



การศึกษากำลังรับแรงจุดต่อยึดแบบรอยเชื่อมในเหล็กฉากภายใต้แรงดึงด้วยการทดสอบ

อภินิติ อัจกุล* และ โอบาส เมฆประมวล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1649 6487 อีเมล: aphinat74@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.003

รับเมื่อ 28 กันยายน 2566 แก้ไขเมื่อ 4 มกราคม 2567 ตอรับเมื่อ 12 มกราคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 1 ตุลาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ข้อกำหนด American Institute of Steel Construction (AISC) แนะนำว่าการออกแบบจุดต่อประเภทรอยเชื่อมของเหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่หรือองค์อาคารที่คล้ายกันเพื่อรับแรงดึง ไม่จำเป็นต้องพิจารณาแรงเยื้องศูนย์ อย่างไรก็ตาม การเยื้องศูนย์ในเหล็กฉากอาจจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของจุดต่อได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดต่อในเหล็กฉากเดี่ยวซึ่งมีพฤติกรรมการดัดแบบ Out of Plane เมื่อรับแรงในแนวแกน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเยื้องศูนย์ที่มีต่อกำลังรับแรงของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมในเหล็กฉากภายใต้แรงดึงด้วยการทดสอบ รวมถึงศึกษาผลกระทบที่ความยาวของรอยเชื่อม และการจัดวางรอยเชื่อม มีต่อกำลังของรอยเชื่อม ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยเหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่ ซึ่งต่อยึดที่ปลายด้วยรอยเชื่อม โดยจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Balanced) และไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Unbalanced) ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดออกแบบให้เกิดการวิบัติที่รอยเชื่อม ผลจากการทดสอบพบว่า จุดต่อที่จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Unbalanced) และการดัดแบบ Out of Plane มีผลทำให้ประสิทธิภาพของจุดยึดต่อลดลงได้มากถึงร้อยละ 20 ระยะพิคกิ้งที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของเหล็กฉาก อาจทำให้กำลังรับแรงของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมมีค่าน้อยกว่ากำลังที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดของ AISC ถึงร้อยละ 20 นอกจากนี้ ความยาวรอยเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัย มีความยาวน้อยกว่า 100 เท่าของความหนาของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นพิคกิ้งที่ AISC แนะนำว่ายังสามารถใช้ความยาวรอยเชื่อมโดยไม่ต้องปรับลดค่าเป็นความยาวประสิทธิภาพ แต่กำลังรับแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลองกลับมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณถึงร้อยละ 20 ในหลาย ๆ กรณี

คำสำคัญ: การดัดแบบ Out-of-Plane รอยเชื่อมแบบไม่เยื้องศูนย์ รอยเชื่อมแบบเยื้องศูนย์



A Study of Strength and Behavior of Angle Welded Connection by Full-scale Tests

Aphinat Ashakul* and Opas Mekpramual

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1649 6487, E-mail: aphinat74@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.003

Received 28 September 2023; Revised 4 January 2024; Accepted 12 January 2024; Published online: 1 October 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

According to American Institute of Steel Construction Specification (AISC), it is not necessary to take into account the effect of eccentricity for the design of welded end connection of single angle, double angle, and similar members. However, the eccentricity in the angle may affect strength of the connections, especially welded connection at the end of single angles in which out-of-plane bending naturally occurs. This research aims to study the effects of eccentricity on the strength and behavior of the welded connection in the angle tension member by experiments. Specimens included single and double angles with balanced and unbalanced weld arrangements and various lengths and gauges of the welded connection. Every specimen was designed so that weld rupture would be the governing limit state. The results showed that unbalanced weld arrangements, increased gauge lengths due to sizes of angles, and out-of-plane bending could altogether reduce weld rupture strength from nominal value up to 20 %. In addition, lengths of welds used in the research, which were less than 100 times weld thickness and were deemed consistent with the number within the recommended values by AISC, results in weld strength being 20% below the predicted values in many cases.

Keywords: Angle Welded Connection, Balanced Weld, Out-Of-Plane, Unbalanced Weld

1. บทนำ

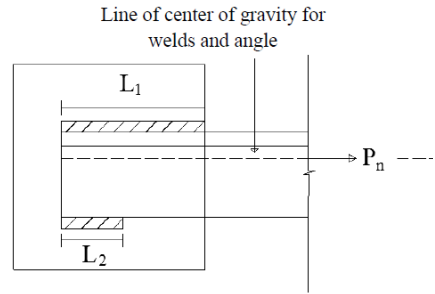
เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า เหล็กฉากเดี่ยวเป็นเหล็ก รูปพรรณที่มีจุดศูนย์กลางของหน้าตัดไม่สมมาตรทั้งในระนาบ และนอกระนาบ การออกแบบจึงควรสร้างสมดุลให้จุด ต่อด้วยการให้จุดศูนย์กลางของจุดต่ออยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กฉาก ดังนั้นสำหรับจุดต่อ ประเภทรอยเชื่อมสำหรับเหล็กฉากเดี่ยวที่ออกแบบด้วยการ พิจารณาสมดุล รอยเชื่อมทั้งสองด้านจะมีความยาวไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 1

คู่มือการออกแบบของข้อกำหนด AISC [1] แนะนำว่าการออกแบบจุดต่อประเภทรอยเชื่อมของเหล็กฉากเดี่ยว เหล็กฉากคู่ และองค์อาคารที่คล้ายกัน เพื่อรับแรงดึงแบบสถิต (Static Load) ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลของการเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งย่อมส่งผลให้จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของเหล็กฉาก ทำให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างรอยเชื่อมกับเหล็กฉาก ผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลกับกำลังรับแรงของจุดต่อ

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกำลังของรอยเชื่อม มีดังนี้

Weiskopf และ Male [2] ทำการทดสอบหาค่า ความเครียด (Strain) ในรอยเชื่อมขนานกับแรงกระทำ (Longitudinal Weld) โดยทำการวัดค่าความเครียดบน เหล็กแผ่นตามแนวยาวของรอยเชื่อม ผู้วิจัยพบว่าค่า ความเครียดเกิดขึ้นน้อยที่กึ่งกลางของรอยเชื่อมแต่มีค่ามากที่ บริเวณปลายรอยเชื่อม Hollister และ Gelman [3] ทำการ ทดสอบหาค่าหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมในช่วง อีลาสติก (Elastic) ตัวอย่างทดสอบใช้เหล็กแผ่นคู่เพื่อลดผล กระทบเนื่องจากการเยื้องศูนย์กลาง ผู้วิจัยสรุปว่า รอยเชื่อมตั้งฉาก กับแนวแรง (Transverse Weld) มีกำลังมากกว่ารอยเชื่อม ขนานกับแนวแรง

Gibson และ Wake [4] ทำการทดสอบตัวอย่างจำนวน 28 ตัวอย่างเพื่อศึกษากำลังรับแรงดึงของจุดต่อแบบรอยเชื่อม ในเหล็กฉาก ตัวอย่างทดสอบมีทั้งเหล็กฉากเดี่ยว เหล็กฉากคู่ โดยมีรูปแบบของรอยเชื่อมทั้งหมด 15 รูปแบบ และมีทั้ง รอยเชื่อมที่สมดุล (Balanced) และไม่สมดุล (Unbalanced)



รูปที่ 1 รอยเชื่อมแบบสมดุล (Balanced) สำหรับเหล็ก ฉากเดี่ยว

จากผลการทดสอบ รอยเชื่อมที่ไม่สมดุลในตัวอย่างที่ใช้เหล็ก ฉากเดี่ยว มีกำลังรับแรงต่ำกว่ารอยเชื่อมที่สมดุลเล็กน้อย ใน ขณะที่กำลังรับแรงของรอยเชื่อม ทั้งประเภทที่สมดุลและไม่สมดุล ในตัวอย่างที่ใช้เหล็กฉากคู่ มีค่าไม่ต่างกัน ค่าหน่วยแรงที่วัด ได้จากเหล็กฉากแสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางของหน่วยแรง อยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างจากตำแหน่งที่ใช้การออกแบบโดย ทั่วไปถึงแม้ว่ารอยเชื่อมจะเป็นประเภทสมดุล อย่างไรก็ตาม Gibson และ Wake [4] สรุปว่าผลต่างของรอยเชื่อมแบบ สมดุลและไม่สมดุลไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่คู่มือ การออกแบบของ AISC แนะนำให้การออกแบบไม่จำเป็นต้อง พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์กลาง (อยู่ในส่วน Commentary)

Butler และ Kulak [5] ทดสอบกำลังของรอยเชื่อมแบบ พอก (Fillet Weld) โดยทำการทดสอบตัวอย่าง 23 ตัวอย่าง รอยเชื่อมที่ใช้มีทั้งประเภทที่ขนานกับแนวแรง และทำมุมกับ แรงเป็นมุมต่าง ๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังของ รอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตามมุมของแรงที่กระทำกับรอยเชื่อมที่ เพิ่มขึ้น

Kanvinde และคณะ [6] ทำการศึกษารอยเชื่อมแบบ พอก ด้วยการทดสอบเป็นรอยเชื่อมตั้งฉากกับแรงกระทำ (Transverse Weld) ทั้งหมด 24 ตัวอย่างทดสอบ และใช้วิธี Traditional Fracture Mechanics และ Stress Modified Critical Strain (SMCS) คาดการณ์ผลที่ได้เทียบกับผลจาก การทดสอบ และสรุปว่าวิธี SMCS ประเมินค่าได้ใกล้เคียง และแม่นยำ Kanvinde และคณะ [7] ยังได้ทำการทดสอบ รอยเชื่อมแบบพอก โดยรูปแบบรอยเชื่อมตั้งฉากกับแรงกระทำ

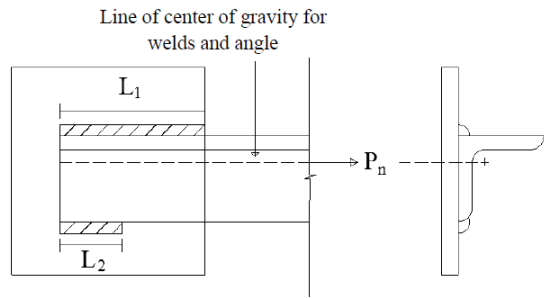
(Transverse Weld) และสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะรอยบาก (Root Notch) แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าระยะรอยบากไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงและความเหนียวของรอยเชื่อม

Regan และ Salter [8] Wu และ Kulak [9] Petretta [10] รวมถึง Zhu และคณะ [11] ทำการวิจัยมุ่งเน้นที่กำลังรับแรงของเหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่และสังเกตพบพฤติกรรมการดัดออกนอกกระนาบของตัวอย่างทดสอบทั้งประเภทที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลและไม่สมดุล

การทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่า มีงานวิจัยไม่มากนัก ที่ทำการตรวจสอบกำลังรับแรงของรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กำลังรับแรงของรอยเชื่อมที่เป็นรอยเชื่อมแบบไม่สมดุลที่ใช้ งานร่วมกับองค์อาคารที่มีพฤติกรรมการดัดออกนอกกระนาบของเหล็กฉาก งานวิจัยเกี่ยวกับเหล็กฉากที่ผ่านมาทั้งหมดเน้นที่ พฤติกรรมการรับแรงของเหล็กฉากทั้งหมด ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังรับแรง ดึงแบบสถิต (Static Load) ของรอยเชื่อมทั้งประเภทสมดุล และไม่สมดุลในการรับแรง ว่าได้รับผลกระทบจากพฤติกรรมการดัดออกนอกกระนาบหรือไม่

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ประกอบด้วย เหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่ ที่มีจุดต่อเป็นรอยเชื่อมแบบ จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของ หน้าตัด หรือแบบสมดุล (Balanced) และจุดศูนย์กลางของ รอยเชื่อมไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด หรือ แบบไม่สมดุล (Unbalanced) การออกแบบตัวอย่างทดสอบ ทั้งหมดเป็นไปตามข้อกำหนด AISC เพื่อให้เกิดการวิบัติที่ รอยเชื่อม โดยใช้ค่ากำลังของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASME SECTION II SFA-5.1/SFA-5.1A [12] ออกแบบให้รอยเชื่อมมีกำลังรับแรงน้อยกว่ากำลังรับแรงดึง ของเหล็กฉาก ที่คำนวณตามกำลังครากและกำลังรับแรงดึง ประลัยที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-02a [13] ดังแสดงในตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ รวมถึงความยาวของรอยเชื่อม L1 และ L2 แสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความยาวของรอยเชื่อมทั้งแบบสมดุล (Balanced) และไม่สมดุล (Unbalanced)

และตารางที่ 2 รอยเชื่อมทั้งหมดในตัวอย่างทดสอบมีความหนา 6 มม.

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบวัสดุตามมาตรฐาน ASTM

วัสดุ	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากต่ำสุด (MPa)	กำลังรับแรงดึงประลัย (MPa)
เหล็กฉาก 120×120×8 mm	326	453
เหล็กฉาก 65×65×8 mm	295	428
แผ่นเหล็ก	271	407
ลวดเชื่อม	448	531

รูปที่ 3-5 แสดงการจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบมีการติดตั้ง มาตรฐานวัดความเครียด (Strain Gauge) และเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่ (Linear Variable Differential Transformer; LvdT) ที่บริเวณที่รองรับเพื่อวัดค่าการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ การทดสอบจะใช้แรงดึงแบบสถิต (Static Load) โดยใช้เครื่องทดสอบ Hydraulic Actuator ขนาด 450 กิโลนิวตัน โดยด้านหนึ่งของตัวอย่างทดสอบจะยึดกับฐานรองรับ ส่วนอีกด้านหนึ่งจะยึดกับหัวของเครื่องทดสอบ Hydraulic Actuator

การทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการโครงสร้างของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [14]

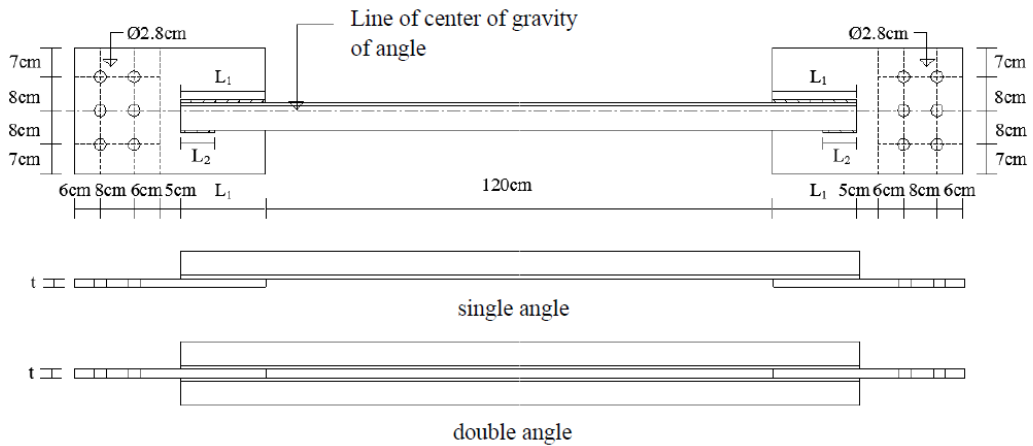
ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดของตัวอย่างทดสอบ (mm)	ความหนาแผ่นประกบ (mm)		ความยาวรอยเชื่อม (mm)		รูปแบบของรอยเชื่อม
		t	L1	L2		
S1-B-G10	65×65×8	10	120	50	Balanced	
S1-U-G10	65×65×8	10	85	85	Unbalanced	
D1-U-G10	65×65×8	10	120	50	Balanced	
D1-B-G10	65×65×8	10	85	85	Unbalanced	
S2-B-G10	120×120×8	10	120	50	Balanced	
S2-U-G10	120×120×8	10	85	85	Unbalanced	
D2-B-G10	120×120×8	10	120	50	Balanced	
D2-U-G10	120×120×8	10	85	85	Unbalanced	
S2-B-G10-a	120×120×8	10	240	90	Balanced	
S2-U-G10-a	120×120×8	10	165	165	Unbalanced	

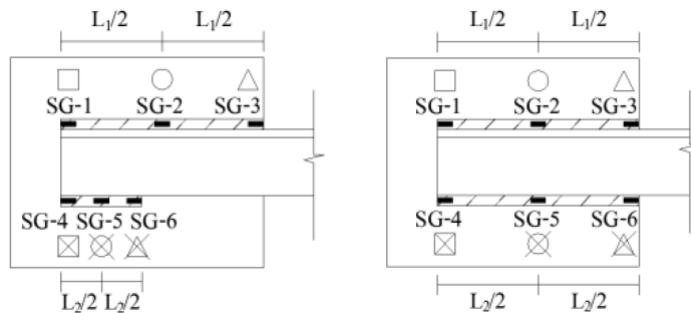
หมายเหตุ: B หมายถึงรอยเชื่อมเป็นแบบสมดุล U หมายถึงรอยเชื่อมแบบไม่สมดุล

D หมายถึงตัวอย่างทดสอบเป็นแบบเหล็กฉากคู่ S หมายถึงตัวอย่างทดสอบเป็นแบบเหล็กฉากเดี่ยว

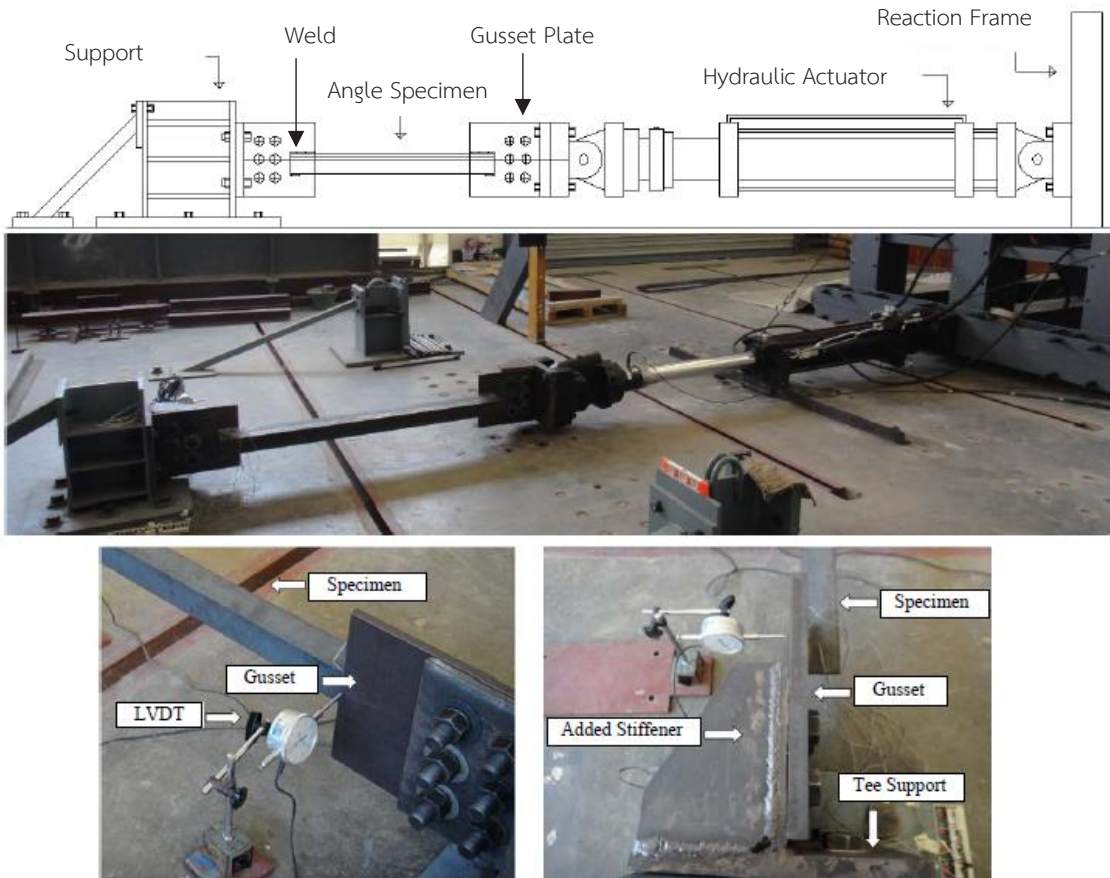
a หมายถึงตัวอย่างทดสอบใช้รอยเชื่อมที่ยาวกว่า



รูปที่ 3 รายละเอียดทั่วไปของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งและชื่อของมาตรวัดความเครียดบนรอยเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 การเตรียมการทดสอบและตัวอย่างทดสอบ

ผลการทดสอบของตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งทำการทดสอบจนเกิดการวิบัติ แสดงอยู่ในตารางที่ 3

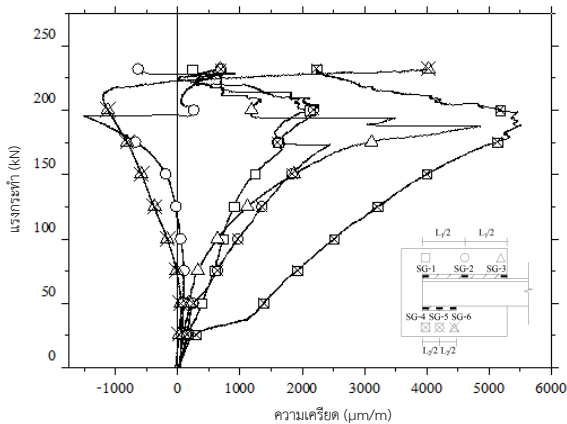
ตารางที่ 3 ยังแสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนระบุของจุดต่อที่คำนวณตามวิธีการของ AISC โดยไม่พิจารณาผลของระยะเยื้องศูนย์ และอัตราส่วนของกำลังที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังที่ได้จากการคำนวณ การฉีกขาดของจุดต่อ (รอยเชื่อม) ภายใต้แรงเฉือนเป็นรูปแบบการวิบัติเพียงรูปแบบเดียวที่เกิดขึ้นในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 และตัวอย่างกราฟแสดงผลระหว่างแรงและค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดความเครียดจากตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากเดี่ยวที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลงและไม่สามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 6 การวิบัติแบบฉีกขาดภายใต้แรงเฉือนของรอยเชื่อม

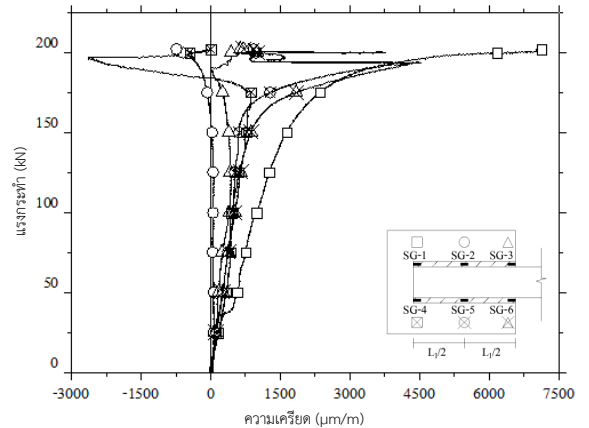
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังสูงสุดของจุดต่อ ที่ได้จากการคำนวณ (kN)	กำลังที่ได้จาก การทดสอบ (kN)	อัตราส่วนกำลังที่ได้จากการทดสอบ/ กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณ ตามข้อกำหนดของ AISC	ระยะเคลื่อนที่หลังแผ่น ประกบ (mm)
S1-B-G10	230	232	1.01	6.72
S1-U-G10	230	202	0.88	4.25
D1-B-G10	459	415	0.90	-
D1-U-G10	459	394	0.86	-
S2-B-G10	230	200	0.87	0.60
S2-U-G10	230	181	0.79	0.44
D2-B-G10	459	417	0.91	-
D2-U-G10	459	373	0.81	-
S2-B-G10-a	446	363	0.81	6.09
S2-U-G10-a	446	366	0.82	3.44



รูปที่ 7 ตัวอย่างกราฟค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบ
ตัวอย่างทดสอบ S1-B-G10

ค่าความเครียดที่อ่านได้จากมาตรวัดความเครียดนี้เป็นเพียงค่าที่แสดงถึงแนวโน้มของพฤติกรรมเท่านั้น ไม่ใช่ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริง หรือค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น เนื่องจากมาตรวัดความเครียดเป็นเครื่องมือวัดที่มีความเหมาะสมในการใช้วัดความเครียดที่เป็นความเครียดดึงฉาก หรือความเครียดที่พื้นผิว การวัดค่าความเครียดในการทดสอบนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ค่าที่ได้ประกอบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 8 ตัวอย่างกราฟค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบ
ตัวอย่างทดสอบ S1-U-G10

อย่างไรก็ตาม ผลของความเครียดที่ได้แสดงให้เห็นแนวโน้มของพฤติกรรมเชิงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดอัดและความเครียดดึง รวมถึงตำแหน่งโดยประมาณของความเครียดสูงสุด

3.2 การวิเคราะห์และอภิปรายผลทดสอบ

ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดแสดงให้เห็นว่าความเครียดมีค่าไม่คงที่ ดังเห็นได้จากค่า

ตารางที่ 4 ผลกระทบเนื่องจากการใช้รอยเชื่อมแบบ Unbalanced ที่มีต่อกำลังของจุดต่อแบบรอยเชื่อม

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดตัวอย่างทดสอบ (mm)	กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณ (kN)	กำลังที่ได้จากการทดสอบ (kN)	อัตราส่วนกำลังที่ได้จากการทดสอบ/กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ AISC	ผลต่าง (ร้อยละ)
D1-B-G10	65×65×8	459	415	0.90	-
D1-U-G10	65×65×8	459	394	0.86	ลดลงร้อยละ 4
D2-B-G10	120×120×8	459	417	0.91	-
D2-U-G10	120×120×8	459	373	0.81	ลดลงร้อยละ 10

ความเครียดที่เกิดขึ้น ในตัวอย่างทดสอบ S1-B-G10 ซึ่งใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลง มีค่าสูงที่สุดเป็นค่าบวกที่มาตรวจวัดความเครียดในตำแหน่งที่ SG-3 และ SG-4 ในขณะที่ค่าความเครียดในตำแหน่งที่ SG-2 และ SG-6 เป็นลบ และค่าความเครียดในตำแหน่ง SG-2 และ SG-5 มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นตัวอย่างทดสอบ S1-U-G10 ซึ่งใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลง มีค่าสูงที่สุดเป็นค่าบวกที่มาตรวจวัดความเครียดในตำแหน่งที่ SG-1 และมีค่าสูงกว่าความเครียดที่วัดได้จากตำแหน่งที่อยู่ถัดไป (SG-2) อย่างเห็นได้ชัด ค่าความเครียดที่วัดได้นั้นมีแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบจากงานของ Gibson และ Wake [4] ค่าความเครียดที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบอื่น ๆ ก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับตัวอย่างที่แสดงนี้ทั้งหมด [14] ทำให้สรุปได้ว่าจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมอยู่คนละตำแหน่งกับตำแหน่งที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไป ซึ่งมาจากการตั้งสมมติฐานว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาอภิปรายเป็นหัวข้อได้ดังนี้

3.3 ผลกระทบที่การใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลง (Unbalanced) มีต่อกำลังรับแรงของจุดต่อเหล็กฉาก

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากคู่ที่ใช้กับรอยเชื่อมแบบสมดุลงและไม่สมดุลง เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบเนื่องจากการใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลงเพียงอย่างเดียว โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการตัดนอกระนาบของเหล็กฉาก ดังนั้นผลที่ได้จากตัวอย่างทดสอบที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลงจึงเป็น

ค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบผลกระทบ

จากผลในตารางที่ 4 จะเห็นว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากขนาด 65×65×8 มม. กำลังรับแรงของจุดต่อซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่ปลายของเหล็กฉากที่ใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลง มีกำลังรับแรงต่ำกว่าจุดต่อที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลงร้อยละ 4 อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากการทดสอบกับกำลังที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC จะเห็นว่า กำลังที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงที่ได้จากการคำนวณถึงร้อยละ 10 และ 14 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการสมการที่ใช้ในการคำนวณ อาจประเมินค่ากำลังสูงกว่าความเป็นจริง สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากขนาด 120×120×8 มม. กำลังรับแรงของจุดต่อซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่ปลายของเหล็กฉากที่ใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลง มีกำลังรับแรงต่ำกว่าจุดต่อที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลงร้อยละ 10 และกำลังรับแรงที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ AISC ถึงร้อยละ 9 และ 19 ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากขนาด 120×120×8 มม. มีขนาดใหญ่กว่า ย่อมทำให้ระยะระหว่างรอยเชื่อม หรือระยะพิทัก มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้กำลังรับแรงของจุดต่อมีค่าต่ำลง

ผลของการใช้รอยเชื่อมที่ไม่สมดุลงส่งผลให้กำลังรับแรงของรอยเชื่อมลดลง อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าการวิบัติของรอยเชื่อมแบบสมดุลงที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC แล้วถึงร้อยละ 10

ตารางที่ 5 ผลกระทบเนื่องจากการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบ ที่มีต่อกำลังของจุดต่อแบบรอยเชื่อม

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดตัวอย่างทดสอบ (mm)	กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณ (kN)	กำลังที่ได้จากการทดสอบ (kN)	อัตราส่วนกำลังที่ได้จากการทดสอบ/กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ AISC	ผลต่าง (ร้อยละ)
D1-B-G10	65×65×8	459	415	0.90	-
S1-B-G10	65×65×8	230	232	1.01	ไม่ลดลง
D2-B-G10	120×120×8	459	417	0.91	-
S2-B-G10	120×120×8	230	200	0.87	ลดลงร้อยละ 4

ตารางที่ 6 ผลกระทบเนื่องจากระยะพิทัก

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดตัวอย่างทดสอบ (mm)	กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณ (kN)	กำลังที่ได้จากการทดสอบ (kN)	อัตราส่วนกำลังที่ได้จากการทดสอบ/กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ AISC	ผลต่าง (ร้อยละ)
S1-B-G10	65×65×8	230	232	1.01	-
S2-B-G10	120×120×8	230	200	0.87	ลดลงร้อยละ 13
S1-U-G10	65×65×8	230	202	0.88	-
S2-U-G10	120×120×8	230	181	0.79	ลดลงร้อยละ 9

3.4 ผลกระทบที่การเอียงศูนย์กลางนอกระนาบ (Out of Plane) มีต่อกำลังรับแรงของจุดต่อของเหล็กฉาก

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบเฉพาะผลกระทบเนื่องจากการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของเหล็กฉากเอง ไม่ได้อยู่บนตัวของเหล็กฉาก ข้อมูลในตารางนี้จึงประกอบด้วยผลทดสอบของกำลังรับแรงของจุดต่อในเหล็กฉากคู่และเหล็กฉากเดี่ยวที่ใช้รอยเชื่อมแบบสมดุลง่ายอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผลของการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบ (เหล็กฉากคู่) และตัวอย่างทดสอบที่มีผลของการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบ (เหล็กฉากเดี่ยว) โดยใช้ผลที่ได้จากตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากคู่เป็นค่าอ้างอิง การเปรียบเทียบผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบนี้ จะใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังที่ได้จากการทดสอบกับกำลังที่ได้จากการคำนวณเป็นหลัก เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีจำนวนเหล็กฉากไม่เท่ากัน กล่าวคือ ตัวอย่างมีทั้งประเภทเหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่

จากผลที่แสดงอยู่ในตารางที่ 5 กำลังรับแรงของ

รอยเชื่อมซึ่งเป็นจุดต่อที่ปลายของเหล็กฉากขนาด 120×120×8 มม. ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเอียงศูนย์กลางนอกระนาบเพียงร้อยละ 5 ในขณะที่จุดต่อที่ปลายของเหล็กฉากขนาด 65×65×8 มม. ไม่ได้รับผลกระทบ สังเกตได้จากกำลังที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับกำลังที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเอียงศูนย์กลางตามข้อกำหนดของ AISC

3.5 ผลกระทบเนื่องจากการจัดวางรอยเชื่อมและความยาวของรอยเชื่อมที่มีต่อกำลังรับแรงของจุดต่อ

ผลกระทบเนื่องจากการจัดวางรอยเชื่อม หรือระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม (ระยะพิทัก) ซึ่งมีค่าเท่ากับความกว้างของขาของเหล็กฉาก แสดงอยู่ในตารางที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยผลลัพธ์จากตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดเหล็กฉากแตกต่างกัน ทำให้ระยะพิทักของรอยเชื่อมแตกต่างกัน อนึ่ง ข้อมูลในตารางที่ 6 นี้แสดงเฉพาะกำลังของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมเหล็กในฉากเดี่ยวที่ได้รับผลกระทบมาก ผลกระทบเนื่องจากความยาวของรอยเชื่อมแสดงอยู่ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลกระทบเนื่องจากความยาวของรอยเชื่อม

ตัวอย่างทดสอบ	ความยาวรอยเชื่อม (mm)		กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณ (kN)	กำลังที่ได้จากการทดสอบ (kN)	อัตราส่วนกำลังที่ได้จากการทดสอบ/กำลังสูงสุดของจุดต่อที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ AISC	ผลต่าง (ร้อยละ)
	L ₁	L ₂				
S2-B-G10	120	50	230	200	0.87	-
S2-B-G10-a	240	90	446	363	0.81	ลดลงร้อยละ 6
S2-U-G10	85	85	230	181	0.79	-
S2-U-G10-a	165	165	446	366	0.82	ไม่ลดลง

ผลที่แสดงอยู่ในตารางที่ 6 แสดงว่าระยะพิคัดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของเหล็กฉาก ส่งผลต่อกำลังรับแรงของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญในรอยเชื่อมที่ใช้กับเหล็กฉากเดียว ในกรณีที่รอยเชื่อมเป็นแบบสมดุล ตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากขนาด 65×65×8 มม. มีกำลังรับแรงที่ได้จากการทดสอบเท่ากับกำลังรับแรงที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเอียงศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากขนาด 120×120×8 มม. กำลังรับแรงของจุดต่อมีค่าต่ำกว่าจุดต่อที่เป็นเหล็กฉาก 65×65×8 มม. รวมถึงกำลังที่ได้จากการคำนวณถึงเกือบร้อยละ 15 ในกรณีที่รอยเชื่อมเป็นแบบไม่สมดุล กำลังรับแรงของจุดต่อมีค่าต่ำกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเอียงศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC สูงถึงร้อยละ 20 สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เป็นเหล็กฉากทั้งสองขนาด

การเปรียบเทียบผลเนื่องจากความยาวของรอยเชื่อมในตารางที่ 7 ใช้อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ได้จากการทดสอบกับกำลังที่ได้จากการคำนวณในการเปรียบเทียบกำลังเป็นหลัก เพื่อแสดงให้เห็นผลกระทบจากความยาวของรอยเชื่อมอย่างชัดเจน เนื่องจากรอยเชื่อมที่ยาวกว่าย่อมมีกำลังรับแรงที่สูงกว่าโดยธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่า รอยเชื่อมที่มีความยาวมาก อาจทำให้จุดต่อมีกำลังรับแรงลดลงได้มากถึงร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเอียงศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC ในกรณีที่รอยเชื่อมเป็นแบบสมดุล ในขณะที่รอยเชื่อมแบบไม่สมดุล ค่าอัตราส่วนแสดงให้เห็นว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 20

ไม่ว่ารอยเชื่อมที่ใช้จะมีความยาวเท่าใดก็ตาม

ข้อกำหนด AISC แนะนำว่า หากรอยเชื่อมที่ใช้มีความยาวไม่เกินกว่า 100 เท่าของความหนาของรอยเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวประสิทธิผลในการคำนวณกำลังเชื่อม อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ความยาวของรอยเชื่อมที่ใช้มีความยาวน้อยกว่า 100 เท่าของความหนารอยเชื่อมทั้งหมด แต่กำลังรับแรงที่ได้จากการทดลองกลับมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณถึงร้อยละ 20 ในหลาย ๆ กรณี

4. สรุป

บทสรุปการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเอียงศูนย์ความยาวของรอยเชื่อม และการจัดวางรอยเชื่อม ที่มีต่อกำลังรับแรงของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมในเหล็กฉากภายใต้แรงดึงมีดังต่อไปนี้

1) ค่าความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดแสดงให้เห็นว่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับผลที่ได้ในงานของ Gibson และ Wake [4] ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการใช้รอยเชื่อมแบบสมดุล (Balanced) ด้วยการคำนวณแบบสถิตอาจไม่ส่งผลให้รอยเชื่อมเกิดความสมดุลอย่างแท้จริง เนื่องจากจุดศูนย์ถ่วงของรอยเชื่อมยังคงไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กฉาก

2) การใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุล (Unbalanced) กับจุดต่อประเภทรอยเชื่อมที่ปลายเหล็กฉาก อาจส่งผลทำให้กำลังรับแรงของจุดต่อมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเอียงศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISC ได้มากถึงร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม จุดต่อที่ใช้รอยเชื่อมแบบ

สมดุลงี้มีกำลังรับแรงที่ลดลงอย่างมีนัยเช่นเดียวกัน

3) ผลเนื่องจากการเยื้องศูนย์นอกระนาบของเหล็กฉาก ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่นอกหน้าตัด ไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมที่ปลายเหล็กฉาก อย่างไรก็ตาม การใช้รอยเชื่อมแบบไม่สมดุลงี้กับเหล็กฉากเดี่ยวที่มีผลเนื่องจากการเยื้องศูนย์นี้ อาจส่งผลให้กำลังรับแรงของจุดต่อมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์ตามข้อกำหนดของ AISI ได้ถึงกว่าร้อยละ 10

4) จุดต่อประเภทรอยเชื่อมที่ปลายเหล็กฉากเดี่ยวที่มีระยะพิคัดมาก เนื่องจากใช้ร่วมกับเหล็กฉากขนาดใหญ่ อาจมีกำลังรับแรงน้อยกว่ากำลังที่คำนวณตามข้อกำหนดของ AISI ถึงร้อยละ 20

5) ความยาวของรอยเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความยาวน้อยกว่า 100 เท่าของความหนาของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นพิคัดที่ AISI แนะนำว่ายังสามารถใช้ความยาวรอยเชื่อมโดยไม่ต้องปรับลดค่าเป็นความยาวประสิทธิผลได้ แต่กำลังรับแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลองกลับมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณถึงร้อยละ 20 ในหลาย ๆ กรณี

ข้อเสนอแนะสำหรับการประเมินกำลังของจุดต่อประเภทรอยเชื่อมที่ใช้กับเหล็กฉาก

1) ใช้รอยเชื่อมประเภทสมดุลงี้

2) เมื่อต้องใช้งานหรือออกแบบรอยเชื่อมที่มีระยะพิคัดหรือความยาวมาก ควรลดกำลังที่นำไปใช้งานจริงลงจากกำลังที่คำนวณได้ร้อยละ 20

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Institute of Steel Construction (AISC) (2016), *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [2] W.H. Weiskopf and M.Male, "Stress distribution in Side-welded joints," *Journal of the American*

Bureau of Welding, vol. 9, pp. 23–48, 1930.

- [3] S.C. Hollister and A.S. Gelman, 1932, "Distribution of stresses in welded double Butt-strap joints," *Journal of the American Welding Society*, vol. 11, pp. 24–31, 1932.
- [4] G.J. Gibson and B.T. Wake, "An investigation of weld connections for angle tension members," *Journal of the American Welding Society*, vol. 21, no. 1, pp. 44–49, 1942.
- [5] L. J. Butler and G. L. Kulak, "Strength of fillet welds as a function of direction of load," *Welding Journal, Welding Research Supplement*, vol. 50, no. 5, pp. 231s–234s, 1971.
- [6] A. M. Kanvinde, B. V. Fell, I. R. Gomez, and M. Robert, "Predicting fracture in structural fillet welds using traditional and micromechanical fracture models," *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 3325–35, 2008.
- [7] A. M. Kanvinde, I. R. Gomez, M. Robert, and B. V. Fell, "Strength and ductility of fillet welds with transverse root notch," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 948–958, 2009.
- [8] P. E. Regan and P. R. Salter, "Tests on Welded-angle tension members," *The Structural Engineering*, vol. 62B, no. 2, pp. 25–30, 1984.
- [9] Y. Wu and G. L. Kulak, "Shear lag in bolted single and double angle tension members," Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alta. Structural Engineering Report No. 187, 1993.
- [10] M. Petretta, "An investigation of the shear lag effect in welded angle tensile connections," Master of Applied Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1999.



- [11] H. T. Zhu, M. C. H. Yam, A. C. C. Lam, and V. P. lu, “The shear lag effects on welded steel single angle tension members,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 1171–86, 2009.
- [12] *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM d638-02a, 2013.
- [13] *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, ASME Section II c sfa-5.1/sfa-5.1m, 2010.
- [14] O. Mekpramual, “Investigation of strength of angle welded connection under tension by Full-scale tests,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2014 (in Thai).