากกับระนาบรอยร้าวได้รับ การวิเคราะห์ โดย Ayatollahi *et al.* [13] เจาะแบบ CFH ที่มีแนวของขอบรูเจาะทั้งสอง อยู่ที่ปลายรอยร้าวสามารถยืดอายุความล้าได้ดีกว่าตำแหน่งอื่นของรูเจาะ เนื่องจากตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor, K) ที่ปลายรอยร้าวลดลง เมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวเข้าไปในพื้นที่ระหว่างรูเจาะ โดยอายุความล้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างในแนวตั้งระหว่างระนาบรอยร้าว และขอบรูเจาะที่ลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะที่เพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพของการเจาะรูในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าภายใต้แรงดึงได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ ในการยืดอายุความล้า โดยเฉพาะรอยร้าวภายใต้แรงดัดออกนอกกระนาบ (Out-of-Plane Bending) ซึ่งเป็นลักษณะของแรงกระทำบนแผ่นพื้นสะพาน [14] ยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยแรงดัดออกนอกกระนาบจะทำให้เกิดการเปิดและปิดของรอยร้าว และความเค้นมีค่าไม่คงที่ตลอดความหนา การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของ



การเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ และผลของตำแหน่งและขนาดของรูเจาะที่มีต่อการยืดอายุความล้าของเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัด โดยอาศัยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยการทดสอบความล้าของตัวอย่างเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัดที่ได้รับการเจาะรูชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้ารูปแบบต่าง ๆ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยการดำเนินการ 2 ส่วน คือ 1) การสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบ และ 2) การศึกษาผลของขนาดและตำแหน่งรูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH ที่มีต่อการยืดอายุความล้า

2.1 การทดสอบความล้า

ตัวอย่างในการทดสอบความล้าทำจากเหล็กแผ่นชั้นคุณภาพ SS400 ตามมาตรฐานมอก. 1479-2558 [15] มีขนาดความกว้าง 300 มิลลิเมตร ความยาว 1,200 มิลลิเมตร และความหนา (t) 12 มิลลิเมตร จำนวนหกตัวอย่าง ตัวอย่างมีรอยบากทะลุความหนาเริ่มต้นยาว 130 มิลลิเมตร และกว้าง 2 มิลลิเมตร (รัศมีความโค้งปลายรอยบาก (r) 1 มิลลิเมตร) ที่กลางแผ่น (ก่อนทำรอยบากมีการเจาะรูนำร่องรอยบากรัศมี (r) 1 มิลลิเมตร เพื่อทำรอยบากได้สะดวก) ตัวอย่างติดตั้งแบบยึดแน่นที่จุดรองรับและติดตั้งมอเตอร์สั่นเขย่า (Vibration Motor) ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง (ภาพที่ 1ก) ด้วยสลักเกลียวขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวนสี่ตัว มอเตอร์สั่นเขย่าให้แรง

กระทำซ้ำซ้อนกับตัวอย่างด้วยความถี่ 25 Hz จากการเหวี่ยงของมวลภายใน โดยให้แรงกระทำในรูปแบบ Sine Wave มีขนาดของแรงกระทำสูงสุด 1,099 กิโลกรัม และสามารถปรับระดับค่าแรงกระทำได้ มอเตอร์สั่นเขย่าให้แรงดัดกระทำบนตัวอย่างด้วยอัตราส่วนความเค้น (stress ratio, R) -1 ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดความเครียดด้วย Strain Gages จำนวนสามตัว ที่ตำแหน่งห่างจากปลายรอยบาก 10 มิลลิเมตร (SG1) 35 มิลลิเมตร (SG2) และ 60 มิลลิเมตร (SG3) โดยใช้ความถี่การเก็บข้อมูลความเครียด 500 Hz

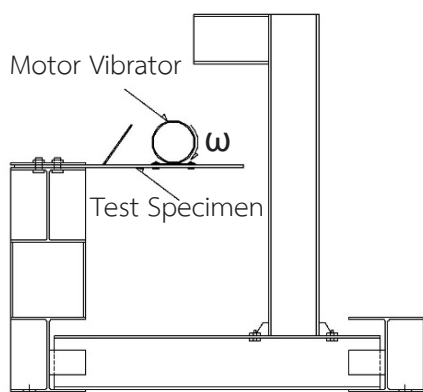
ตัวอย่างทดสอบได้รับการทดสอบความล้าแบบ High-cycle ภายใต้ช่วงความเค้นปกติสองระดับ คือ 90 MPa และ 120 MPa (ตารางที่ 1) มีการให้แรงกระทำซ้ำซ้อนในช่วงที่ 1 เพื่อทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นออกจากขอบแต่ละฝั่งของรอยบาก (a_1 และ a_2) ยาว 10 มิลลิเมตร (ภาพที่ 1ข) โดยมีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบแรงกระทำในช่วงแรก 330,000 รอบ และ 405,000 รอบในตัวอย่าง S120 และ S90 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการเจาะรูชะลอการขยายตัวของรอยร้าว โดยสามารถแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1) ไม่มีการเจาะรู 2) รูเจาะแบบ single SDH ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (D) 2 มม. ที่ปลายรอยร้าวความล้า ($H = 0.5D$ และ $V = 0$) (ภาพที่ 1ค) และ 3) รูเจาะแบบ double SDH ขนาด D เท่ากับ 2 มม. ที่ปลายรอยร้าวความล้า โดยมีระยะ $H = 0.5D$ และ $V = 0.25D$ เมื่อ H และ V คือ ระยะห่างจากปลายรอยร้าวถึงจุดศูนย์กลางรูเจาะในทิศตามแนวรอยร้าวและตั้งฉากกับแนวรอยร้าว ตามลำดับ การทดสอบเลือกตำแหน่งรูเจาะที่ $H = 0.5D$

ห่างจากปลายรอยร้าว เพื่อป้องกันผลกระทบของความคลาดเคลื่อนในการกำหนดตำแหน่งปลายรอยร้าวที่อาจมีต่อผลการทดสอบจากการใช้รูเจาะขนาดเล็ก ในช่วงที่ 2 ของการทดสอบตัวอย่างทดสอบ

ได้รับการทดสอบความล้าจนกระทั่งมีความยาวรอยร้าวรวม (a) ประมาณ 170 มิลลิเมตร หรือมีความยาวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ 10 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

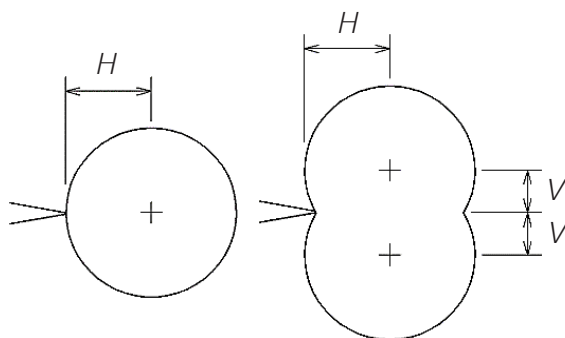
ตัวอย่าง	ช่วงความเค้นปกติ (MPa)	รูปแบบการเจาะรู	ความยาวรอยร้าวก่อนเจาะรู (a, มิลลิเมตร)	H, V
S90H0-1	90	ไม่มีการเจาะรู	-	-
S90H0-2	90	ไม่มีการเจาะรู	-	-
S90H1	90	Single SDH	153	0.5D, 0
S90H2	90	Double SDH	152	0.5D, 0.25D
S120H1	120	Single SDH	152	0.5D, 0
S120H2	120	Double SDH	149.5	0.5D, 0.25D



ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



ข) การวัดระยะความยาวรอยร้าว

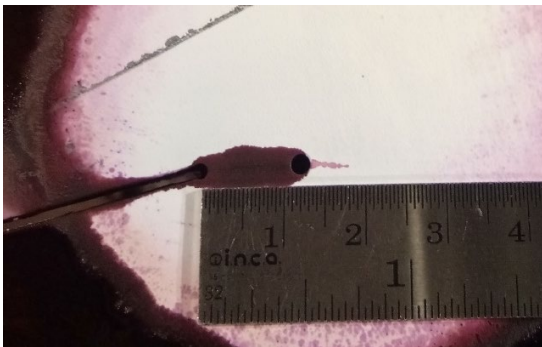


ค) ตำแหน่งรูเจาะของการทดสอบ

ภาพที่ 1 การทดสอบความล้าของตัวอย่างทดสอบ



การระบุตำแหน่งปลายรอยร้าว และวัดความยาวรอยร้าวระหว่างการทดสอบใช้วิธีสารแทรกซึม (penetrant testing) ร่วมกับกล้อง microscope ที่มีกำลังขยาย 50 เท่า และมีความละเอียดในการวัดความยาว 0.02 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2) โดยมีการวัดความยาวรอยร้าวที่ถูกรอบแรงกระทำ 45,000 รอบ



ก) วิธีสารแทรกซึม (penetrant testing)



ข) กล้อง microscope

ภาพที่ 2 การระบุตำแหน่งและวัดความยาวรอยร้าว

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาตัวประกอบ

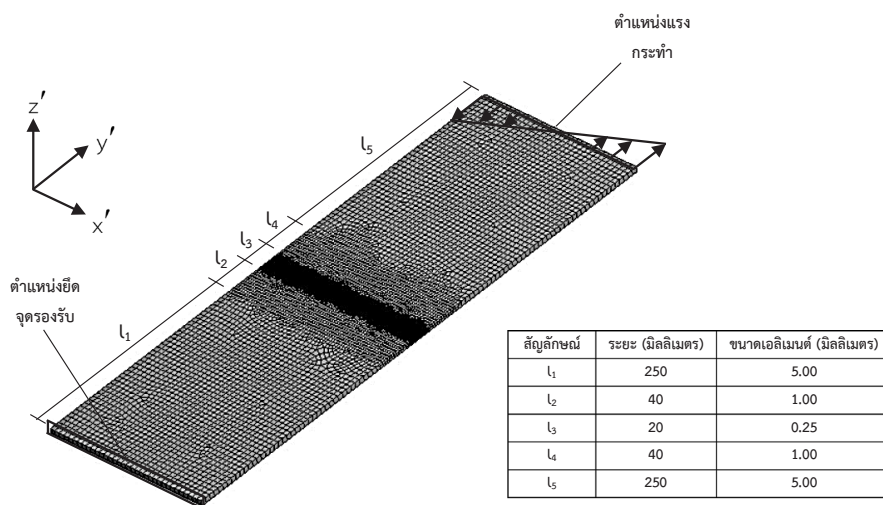
ความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K) ที่ปลายรอยร้าว และความเค้นหนาแน่น (stress concentration, K_t) รอบรูเจาะ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการประเมินการขยายตัวของรอยร้าวและการเกิดรอยร้าวออกจากรูเจาะ ตามลำดับ แบบจำลองตัวอย่างเหล็กแผ่นได้รับการพัฒนาในโปรแกรม ANSYS โดยสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นสองกลุ่ม คือ 1) แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบ และ 2) แบบจำลองสำหรับศึกษาผลของตำแหน่งและขนาดรูเจาะที่มีต่อการยืดอายุความล้า แบบจำลองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีรอยร้าวออกจากรอยบากยาว 10 มิลลิเมตร ตามการทดสอบความล้า ในช่วงที่ 1 โดยแบบจำลองกลุ่มที่ 1 มีรูปแบบรูเจาะตามการทดสอบในตารางที่ 1 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 มีขนาด D และตำแหน่งรูเจาะแตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นสามกลุ่มย่อย (ตารางที่ 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ ต่อการยืดอายุความล้า (กลุ่มที่ 2ก) และผลของตำแหน่งการเจาะรู (ระยะ V และ H) ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าวเข้ารูเจาะ และการเกิดรอยร้าวออกจากรูเจาะแบบ CFH (กลุ่มที่ 2ข และ 2ค)

แบบจำลองทั้งสองกลุ่มใช้เอลิเมนต์ SOLID186 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 200 GPa และอัตราส่วนของปัวซอง 0.3 บริเวณใกล้รอยบากและรูเจาะ (ห่างจากรอยบากและรูเจาะไม่เกิน 10 มิลลิเมตร) ใช้เอลิเมนต์ละเอียดขนาด 0.25 มิลลิเมตร. (ภาพที่ 4ก) บริเวณห่างจากรอยบากที่อยู่ภายใต้ของแรงดัด ใช้เอลิเมนต์ขนาด 1 มิลลิเมตร พื้นที่จุดรองรับและพื้นที่ติดตั้งมอเตอร์ใช้เอลิเมนต์ขนาด 5 มิลลิเมตร

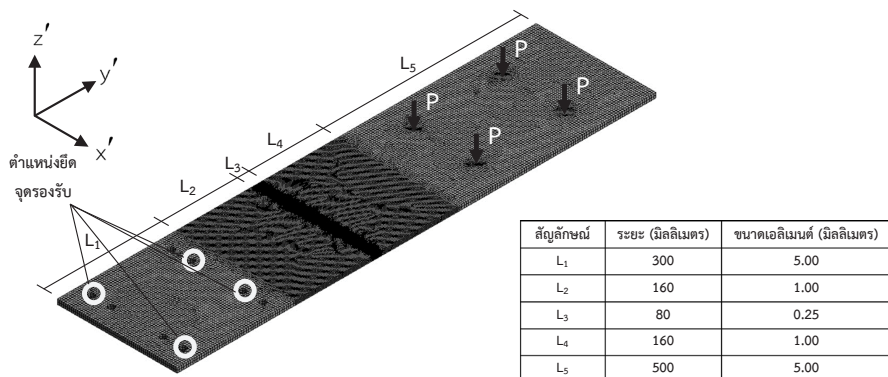
รอบรูเจาะ (ภาพที่ 4ค) มีการแบ่งเอลิเมนต์ในแนวรัศมีวงกลมออกเป็น 60 ส่วนเท่า ๆ กัน (6 องศาต่อเอลิเมนต์) [16,17] และที่ตำแหน่งปลายรอยร้าว (ภาพที่ 4ข) มีการแบ่งเอลิเมนต์ในแนวรัศมีวงกลมออกเป็น 30 ส่วนเท่า ๆ กัน (12 องศาต่อเอลิเมนต์) [16,17] ผิวรอยร้าวใช้ Contact แบบ Frictional [18] ในการป้องกันการซ้อนทับกันของผิวรอยร้าว ภายใต้แรงดัด ตำแหน่งจุดรองรับของแบบจำลองมีการจำกัดการเคลื่อนตัว และจำกัดการหมุนในแนวแกน x' แกน y' และแกน z' (Fixed Support) แรงกระทำจากมอเตอร์จำลองด้วยแรงกระทำแบบกระจาย (P) ขนาด 0.537 MPa และ 0.396 MPa สำหรับตัวอย่าง S120 และ S90 ตามลำดับ ในทิศ $\pm U_z$, บนพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22×22 มิลลิเมตร

จำนวนสี่จุด ตามตำแหน่งการยึดมอเตอร์เข้ากับตัวอย่างทดสอบ

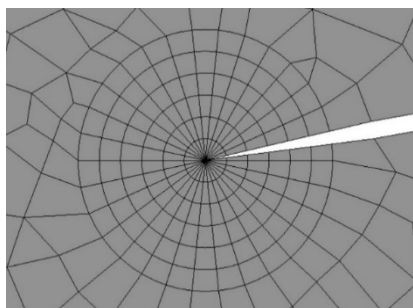
แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้นำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต [19] ที่ศึกษาผลกระทบของการสัมผัสของผิวรอยร้าวที่มีต่อตัวประกอบความเข้มของความเค้น โดยใช้แผ่นเหล็กที่มีอัตราส่วนความยาวรอยร้าวกลางแผ่นต่อความกว้างแผ่น (a/w) 0.5 รับโมเมนต์ดัดในระนาบดังแสดงในภาพที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษานี้ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเข้มของความเค้นกรณีที่ยึดกันและไม่ได้ป้องกันการซ้อนทับการของผิวรอยร้าว (K_{eff}/K) ที่ปลายรอยร้าวฝั่งแรงดึงเท่ากับ 1.15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1.14 ที่ได้จากผลการวิจัยในอดีต



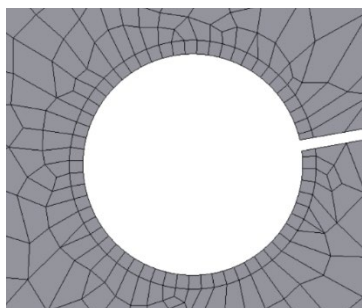
ภาพที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต



ก) การแบ่งเอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ



ข) การแบ่งเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าว



ค) การแบ่งเอลิเมนต์รอบรูเจาะ

ภาพที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

No.	D (มม.)	ระยะ H	ระยะ V	หมายเหตุ
2ก	2, 4, 6, 8, 10	0.5D	0, 0.25D, 1D, 1.5D	ผลของ D และรูปแบบการเจาะรู (Single SDH, Double SDH และ CFH) ที่มีการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ
2ข	4, 8	0.5D	0.6D, 0.7D, 0.8D, 0.9D, 1.0D, 1.25D, 1.5D	ผลของ D และระยะ V ในรูเจาะแบบ CFH ที่มีการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ
2ค	4	-D, -0.75D, -0.5D, -0.25D, 0, 0.25D, 0.5D, 0.75D, D	0.8D	ผลของระยะ H ที่มีการขยายตัวของรอยร้าวเข้ารูเจาะ และการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะแบบ CFH

3. ผลการทดสอบความล้า

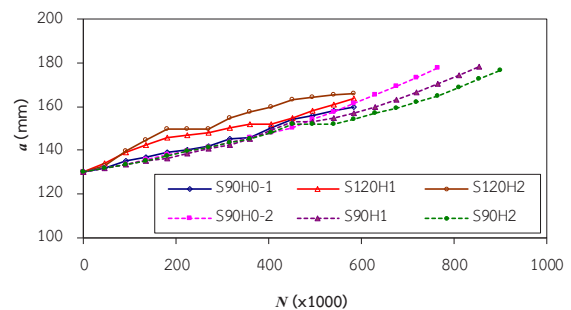
ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวรวม (a) และจำนวนรอบของแรงกระทำ (N) หลังจากช่วงที่ทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ (ภาพที่ 5) ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มของแรงกระทำ (S90 และ S120) มีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวค่อนข้างคงที่ โดยตัวอย่าง S90 มีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในช่วงเริ่มต้นต่ำกว่า S120 เนื่องจากระดับของความเค้นปกติที่น้อยกว่า รอยร้าวในทุกตัวอย่างมีการขยายตัวในทิศทางมุมประมาณ 10 องศา จากแนวรอยบากเอียงไปยังฝั่งจุดรองรับ (ภาพที่ 6ก) ตัวอย่างที่ได้รับการเจาะรูมีการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวทันทีที่มีการเจาะรูที่ a ประมาณ 150 มิลลิเมตร ตัวอย่าง S120 ที่มีการเจาะรูปแบบ Single SDH และ Double SDH สามารถรับ N ได้ประมาณ 45,000 รอบ และ 90,000 รอบ ตามลำดับ ก่อนที่รอยร้าวขยายตัวออกจากรูเจาะ โดยรูเจาะแบบ double SDH มีการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะฝั่งใกล้หน้าหน้ากระทำและมีทิศการขยายตัวของรอยร้าวเอียงไปยังจุดรองรับเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเจาะรูสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้ภายใต้แรงดัด โดยรูเจาะแบบ Double SDH ชะลอการขยายตัวของรอยร้าวได้ดีกว่าแบบ Single SDH เมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N ที่ได้จากการทดสอบได้นำมาใช้คำนวณช่วงตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) โดยใช้สมการของ Paris ที่รวมผลของการปิดของรอยร้าวภายใต้ความเค้นอัด [20]

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff} = q_o \Delta K \quad (2)$$

เมื่อ da/dN คืออัตราการขยายตัวของรอยร้าว C และ m คือค่าคงที่ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1.916×10^{-11} เมตร/รอบ และ 3 ตามลำดับ [21] q_o คือ ผลของการปิดของรอยร้าว โดย da/dN คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N ในภาพที่ 5 และ q_o คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$q_o = \begin{cases} 1 & \text{for } R \geq 0 \\ \frac{1-0.5 \cdot R}{1-R} & \text{for } R < 0 \end{cases} \quad (3)$$



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N



ก) รอยร้าวออกจากรอยบาก



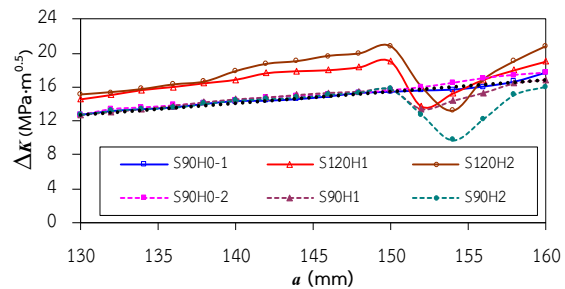
ข) ตัวอย่าง S120H1



ค) ตัวอย่าง S120H2

ภาพที่ 6 รอยร้าวออกจากรอยบาก และรูเจาะ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK และ a (ภาพที่ 7) ก่อนการเจาะรู ΔK มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความยาวรอยร้าว โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.73 - 15.09 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ในตัวอย่าง S90 และ 15.41 - 20.74 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ในตัวอย่าง S120 สำหรับ a ในช่วง 130 - 150 มม. เมื่อมีการเจาะรู ΔK ลดลงและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมก่อนการเจาะรู เมื่อรอยร้าวออกจากรูเจาะและมีค่า a ในช่วง 150 - 160 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างที่รับขนาดของแรงกระทำเท่ากัน รูเจาะแบบ Double SDH ทำให้ ΔK ลดลงมากกว่ารูเจาะแบบ Single SDH จึงทำให้ชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้มากกว่า

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK และ a

4. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 แบบจำลองตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างความเค้น Von Mises ที่บริเวณปลายรอยร้าว และรอบรูเจาะ ตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรูมีความเค้นสูงที่บริเวณปลายรอยร้าว เมื่อเจาะรูแบบ Single SDH และ Double SDH ทำให้ขนาดของความเค้นมีค่าลดลง ความเค้นมีค่าสูงที่ผิวตัวอย่าง และมีค่าลดลงบริเวณกึ่งกลางความหนา โดยรูเจาะแบบ Double SDH มีความเค้นรอบรูเจาะฝั่งใกล้หน้าหนักกระทำสูงกว่ารูเจาะฝั่งใกล้จุดรองรับ ซึ่งตำแหน่งที่มีความเค้นสูงนี้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ตรวจพบรอยร้าวออกจากรูเจาะในตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ เนื่องจากความเค้นมีค่าไม่คงที่ตลอดความหนา จึงทำให้ขอบการขยายตัวของรอยร้าวไม่เป็นเส้นตรงตามความหนาของแผ่นตัวอย่าง (ภาพที่ 9)

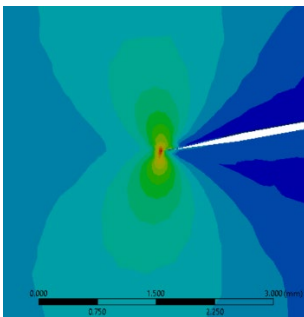
ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้นำมาใช้ในการคำนวณ ΔK และมุมการขยายตัวของรอยร้าว (θ) โดยพิจารณาผลของแรงกระทำตั้งฉาก (mode 1) และแรงเฉือนบนระนาบรอยร้าว (mode 2) โดยคำนวณได้จาก [22]

$$\Delta K = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(\alpha_1 \Delta K_{II})^2} \quad (4)$$

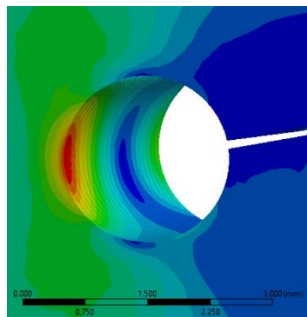
$$\theta = \pm \left[155.5 \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] - 83.4 \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (5)$$

เมื่อ K_I และ K_{II} คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น mode 1 และ mode 2 ตามลำดับ และ θ คือ ทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว (องศา) มีค่าเป็นลบเมื่อ $K_{II} > 0$ ภาพที่ 10 แสดงค่า ΔK ตามความหนาจากตำแหน่งกึ่งกลางความหนา ($z = 0$ มิลลิเมตร หรือ $z/t = 0$) ถึงผิวด้านนอก ($z = 6$ มิลลิเมตร หรือ $z/t = 0.5$) ของตัวอย่างทดสอบที่มีรอยร้าวออกจากรอยบากแต่ละด้านยาว 10 มม. ($a = 150$) มม. ΔK มีค่ามากที่สุดที่ผิวด้านนอกเท่ากับ

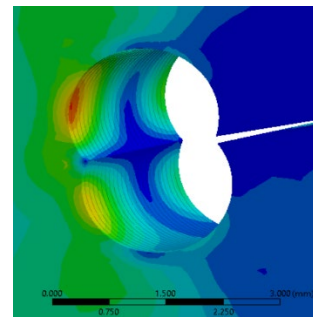
14.39 และ 19.49 MPa·m^{0.5} ในตัวอย่าง S90H0 และ S120H0 ตามลำดับ โดยมีมุม θ เท่ากับ 4.03 องศา ผลการวิเคราะห์ให้มุม θ ที่น้อยกว่าการทดสอบทั้งนี้อาจเนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวราบจากการเหวี่ยงของมอเตอร์ร่วมกับรูปแบบการติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่จู่ตรงรับด้วยสลักเกลียวจำนวนจำกัด ทำให้การกระจายความเค้นบนหน้าตัดภายใต้แรงกระทำในแนวราบมีความไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามก็ตี ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาผลของการเปิดและปิดของรอยร้าวภายใต้โมเมนต์ดัดให้ค่า ΔK ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ และสามารถใช้คำนวณทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้



ก) ตัวอย่าง S90H0

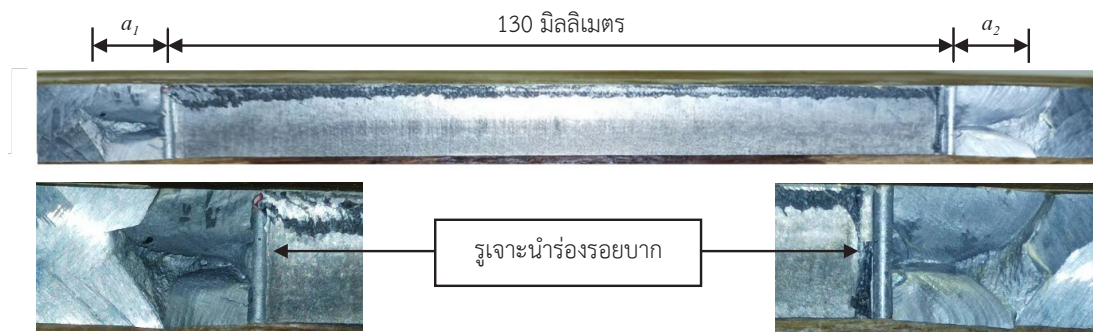


ข) ตัวอย่าง S90H1

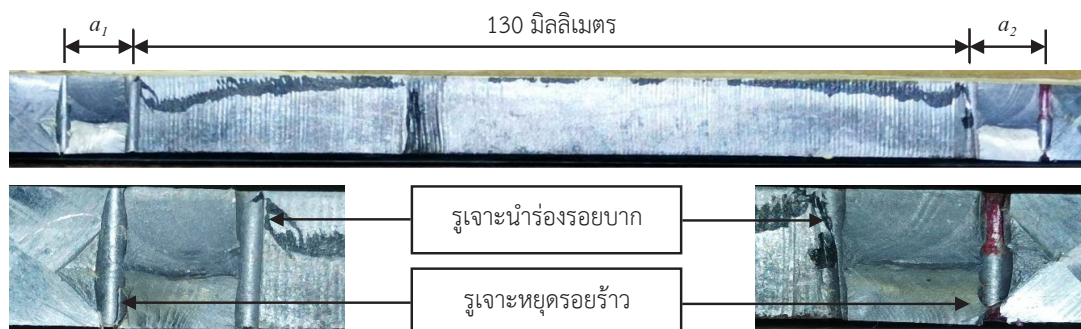


ค) ตัวอย่าง S90H2

ภาพที่ 8 ความเค้นรอบรูเจาะ Single hole และ Double holes

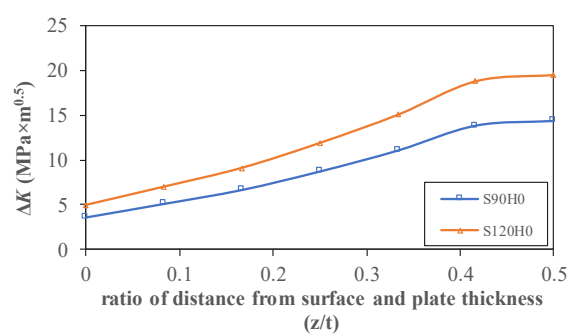


ก) ตัวอย่าง S90H0



ข) ตัวอย่าง S90H2

ภาพที่ 9 ผิวยรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK

และอัตราส่วนระหว่างระยะจากกึ่งกลางความหนาต่อความหนาของเหล็กแผ่น (z/t)

4.2 แบบจำลองที่มีการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ

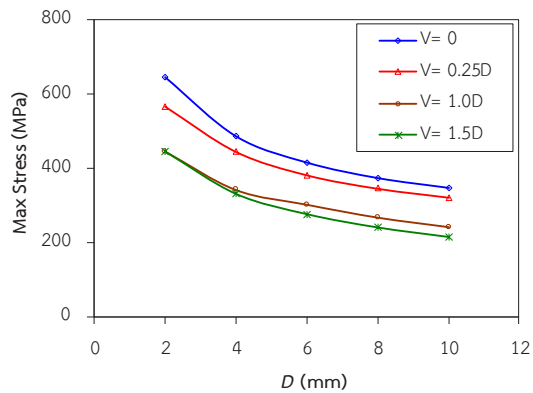
4.2.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (D) และรูปแบบรูเจาะต่อการยืดอายุความล้า

ภาพที่ 12 แสดงอัตราส่วนระหว่างความเค้น Von Mises รอบรูเจาะและตำแหน่งที่ไม่มีอิทธิพลของรูเจาะ (far-field Von Mises stress) ที่ผิวด้านนอกของรูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH ที่มี V เท่ากับ 1.0D รูเจาะฝังใกล้แรงกระทำและจุดรองรับแทนด้วยสัญลักษณ์ DL และ DS ตามลำดับ อัตราส่วนความเค้นรอบรูเจาะลดลงตามขนาด D ที่เพิ่มขึ้นในทุกรูปแบบของรูเจาะ โดยตำแหน่งที่มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะเป็นตำแหน่งที่จะเกิดการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ รูเจาะแบบ Single SDH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดที่ตำแหน่ง 12 องศาจากแนวแกน x รูเจาะแบบ Double SDH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ DL ที่ตำแหน่ง 18 องศาจากแนวแกน x ในทุกขนาด D โดยความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ DL และ DS ลดลงเมื่อ D มีค่าเพิ่มมากขึ้น รูเจาะแบบ CFH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดในฝั่งใกล้รอยร้าวรอบรูเจาะ DL และ DS ที่มุม 204 - 216 องศา และ 150 - 156 องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากปลายรอยร้าว และรอยร้าวมีโอกาสที่ขยายตัวเข้ารูเจาะในตำแหน่งดังกล่าว นอกจากนี้ รอยร้าวมีแนวโน้มที่จะขยายตัวออกจากรูเจาะ CFH ที่มี V เท่ากับ 1.0D ที่รูเจาะ DL ในตำแหน่ง 18 องศาเช่นเดียวกับรูเจาะแบบ Double SDH

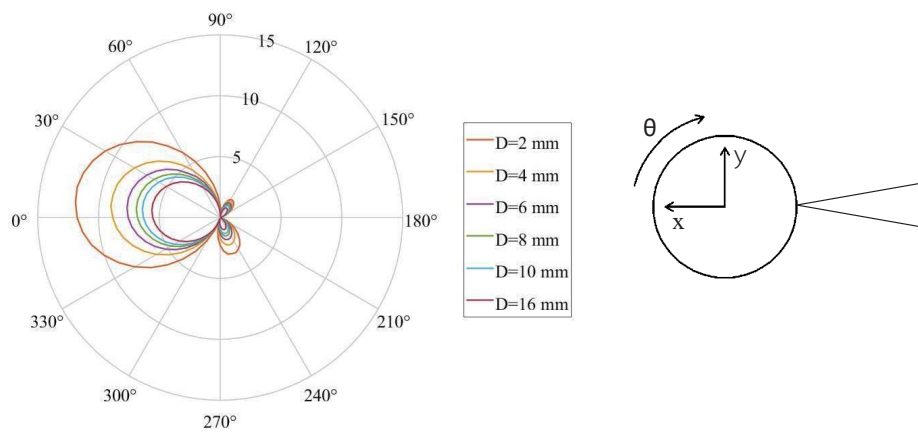
ผลกระทบของขนาด D และรูปแบบการเจาะรูที่มีต่ออัตราส่วนความเค้นแสดงในภาพที่ 11 อัตราส่วนความเค้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขนาด D จาก 2 มิลลิเมตร เป็น 4 มิลลิเมตร และมีอัตราการลดของอัตราส่วนความเค้นที่ลดลงในรูเจาะที่มีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับรูเจาะขนาดเดียวกัน CFH ($V = 1.0D$ และ $1.5D$) มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจ้าน้อยกว่า Double SDH และ Single SDH ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ารูเจาะแบบ CFH และ Single SDH มีประสิทธิภาพในการยืดอายุความล้าออกจากรูเจาะมากที่สุดและน้อยสุด ตามลำดับ Dexter and Ocel [1] ได้ให้สมการในการคำนวณขนาด D ที่เหมาะสมในการเจาะรูแบบ Single SDH เพื่อหยุดการขยายตัวของรอยร้าวความล้า ดังนี้

$$\frac{\Delta K}{\sqrt{D/2}} \leq 10.5\sqrt{\sigma_y} \quad (6)$$

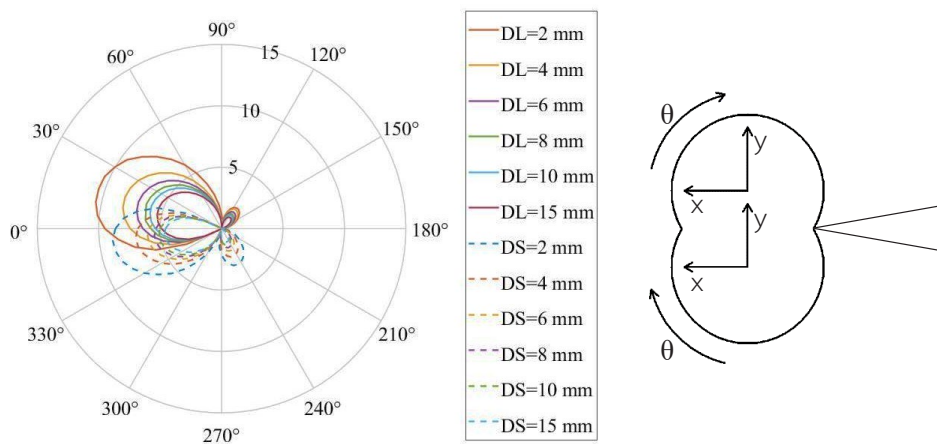
เมื่อ σ_y คือ ความเค้นครากของแผ่นเหล็ก (MPa) สำหรับตัวอย่างทดสอบ S90 ที่มี ΔK เท่ากับ $14.39 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ จะได้ขนาด D ของรูเจาะแบบ Single SDH เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ซึ่งรูเจาะแบบ Double SDH และ CFH ที่มีขนาด D เท่ากับ 13 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะให้ขนาดความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะที่เท่ากัน ดังนั้น การเจาะรูแบบ Double SDH และ CFH จะสามารถช่วยลดขนาดรูเจาะได้



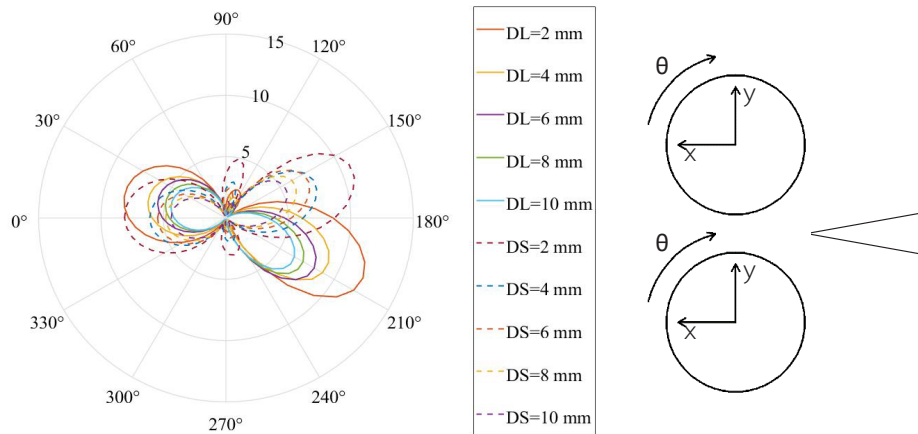
ภาพที่ 11 ผลของ D และรูปแบบการเจาะรูที่มีต่อความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ



ก) รูเจาะแบบ Single hole



ข) รูเจาะแบบ Double holes



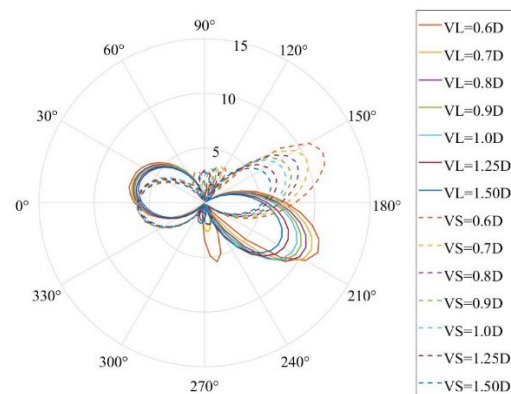
ค) รูเจาะแบบ Flank holes ที่มี $V = 1.0D$

ภาพที่ 12 ความเค้นรอบรูเจาะ

4.2.2 ผลของระยะ V และ H ต่อการขยายตัวของรอยร้าวเข้า และออกจากรูเจาะแบบ CFH

อัตราส่วนความเค้น Von Mises รอบรูเจาะและตำแหน่งที่ไม่มีอิทธิพลของรูเจาะที่ผิวด้านนอกในรูเจาะแบบ CFH ที่มีระยะ V ในช่วง 0.6D ถึง 1.5D แสดงในภาพที่ 13 โดยระยะ V ของรูเจาะ DL และ DS แสดงด้วยสัญลักษณ์ VL และ VS ในภาพ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระยะ V ของรูเจาะแบบ CFH มีผลต่อการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะค่อนข้างน้อย แต่มีผลกระทบมากต่อความเค้นสูงสุดฝั่งใกล้กับปลายรอยร้าวในกรณีที่รูเจาะมีระยะ V มากอาจทำให้รอยร้าวไม่ขยายตัวเข้ารูเจาะ แต่การเจาะรูจะเป็นเพียงการชะลอการขยายตัวของรอยร้าว เมื่อรอยร้าวขยายตัวเข้าไปในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการเจาะรู ดังนั้น การเจาะรูแบบ CFH จึงควรเลือก

ระยะ V ที่ใกล้กับปลายรอยร้าว เพื่อลดขนาดความยาวของรอยร้าวเข้ารูเจาะและทำให้รอยร้าวขยายตัวเข้ารูเจาะได้

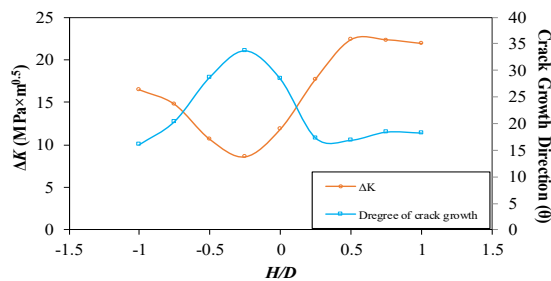


ภาพที่ 13 อัตราส่วนความเค้นรอบรูเจาะแบบ CFH ที่มีขนาด D 4 มิลลิเมตร และ H เท่ากับ 0.8D

อิทธิพลของระยะ H ในการเจาะรูแบบ CFH ที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าว และทิศทาง



การขยายตัวของรอยร้าว (ภาพที่ 14) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งการเจาะรูที่มี $H/D = -0.25$ จะให้ค่า ΔK มีค่าลดลงต่ำสุด และมีการเบี่ยงเบนทิศทางของรอยร้าวสูงสุด ซึ่งการเจาะรูที่ตำแหน่งนี้ หรือเมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวถึงตำแหน่งนี้ จะมีการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวต่ำสุด หลังจากนั้นเมื่อปลายรอยร้าวขยายตัวผ่านบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของรูเจาะ จะมีค่า ΔK เพิ่มขึ้นอีกครั้ง



ภาพที่ 14 ผลของระยะ H/D ที่มีต่อ ΔK ในรูเจาะแบบ CFH (ที่ระยะ $V=0.8D$)

5. บทสรุป

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการเจาะรูแบบ single SDH, double SDH และ CFH ในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าทะลุความหนาภายใต้แรงดัดนอกระนาบสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1.) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาปฏิสัมพันธ์ของผิวรอยร้าวสามารถทำนายอัตราการขยายตัวและทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้อย่างเหมาะสม

2.) รูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH สามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าว

ความล้าภายใต้แรงดัดได้โดยประสิทธิภาพการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าเพิ่มขึ้นตามขนาด D เมื่อใช้ขนาด D เท่ากัน รูเจาะแบบ CFH ให้ค่าความเค้นรอบรูเจาะต่ำสุดตามด้วยรูเจาะแบบ Double SDH และ Single SDH

3.) ในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าของ CFH ขึ้นอยู่กับขนาด D และตำแหน่งการเจาะรู โดยตำแหน่งรูเจาะที่มี H/D เท่ากับ -0.25 มีประสิทธิภาพในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวสูงสุด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R J Dexter and J M Ocel (2013). Manual for repair and retrofit of fatigue cracks in steel bridges. Federal Highway Administration, FHWA-IF-13-020.

[2] L Fang, Z Fu, B Ji, and Q Wang (2023). Interference of cracking and drilling on opposite side of steel deck components. Journal of Constructional Steel Research, 208: 107996.

[3] FHWA (2013). Manual for Repair and Retrofit of Fatigue Cracks in Steel Bridges.

[4] FHWA (2012). Manual for Design, Construction and Maintenance of orthotropic steel deck bridges.

[5] H Wu, A Imad, N Benseddiq, J T P D Castro, and M A Meggiolaro (2010). On the prediction of the residual fatigue life of

cracked structures repaired by the stop-hole method. *International Journal of Fatigue*, 32: 670-677.

[6] C S Shin, C M Wang, and P S Song (1996). Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods. *International Journal of Fatigue*, 18: 535-546.

[7] M S Ferdous, C Makabe, M S Rana, and T Miyazaki (2011). Improving the fatigue strength of a multiple hole specimen by applying additional holes or notches, *Engineering Failure Analysis*, 18: 75-87.

[8] S M J Razavi, M R Ayatollahi, and F Berto (2018). Assessment of fatigue crack growth behavior of cracked specimens repaired by indentation. *Procedia Structural Integrity*, 13: 69-73.

[9] Y Hu, M Song, J Liu, and M Lei (2020). Effects of stop hole on crack turning, residual fatigue life and crack tip stress field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42: 216.

[10] P S Song, Y L Shieh (2004). Stop drilling procedure for fatigue life improvement. *International Journal of Fatigue*, 26: 1333-1339.

[11] M R Ayatollahi, S M J Razavi, and M Y Yahya (2015). Mixed mode fatigue crack initiation and growth in a CT specimen repaired by stop hole technique. *Engineering*

Fracture Mechanics, 145: 115-127.

[12] S M J Razavi, M R Ayatollahi, C Sommitsch, and C Moser (2017). Retardation of fatigue crack growth in high strength steel S690 using modified stop-hole technique, *Engineering Fracture Mechanics*, 169: 226-237.

[13] M R Ayatollahi, S M J Razavi, and H R Chamani (2014). A numerical study on the effect of symmetric crack flank holes on fatigue life extension of a SENT specimen. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37: 1153-1164.

[14] M Li, Y Suzuki, K Hashimoto, K Sugiura (2018). Experimental study on fatigue resistance of rib-to-deck joint in orthotropic steel bridge deck. *Journal of Bridge Engineering*, 23(2): 04017128.

[15] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 1479-2558) (2558).เหล็กกล้าทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.

[16] IIW (2012). Recommendations for fatigue design of welded joints and components.

[17] M Li, K Hashimoto, and K Sugiura (2014). Influence of Asphalt Surfacing on Fatigue Evaluation of Rib-to-Deck Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks. *Journal of Bridge Engineering*, 04014038.

[18] G M Sayeed Ahmed, A Algahtani, E R I Mahmoud, and I A Badruddin (2018).



Experimental evaluation of interfacial surface cracks in friction welded dissimilar metals through image segmentation technique (IST).

International Journal of Materials, 11: 2460.

[19] P Albrecht, and A Lenwari (2006). Stress intensity factor for center-cracked plate with crack surface interference. Engineering Fracture Mechanics, 73: 1035-1045.

[20] Y Lei (2008). Finite element crack closure analysis of a compact tension

specimen. International Journal of Fatigue, 30: 21–31.

[21] NASGRO (2010). Fracture mechanics and fatigue crack growth analysis software (version 6.0), reference manual, NASA Johnson Space Center and Southwest Research Institute.

[22] H A Richard, B Schramm, and N H Schirmeisen (2014). Cracks on Mixed Mode loading-Theories, experiments, simulations. International Journal of Fatigue, 62: 93-103.