

บทที่ 3 การออกแบบตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การออกแบบตัวอย่างทดสอบ กำลังของวัสดุของตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ และวิธีการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ

การออกแบบตัวอย่างทดสอบจะออกแบบตามข้อกำหนด American Institute of Steel Construction (AISC 2010) โดยตัวอย่างทดสอบจะไม่เกิดการครากจากแรงดึง (Tensile Yielding) หรือการฉีกขาดจากแรงดึง (Tensile Rupture) เนื่องจากต้องการหาค่ากำลังรับแรงของจุดต่อ

ตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากจะใช้รอยเชื่อมขนานกับแรงกระทำ (Longitudinal Weld) ไม่เพิ่มรอยเชื่อมตั้งฉากกับแรงกระทำ (Transverse Weld) เนื่องจากงานวิจัยของ Butler และ Kulak [4] รอยเชื่อมตั้งฉากกับกระทำมีกำลังเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 44 ของรอยเชื่อมขนานกับแรงกระทำ เมื่อเพิ่มรอยเชื่อมตั้งฉากกับแรงกระทำในตัวอย่างทดสอบเหล็กฉาก ส่งผลให้เกินขีดจำกัดของเครื่องทดสอบ ดังนั้นตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากไม่เพิ่มรอยเชื่อมตั้งฉากกับแรงกระทำ

3.1.1 การออกแบบขนาดเหล็กฉาก

การออกแบบขนาดเหล็กฉาก ตามข้อกำหนดการออกแบบ AISC (2010) จะพิจารณากำลังรับแรงดึงทั้งบนพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดและบนพื้นที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผลดังนี้

การครากจากแรงดึงบนพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (Tensile Yielding)

$$P_n = F_y A_g \quad (3.1)$$

เมื่อ P_n คือ กำลังแรงดึงระบุ (kg)

F_y คือ กำลังครากของวัสดุ (kg/cm²)

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (cm²)

การฉีกขาดจากแรงดึงบนพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล (Tensile Rupture)

$$P_n = F_u A_e \quad (3.2)$$

เมื่อ F_u คือ กำลังประลัยของวัสดุ (kg/cm^2)

A_e คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล (cm^2)

การยึดต่อดัวยรอยเชื่อม คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผลดังนี้

$$A_e = U A_g \quad (3.3)$$

เมื่อ U คือ ตัวคูณ Shear Lag

ข้อกำหนด AISC (2010) ค่า U คำนวณหาได้จากสมการ (3.4) ดังนี้ (ยกเว้นเหล็กแผ่นและเหล็กท่อ)

$$U = \left(1 - \frac{\bar{x}}{L} \right) \leq 0.9 \quad (3.4)$$

และค่า U สำหรับแผ่นเหล็ก

$$\begin{aligned} L \geq 2W & : U = 1 \\ 2W > L \geq 1.5W & : U = 0.87 \\ 1.5W > L \geq W & : U = 0.75 \end{aligned} \quad (3.5)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดถึงผิวสัมผัสของจุดต่อยึด (cm)

L คือ ความยาวรอยต่อในทิศทางแรงดึง (cm)

W คือ ความกว้างของเหล็กแผ่น (cm)

3.1.2 ขนาดของรอยเชื่อม

ข้อกำหนด AISC (2010) กำหนดขนาดรอยเชื่อมเล็กสุดและใหญ่สุดของรอยเชื่อมแบบพอก (Fillet weld) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของรอยเชื่อมแบบพอก (Fillet weld)

ความหนาของชิ้นงานที่ บางกว่า t (mm)	ขนาดขาเชื่อม เล็กสุด (mm)	ขนาดขาเชื่อม ใหญ่สุด (mm)
$t \leq 6$	3	6
$6 < t \leq 13$	5	$t - 2$
$13 < t \leq 19$	6	$t - 2$
$19 < t$	8	$t - 2$

3.1.3 กำลังระบุของรอยเชื่อม

ข้อกำหนด AISC (2010) กำหนดให้พิจารณากำลังระบุของรอยเชื่อมโดยเปรียบเทียบระหว่างกำลังระบุของลวดเชื่อม (Weld Metal) กับกำลังระบุของชิ้นงาน (Base Metal) กำลังระบุของลวดเชื่อมควรมีค่าน้อยกว่ากำลังระบุของชิ้นงาน เพื่อที่จุดต่อยึดจะสามารถถ่ายแรงได้ทั้งหมด กำลังระบุคำนวณได้ดังนี้

$$\text{กำลังระบุบนชิ้นงาน} \quad R_n = F_{nBM} A_{BM} \quad (3.6)$$

$$\text{กำลังระบุบนรอยเชื่อม} \quad R_n = F_{nw} A_{we} \quad (3.7)$$

เมื่อ R_n คือ กำลังระบุของชิ้นงานหรือลวดเชื่อม (kg)

F_{nBM} คือ กำลังระบุของชิ้นงาน (kg/cm^2)

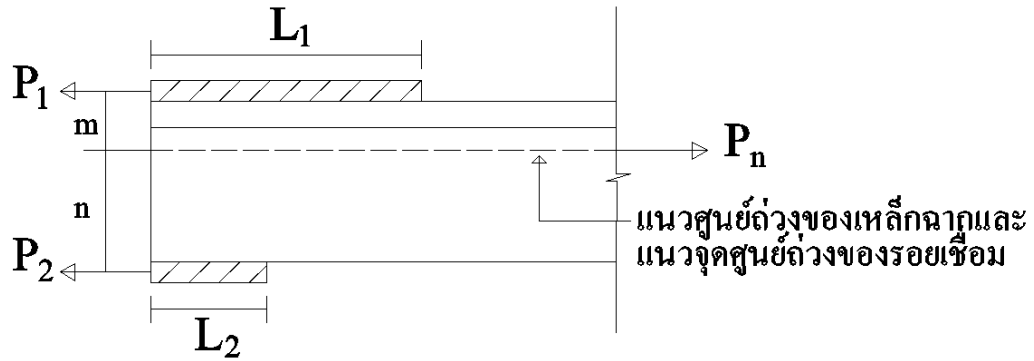
F_{nw} คือ กำลังระบุของลวดเชื่อม (kg/cm^2)

A_{BM} คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (cm^2)

A_{we} คือ พื้นที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม (cm^2)

3.1.4 การออกแบบรอยเชื่อมแบบ Balanced

การต่อข้อด้วยการเชื่อมในเหล็กฉาก จะต้องจัดแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อมให้อยู่ในระนาบเดียวกับแนวศูนย์กลางของเหล็กฉาก แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ซึ่งการออกแบบจะเป็นการพิจารณาหาความยาวของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.1 การออกแบบรอยเชื่อมผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของเหล็กฉาก

โดยสมมติโมเมนต์รอบแนวรอยเชื่อม L_2 จะได้แรงต้าน

$$P_1 = \frac{(P_n)(n)}{(m+n)} \quad (3.8)$$

ดังนั้น ความยาวรอยเชื่อม

$$L_1 = \frac{P_1}{T_w} \quad (3.9)$$

และรวมแรงตามแนวแกน จะได้แรงต้าน

$$P_2 = P_n - P_1 \quad (3.10)$$

ดังนั้น ความยาวรอยเชื่อม

$$L_2 = \frac{P_2}{T_w} \quad (3.11)$$

เมื่อ P_n คือ แรงที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กฉาก (kg)

P_1, P_2 คือ แรงต้านของรอยเชื่อม (kg)

L_1, L_2 คือ ความยาวของรอยเชื่อม (cm)

m, n คือ ระยะห่างจากขอบเหล็กฉากถึงจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (cm)

T_w คือ กำลังของลวดเชื่อมต่อหนึ่งหน่วยความยาว (kg/cm)

3.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบมีทั้งหมด 16 ตัวอย่างทดสอบ ทั้งหมดต่อยึดที่ปลายกับแผ่นประกบด้วยรอยเชื่อมแบบพอก (Fillet weld) ขนาด 6 mm ตัวอย่างทดสอบ 2 ตัวอย่างเป็นเหล็กแผ่นที่มีรอยเชื่อมตั้งฉากและขนานกับแนวแรง เพื่อตรวจสอบหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อม อีก 14 ตัวอย่างประกอบด้วยเหล็กฉากเดี่ยวและเหล็กฉากคู่ที่มีการเชื่อมในแบบมีจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Balanced) และที่มีจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Unbalanced) เพื่อตรวจสอบหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมและตรวจสอบกำลังรับแรงของจุดต่อ รวมถึงศึกษาผลกระทบความหนาของแผ่นประกบ ความยาวของจุดยึดต่อ ขนาดเหล็กฉาก เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการจัดแบบ Out of Plane ในเหล็กฉากเดี่ยว ข้อมูลตัวอย่างทดสอบแสดงทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 การออกแบบตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นไปตามข้อกำหนด AISC (2010) และตามขนาดของเครื่องทดสอบที่ใช้ทดสอบ รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแสดงดังในรูปที่ 3.3 และรายการคำนวณออกแบบแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบแผ่นเหล็ก

ตัวอย่าง ทดสอบ (mm)	ขนาดของ ตัวอย่างทดสอบ (mm)	ความหนาแผ่นประกบ (mm)	ความยาวรอยเชื่อม ¹ (mm)		
		t	L ₁	L ₂	L ₃
P-T-G10	50x18	10	-	-	50
P-L-G10	50x18	10	100	100	-

หมายเหตุ

- ¹ รูปที่ 3.2

- P หมายถึง ตัวอย่างทดสอบเหล็กแผ่น

- T หมายถึง รอยเชื่อมตั้งฉากกับแนวแรง

- L หมายถึง รอยเชื่อมขนานกับแนวแรง

- G หมายถึง ความหนาแผ่นประกบ

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบเหล็กฉาก

ตัวอย่าง ทดสอบ (mm)	ขนาดของ ตัวอย่างทดสอบ (mm)	ความหนาแผ่นประกบ (mm)	ความยาวรอยเชื่อม ¹ (mm)	
		t	L ₁	L ₂
S1-B-G10	65x65x8	10	120	50
S1-U-G10	65x65x8	10	85	85
D1-U-G10	65x65x8	10	120	50
D1-B-G10	65x65x8	10	85	85
S1-B-G16	65x65x8	16	120	50
S1-U-G16	65x65x8	16	85	85
S1-B-G22	65x65x8	22	120	50
S1-U-G22*	65x65x8	22	85	85
S2-B-G10*	120x120x8	10	120	50
S2-U-G10*	120x120x8	10	85	85
D2-B-G10*	120x120x8	10	120	50
D2-U-G10*	120x120x8	10	85	85
S2-B-G10-a*	120x120x8	10	240	90
S2-U-G10-a*	120x120x8	10	165	165

หมายเหตุ

- ¹ รูปที่ 3.2

- S หมายถึง ตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากเดี่ยว

- D หมายถึง ตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากคู่

- B หมายถึง จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Balanced)

- U หมายถึง จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Unbalanced)

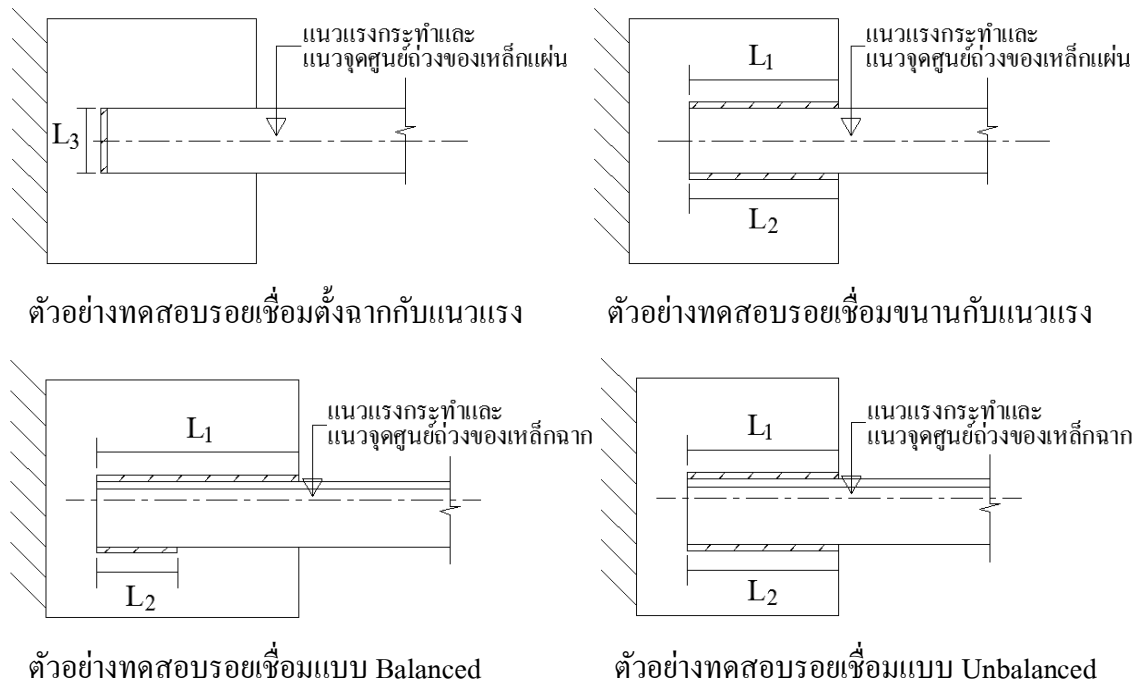
- G หมายถึง ความหนาของแผ่นประกบ

- 1 หมายถึง ขนาดตัวอย่างทดสอบ 65x65x8 mm

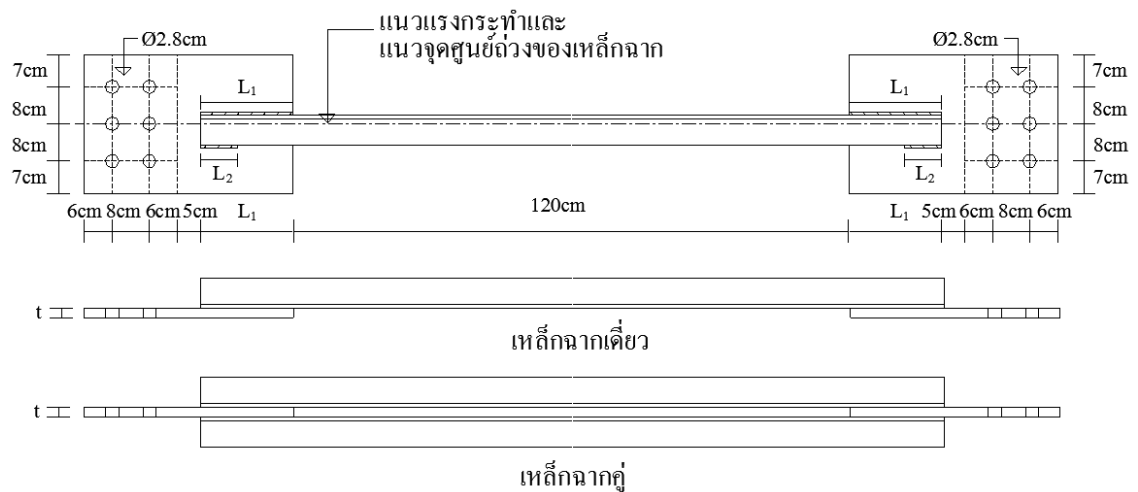
- 2 หมายถึง ขนาดตัวอย่างทดสอบ 120x120x8 mm

- a หมายถึง เพิ่มความยาวของรอยเชื่อม

-* หมายถึง อุปกรณ์ติดตั้งทำการแก้ไข



รูปที่ 3.2 ความยาวรอยเชื่อมของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแบบ Balanced

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

ตัวอย่างทดสอบวัสดุจะประกอบด้วย เหล็กฉาก เหล็กแผ่นชั้นคุณภาพ SS400 และลวดเชื่อมชั้นคุณภาพ E60 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็ก เพื่อหาลำดับรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และกำลังรับแรงดึงประลัย (Ultimate Strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638-02a [23] ส่วนลวดเชื่อมเป็นไปตามมาตรฐาน ASME SECTION II SFA-5.1/SFA-5.1A [24] ผลการ

ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กและลวดเชื่อม เป็นดังตารางที่ 3.4 และผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กและลวดเชื่อมทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบของวัสดุ

วัสดุตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงดึงที่ จุดครากต่ำสุด (MPa)	กำลังรับแรงดึง ประลัย (MPa)
เหล็กฉาก 120x120x8 mm	326	453
เหล็กฉาก 65x65x8 mm	295	428
แผ่นเหล็ก	271	407
ลวดเชื่อม	448	531

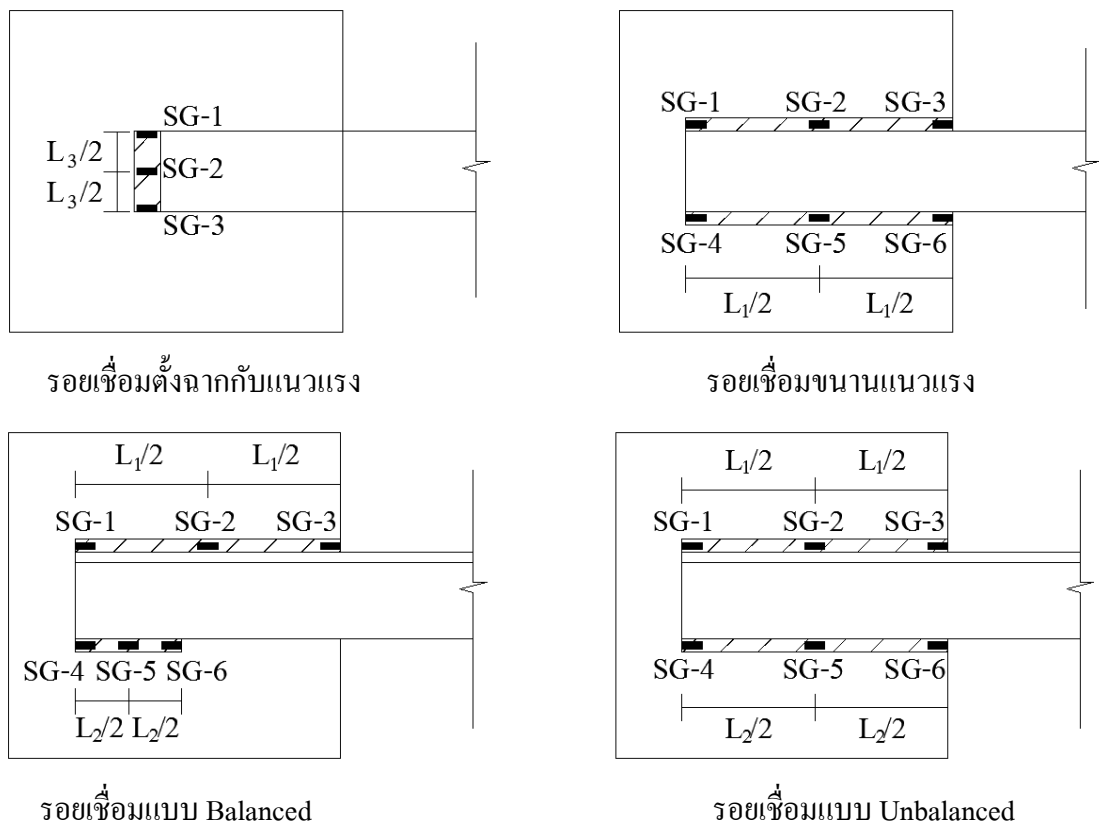
3.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับการทดสอบ

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งบนตัวอย่างทดสอบเพื่อวัดค่าต่างๆ ได้แก่ สเตรนเกจ (Strain Gauge) และเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดค่าเครียด (Strain) ทำมาจากลวดโลหะขนาดเล็ก การทำงานของสเตรนเกจ คือ ถ้าชิ้นงานไม่มีแรงมากระทำ ค่าความต้านทานของชิ้นงานจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ถ้ามีแรงมากระทำ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบต่างๆ เช่น เกิดการยืด หด บิด หรืออง เป็นต้น ค่าความต้านทานของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลง สเตรนเกจจะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Wheatstone Bridge) เพื่อแปลงค่าความต้านทานเป็นค่าความเครียด

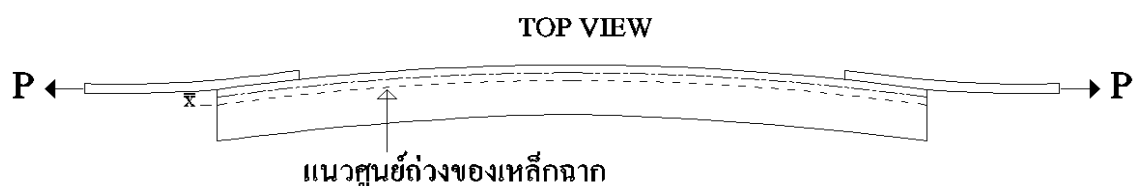
การติดตั้งสเตรนเกจพื้นผิวชิ้นงานต้องเรียบและสะอาด เนื่องจากงานวิจัยนี้จะติดตั้งสเตรนเกจบนพื้นผิวของรอยเชื่อม ซึ่งมีพื้นผิวที่ขรุขระ จึงดำเนินการการขัดพื้นผิวของรอยเชื่อมให้เรียบด้วยกระดาษทรายที่ละเอียด การขัดดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงของรอยเชื่อม เพราะในทางทฤษฎีพื้นผิวรอยเชื่อมส่วนที่ขรุขระจะถือว่าเป็นส่วนที่เป็นกำลังเสริม รายละเอียดตำแหน่งเตรนเกจบนรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.4



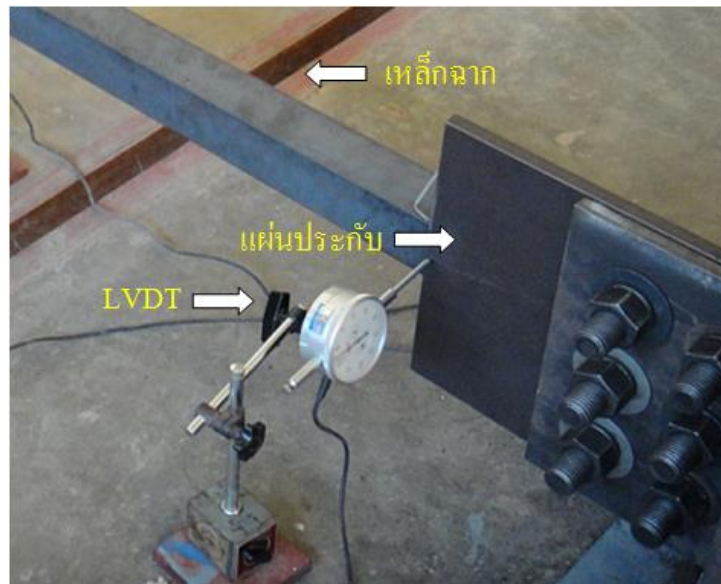
รูปที่ 3.4 การติดตั้งสตรนเกจบนรอยเชื่อม

3.4.2 เครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่ (LVDT)

เครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่ (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) ใช้ตรวจวัดการเคลื่อนที่เฉพาะในตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากเดี่ยวที่มีจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Balanced) และที่มีจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Unbalanced) เนื่องจากพฤติกรรมการคดแบบ Out of Plane ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ผลดังกล่าวเกิดจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กฉากเดี่ยวไม่ได้อยู่บนระนาบหน้าตัด จึงเกิดระยะเยื้องศูนย์กลาง เมื่อมีแรงกระทำจึงทำให้เกิดการคด Out of Plane เพราะแรงกระทำจะเดินทางผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กฉาก ตำแหน่งของ LVDT บนตัวอย่างทดสอบจะวัดการเคลื่อนที่ในแนวราบบริเวณกึ่งกลางขอบด้านหลังของแผ่นประกบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



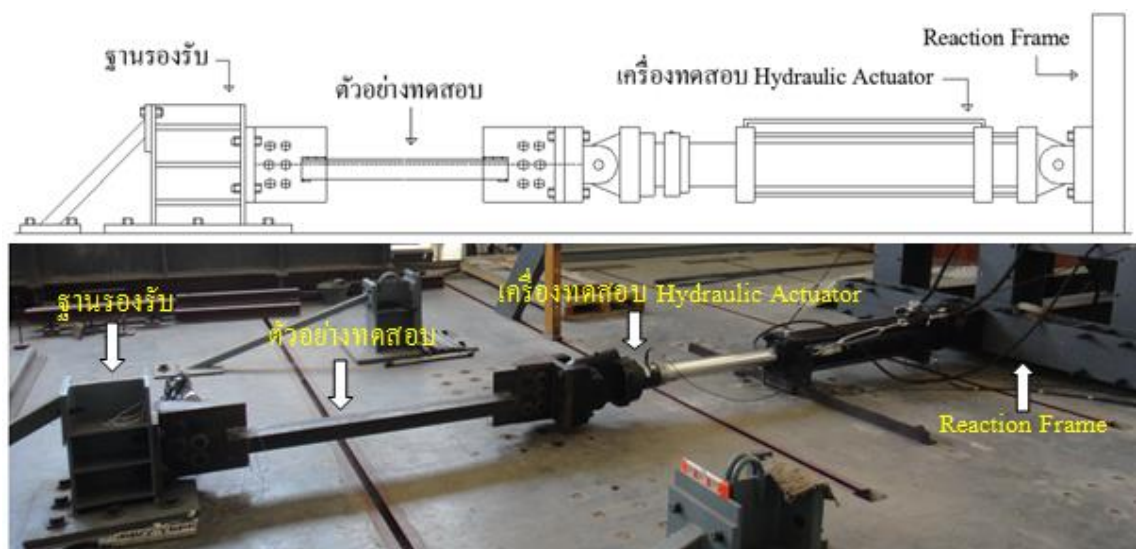
รูปที่ 3.5 การคดแบบ Out of Plane ในเหล็กฉากเดี่ยว



รูปที่ 3.6 ตำแหน่ง LVDT ด้านหลังของแผ่นประกับ

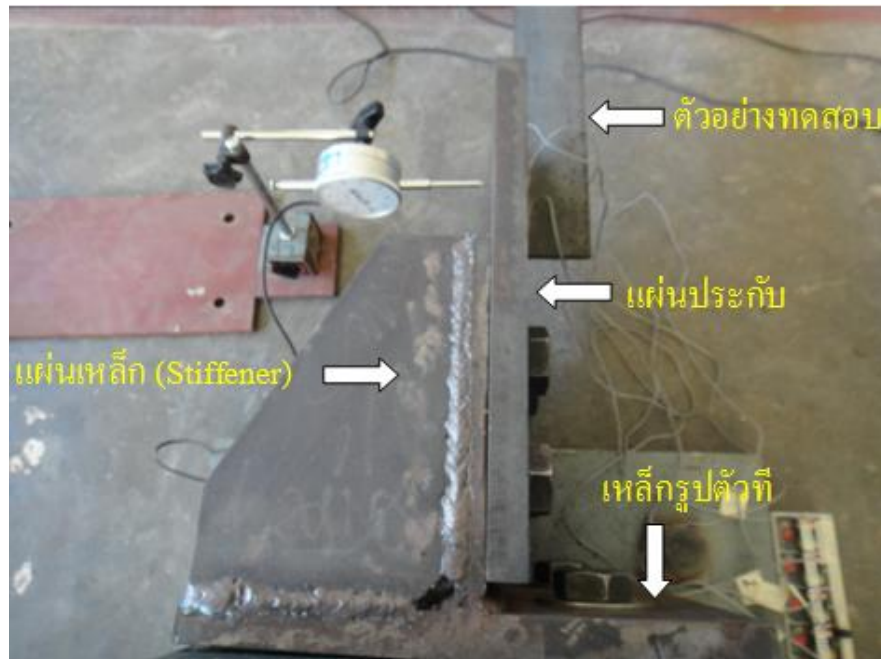
3.5 วิธีทดสอบ

การทดสอบจะใช้แรงดึงแบบสถิต (Static Load) โดยใช้เครื่องทดสอบ Hydraulic Actuator ขนาด 450 kN ฝั่งด้านหนึ่งของตัวอย่างทดสอบจะยึดกับฐานรองรับ ส่วนอีกด้านหนึ่งจะยึดกับหัวของเครื่องทดสอบ Hydraulic Actuator ทั้งสองด้านจะมีเหล็กรูปตัว T ที่ทำหน้าที่ยึดตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การทดสอบจะให้แรงกระทำในแนวราบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.7 วิธีการทดสอบ

จากการทดสอบในตัวอย่างทดสอบเหล็กฉากเดี่ยว อุปกรณ์ติดตั้งเหล็กรูปตัวทีมีการเสีรูปตามแผ่น
 ประกับ เนื่องจากการดัดแบบ Out of Plane การเสีรูปของอุปกรณ์ติดตั้งจะเกิดกับตัวอย่างทดสอบ
 S1-B-G10 ถึงตัวอย่างทดสอบ S1-B-G22 และทำการแก้ไขอุปกรณ์ติดตั้งในตัวอย่างทดสอบ S1-U-
 G22 โดยการเสริมแผ่นเหล็ก (Stiffener) แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผ่นเหล็กที่เสริมในเหล็กรูปตัวที