

การศึกษาความล้าของเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงดัดกระทำแบบซ้ำๆ Experimental Investigation of Fatigue in Steel Beams under Cyclic Loading

ภูมิภักดิ์ ทำเนียบ¹ และ จินตหรา ลาวงศ์เกิด^{2,*}

^{1,2} หน่วยงานวิจัยด้านกลศาสตร์ของแข็งและการสั่นสะเทือนขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: ljintara@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการความล้าของคานเหล็กรูปพรรณ โดยเน้นการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากความล้า คุณสมบัติเชิงกล แนวทางการซ่อมแซม และอายุความล้าของคานเหล็ก การศึกษาครอบคลุมคานเหล็กในสามสภาพ ได้แก่ คานเหล็กที่ไม่มีรอยบาก คานเหล็กที่มีรอยบาก และคานเหล็กที่มีการติดตั้งรูหยุดที่ปลายรอยบาก การทดสอบสิ้นสุดลงเมื่อชิ้นงานสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก หรือเมื่อถึงขีดจำกัดอายุความล้า ผลการทดสอบพบว่า คานเหล็กรูปพรรณที่ไม่มี ความเสียหายมีอายุความล้าใกล้เคียงกับค่าที่ระบุในมาตรฐานของ AASHTO ในขณะที่คานเหล็กที่มีรอยบากมีอายุความล้าสั้นลง เนื่องจาก รอยบากเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว อย่างไรก็ตาม คานที่มีหยุดที่ ปลายรอยบากสามารถยืดอายุความล้าได้มากกว่าคานที่มีรอยบากเพียง อย่างเดียว เนื่องจากรูหยุดช่วยกระจายและลดความเข้มข้นของความเค้น บริเวณปลายรอยบาก ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ ประเมินอายุความล้าของคานเหล็กที่ได้รับความเสียหาย ตลอดจนแนวทางการใช้รูหยุดเพื่อชะลอการเติบโตของรอยร้าว ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนซ่อมแซมและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ความล้า, คานเหล็ก, รอยบาก, รูหยุด

Abstract

This research aims to investigate the fatigue behavior of structural steel beams, focusing on fatigue-induced damage, mechanical properties, repair strategies, and fatigue life. The study examines steel beams in three conditions: beams without pre-cracked notches, beams with pre-cracked notches, and beams with stop-hole installed at the tips of the pre-cracked notches. The fatigue tests were conducted until the specimens lost their load-carrying capacity or reached their fatigue life limits based on predefined criteria. The test results indicate that the fatigue life of undamaged steel beams is comparable to the values specified in the AASHTO standard. In contrast, steel beams with pre-cracked notches exhibit a shorter fatigue life due

to the notch serving as an initiation point for crack propagation. However, beams with stop-hole at the tips of the pre-cracked notches demonstrated a longer fatigue life than those with pre-cracked notches alone, as the stop-hole help to redistribute and reduce stress concentration at the notch tips. The findings of this study provide valuable insights for assessing the fatigue life of damaged steel beams and applying stop-hole as an effective measure to slow crack growth. This information is crucial for planning repairs and extending the service life of steel structures efficiently.

Keywords: fatigue, steel beams, pre-cracked notches, stop-hole

1. คำนำ

ในอดีตโครงสร้างเหล็กมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมกำลัง โดยส่วนใหญ่ งานก่อสร้างที่ใช้โครงสร้างเหล็กในการก่อสร้างจะเป็นงานก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่และต้องการความรวดเร็วในการก่อสร้าง หรือเป็นโครงสร้างพื้นฐาน ต่างๆไม่ว่าจะเป็น สะพานเหล็กข้ามแม่น้ำ โครงสร้างทางรถไฟ โครงสร้างที่ อยู่ติดกับทะเลหรือกลางทะเล ซึ่งจนถึงปัจจุบันแม้โครงสร้างเหล็กจะมีการ ใช้งานที่น้อยลงเนื่องจากราคาค่าวัสดุที่สูงขึ้นแต่ยังคงมีการใช้เหล็กมาทำ โครงสร้างบางประเภทอยู่ เหล็กที่เป็นส่วนสำคัญหรือส่วนประกอบในงาน ก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายเช่น เหล็กรูปพรรณ เหล็กข้ออ้อย หรือเหล็กเส้น กลม โดยในบางแห่งที่โครงสร้างเหล็กมีการใช้งานมาเป็นเวลานานจึงมีการ เกิดการเสื่อมสภาพขึ้นเช่น การผุกร่อน การขึ้นสนิม การเสียรูปเนื่องจาก ความล้าจากการใช้งานเป็นเวลานาน และการเกิดรอยแตกร้าวที่เนื้อเหล็ก ซึ่งเป็นปัญหาที่สามารถพบเจอได้ในโครงสร้างเหล็กที่มีความล้าและผ่าน การใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง [1-3]

รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างเหล็ก เช่น เหล็กในโครงสร้างสะพานเหล็ก มีความอันตรายอย่างมาก จากลักษณะ การใช้งานที่มีการใช้งานตลอดเวลา ทำให้เหล็กเกิดความล้าขึ้นซึ่งเป็นอีก สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าวและเกิดการขยายตัวมากขึ้น [4] โดยการซ่อมแซมเบื้องต้นทำได้โดยการทำรูหยุด (Stop-hole) บนปลายของรอยร้าว เพื่อหยุดการเกิดการขยายตัวของรอยร้าวและประเมินแนวทางการซ่อมบำรุง ซึ่งการทำรูหยุดเป็นการหยุดเพียงชั่วคราวเท่านั้น ในขณะที่มีการใช้รูหยุด โครงสร้างเหล็กยังคงมีการใช้งานโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอทำให้มีโอกาสใน การเกิดรอยร้าวขึ้นอีกรอบได้ จึงต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความล้าของ

คานเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว คานเหล็กที่มีรอยร้าวและคานเหล็กที่มีรอยร้าวกับรูหยุด เพื่อศึกษาอายุความล้า พฤติกรรม และการวิบัติจากความล้าของคานเหล็ก

จากที่กล่าวมาข้างต้น การวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลและยืดอายุความล้าของเหล็กโดยการเจาะรูหยุดเพื่อหยุดรอยร้าว เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาผลเชิงปริมาณของการใช้รูหยุด (Stop-hole) ในคานเหล็กประเภทนี้ โดยศึกษา อายุความล้าก่อนเกิดรอยร้าวอีกรอบหลังจากการเจาะรูหยุด พฤติกรรมของรูหยุดและคานเหล็กที่ได้ทำการศึกษา สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทำนายอายุของโครงสร้างภายหลังความเสียหายจากการใช้งาน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแตกร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็ก

ความล้า (Fatigue) คือความเสียหายที่เกิดจากการกระทำซ้ำๆ (Cyclic Load) เป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะไม่เกิดความเสียหายจากการเกิดแรงกระทำเพียงครั้งเดียว เป็นการสะสมความเสียหายและความล้าของเหล็กที่ถูกกระทำแบบซ้ำๆ ส่งผลให้ค่อยๆ เกิดรอยแตกร้าว (Crack Initiation) ขึ้นในเนื้อเหล็ก นำสู่การขยายตัวของรอยร้าว (Crack Propagation) ในช่วงการขยายตัวของรอยร้าวเมื่อได้รับภาระการกระทำซ้ำๆ ส่งผลให้รอยร้าวเกิดการขยายตัวได้จนเกิดการแตกหัก (Rupture) ในที่สุด

2.2 S-N curve

S-N curve หรือ Wöhler curve เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความเค้น (Stress range) และ จำนวนรอบของความล้า (Number of cycle) ของวัสดุ ซึ่งถูกคิดค้นโดย August Wöhler เพื่อใช้ในการประเมินและออกแบบสำหรับการใช้งานว่าวัสดุจะเริ่มเกิดการวิบัติที่จำนวนรอบที่เท่าไรในช่วงความเค้นนั้นๆ

2.3 รูหยุด (Stop-hole)

รูหยุด หรือ Stop-hole เป็นวิธีการซ่อมแซมความเสียหายเบื้องต้นของโครงสร้างเหล็กที่มีการเกิดรอยร้าว จุดประสงค์เพื่อชะลอ และหยุดการอัตราการเพิ่มขึ้นของรอยแตกร้าว [5-6] โดยการเจาะรูหยุดรอยร้าวสามารถทำได้โดยเจาะรูให้ปลายของรอยร้าวหายไประหว่างเนื้อเหล็กที่ถูกเจาะ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพในการหยุดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กได้เป็นอย่างดี การเจาะควรให้ปลายของรอยร้าวอยู่ภายในหรือขอบของรูหยุด การซ่อมแซมด้วยวิธีรูหยุดรอยร้าวยังต้องคำนึงถึงขนาดรัศมีของรูหยุดโดยต้องไม่ทำให้เหล็กสูญเสียเนื้อที่หน้าตัดมากเกินไป

2.4 สมการที่เกี่ยวข้อง

โมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำต่อคานเหล็กรูปพรรณที่จุดกึ่งกลาง

$$M = \frac{P \times L}{6} \quad (1)$$

โดย M คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่คาน P คือ แรงที่กระทำ L คือ ระยะระหว่างจุดรองรับทั้ง 2 ข้าง

ตรวจสอบความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนคานเหล็กรูปพรรณ

$$\sigma = \frac{M c}{I} \quad (2)$$

โดย σ คือ ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นของคานเหล็กรูปพรรณ (Bending Stress) M คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่คาน c คือ ระยะจากแกนสะเทินถึงระยะที่ต้องการคำนวณ I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

3. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

ในการศึกษาความล้าของคานเหล็กรูปพรรณใช้วิธีการทดสอบแรงดัดแบบซ้ำๆ โดยใช้การทดสอบแบบการดัดแบบสี่จุดภายใต้แรงกระทำที่ต่างกัน คือ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กโดยใช้หน้าตัดเหล็กที่ไม่มี ความเสียหายเป็นหน้าตัดเหล็กควบคุม มีรายละเอียดวัสดุ การเตรียมชิ้นงาน ตัวอย่างทดสอบ และการทดสอบดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1.คานเหล็กรูปพรรณ SS400 ขนาด H100x100x17.2 กก./ม. ยาว 2 เมตร ที่ไม่มีความเสียหาย จำนวน 4 คาน แสดงในตารางที่ 1

3.1.2.คานเหล็กรูปพรรณ SS400 ขนาด H100x100x17.2 กก./ม. ยาว 2 เมตร และมีรอยบากลึก 23 มิลลิเมตรที่ปีกกลางของคานเพียงฝั่งเดียว จำนวน 4 คาน แสดงในตารางที่ 1

3.1.3.คานเหล็กรูปพรรณ SS400 ขนาด H100x100x17.2 กก./ม. ยาว 2 เมตร มีรอยบากลึก 23 มิลลิเมตร และรูหยุด (Stop-hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตรที่ปลายรอยบาก ที่ปีกกลางของคานเพียงฝั่งเดียว จำนวน 4 คาน แสดงในตารางที่ 1

3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.1.นำคานเหล็กรูปพรรณมาแบ่งชุดการทดสอบและเตรียมผิวที่บริเวณที่ต้องการติด Strain Gauge โดยใช้กระดาษทรายขัดที่ผิวและใช้ผ้าสะอาดเช็ดฝุ่นออก และติด Strain Gauge ที่มี Gauge Factor $2.11 \pm 1\%$

3.2.2.นำคานเหล็กรูปพรรณชุดทดสอบที่สอง มาสร้างรอยบาก (Pre-crack) ด้วยเลื่อยตัดเหล็กและตะไบ ที่บริเวณขอบปีกกลางกึ่งกลางของคานเหล็ก

3.2.3.นำคานเหล็กรูปพรรณชุดที่สาม มาสร้างรอยบาก (Pre-crack) และ รูหยุด (Stop-hole) ด้วยเลื่อยตัดเหล็ก ตะไบ และสว่าน บริเวณขอบปีกกลางกึ่งกลางของคานเหล็ก

3.3 รายละเอียดตัวอย่างตัวทดสอบ

3.3.1.นำคานเหล็กรูปพรรณในกลุ่มทดสอบที่หนึ่ง มาทดสอบภายใต้แรงดัดกระทำแบบซ้ำๆ โดยทดสอบที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ตามลำดับ

3.3.2.กลุ่มตัวอย่างที่สอง คือ คานเหล็กรูปพรรณยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) จำนวน 4 คาน

3.3.3.กลุ่มตัวอย่างที่สาม คือ คานเหล็กรูปพรรณ ยาว 2 เมตร ที่มีรอยบาก (Pre-crack) และรูหยุด (Stop-hole) จำนวน 4 คาน

ตารางที่ 1 รายละเอียดชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ลำดับ	Specimens	รายละเอียด	แรงกระทำ
1.	SB-C- P_y	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร	P_y
2.	SB-C- $0.9P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร	$0.9P_y$
3.	SB-C- $0.7P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร	$0.7P_y$
4.	SB-C- $0.6P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร	$0.6P_y$

5.	SB-PC- P_y	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร	P_y
6.	SB-PC- $0.9P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร	$0.9P_y$
7.	SB-PC- $0.7P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร	$0.7P_y$
8.	SB-PC- $0.6P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร	$0.6P_y$
9.	SB-PS- P_y	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร และรูหยุด (Stop-hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร	P_y
10.	SB-PS- $0.9P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร และรูหยุด (Stop-hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร	$0.9P_y$
11.	SB-PS- $0.7P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร และรูหยุด (Stop-hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร	$0.7P_y$
12.	SB-PS- $0.6P_y$	คานเหล็กรูปพรรณ H100x100 ความยาว 2 เมตร ที่มีการสร้างรอยบาก (Pre-crack) ลึก 23 มิลลิเมตร กว้าง 1.48 มิลลิเมตร และรูหยุด (Stop-hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร	$0.6P_y$

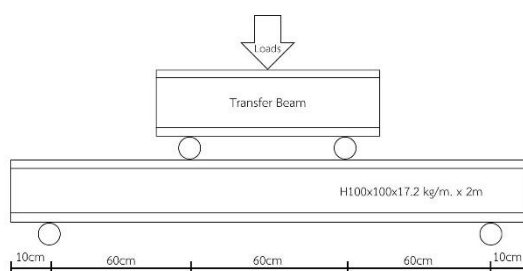
3.4 การดำเนินการทดสอบ

3.4.1.เตรียมการติดตั้งทดสอบความล้าคานเหล็กรูปพรรณในการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (4-Point bending) ด้วยแรงกระทำแบบซ้ำๆ ควบคุมการทดสอบด้วยเครื่อง Servo Controller ดังแสดงในรูปที่ 1 รูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4

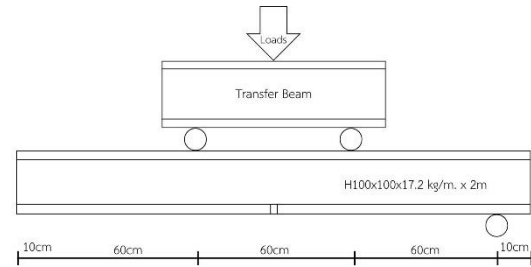
3.4.2.นำคานเหล็กรูปพรรณในกลุ่มทดสอบที่หนึ่ง มาทดสอบภายใต้แรงดัดกระทำแบบซ้ำๆ โดยทดสอบที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ตามลำดับ

3.4.3.นำคานเหล็กรูปพรรณในกลุ่มทดสอบที่สอง ที่มีการทำรอยบากที่บริเวณกึ่งกลางของปีกล่างคานเพียงฝั่งเดียว มาทดสอบภายใต้แรงดัดกระทำแบบซ้ำๆ โดยทดสอบที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ตามลำดับ

3.4.4.นำคานเหล็กรูปพรรณในกลุ่มทดสอบที่สาม ที่มีการทำรอยบากที่บริเวณกึ่งกลางของปีกล่างของคานเพียงฝั่งเดียว และมีการเจาะรูหยุด (Stop-hole) มาทดสอบภายใต้แรงดัดกระทำแบบซ้ำๆ โดยทดสอบที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ตามลำดับ



รูปที่ 1 Test setup แบบ 4-point bending ของคานควบคุม



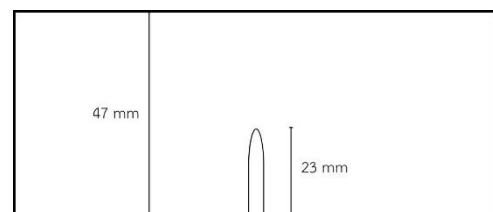
รูปที่ 2 Test setup แบบ 4-point bending ของคานที่มีรอยบาก (Pre-crack) และคานที่มีทั้งรอยบาก (Pre-crack) กับรูหยุด (stop-hole)



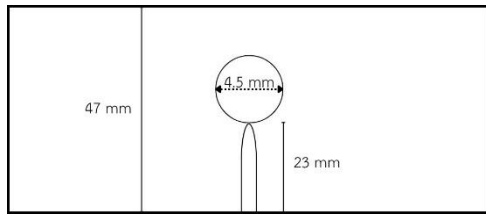
รูปที่ 3 Test setup สำหรับคานที่ไม่มีความเสียหาย



รูปที่ 4 Test setup คานที่มีการจำลองความเสียหาย



รูปที่ 5 รอยบาก (Pre-crack) ที่ปีกล่างของคาน



รูปที่ 6 รอยบาก (Pre-crack) และรูหยุด (Stop-hole) ที่ปีกล่างของคานเหล็ก

4. ผลการทดสอบ

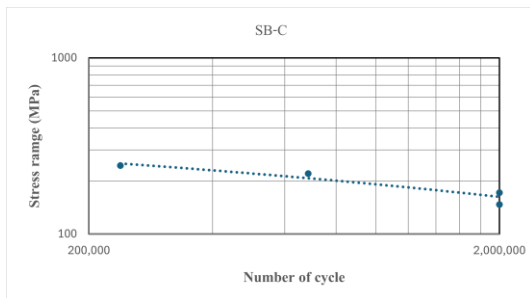
4.1 S-N curve

จากการทดสอบความล้าเหล็กรูปพรรณที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ สำหรับคานเหล็กที่ไม่มีความเสียหายสามารถสร้างสมการในการประมาณอายุความล้าได้ตามสมการที่ (3) สามารถสร้างกราฟช่วงความเค้นต่อรอบความล้าของคานเหล็กรูปพรรณที่ไม่มีความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับคานเหล็กที่มีรอยบากสามารถสร้างสมการในการประมาณอายุความล้าได้ตามสมการที่ (4) สามารถสร้างกราฟช่วงความเค้นต่อรอบความล้าของคานเหล็กรูปพรรณที่ไม่มีความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 8 และสำหรับคานเหล็กที่มีรอยบากและมีรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายรอยบากสามารถสร้างสมการในการประมาณได้ตามสมการที่ (5) สามารถสร้างกราฟช่วงความเค้นต่อรอบความล้าของคานเหล็กรูปพรรณที่ไม่มีความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 9

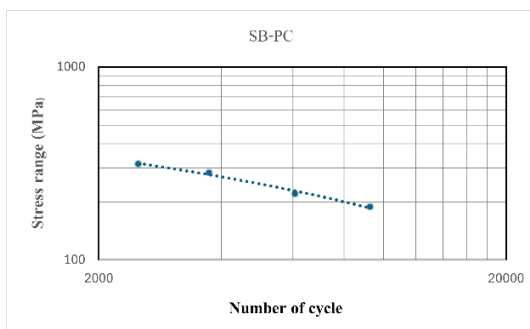
$$S = 4794.01N_f^{-0.24018} \quad (3)$$

$$S = 6655.72N_f^{-0.39007} \quad (4)$$

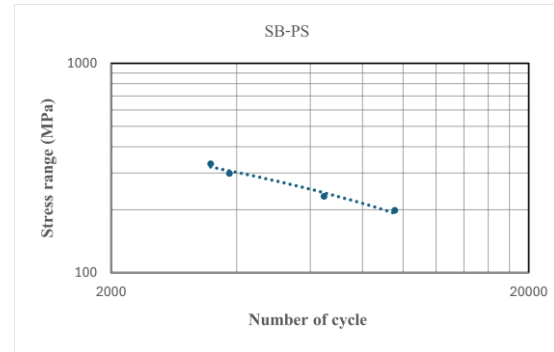
$$S = 19955.82N_f^{-0.50297} \quad (5)$$



รูปที่ 7 S-N curve ของคานชุดควบคุม



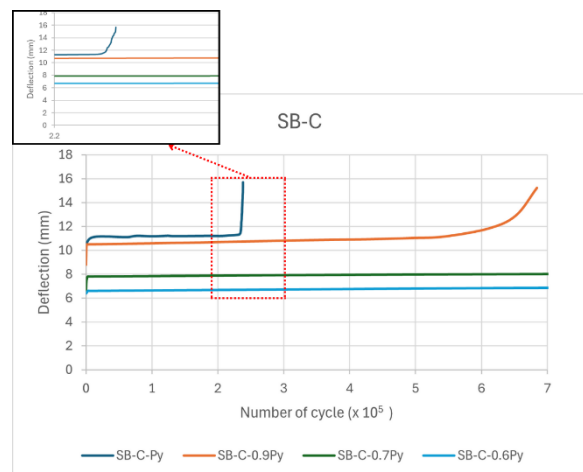
รูปที่ 8 S-N curve ของคานที่มีรอยบาก (Pre-crack)



รูปที่ 9 S-N curve ของคานที่มีรอยบาก (Pre-crack) และรูหยุดที่ปลาย (Stop-hole)

4.2 อายุความล้าและการแอ่นตัวในการทดสอบ

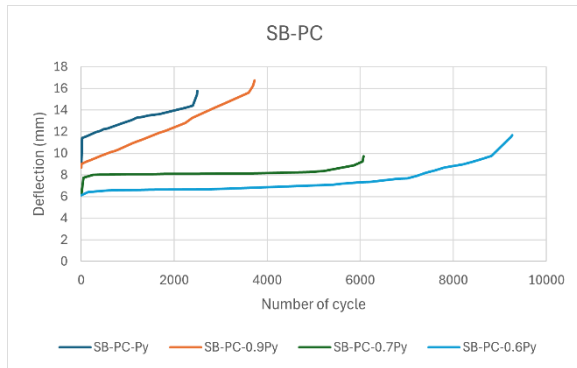
จากการทดสอบขึ้นตัวอย่างทดสอบควบคุม (SB-C) ที่แรงกระทำที่ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อมีแรงกระทำที่เมื่อทดสอบผ่านระยะเวลาหนึ่งของอายุความล้า คานเหล็กจะเริ่มแอ่นตัวมากขึ้น ลักษณะการวิบัติที่แรงกระทำ P_y ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ คานเหล็กเกิดรอยแตกที่ปีกล่างคาน เกิดการแอ่นตัวและเอนตัวไปทางด้านข้างเล็กน้อย โดยการแอ่นตัวสูงสุดในการทดสอบอยู่ที่ 15.695 มิลลิเมตร อายุความล้าอยู่ที่ 238,434 รอบ คานที่ทดสอบที่ $0.9P_y$ ของหน้าตัดเหล็กที่ควบคุม ลักษณะการวิบัติเกิดรอยแตกที่ปีกล่าง มีการแอ่นตัวและเอนตัวไปทางด้านข้างเช่นเดียวกับคานที่ทดสอบที่แรง P_y ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ โดยการแอ่นตัวสูงสุดอยู่ที่ 15.225 มิลลิเมตร มีอายุความล้าอยู่ที่ 684,303 รอบ คานที่ทดสอบความล้าภายใต้แรงกระทำ $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ มีอายุความล้ามากกว่า 2,000,000 รอบ (Endurance Limit) มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบที่ 8.47 มิลลิเมตร และ 7.51 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 10 การแอ่นตัวของคานชุดควบคุมที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$, $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กที่ไม่มีความเสียหายหรือหน้าตัดควบคุม

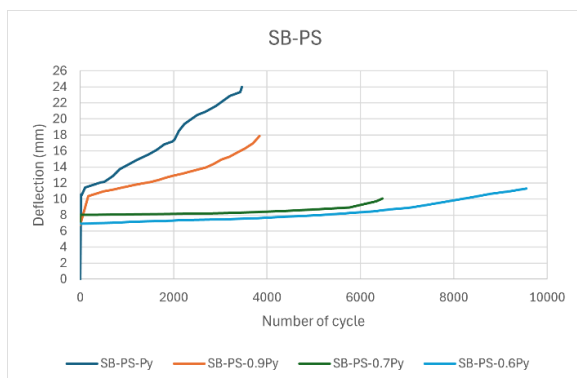
สำหรับการทดสอบความล้าคานเหล็กรูปพรรณที่มีรอยบาก (Pre-crack) ที่แรงกระทำที่ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กคานค้ำ พบว่าอายุความล้าของคานเหล็กที่มีรอยบาก (Pre-crack) มีจำนวนที่ลดลงเมื่อเทียบกับคานที่ไม่มิดำหนิ โดยเมื่อคานทดสอบที่แรง P_y

ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 15.765 มิลลิเมตร อายุความล้าอยู่ที่ 2,501 รอบ คานที่ทดสอบที่ $0.9P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 16.725 มิลลิเมตร อายุความล้าที่ 3,730 รอบ คานที่ทดสอบที่แรง $0.7P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 9.715 มิลลิเมตร อายุความล้าที่ 6,068 รอบ และคานที่ทดสอบที่แรงกระทำ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 11.67 มิลลิเมตร และอายุความล้าที่ 9,262 รอบความล้า ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การแอ่นตัวของคานที่มีรอยบาก (Pre-crack) ที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$, $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม

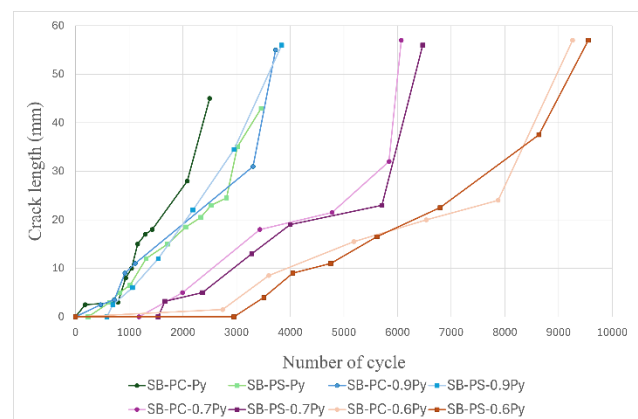
สำหรับการทดสอบความล้าคานเหล็กรูปพรรณที่มีรอยบาก (Pre-crack) และรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายของรอยบาก ที่แรงกระทำที่ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม พบว่าอายุความล้าของคานเหล็กที่มีรอยบาก (Pre-crack) และมีรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายของรอยบาก มีจำนวนรอบความล้าที่มากกว่าจำนวนรอบความล้าของคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อคานทดสอบที่แรง P_y ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 24 มิลลิเมตร มีอายุความล้าอยู่ที่ 3,461 รอบ คานที่ทดสอบที่ $0.9P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 17.88 มิลลิเมตร อายุความล้าที่ 3,842 รอบ คานที่ทดสอบที่แรง $0.7P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 10.075 มิลลิเมตร อายุความล้าที่ 6,467 รอบ และคานที่ทดสอบที่แรงกระทำ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม มีการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบ 11.3 มิลลิเมตร อายุความล้าที่ 9,555 รอบความล้า ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การแอ่นตัวของคานที่มีรอยบาก (Pre-crack) และรูหยุด (stop-hole) บริเวณปลายรอยบาก ที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$, $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม

4.3 รอยแตกร้าวจากการทดสอบ

จากการทดสอบคานเหล็กรูปพรรณที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว และคานเหล็กรูปพรรณที่มีทั้งรอยบากและรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายรอยบากพบว่าเมื่อทดสอบที่ระดับแรงกระทำต่างๆ การเกิดรอยแตกร้าวทั้งคานที่มีเพียงรอยบากเพียงอย่างเดียวและคานที่มีรอยบากกับรูหยุด (Stop-hole) ที่ปลายรอยบากมีระยะเวลาการเกิดรอยแตกร้าวที่ใกล้เคียงกัน แต่คานเหล็กที่มีรูหยุด การขยายตัวของรอยแตกร้าวในช่วงต้นจะช้ากว่าคานที่มีเพียงรอยบาก รอยแตกร้าวในคานที่มีรูหยุดจะเกิดภายในขอบของรูหยุดในช่วงเริ่มต้นซึ่งใช้ระยะเวลาหนึ่งจึงเกิดการขยายตัวออกมาจากขอบของรูหยุด ที่แรงกระทำ P_y ของหน้าตัดเหล็กควมคุม คานที่มีรอยบากเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่รอบความล้า 179 รอบ ความยาวรอยร้าวที่บริเวณใกล้กึ่งกลางคาน 45 มิลลิเมตร ที่ 2,501 รอบความล้า ในคานที่มีรอยบากและรูหยุด (stop-hole) สังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจน 3 มิลลิเมตร ที่ 622 รอบความล้า ความยาวรอยร้าวที่ 43 มิลลิเมตร ที่ 3,461 รอบความล้า ซึ่งมีอายุความล้ามากกว่าคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว ที่แรงกระทำ $0.9P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม คานที่มีรอยบากเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่รอบความล้า 468 รอบ ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 55 มิลลิเมตร ที่ 3,730 รอบความล้า ในคานที่มีรอยบากและรูหยุด (stop-hole) สังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจน 2.5 มิลลิเมตร ที่ 694 รอบความล้า ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 56 มิลลิเมตร ที่ 3,842 รอบความล้า ซึ่งมีอายุความล้ามากกว่าคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว ที่แรงกระทำ $0.7P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม คานที่มีรอยบากเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขนาด 5 มิลลิเมตร ที่รอบความล้า 1,995 รอบ ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 57 มิลลิเมตร ที่ 6,068 รอบความล้า ในคานที่มีรอยบากและรูหยุด (stop-hole) สังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจน 3.2 มิลลิเมตร ที่ 1,665 รอบความล้า ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 56 มิลลิเมตร ที่ 6,467 รอบความล้า ซึ่งมีอายุความล้ามากกว่าคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว ที่แรงกระทำ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควมคุม คานที่มีรอยบากเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขนาด 1.5 มิลลิเมตร ที่รอบความล้า 2,744 รอบ ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 57 มิลลิเมตร ที่ 9,262 รอบความล้า ในคานที่มีรอยบากและรูหยุด (stop-hole) สังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจน 4 มิลลิเมตร ที่ 3,509 รอบความล้า ความยาวรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน 56 มิลลิเมตร ที่ 9,555 รอบความล้า ซึ่งมีอายุความล้ามากกว่าคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว โดยการใส่รูหยุด (Stop-hole) สามารถยืดอายุความล้าและชะลอการเกิดรอยแตกร้าวของคานเหล็กได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiang et al. (2021)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความยาวรอยแตกร้าวต่อรอบความล้า

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าการทดสอบที่แรงกระทำ P_y และ $0.9P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ในช่วงต้นของการทดสอบความยาวรอยแตกกว้างมีความใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบที่แรงกระทำ $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ความยาวรอยแตกกว้างต่อจำนวนรอยความล้ามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในคานที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียว และคานที่มีรอยบากกับรูหยุด (Stop-hole) แต่เมื่อรอยแตกกว้างขยายตัวและความยาวมากกว่า 25 มิลลิเมตรหรือขยายตัวถึงระดับเว้าของคานสำหรับทุกแรงกระทำ กราฟความยาวรอยร้าวต่ออายุความล้ามีความชันมากขึ้นทำให้สังเกตได้ว่าการเกิดรอยแตกกว้างมีความเร็วการขยายตัวเพิ่มขึ้นและคงที่มากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอายุคานเหล็กที่มีรอยบากเพียงอย่างเดียวกับคานเหล็กที่มีรอยบากและรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายรอยบาก ดังแสดงในตารางที่ 2 มีอายุความล้าเพิ่มขึ้น ร้อยละ 38.38, ร้อยละ 3, ร้อยละ 6.61 และร้อยละ 3.14 ที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอายุความล้าของคานที่มีรอยบากกับมีรอยบากและรูหยุด

แรงที่กระทำ	อายุความล้าของคานที่มีรอยบาก (Cycle)	อายุความล้าของคานที่มีรอยบากและรูหยุด (Cycle)	ร้อยละของอายุความล้าที่เพิ่มขึ้น
P_y	2,501	3,461	38.38
$0.9P_y$	3,730	3,842	3
$0.7P_y$	6,068	6,467	6.61
$0.6P_y$	9,262	9,555	3.14

5. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาความล้าของคานเหล็กรูปพรรณที่ไม่มีความเสียหาย คานเหล็กรูปพรรณที่มีรอยบาก และคานเหล็กรูปพรรณที่มีรูหยุด (stop-hole) ที่ปลายรอยบาก สามารถสรุปได้ดังนี้ การทดสอบที่แรงกระทำ P_y , $0.9P_y$, $0.7P_y$ และ $0.6P_y$ ของหน้าตัดเหล็กควบคุม ของคานทั้งสามกลุ่มสามารถสร้างสมการความเค้นต่อรอบความล้าเพื่อออกแบบความล้าจากค่าที่ทดสอบได้ คานเหล็กที่มีความเสียหายมีอายุความล้าลดลงจากคานเหล็กที่ไม่มีความเสียหายอย่างมากเมื่อเทียบจากอายุความล้าของคานเหล็ก การใช้รูหยุด (Stop-hole) สามารถชะลอการเกิดและการขยายตัวของรอยแตกกว้างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับคานที่มีเพียงรอยบาก (Pre-crack) เมื่อรอยแตกกว้างขยายตัวจากปีกคานเข้าสู่บริเวณเว้าของคาน การเกิดและขยายตัวของรอยแตกกว้างมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ผลที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานภาคสนามหรืองานด้านการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเหล็กที่สามารถเกิดปัญหาความล้า เช่น โครงสร้างสะพานเหล็ก โครงสร้างสะพานรถไฟ หรือ

เพื่อประเมินโครงสร้างที่มีการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานและเกิดความเสียหายสะสมจากการใช้งาน อีกทั้งสามารถนำผลการศึกษาไปต่อยอดในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเก็บข้อมูลการใช้งานจริงในภาคสนามหรือการศึกษาการซ่อมแซมโครงสร้างเหล็กรับความล้า เช่น การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) การใช้ High-strength bolts หลังจากการเจาะรูหยุด (Stop-hole) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุความล้าจากการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษา รวมถึง อาจารย์ที่ปรึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, 2(4), 456-476.
- [2] Tavakkolizadeh, M., & Saadatmanesh, H. (2003). Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. *Journal of structural engineering*, 129(2), 186-196.
- [3] Kim, Y. J., & Harries, K. A. (2011). Fatigue behavior of damaged steel beams repaired with CFRP strips. *Engineering Structures*, 33(5), 1491-1502.
- [4] Cui, C., Zhang, Q., Zhang, D., Lao, W., Wu, L., & Jiang, Z. (2024). Monitoring and detection of steel bridge diseases: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- [5] Jiang, X., Lv, Z., Qiang, X., & Zhang, J. (2021). Improvement of Stop-Hole Method on Fatigue-Cracked Steel Plates by Using High-Strength Bolts and CFRP Strips. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 6632212.
- [6] Yao, Y., Ji, B., Fu, Z., Zhou, J., & Wang, Y. (2019). Optimization of stop-hole parameters for cracks at diaphragm-to-rib weld in steel bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105747.