

กำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อแผ่นเหล็กโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา

สิทธิชัย แสงอาทิตย์^{1*} และ ศาสน์ สุขประเสริฐ²

Seangatith, S.^{1*} and Sukprasert, S.² (2004). Tensile Strength of Steel Plate Welded Connection by Welders in Nakhon Ratchasima Province. *Suranaree J. Sci. Technol.* 11:115-124.

Received: Aug 29, 2003; Revised: Oct 31, 2003; Accepted: Dec 26, 2004

Abstract

The experimental results on the tensile strength of the steel plate welded connections by the welders in Nakhon Ratchasima were presented and compared with the EIT welding connection design equations. The weld joints were classified into three types: butt joint with groove weld, lap joint with fillet weld subjected to tensile load parallel to the weld joint, lap joint with fillet weld subjected to tensile load perpendicular to the weld joint. It was found that the obtained factors of safety, which was the ratio between the test specimen tensile strength and the tensile strength based on the EIT design equations, were generally lower than the factors of safety specified in EIT specification. Also, for the specimens in a given weld joint pattern welded by a welder, the tensile strength of the test specimens had a high variation, indicating that the qualification of the welder in Nakhon Ratchasima province was not uniform. Thus, an urgent controlling measure must be developed to improve the welder qualification to an acceptable standard, such as the American Welder Society standard.

Keywords: Factor of safety, tensile strength, welding, steel plate connection

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อแผ่นเหล็กโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา และเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้กับค่ากำลังรับแรงดึงที่คำนวณจากสมการออกแบบรอยเชื่อมของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) ในการศึกษา รอยเชื่อมถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบประกอบด้วยรอยเชื่อมตอแบบเชื่อมชน (butt joint) รอยเชื่อมตอแบบเชื่อมทับ (lap joint) ขนานกับแรงดึง และแบบรอยเชื่อมตอแบบเชื่อมทับตั้งฉากกับแรงดึง จากการศึกษาพบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของรอยเชื่อมที่ได้จากการหารค่ากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบด้วยค่ากำลังรับแรงดึงจากสมการของ

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000
E-mail:sitichai@ccs.sut.ac.th

² สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

วสท. ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าตามข้อกำหนดของ วสท. นอกจากนั้นแล้ว ค่ากำลังรับแรงดึงของแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ได้จากช่างเชื่อมแต่ละรายในการเชื่อมรูปแบบหนึ่ง ๆ ยังมีความแตกต่างกันค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับช่างเชื่อมอ้างอิง ซึ่งแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของฝีมือในการเชื่อมของช่างเชื่อม ในจังหวัดนครราชสีมา ถึงแม้ว่าช่างเชื่อมที่สุ่มตัวอย่างจะมีประสบการณ์ในการทำงานเชื่อมโครงสร้างประเภทต่าง ๆ โดยเฉลี่ย 10 ปี ดังนั้น จึงควรกำหนดมาตรการในการควบคุมและอบรมช่างเชื่อมให้มีเทคนิคและฝีมือในการเชื่อมให้สูงขึ้นตามมาตรฐานสากลอย่างเร่งด่วน เช่น มาตรฐานของสมาคมช่างเชื่อมอเมริกัน เป็นต้น

บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา รัฐบาลได้มีนโยบายส่งเสริมอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม หรือ SME ทำให้มีการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตภูมิภาคและตามหัวเมืองใหญ่ โครงสร้างที่นิยมใช้ในการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กดังกล่าวคือ โครงสร้างเหล็ก (steel structures) ทั้งนี้เนื่องจากว่า โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีกำลังสูง (high strength) มีความเหนียว (ductility and toughness) สูง และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ก่อสร้างโดยใช้วัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ทำให้โครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว นอกจากนั้นแล้ว โครงสร้างเหล็กยังสามารถถูกต่อเติมและถูกรื้อถอนและนำไปก่อสร้างใหม่ได้โดยง่ายแต่เนื่องจากชิ้นส่วนของโครงสร้างเหล็กไม่สามารถหล่อเป็นชิ้นส่วนต่อเนื่องตลอดโครงสร้างได้ ดังนั้น ชิ้นส่วนของโครงสร้างจึงมักถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยวิธีการเชื่อมต่อที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ การเชื่อมต่อโดยสลักเกลียว (bolted connection) และการเชื่อมต่อด้วยการเชื่อมไฟฟ้า (welded connection) ซึ่งในการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก การเชื่อมต่อด้วยการเชื่อมไฟฟ้าจะค่อนข้างได้รับความนิยมมากกว่าการเชื่อมต่อโดยสลักเกลียว ทั้งนี้เนื่องจากว่ารอยเชื่อมต่อโดยใช้การเชื่อมต่อด้วยไฟฟ้ามีความแข็งแรงเท่ากับความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้ทำโครงสร้างที่ถูกเชื่อมต่อ ทำให้รวดเร็วและประหยัด เพราะไม่ต้องใช้แผ่นประกบ (gusset plate) จำนวนมากเท่ากับการเชื่อมต่อโดยใช้สลักเกลียว สามารถ

ทำการแก้ไขข้อผิดพลาดได้ง่าย ใช้งานได้กว้างขวาง เช่น ในการเชื่อมต่อเหล็กกลมกลวงเข้ากับชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ และมีเสียงรบกวนน้อย แต่การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็กด้วยการเชื่อมไฟฟ้า อาจเกิดการวิบัติได้โดยง่ายหากรอยเชื่อมไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการขาดความรู้ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการเชื่อมของช่างเชื่อม โดยจะทำให้กำลังประลัยหรือกำลังรับแรงสูงสุด (ultimate strength) ของรอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่าที่ได้คำนวณออกแบบไว้ ดังตัวอย่างการวิบัติที่เกิดขึ้นที่รอยเชื่อมต่อของโครงข้อหมุนเหล็ก (steel truss) ที่ใช้รองรับหลังคาของโรงงานคินสอ สีเทียนที่อำเภอไทรน้อย จังหวัดอยุธยา

เนื่องจากรอยเชื่อมต่อของชิ้นส่วนของโครงสร้างเหล็กมีความสำคัญต่อความแข็งแรง ความทนทาน และความมีเสถียรภาพของโครงสร้างมาก และในประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานของรัฐหรือสมาคมมาควบคุมคุณภาพและสอบเทียบฝีมือของช่างเชื่อมที่ได้รับการรับรองทางกฎหมายดังเช่นในต่างประเทศ เช่น ในสหรัฐอเมริกาโดย American Welding Society เป็นต้น มีเพียงหน่วยงานบางหน่วยงานเท่านั้น เช่น กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงมหาดไทย เป็นต้น ที่ทำการจัดอบรมและพัฒนาฝีมือช่างเชื่อมอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้ช่างเชื่อมที่ผ่านการอบรมดังกล่าวก็ยังคงมีจำนวนที่จำกัด ทำให้คุณภาพของช่างเชื่อมแตกต่างกันไปตามพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศค่อนข้างสูงมาก โดยเฉพาะระหว่างช่างเชื่อมที่ทำงานอยู่ในบริษัทก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีมาตรฐานการตรวจสอบฝีมือของช่างเชื่อม (welder

qualification) อย่างถูกต้อง ดังตัวอย่างขั้นตอนที่นำเสนอในเอกสารอ้างอิง 1 กับช่างเชื่อมที่ทำงานอยู่ในบริษัทหรือผู้รับเหมางานขนาดเล็กในเขตภูมิภาคที่ไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบฝีมือของช่างเชื่อม ดังนั้น วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือเพื่อนำเสนอข้อมูลของกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมไฟฟ้าของแผ่นเหล็กที่ถูกเชื่อมโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างช่างเชื่อมจำนวน 6 ราย และเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวกับกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมที่ถูกเชื่อมโดยช่างเชื่อมที่ได้รับการตรวจสอบแล้วและกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมที่คำนวณจากสมการการออกแบบรอยเชื่อมของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) เพื่อหาอัตราส่วนความปลอดภัยของกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อม

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบทำด้วยแผ่นเหล็ก (steel plate) ที่มีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐานมอก. 55-2516 จากการทดสอบแรงดึง (tension test) ตามมาตรฐาน ASTM E8 พบว่า แผ่นเหล็กมีหน่วยแรงคลาก (yielding stress) 288.5 เมกะปาสคาล (2,830 ksc) มีหน่วยแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile stress) 356.8 เมกะปาสคาล (3,500 ksc) และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent of elongation) ในช่วงความยาว 50 มิลลิเมตร 24.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคุณสมบัติข้างต้นสอดคล้องกับเหล็กกล้าคาร์บอนชนิด A36 ตามมาตรฐาน ASTM แผ่นเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ตัดมาจากแผ่นเหล็กในแนวที่ขนานกับแนวรีดเหล็ก โดยมีขนาดความยาว 250 มิลลิเมตร ความกว้าง 75 มิลลิเมตร และความหนา 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร การกำหนดความหนาข้างต้นนี้มีจุดประสงค์ให้ครอบคลุมความหนาของเหล็กโครงสร้าง (structural steel) ที่มักใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างเหล็กขนาดเล็ก

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นลวดเชื่อมยี่ห้อ Kobe Steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

เบอร์ E6013 ซึ่งมีกำลัง 60 ksi (413.7 เมกะปาสคาล หรือ 4,220 ksc) และอยู่ในกลุ่มลวดเชื่อมที่มีระดับความยากในการเชื่อมปานกลางคือ ระดับ F2 โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมและจำนวนครั้งในการเชื่อมเพื่อให้ได้ขนาดของรอยเชื่อมที่ต้องการจะให้ช่างเชื่อมเป็นผู้กำหนดตามประสบการณ์ของช่างเชื่อม

รูปแบบของจุดเชื่อมต่อบ้างออกเป็น 3 ประเภทตามลักษณะที่ใช้มากในการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กขนาดเล็กคือ

1. รอยเชื่อมแบบเชื่อมชน (butt joint) แบบ square ที่ได้จากการเชื่อมแบบบากร่อง (groove weld)
2. รอยเชื่อมแบบเชื่อมทาบ (lap joint) ที่ได้จากการเชื่อมแบบพอก (fillet weld) โดยรอยเชื่อมอยู่ในแนวขนานกับแรงดึง

3. รอยเชื่อมเช่นเดียวกับข้อ 2. แต่รอยเชื่อมอยู่ในแนวตั้งฉากกับแรงดึง

ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 1 โดยที่ $L = 30$ มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเหล็กหนา 12 มิลลิเมตร โดยการเชื่อมแบบบากร่องถูกกำหนดให้รอยเชื่อมมีความหนาเท่ากับความหนาของแผ่นเหล็กและการเชื่อมแบบพอกถูกกำหนดให้รอยเชื่อมมีขนาดเท่ากับความหนาของแผ่นเหล็ก โดยใช้กำลังรับแรงดึงสูงสุดของแผ่นเหล็กเท่ากับ 356.8 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงเฉือนของรอยเชื่อมเท่ากับ 413.7 เมกะปาสคาล และการวิเคราะห์และออกแบบ พบว่า ขนาดและความยาวของรอยเชื่อมข้างต้นได้ถูกออกแบบให้มีกำลังไม่เก้นกำลังสูงสุดของแผ่นเหล็ก

การเก็บตัวอย่างทดสอบจะกระทำโดยการออกสำรวจและสัมภาษณ์สถานประกอบการที่ทำธุรกิจรับเหมาก่อสร้างโครงสร้างเหล็กขนาดเล็กในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 6 แห่ง ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 1 โดยสรุปแล้วในการศึกษานี้ช่างเชื่อมมีประสบการณ์ในการทำงานอยู่ระหว่าง 9-13 ปี โดยครึ่งหนึ่งเรียนจบจากโรงเรียนเทคนิคที่มีการฝึกปฏิบัติการด้านการเชื่อมไฟฟ้าและ

อีกครั้งหนึ่งศึกษาการเชื่อมไฟฟ้าจากช่างเชื่อมรุ่นพี่ช่างเชื่อมจากสถานประกอบการแต่ละแห่งจะทำการเชื่อม 3 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมี 2 ความหนา ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และความหนาละ 3 ตัวอย่าง และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบอ้างอิงในการศึกษานี้ยังได้เก็บตัวอย่างทดสอบที่ถูกเชื่อมโดยช่างเชื่อมของบริษัท Slot-Nankai จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทรับเหมางานเชื่อมโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยเฉพาะท่อและถังขนาดกลางถึงใหญ่ โดยพนักงานเชื่อมของบริษัทได้รับการอบรมและตรวจสอบฝีมือแล้วอีก 1 ชุด รวมตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ทั้งสิ้น 126 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาไว้ในสภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยตัวอย่างทดสอบถูกทดสอบหากล้างรับแรงดึงของรอยเชื่อมโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2,000 kN และมีอุปกรณ์เก็บข้อมูลของแรงดึงและการยืดตัวของตัวอย่างทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องมือทดสอบและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ในการทดสอบตัวอย่างทดสอบรอยเชื่อมรูปแบบที่ 1 dial gage ถูกนำมาติดตั้งตามรูปเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยเชื่อม

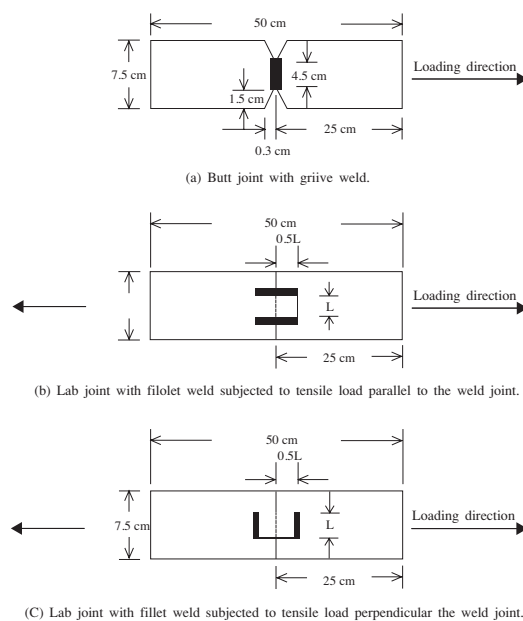


Figure 1. Details of the welded connections used in this study.

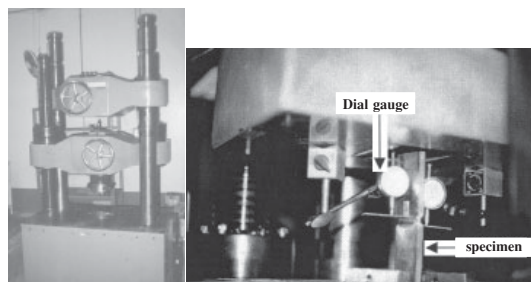


Figure 2. Univeresal Testing Machine and test set-up for type 1 welded connections specimen.

Table 1. Details of welders and specimens, averaged tensile strength, and factor of safety of welded connections.

Welder no.	Experience (years)	Weld pattern-plate thickness (mm)	Averged tensile strength (kN)	tensile strength / welding length (kN/cm)	Factor of safety
1	10	1-6	100.5	21.92	3.01
		1-12	140.9	32.49	2.11
		2-6	113.9	5.58	3.59
		2-12	160.6	8.25	3.04
		3-6	148.9	7.63	4.70
		3-12	227.3	11.77	4.30
2	9	1-6	87.1	20.14	2.61
		1-12	180.2	37.73	2.70
		2-6	92.1	4.68	2.90
		2-12	137.3	6.52	2.60
		3-6	134.3	7.02	4.24
		3-12	212.8	12.02	4.03
3	13	1-6	125.4	24.46	3.76
		1-12	257.6	51.33	3.86
		2-6	122.8	6.15	3.87
		2-12	223.0	11.34	4.22
		3-6	163.6	7.82	5.16
		3-12	244.1	12.45	4.62
4	11	1-6	110.1	21.05	3.30
		1-12	147.7	32.66	2.21
		2-6	114.3	5.60	3.60
		2-12	161.4	8.55	3.05
		3-6	167.3	8.15	5.28
		3-12	270.2	14.87	5.11
5	13	1-6	14.3	23.37	3.42
		1-12	215.8	50.49	3.23
		2-6	115.8	5.74	3.65
		2-12	132.3	6.73	2.50
		3-6	156.4	8.04	4.93
		3-12	181.0	9.21	3.42

Table 1. Details of welders and specimens, averaged tensile strength, and factor of safety of welded connections. (Continued)

welder No.	Experience (years)	welding pattern- plate thickness (mm)	Averaged tensile strength (kN)	tensile strength / welding length (kN/cm)	Factor of safety
6	10	1-6	97.5	20.94	2.92
		1-12	137.7	31.52	2.06
		2-6	104.7	5.42	3.30
		2-12	164.1	8.84	3.11
		3-6	117.3	6.16	3.70
		3-12	137.3	7.27	2.60
7	6	1-6	126.3	24.21	3.78
		1-12	321.9	66.25	4.82
		2-6	109.7	5.63	3.46
		2-12	156.5	7.88	2.96
		3-6	180.8	9.21	5.70
		3-12	225.1	11.66	4.26

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

พฤติกรรมการรับแรงดึงและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบขึ้นอยู่กับรูปแบบของรอยเชื่อมดังที่แสดงในรูปที่ 3-5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยึดตัวของตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ในการศึกษาที่กำหนดให้ระยะจับตัวอย่างทดสอบของเครื่อง UTM มีค่าเท่ากับ 200 มิลลิเมตร เท่ากันทุกตัวอย่างทดสอบ โดยระยะยึดตัวของตัวอย่างทดสอบเป็นระยะที่ loading head เคลื่อนตัว จากรูปเราจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงดึงที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของวัสดุเหนียว (ductile behavior) ทั้งในกรณีของแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร กล่าวคือ รอยเชื่อมจะรับแรงดึงโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะการยึดตัว

ในรูปแบบเชิงเส้นตรง (linear) ในช่วงแรกประมาณ 75 - 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดึงสูงสุด จากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยึดตัวจะค่อยๆ มีความชันลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งอยู่ในแนวนอนเมื่อรอยเชื่อมรับแรงดึงสูงสุด โดยในช่วงที่สองนี้การยึดตัวของรอยเชื่อมจะเกิดขึ้นอย่างมากขณะที่แรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก พฤติกรรมลักษณะนี้เกิดจากการที่รอยเชื่อมเกิดการคลาก (yielding) และในช่วงสุดท้าย เมื่อรอยเชื่อมเริ่มมีการแตกร้าว กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่การยึดตัวเกิดมากขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเกิดการแตกหัก (fracture) ที่รอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบที่หนา 12 มิลลิเมตร จะมีระยะยึดตัวที่จุดวิบัติต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบที่หนา 6 มิลลิเมตรมาก ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของรอยเชื่อมแบบเปราะ (brittle) สาเหตุที่รอยเชื่อมขนาด 12 มิลลิเมตร มีพฤติกรรมดังกล่าวน่าจะมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมขนาด 12 มิลลิเมตร ที่มีมากกว่า

รอยเชื่อมขนาด 6 มิลลิเมตร ซึ่งพบได้จากการสังเกตรอยแตกร้าวของรอยเชื่อม นอกจากนั้นแล้ว ตัวอย่างทดสอบที่มีรอยเชื่อมแบบที่ 3 จะมีการลดลงของกำลังที่รวดเร็วมากก่อนถึงจุดแตกหัก ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 5 ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่รอยเชื่อม

มีการวิบัติที่เกิดขึ้นพร้อมกันตลอดแนวความยาวของรอยเชื่อมและการที่รอยเชื่อมเป็นแบบพอก (fillet weld) ที่มีการถ่ายแรงจากแผ่นเหล็กแผ่นหนึ่งไปยังแผ่นเหล็กอีกแผ่นหนึ่งโดยใช้กำลังรับแรงเฉือนของรอยเชื่อม

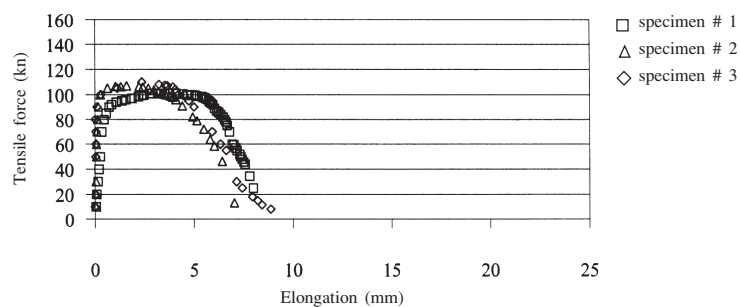


Figure 3. Tensile force-elongation relationship of type 1 welded connection specimen with 6 mm thickness.

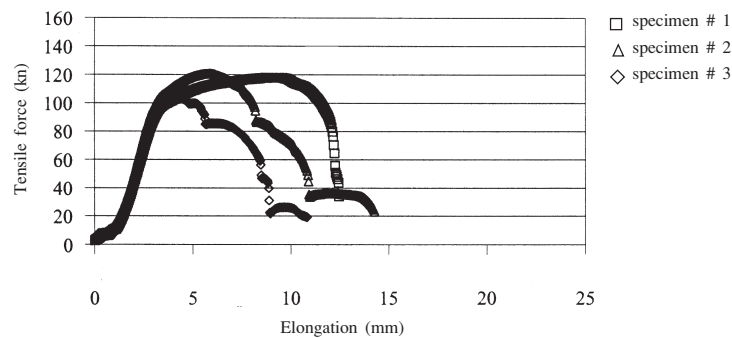


Figure 4. Tensile force-elongation relationship of type 2 welded connection specimen with 6 mm thickness.

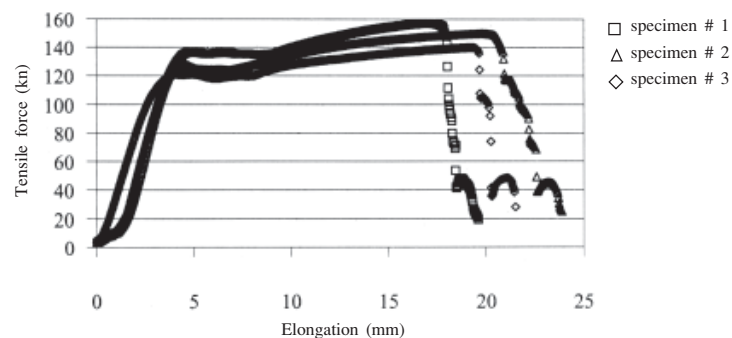


Figure 5. Tensile force-elongation relationship of type 3 welded connection specimen with 6 mm thickness.

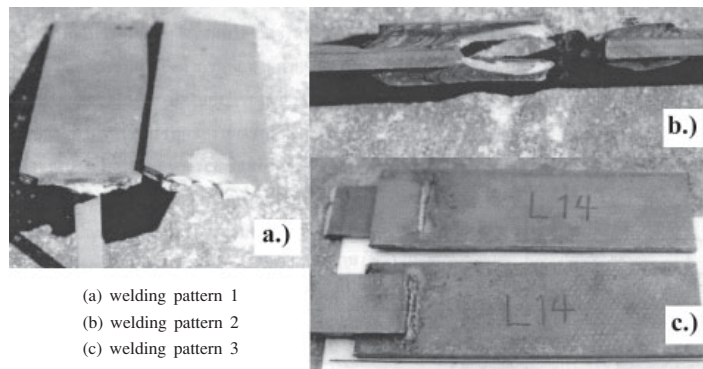


Figure 6. Typical mode of failure of welded connection specimens.

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทั้งสามรูปแบบ จากการสังเกตขณะทดสอบพบว่า การวิบัติของรอยเชื่อมแบบที่ 1 จะเริ่มจากขอบนอกของรอยเชื่อมโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงเมื่อเทียบกับรอยเชื่อมด้านใน ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่บริเวณดังกล่าวมี stress concentration เกิดขึ้นสูงกว่า และการวิบัติจะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ก่อน จากนั้น บริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมจะมีการวิบัติเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กและรอยเชื่อมในลักษณะของการเกิด necking โดยมีระยะนำท่อม 45 องศาับระยะนำของแผ่นเหล็กจนกระทั่งแผ่นเหล็กทั้งสองแยกตัวออกจากกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 6 (a) ในกรณีของตัวอย่างทดสอบแบบที่ 2 การวิบัติของตัวอย่างจะเกิดขึ้นที่รอยเชื่อมในลักษณะการคลากของรอยเชื่อมเนื่องจากแรงเฉือนเนื่องจากรอยเชื่อมพอกมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดอัด โดยจะเริ่มที่บริเวณจุดที่ปลายของแผ่นเหล็กทั้งสองชนกัน ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางความยาวของรอยเชื่อมดังกล่าว จากนั้น การวิบัติจะขยายตัวออกมาที่ปลายของรอยเชื่อมด้านนอก ดังที่แสดงในรูปที่ 6 (b) โดยที่รอยแตกร้าวนรอยเชื่อมจะมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ ในกรณีของตัวอย่างทดสอบแบบที่ 3 การวิบัติเกิดขึ้นที่รอยเชื่อม ดังที่แสดงในรูปที่ 6 (c) โดยรอยแตกจะทำมุม 45 องศาับระยะนำของแผ่นเหล็กเนื่องจากรอยเชื่อมพอกมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดอัด

รอยแตกดังกล่าวมีความหนาของรอยแตกที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและเกิดขึ้นพร้อมกันตลอดความยาวของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบรอยเชื่อม

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยึดตัวของตัวอย่างทดสอบและลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างทดสอบบางส่วนมีพฤติกรรมการรับแรงดึงและลักษณะการวิบัติที่แตกต่างจากตัวอย่างทดสอบโดยส่วนใหญ่ โดยตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจะมีการวิบัติที่ค่าแรงดึงและระยะยึดตัวที่ค่อนข้างต่ำ และจากการพิจารณาลักษณะการแตกร้าพบว่า

1. ในกรณีของรอยเชื่อมแบบที่ 1 ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมักจะมีรอยเชื่อมที่ไม่เต็มหน้าตัดของแผ่นเหล็ก โดยเฉพาะในตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 12 มิลลิเมตร ซึ่งมีความยากในการเชื่อมให้เต็มหน้าตัดของรอยเชื่อมต่อ

2. ในกรณีของรอยเชื่อมแบบที่ 2 ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมักจะมีการวิบัติโดยที่แผ่นประกบจะติดกับตัวอย่างทดสอบข้างละอันเนื่องจากรอยเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอหรือการวางแผ่นเหล็กในขณะเชื่อมที่เอียงศูนย์ ทำให้รอยเชื่อมรับแรงไม่เท่ากัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกี่ยวข้องกับวิธีการเชื่อมและเทคนิคการเชื่อมของช่างเชื่อมเป็นหลัก นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่า บางส่วนของตัวอย่างทดสอบข้างต้นมีความพรุนที่รอยแตกร้า ซึ่งเกิดจากการที่ช่างเชื่อมใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่สูงเกินไป

หรือการให้ระยะช่องว่างของแผ่นเหล็กมากเกินไป และมีเศษ slag ที่รอยแตกร้าว ซึ่งเกิดจากการที่ช่างเชื่อมทำให้รอยเชื่อมเย็นตัวรวดเร็วมากเกินไป ทำให้เกิดการเก็บเศษ slag ไว้ภายในรอยเชื่อมก่อนที่เศษ slag จะลอยขึ้นถึงผิวหน้าของรอยเชื่อม (Larry, 1992)

กำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อม

ตารางที่ 1 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (averaged tensile strength) ของรอยเชื่อม กำลังรับแรงดึงต่อความยาวของรอยเชื่อม และอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) เทียบกับสมการออกแบบรอยเชื่อมต่อของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ของรอยเชื่อมแต่ละรูปแบบ และตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) แรงดึงสูงสุดตามสมการออกแบบของ วสท. และอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยของรอยเชื่อมรูปแบบต่าง ๆ ของช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมาที่ถูกสุ่มตัวอย่าง

จากตารางที่ 1 พบว่า ถ้าแผ่นเหล็กมีความหนาเท่ากันและช่างเชื่อมเป็นบุคคลเดียวกันแล้ว กำลังรับแรงดึงสูงสุดต่อความยาวของรูปแบบการเชื่อมที่ 1 จะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมแบบที่ 2 และแบบที่ 3 โดยเฉลี่ยประมาณ 4 และ 2.9 เท่า ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการที่รอยเชื่อมแบบที่ 1 รองรับแรงดึงโดยตรง ขณะที่รอยเชื่อมแบบที่ 2 และ 3 จะรองรับแรงดึงที่ถ่ายมาจาก

แผ่นเหล็กมายังแผ่นเหล็กประกบ ซึ่งรอยเชื่อมพอกดังกล่าวมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำ เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดอัด นอกจากนั้นแล้ว รอยเชื่อมแบบที่ 3 มีกำลังรับแรงดึงสูงสุดต่อความยาวสูงกว่ารอยเชื่อมแบบที่ 2 เนื่องจากรอยเชื่อมแบบที่ 3 รองรับแรงดึงพร้อมกันตลอดแนวเชื่อมอย่างสม่ำเสมอมากกว่าในรอยเชื่อมแบบที่ 2 ซึ่งทำให้มาตรฐานการออกแบบกำหนดให้ทำการเชื่อมอุ้งมุม (end returns) ในกรณีรอยเชื่อมดังกล่าว

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของช่างเชื่อมรายที่ 1 ถึง 6 กับช่างเชื่อมรายที่ 7 ที่ใช้เป็นช่างเชื่อมอ้างอิง พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ถูกเชื่อมโดยช่างเชื่อมรายที่ 7 มีความแตกต่างของกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมของแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของช่างเชื่อมรายที่ 1 ถึง 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ช่างเชื่อมได้ผ่านมาตรฐานการเชื่อมจะทำให้ช่างเชื่อมมีฝีมือและเทคนิคในการเชื่อมที่ดีและได้รอยเชื่อมที่มีกำลังรับแรงดึงที่สม่ำเสมอ นอกจากนั้นแล้ว จากตารางที่ 2 พบว่า อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบโดยช่างเชื่อมรายที่ 1 ถึง 6 มีค่าค่อนข้างสูงคือ อยู่ระหว่าง 10.8 เปอร์เซ็นต์ ถึง 26.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่างเชื่อมแต่ละรายในจังหวัดนครราชสีมา มีฝีมือในการเชื่อมตัวอย่างทดสอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก

Table 2. Averaged tensile strength, standard deviation, predicted tensile strength by using EIT design equations, and averaged factor of safety of welded connections by the welded in Nakhon Ratchasima.

welding pattern - plate thickness	1/6	1/12	2/6	2/12	3/6	3/12
Averaged Tensile strength, $\bar{\sigma}_{ult}$ (kN)	110.1	180	110.6	163.1	147.5	210.2
standard deviation, S_x (kN)	21.2	47	11.9	32.3	21.8	47.2
$(S_x / \bar{\sigma}_{ult})$ 100, %	19.2	26.1	10.8	19.8	14.8	22.4
Predicted tensile strength by using EIT design equations(kN)	33.38	66.75	31.71	52.85	31.71	52.85
Averaged factor of safety	3.3	2.7	3.5	3.1	4.7	4

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนปลอดภัยของรอยเชื่อมที่ได้จากการหาค่ากำลังรับแรงดึงที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้โดยใช้สมการออกแบบรอยเชื่อมของ วสท. ดังที่แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พบว่า รอยเชื่อมแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ที่ถูกเชื่อมโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา โดยส่วนใหญ่ (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด) มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 3.33 ซึ่งเป็นเกณฑ์ของ วสท. อย่างไรก็ตาม เมื่อแผ่นเหล็กที่เชื่อมต่อมีความหนา 12 มิลลิเมตร แล้วค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณได้จะต่ำกว่าเมื่อแผ่นเหล็กที่เชื่อมต่อมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยเฉพาะในรอยเชื่อมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ 2.7 และ 3.1 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่รอยเชื่อมของแผ่นเหล็กขาดความสมบูรณ์เนื่องจากการเชื่อมไม่เต็มหน้าตัดของแผ่นเหล็กและการเกิดรอยพุนในรอยเชื่อม

บทสรุป

จากการศึกษากำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมแบบต่าง ๆ โดยทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความหนาของแผ่นเหล็ก ชนิดของลวดเชื่อม ชนิดของจุดเชื่อมต่อ ชนิดการเชื่อม และความยาวและขนาดของรอยเชื่อม เป็นต้น พบว่า

1. ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงดึงแบบเหนียว (ductile) สอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็ก แต่มีการวิบัติแบบทันทีทันใดมากกว่า โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะการยืดตัวในรูปแบบเชิงเส้นตรง (linear) ประมาณ 75 - 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดึงสูงสุด และตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติที่รอยเชื่อม โดยรอยเชื่อมแบบที่ 1 มีกำลังรับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยความยาวสูงสุด รองลงมาเป็นรอยเชื่อมแบบที่ 3 และ

แบบที่ 2 ตามลำดับ

2. เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมที่ได้จากตัวอย่างทดสอบรูปแบบที่ 1 และประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของรูปแบบที่ 2 กับสมการออกแบบรอยเชื่อมของ วสท. แล้วพบว่า กำลังรับแรงดึงที่ได้มีอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำกว่าที่ วสท. กำหนดคือ 3.33 โดยที่ตัวอย่างทดสอบแบบที่ 3 เท่านั้น ที่มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าที่ วสท. กำหนด อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงดึงของแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ได้จากช่างเชื่อมแต่ละรายในการเชื่อมรูปแบบหนึ่ง ๆ ยังมีความแตกต่างกันค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับช่างเชื่อมอ้างอิง แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของฝีมือในการเชื่อมของช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา ถึงแม้ว่าช่างเชื่อมที่สุ่มตัวอย่างในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมาจะมีประสบการณ์ในการทำงานเชื่อมโครงสร้างประเภทต่าง ๆ โดยเฉลี่ย 10 ปีก็ตาม ดังนั้น ควรกำหนดมาตรการในการควบคุมอบรมช่างเชื่อมให้มีเทคนิคและฝีมือในการเชื่อมให้สูงขึ้นตามมาตรฐานสากลอย่างเร่งด่วน เช่น มาตรฐานของสมาคมช่างเชื่อมอเมริกัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- สมนึก วัฒนศรีกุล. (2540). การทดสอบวิธีดำเนินการเชื่อมและการทดสอบช่างเชื่อม. *Welding and Metal Technology Journal*. หน้า 56-64.
- รังสี นันทสาร. (2530). การออกแบบโครงสร้างเหล็ก. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- McCormac, J.C. (1992). *Structural Steel Design: ASD Method*. 4th ed. HarperCollins, New York.
- Larry, J. (1992). *Welding Principles and Applications*. Delmer Publishert, New York.