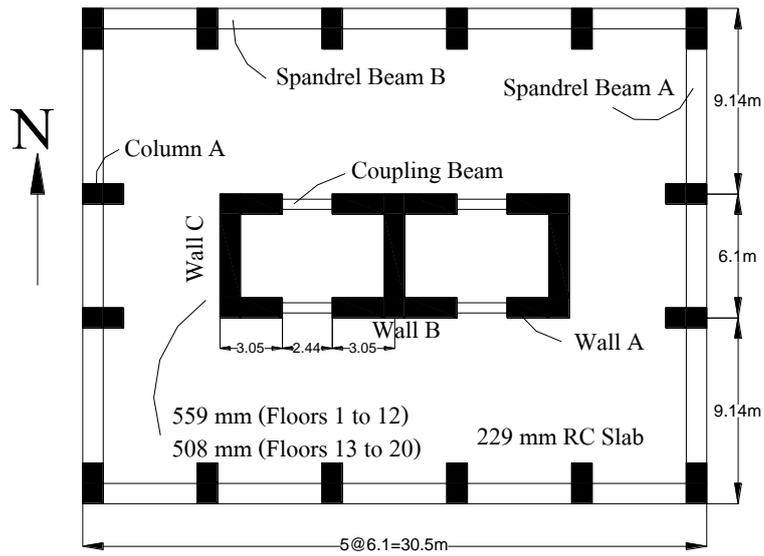


บทที่ 3 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการจำลองและการออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนัง ผนังรับแรงเฉือน และจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ การจำลองและออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนังสำหรับงานวิจัยนี้จะทำ 2 ตัวอย่างทดสอบ คือ คานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนที่มีพฤติกรรมการครากรูปแบบแรงเฉือนและรูปแบบแรงคัต จุดต่อสำหรับเชื่อมคานเหล็กเข้ากับผนังของทั้งสองตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนรูปแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle เนื่องจากจุดต่อดังกล่าวมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนและแรงคัต ได้ดีและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการซ่อมแซมให้กับโครงสร้างระบบ HCW ด้วย

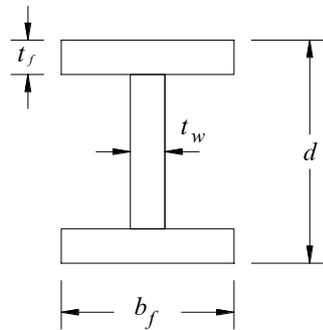
3.1 อาคารต้นแบบ

อาคารต้นแบบในการศึกษานี้เป็นอาคารคอนกรีตที่ใช้ระบบ HCW และเป็นอาคารต้นแบบในการศึกษาของ Gong และ Shahrooz [7] อาคารต้นแบบนี้มีความสูงชั้นเท่ากับ 2.74 เมตรเท่าๆ กันทั้งหมด 20 ชั้น มีช่วงคานด้านยาว 5 ช่วง และมีช่วงคานด้านสั้น 3 ช่วงคาน มีโครงสร้างระบบ HCW อยู่ด้านในตัวอาคาร ประกอบไปด้วยผนังรับแรงเฉือน 3 ด้าน ที่เชื่อมต่อกันด้วยคานเหล็กประกอบ (Built-Up Beam) รูปตัวไอดังรูปที่ 3.1 ในแต่ละชั้นความสูงของอาคารต้นแบบมีคานเหล็กเชื่อมต่อผนังที่ขนาดแตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 3.1 ขนาดและเหล็กเสริมของผนังรับแรงเฉือนทั้งสามแสดงดังตาราง 3.2 การศึกษาโครงสร้างระบบ HCW ในอดีตใช้การจำลองตัวอย่างทดสอบจากอาคารต้นแบบที่ได้กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้จึงจำลองตัวอย่างทดสอบให้มีขนาดคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรง ค่าสติเฟนส และการสลายพลังงานได้ คานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนที่ชั้นความสูงที่ 5-12 ในอาคารตัวอย่างเป็นขนาดคานเหล็กขนาดเดียวกัน ดังนั้น โครงสร้างระบบ HCW ใช้คานเหล็กขนาดนี้มากที่สุด งานวิจัยในอดีตจึงเลือกคานเหล็กเชื่อมต่อผนังที่ชั้น 5 เป็นตัวแทนในการจัดทำตัวอย่างทดสอบ และเนื่องจากผนังรับแรงเฉือนทั้งสามของอาคารต้นแบบมีลักษณะคล้ายกันจึงเลือกใช้ผนังรับแรงเฉือน A ที่ชั้นความสูงที่ 5 ในการจำลองตัวอย่างทดสอบ



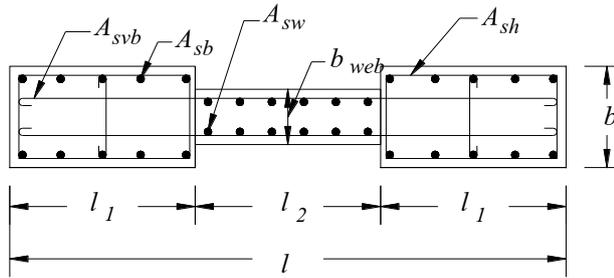
รูปที่ 3.1 แปลนอาคารต้นแบบ [7]

ตารางที่ 3.1 มิติคานเหล็กเชื่อมผนังของอาคารต้นแบบในการศึกษาของ Gong และ Shahrooz [7]



Floors	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	Stiffeners
1 to 4	381	305	44.5	16	12@381
5 to 8	457	305	44.5	16	12@381
9 to 12	457	305	44.5	16	12@381
13 to 16	406	305	44.5	16	12@381
17 to 20	305	229	31.8	9.5	10@216

ตารางที่ 3.2 มิติผนังรับแรงเฉือนของอาคารต้นแบบ [7]



Floors	l (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	b (mm)	b_{web} (mm)	A_{sb} (mm)	A_{svb} (mm)	A_{sh} (mm)	A_{sw} (mm)
1 to 4	3048	1016	1016	559	305	11(2)#11	#5@150	#5@75	18#11
5 to 8	3048	1016	1016	559	305	9(2)#11	#5@150	#5@75	16#11
9 to 12	3048	1016	1016	559	305	7(2)#8	#5@150	#5@75	14#8
13 to 16	3048	1016	1016	457	203	7(2)#5	#5@150	#4@150	14#6
17 to 20	3048	762	1524	381	127	8(2)#4	#5@200	#4@200	12#4

3.2 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ

จากลักษณะการรับแรงและพฤติกรรมการวิบัติที่มีลักษณะเป็นแบบ โค้งสองทาง (Double Curvature) ทำให้คานที่เชื่อมระหว่างผนังเกิดจุดดัดกลับที่บริเวณกึ่งกลางคาน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว และมีโมเมนต์ดัดเกิดสูงที่บริเวณปลายคานหรือจุดต่อ (รูปที่ 2.3) การทดสอบจึงทดสอบโดยให้แรงเฉือนแบบสลับทิศ (Cyclic Load) ที่บริเวณกึ่งกลางคานเชื่อมต่อผนัง

3.2.1 การออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนัง (Link Beam)

โครงสร้างระบบ HCW เป็นโครงสร้างที่อาศัยการครากของคานเหล็กเป็นตัวการสลายพลังงานแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จะจำลองพฤติกรรมการครากของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือน 2 ลักษณะ คือแบบที่เกิดการครากจากแรงเฉือน (Shear Yielding) จำนวน 1 ตัวอย่างทดสอบ และแบบที่เกิดการครากจากแรงดัด (Flexural Yielding) จำนวน 1 ตัวอย่างทดสอบ พฤติกรรมการครากของคานเหล็กขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกำลังรับแรงดัด (Plastic Moment, M_p) ต่อกำลังรับแรงเฉือน (Plastic Shear, V_p) ค่ากำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดที่ออกแบบตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 จะเป็นไปตามตามข้อกำหนดการออกแบบและด้วยประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงต้องมีการลดขนาดของกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบ คานเหล็ก

เชื่อมต่อนั่งจะมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับ Shot Link ในโครงสร้างประเภท Eccentrically Braced Frame โดยที่คานเหล็กดังกล่าวจะมีการครากจากแรงเฉือน ในกรณีนี้

$$e \leq \frac{1.6M_p}{V_p} \quad (3.1)$$

เมื่อ e คือ ความยาวช่วงเฉือนคานเหล็กเชื่อมต่อนั่ง (Shear Span Length)

กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนของคานเหล็กสามารถหาได้จากหน้าตัดคานประกอบดังสมการนี้

$$M_p = f_y Z_x \quad (3.2)$$

$$V_p = 0.6 f_y A_{tw} \quad (3.3)$$

โดย f_y คือ กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็ก

Z_x คือ Modulus of Plastic

A_{tw} คือ สำหรับคานเหล็กรูปตัวไอตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน $= (d - 2t_f)t_w$

คานเหล็กเชื่อมต่อนั่งจะมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับ Long Link โดยคานจะมีการครากจากแรงดัด ในกรณีนี้

$$e \geq \frac{2.6M_p}{V_p} \quad (3.4)$$

เนื่องจากคานเหล็กอาจเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) ในขณะที่เกิดการคราก ดังนั้น จึงต้องมีการป้องกันโดยใช้แผ่น Stiffener คานเหล็กเชื่อมต่อนั่งหน้าตัดตัวไอที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือนจะต้องใส่ Stiffener ไว้ทุกๆ ระยะเท่ากับ $(30t_w - d/5)$ และคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งที่มีหน้าตัดตัวไอที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงดัดต้องใส่ Stiffener ไว้ที่ 1.5 เท่าของความกว้างปีกคาน (b_f) ตามมาตรฐาน AISC 2010 [5]

3.2.2 การออกแบบจุดต่อ

จุดต่อที่สามารถนำมาใช้เชื่อมต่อระหว่างคานเหล็กและผนังรับแรงเฉือนมีหลายรูปแบบ การฝังกัดในการเชื่อมต่อคานเหล็กเข้ากับผนังรับแรงเฉือน ซึ่งใช้ในปัจจุบันการเชื่อมแซมจะเป็นไปได้ยากมากเมื่อเกิดความเสียหายจากการรับแรงแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จึงศึกษาจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนที่เพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมแซม เนื่องจากลักษณะการรับแรงของโครงสร้างระบบ HCW ทำให้บริเวณจุดต่อมีผลกระทบจากแรงเฉือนและแรงดัดซึ่งเกิดขึ้นจากแรงสลับทิศภายใต้แรงแผ่นดินไหว การออกแบบจึงต้องออกแบบโดยคำนึงถึงทั้งสองแรงดังกล่าวนี้

3.2.2.1 จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน (Partially Restrained Connection)

งานวิจัยนี้ใช้จุดต่อยึดครึ่งบางส่วนแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในการเชื่อมต่อคานเหล็กเข้ากับผนังรับแรงเฉือน เนื่องจากจุดต่อดังกล่าวเป็นจุดต่อที่สามารถเชื่อมแซมหรือถอดออกได้ง่าย ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงโมเมนต์ดัด (M) กับมุมหมุนของจุดต่อ (θ) ซึ่งสร้างได้จากสมการที่ 3.5 เป็นดังรูปที่ 3.3 [9]

$$\frac{M}{M_u} = \frac{\theta/\theta_0}{[1+(\theta/\theta_0)^n]^{1/n}} \quad (3.5)$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์กำหนดความอ่อน (Flexibility) ของจุดต่อ

θ คือ มุมหมุนของจุดต่อ

θ_0 คือ มุมหมุนอ้างอิง = M_u/R_{ki}

โดยที่ M_u คือ ผลรวมของโมเมนต์ด้านทานที่เกิดจากเหล็กฉาก ซึ่งคำนวณได้จาก

$$M_u = M_{os} + M_{pt} + V_{pt}d_2 + 2V_{pa}d_4 \quad (3.6)$$

เมื่อ M_{os} คือ กำลังรับแรงโมเมนต์ของเหล็กฉากด้านล่าง = $f_y I_s t_s^2 / 4$

M_{pt} คือ กำลังรับแรงโมเมนต์พลาสติกของเหล็กฉากด้านบน = $V_{pt} g_2 / 2$

V_{pt} คือ แรงเฉือนพลาสติกของเหล็กฉากแนวตั้งด้านบน

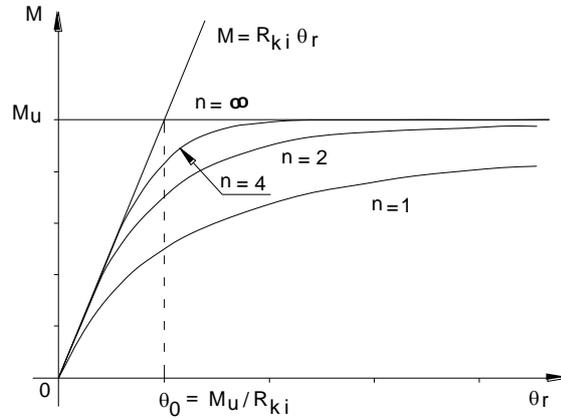
V_{pa} คือ แรงเฉือนพลาสติกของเหล็กฉากแนวตั้งที่เอวคานเหล็ก

โดยที่ R_{ki} คือ สติฟเนส (Stiffness) รวมของเหล็กฉาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

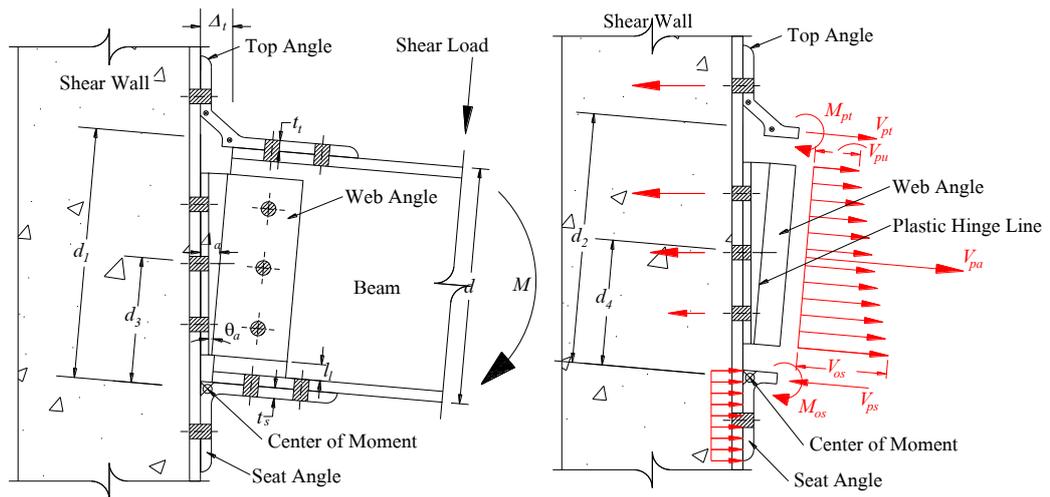
$$R_{ki} = K_{it} + K_{is} + K_{ia} \quad (3.7)$$

- เมื่อ K_{it} คือ ค่าสติเฟนเสริมต้นของเหล็กฉากด้านบน
- K_{is} คือ ค่าสติเฟนเสริมต้นของเหล็กฉากด้านล่าง
- K_{ia} คือ ค่าสติเฟนเสริมต้นของเหล็กฉากที่เอวคานเหล็ก

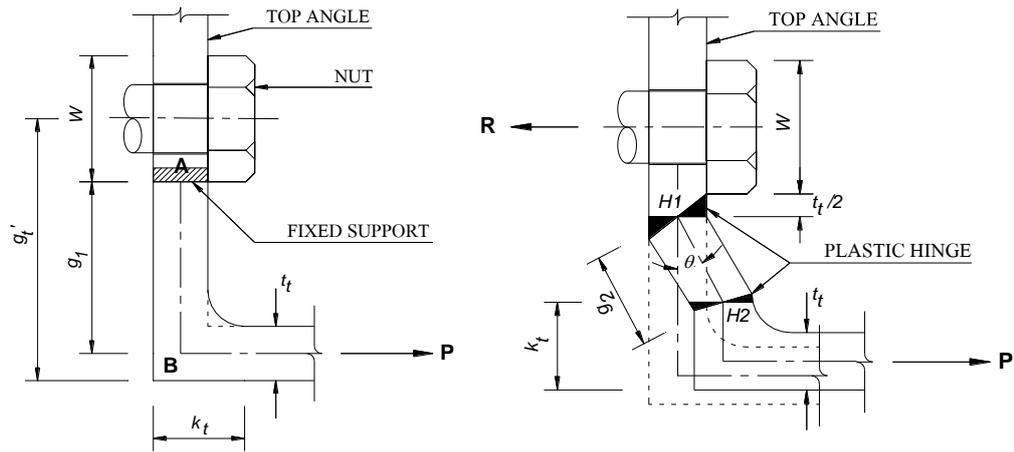
ค่า K_{it} K_{is} และ K_{ia} ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมิติและขนาดของเหล็กฉากด้านบน เหล็กฉากด้านล่าง และเหล็กฉากที่เอวคานดังรูปที่ 3.4 ถึง 3.7 สามารถหาได้จากการศึกษาของ Kishi และ Chen 1999 [9]



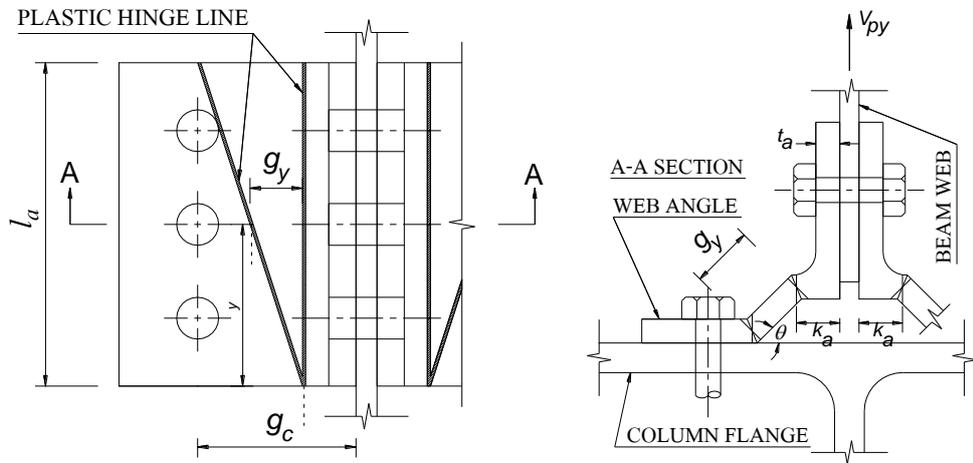
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์โมเมนต์ตัดกับมุมการเสยรูปของการออกแบบรอยต่อแบบยึดครึ่งบางส่วน [9]



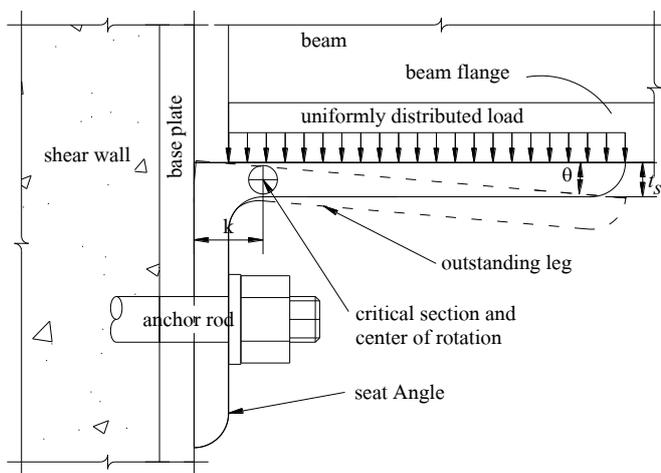
รูปที่ 3.3 ลักษณะการถ่ายแรงของจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle [9]



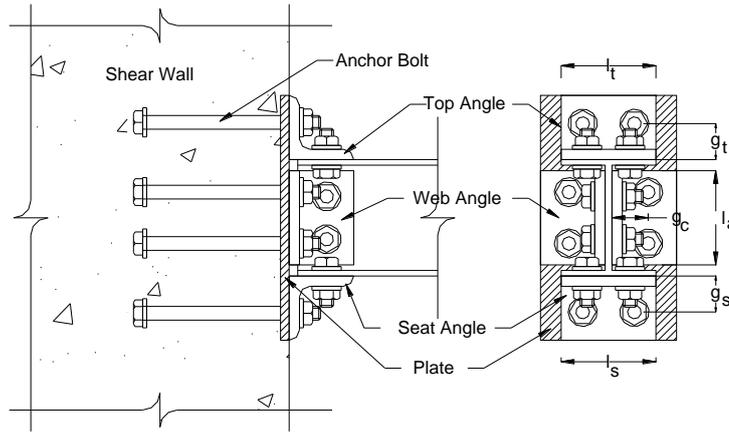
รูปที่ 3.4 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากด้านบน (Top Angle) [9]



รูปที่ 3.5 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากที่เอว (Web Angle) [9]



รูปที่ 3.6 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากด้านล่าง (Seat Angle) [9]



รูปที่ 3.7 ลักษณะจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle [9]

3.2.2.2 การออกแบบสลักเกลียว (Bolt)

จุดต่อยึดครึ่งบางส่วนแบบ Top and Sea Angle with Double Web Angle เป็นจุดต่อที่ใช้สลักเกลียวเป็นตัวถ่ายแรงและเป็นตัวยึดเหล็กฉากของจุดต่อเข้ากับคานเหล็ก ลักษณะการถ่ายแรงในสลักเกลียวด้านที่ติดกับคานเหล็กมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นว่าสลักเกลียวจะต้องถ่ายแรงเฉือนทั้งในระนาบของแผ่นปีกคานและแผ่นเอว โดยสลักเกลียวที่ยึดเหล็กฉากด้านบนกับปีกคานเหล็กอยู่ภายใต้แรงเฉือน V_{pu} ส่วนสลักเกลียวที่ยึดเหล็กฉากด้านล่างกับปีกคานเหล็กรับแรงเฉือน V_{ps} และสมมุติให้สลักเกลียวที่ยึดเหล็กฉากตรงกลางกับเอวคานเหล็กรับแรงแบบกระจาย (Distributed Force) ซึ่งมีแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ V_{pu} และต่ำสุดเท่ากับ V_{os} กระจายเป็นแนวยาว l_a เนื่องจากการทดสอบใช้แรงแบบสลับทิศ (Cyclic Load) ดังนั้น สลักเกลียวด้านบนและด้านล่างจึงต้องสามารถรับแรงได้ทั้งแรงดึงและแรงอัด กำลังรับแรงเฉือน (V_b) ของสลักเกลียว สามารถคำนวณได้จาก

$$V_b = nA_b f_v \tag{3.8}$$

เมื่อ n คือ จำนวนสลักเกลียว

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดสลักเกลียว (ไม่คำนึงถึงผลกระทบของเกลียว)

f_v คือ ความเค้นเฉือนที่จุดครากของสลักเกลียว

3.2.2.3 การออกแบบสลักเกลียวส่วนที่ฝังกับผนัง (Anchor Bolt)

การยึดเหล็กฉากของจุดต่อเข้ากับผนังรับแรงเฉือนจะใช้สลักเกลียวหรือ Anchor Bolt ในการยึด โดยทำการฝังส่วนหัวของสลักเกลียวไว้กับผนังรับแรงเฉือนและให้ส่วนปลาย (ส่วนเกลียว) ยื่นออกมาจากผนังสำหรับติดตั้งจุดต่อ การออกแบบจะให้สลักเกลียวที่ฝังกับผนังในส่วนที่ยึดกับแผ่นเอวของคานเหล็กรับแรงเฉือน ในขณะที่สลักเกลียวที่ยึดเหล็กฉากด้านบนและด้านล่าง (Top and Seat Angle) เป็นตัวรับแรงดึง (รูปที่ 3.5) กำลังรับแรงดึงของสลักเกลียว (P_b) สามารถคำนวณได้จาก (AISC 2010 [5])

$$P_b = nA_b f_t \quad (3.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนสลักเกลียว

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดสลักเกลียว (ไม่คำนึงถึงผลกระทบของเกลียว)

f_t คือ กำลังรับแรงดึงสลักเกลียว

เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นคานไหวเป็นแรงสลับทิศ สลักเกลียวด้านบนและด้านล่างจึงมีลักษณะการรับแรงสลับกัน เมื่อสลักเกลียวด้านบนรับแรงดึงสลักเกลียวด้านล่างจะไม่มีแรงกระทำ เนื่องจากเหล็กฉากจะรับแรงอัดที่เกิดขึ้น และเมื่อสลักเกลียวด้านล่างรับแรงดึง สลักเกลียวด้านบนก็จะไม่มีแรงกระทำเช่นกัน

การออกแบบจะให้สลักเกลียวที่ฝังกับผนัง (Anchor Bolt) เพื่อยึดเหล็กฉากที่เอวคานเหล็ก (Web Angle) ทำหน้าที่รับแรงเฉือนที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากการก่อสร้างจริง จะต้องมีการเผื่อขนาดของรูเจาะเพื่อสะดวกต่อการติดตั้ง ทำให้จุดต่ออาจจะเกิดการขยับไปมาหรือการไถล (Slip) ในขณะที่รับแรงการทดสอบแบบสลับทิศ การป้องกันการไถลนั้นจะทำการเชื่อมแหวนรองเหล็ก (Washer) ที่มีขนาดรูพอดีกับสลักเกลียวติดกับเหล็กฉาก ทำให้เกิดแรงดึง แรงเฉือน และแรงคัดในสลักเกลียวดังรูปที่ 3.8 การคำนวณกำลังรับแรงของสลักเกลียวที่รับแรงดึง แรงเฉือน และแรงเป็นได้ตั้งสมการความสัมพันธ์ที่ 3.10 [12] และ [13]

$$\left(\frac{4P}{\pi d_u^2} + \frac{6klV}{d_u^3} \right)^2 + \left(\frac{V}{0.15\pi d_u^2} \right)^2 = (nF_u)^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ P คือ แรงดึงในแนวแกน

d_u คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโดยพิจารณาผลกระทบจากเกลียว

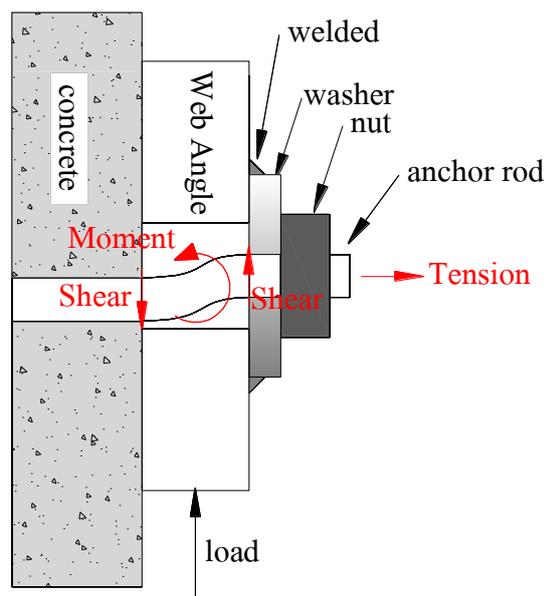
k คือ สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล

l คือ ความยาวประสิทธิผล

V คือ กำลังรับแรงของสลักเกลียว

n คือ จำนวนสลักเกลียว

F_u คือ หน่วยแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียว



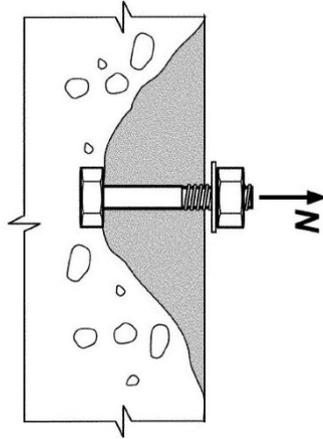
รูปที่ 3.8 ลักษณะของสลักเกลียวเมื่อรับแรงดึง แรงเฉือน และแรงคด [13]

การออกแบบสลักเกลียวในส่วนที่ฝังกับผนัง (Anchor Bolt) จะขึ้นอยู่กับลักษณะการรับแรงของสลักเกลียว การออกแบบความยาวของสลักเกลียวที่ฝังกับผนังจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงแตกออกของคอนกรีต (Concrete Breakout) ของผนังรับแรงเฉือนและเหล็กเสริมพิเศษป้องกันการแตกออกของคอนกรีต ความยาวของสลักเกลียวที่ฝังกับผนัง (Anchor Bolt) ที่ต้องรับแรงดึงถอน V_{pr} ที่คำนวณได้ (รูปที่ 3.9) ต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแตกออกของคอนกรีต (Concrete Breakout Area) การคำนวณกำลังรับแรงดึงแตกของคอนกรีต (N_{cb}) ตามมาตรฐาน ACI318-08 เป็นดังนี้ [11]

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ec,N} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b \quad (3.11)$$

เมื่อ A_{Nc} และ A_{Nco} คือ ตัวประกอบที่ขึ้นกับพื้นที่การแตกออกของคอนกรีตรอบๆ Anchor

$\Psi_{ec,N}, \Psi_{ed,N}, \Psi_{c,N}, \Psi_{cp,N}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ACI318-08 [11]



รูปที่ 3.9 การแตกออกของคอนกรีต [11]

เนื่องจากผนังรับแรงเฉือนมักจะมีลักษณะแคบยาว ทำให้พื้นที่ในการต้านทานการแตกออกมีความกว้างน้อย ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงของ Anchor ต่ำ การออกแบบจึงต้องอาศัยเหล็กเสริมพิเศษช่วยรับแรงที่เกิดขึ้น เหล็กเสริมพิเศษหรือเหล็กเสริมหลักที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับ Anchor ในระยะไม่เกิน 0.5 เท่าของระยะฝังของ Anchor ดังรูปที่ 3.10 สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงแตกของคอนกรีตได้ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ACI318-08 โดยกำลังรับแรงของเหล็กเสริมสามารถหาได้จาก

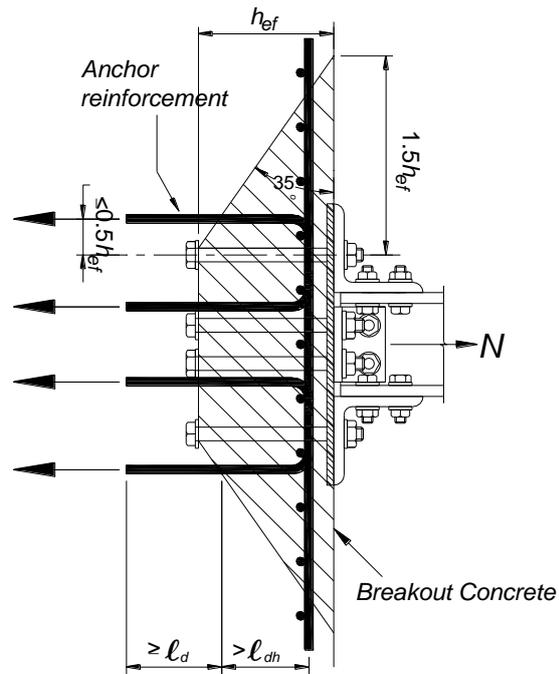
$$T_u = \phi n A_{gb} f_y \quad (3.12)$$

เมื่อ T_u คือ กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมพิเศษ

ϕ คือ ตัวคูณลดแรง (0.75)

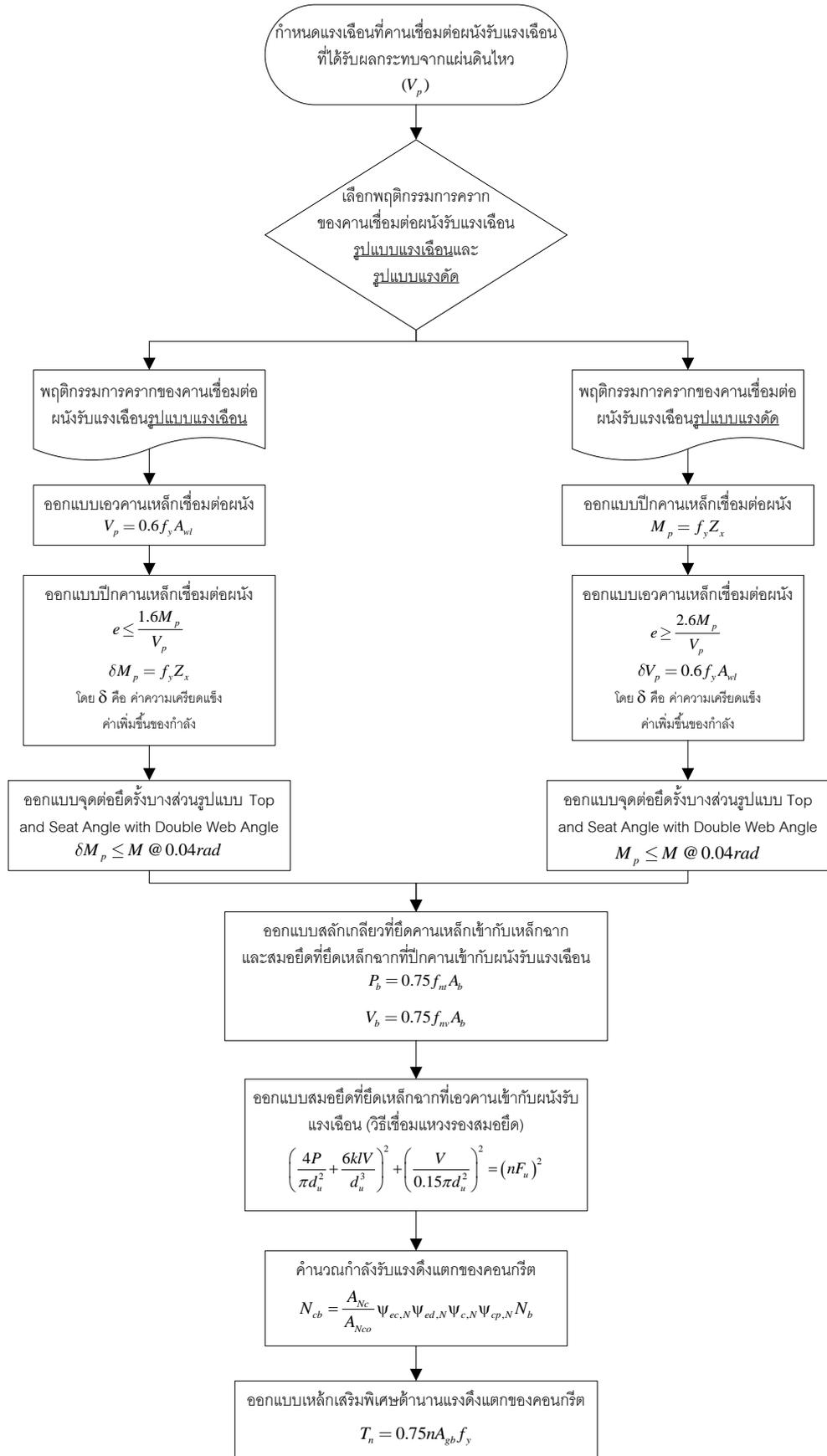
n คือ จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ

A_{gb} คือ พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษ



รูปที่ 3.10 ระยะที่สามารถนำเหล็กเสริมมาใช้ในการคำนวณกำลังได้

วิธีการออกแบบคานเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนและจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนรูปแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle ที่ได้กล่าวในข้างต้นเป็นวิธีออกแบบที่งานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการออกแบบ

3.3 คุณสมบัติของวัสดุของตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้คือ เหล็กแผ่น เหล็กฉาก เหล็กเสริมคอนกรีต และ คอนกรีต ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

3.3.1 เหล็กเสริมคอนกรีต (Steel Reinforcement)

กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด (f_u) ของเหล็กเสริมที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบเป็นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

Component	Yield Stress (Mpa)	Ultimate Stress (Mpa)
DB10 ($\phi=10\text{mm}$)	480	620
DB12 ($\phi=12\text{mm}$)	550	800
RB6 ($\phi= 6\text{mm}$)	420	560
RB9 ($\phi= 9\text{mm}$)	400	570

3.3.2 เหล็กแผ่น (Plate) และเหล็กฉาก (Angle)

เหล็กแผ่นและเหล็กฉากสำหรับทำคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนหน้าตัดประกอบรูปตัวไอและ จุดต่อยี่ครั้งบางส่วนรูปแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กแผ่นชั้นคุณภาพ SS400 ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด (f_u) ซึ่งสามารถหาได้จากการทำตัวอย่างทดสอบเหล็กตาม AISC และการทดสอบ Tensile Strength มีค่ากำลังดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 กำลังรับแรงดึงของเหล็ก

Component	Yield Stress (Mpa)	Ultimate Stress (Mpa)
Plate 4.5 mm	290	420
Plate 8 mm	290	440
Plate 16 mm	300	450
L75x75x12 mm	350	500
L130x130x15 mm	290	450

3.3.3 สลักเกลียวทั่วไปและสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีต (Bolt and Anchor rod)

งานวิจัยนี้ใช้สลักเกลียวทั่วไปสำหรับยึดคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนกับเหล็กฉากของจุดต่อ และสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีตสำหรับยึดเหล็กฉากของจุดต่อเข้ากับผนังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด (f_u) ของสลักเกลียวทั่วไปและสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีตซึ่งสามารถหาได้จากการทำตัวอย่างทดสอบเหล็กตาม AISC และการทดสอบ Tensile Strength มีค่ากำลังดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวทั่วไปและสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีต

Component	Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)
Bolt M16 (Class 10.9)	960	1060
Anchor rod M20 (Class10.9)	960	1060

3.3.4 คอนกรีต (Concrete)

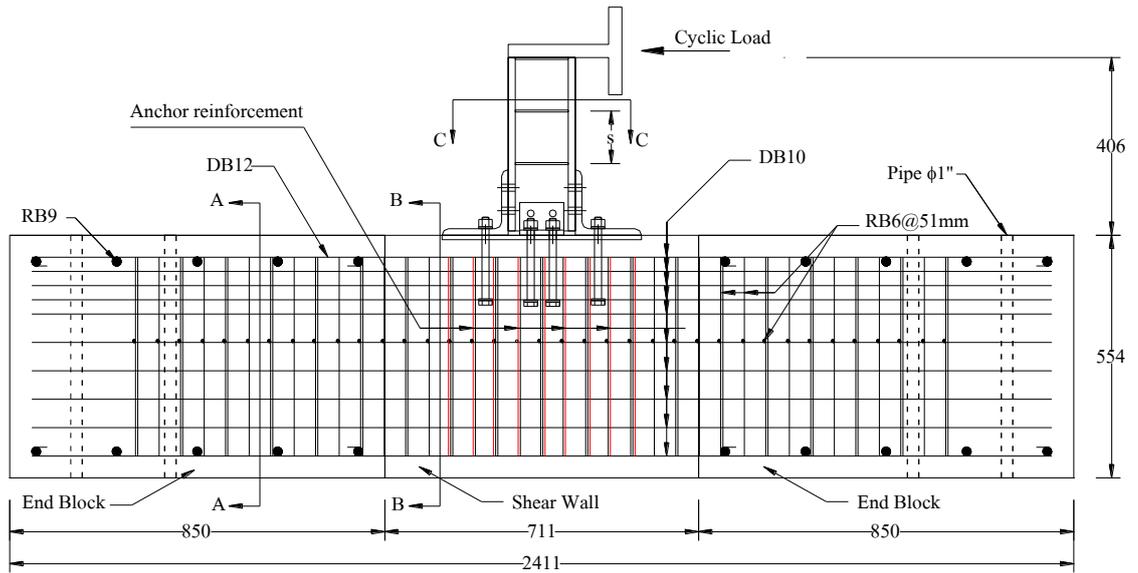
คอนกรีตที่ใช้ทำผนังรับแรงเฉือนและบล็อกคอนกรีตทั้งสองด้านเป็นคอนกรีตชั้นคุณภาพชั้น 35 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในวันที่ทดสอบจริงแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

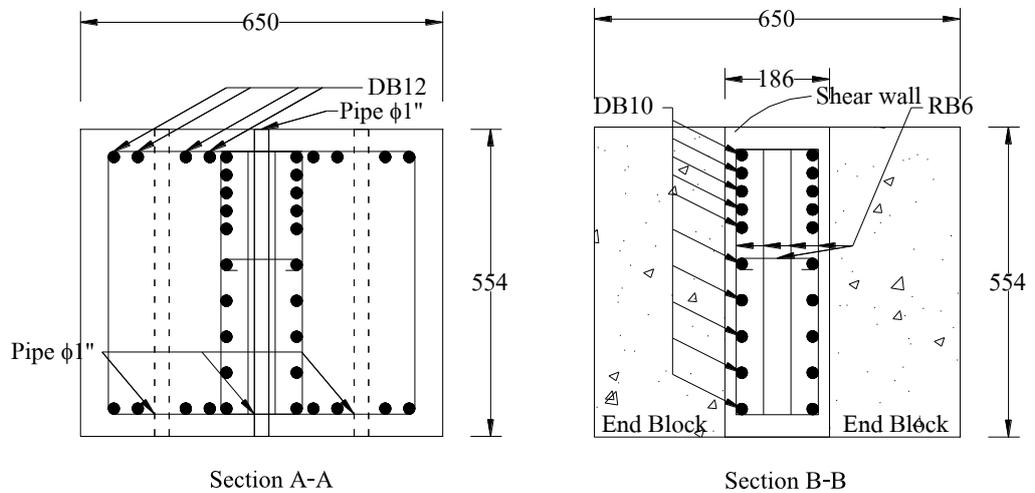
Component	ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (Mpa)	ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (Mpa)
Compressive Strength (f'_c)	37	36

3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

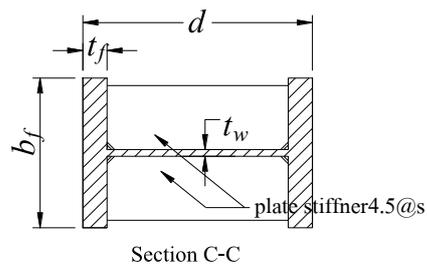
การศึกษาจะทำการจำลองตัวอย่างทดสอบให้มีขนาดเล็กลงด้วยอัตราส่วน 1:3 เท่าของอาคารต้นแบบ เช่นเดียวกันกับการทดสอบในการศึกษาที่ผ่านมา [7] เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรง ค่าสติเฟนส และการสลายพลังงานกับงานวิจัยดังกล่าวได้ การจำลองตัวอย่างทดสอบให้มีขนาดเล็กลงต้องจำลองโดยให้ดัชนี โครงสร้างต่างๆ ที่บ่งบอกแนวโน้มพฤติกรรมกรรับแรงคล้ายกับอาคารต้นแบบ รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 และตารางที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2

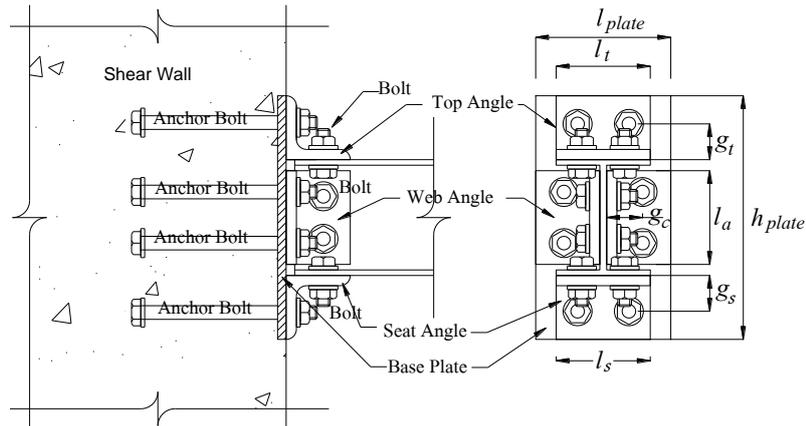


รูปที่ 3.13 ภาพตัดส่วนของบล็อกคอนกรีตและผนังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2



รูปที่ 3.14 ภาพตัดส่วนของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือน

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2



Component	b_f (mm)	t_f (mm)	d (mm)	t_w (mm)	s (mm)
Specimen 1	100	16	152	4.5	100
Specimen 2	115	8	136	8	170

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดขนาดเหล็ก สลักเกลียว และระยะต่างๆ สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2

Component	Specimen 1	Specimen 2
Base Plate (SS400)	460x160x10 mm	440x160x10 mm
Top Angle (SM400)	L130x130x15 mm	L130x130x15 mm
Seat Angle (SM400)	L130x130x15 mm	L130x130x15 mm
Web Angle (SM400)	L75x75x12 mm	L75x75x12 mm
Bolt	M16(10.9)	M16(10.9)
Anchor rod	M20(10.9)	M20(10.9)
g_t (mm)	54	60
g_c (mm)	42	42
g_s (mm)	54	60
l_t (mm)	120	154
l_a (mm)	110	110
l_s (mm)	120	154

3.4.1 การจำลองคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือน (Link Beam)

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง คานเชื่อมต่อนั่งที่มีการเสียรูปในลักษณะโค้งสองทาง (Double Curvature) ซึ่งมีจุดดัดกลับที่บริเวณกึ่งกลางคาน พฤติกรรมการวิบัติ

ของจุดต่อทั้งสองด้านจึงเหมือนกัน ดังนั้น การจำลองคานเชื่อมต่อผนังจะใช้ความยาวคานเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวคานทั้งหมด ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะคล้ายกับคานยื่น เนื่องจากในขณะที่คานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงแผ่นดินไหว จะมีการตัดตัวในรูปแบบ โค้งสองทาง (Double Curvature) โดยมีจุดค้ำยันที่กึ่งกลางคาน ที่บริเวณกึ่งกลางคานจะไม่เกิดแรงดัดเกิดแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว คานเชื่อมต่อผนังใช้คานเหล็กหน้าตัดประกอบ (Built-Up Beam) รูปตัวไอจากเหล็กแผ่นชั้นคุณภาพ SS400

การออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนังของตัวอย่างทดสอบที่ 1 จะทำให้พฤติกรรมของคานเหล็กครากแบบแรงเฉือน (สมการที่ 3.1) โดยการใช้ค่าดัชนีโครงสร้าง M_p/eV_p เป็นตัวกำหนดขนาดคานเหล็กเชื่อมต่อผนัง เพื่อให้พฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมามากที่สุด การออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนังจะคำนึงถึงเรื่องกำลังที่จุดครากจริงของเหล็กแผ่นขนาดความหนา 4.5 มิลลิเมตร (2860 ksc) และสมมุติให้มีค่าความเครียดแข็งเท่ากับ 1.1 เท่า (Overstrength due to Strain Hardening) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 1 เป็นการครากแบบแรงเฉือน จึงต้องใช้แผ่น Stiffener ทั้งสองด้านของคานเหล็กรูปตัวไอ โดยระยะห่างของแผ่น stiffener เป็นไปตามมาตรฐาน AISC 2010 [5] อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานเหล็กสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และตัวอย่างทดสอบของงานวิจัยในอดีต เป็นดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงเฉือน

Structural index	อาคารต้นแบบ	งานวิจัยของ Gong และ Shahrooz	งานวิจัยนี้
M_p/eV_p	0.713	0.856	0.892

การออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนตัวอย่างทดสอบที่ 2 จะทำให้คานเหล็กเชื่อมต่อผนังมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากตัวอย่างทดสอบที่ 1 คือ มีพฤติกรรมการครากแบบแรงดัด (สมการที่ 3.2) แต่ยังคงขนาดความสูงของคานและความกว้างให้ใกล้เคียงกัน การออกแบบจะคำนึงถึงเรื่องกำลังที่จุดครากจริงของเหล็กแผ่นจริง (2920 ksc) และการแข็งขึ้นของกำลัง (1.3) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 2 เป็นพฤติกรรมการครากแบบแรงดัด จึงใช้แผ่น Stiffener ทั้งสองด้านของคานเหล็กรูปตัวไอและระยะห่างของแผ่น Stiffener เป็นไปตามมาตรฐาน AISC 2010 [5]

3.4.2 การจำลองขนาดผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall of Specimen)

การออกแบบผนังรับแรงเฉือนในงานวิจัยนี้จะเหมือนกันทั้งสองตัวอย่าง และมีลักษณะที่คล้ายกับงานวิจัยในอดีตทั้งขนาดและการเสริมเหล็ก การจำลองผนังรับแรงเฉือนจะจำลองเฉพาะบางส่วนที่ได้รับผลกระทบเท่านั้น

การออกแบบเหล็กเสริมในผนังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบจะอาศัยค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดผนังรับแรงเฉือน (ρ) โดยที่

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} \quad (3.13)$$

เมื่อ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดผนังรับแรงเฉือน

ค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดผนังรับแรงเฉือนสำหรับผนังรับแรงเฉือนของอาคารต้นแบบ ในงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดผนังรับแรงเฉือน

Structural index	อาคารต้นแบบ	งานวิจัยของ Gong และ Shahrooz	งานวิจัยนี้
$\rho = A_s / A_g$	0.0152	0.0149	0.0152

3.4.3 การจำลองบล็อกคอนกรีต (Reaction Block)

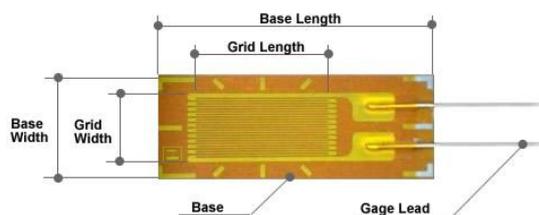
การติดตั้งผนังคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบจะใช้บล็อกคอนกรีตเพื่อยึดผนังกับพื้นห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 3.11 และ 3.12) เพื่อป้องกันการไถลและการกระดกเนื่องจากบล็อกคอนกรีตนั้นไม่ใช่ส่วนของ การจำลององค์อาคารในการทดสอบ การออกแบบบล็อกคอนกรีตจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราส่วน ดัชนีโครงสร้าง การออกแบบจะทำให้เหมือนกันทั้งสองด้านของผนังรับแรงเฉือน โดยต้องมีความ แข็งแรงมากจนไม่มีการเสียหาย บล็อกคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 35 เมกะปาสกาล ที่ 28 วัน บล็อก คอนกรีตทั้งสองด้านจะมีท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ด้านละ 6 ท่อน เพื่อใช้ในการยึด ตัวอย่างทดสอบกับพื้นห้องปฏิบัติการ โดยใช้สลักเกลียว (Stud) ที่มีขนาดพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลาง รอบในของท่อเหล็ก

3.5 การติดตั้งเครื่องมือวัด

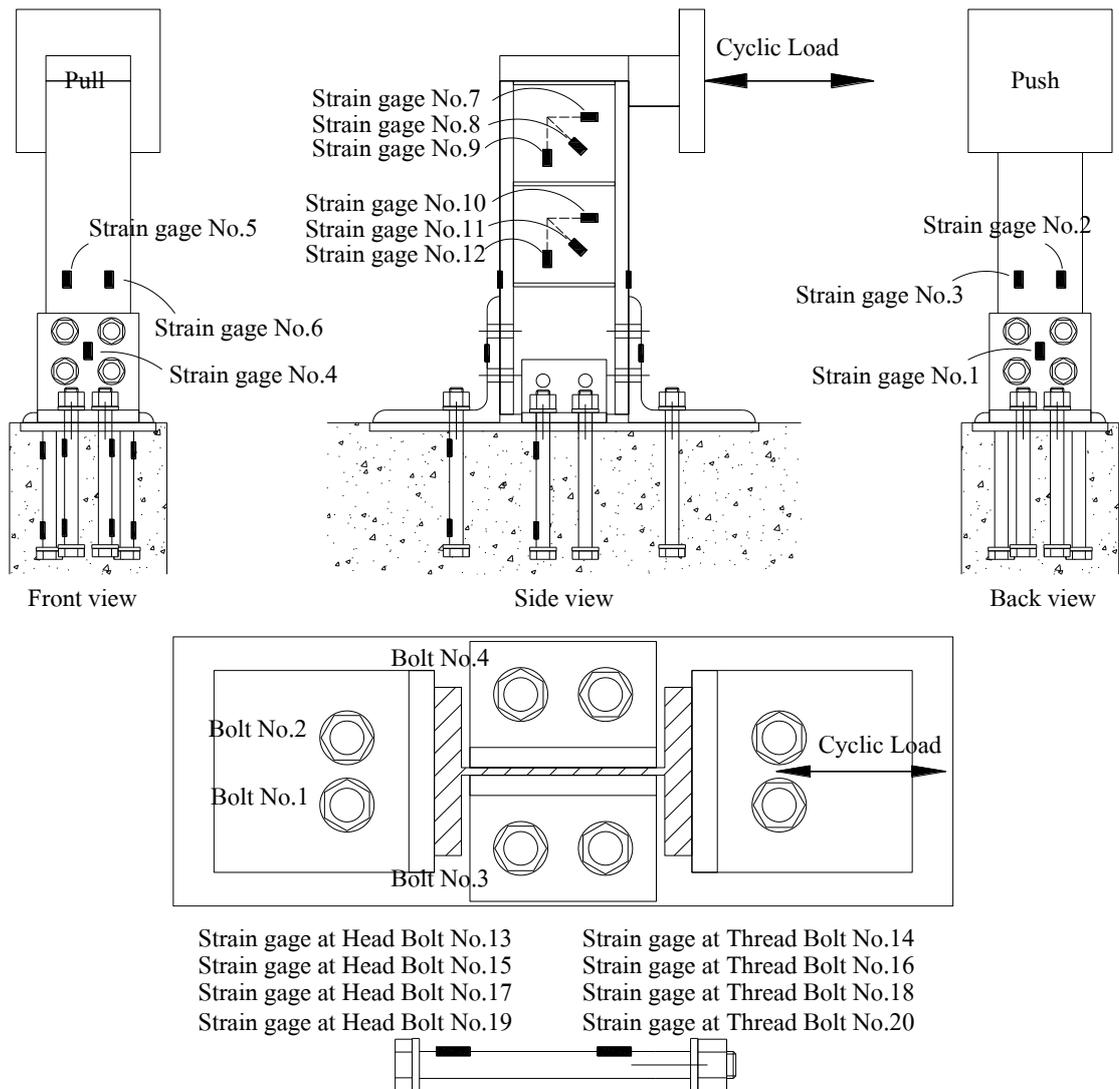
ข้อมูลที่สำคัญในการทดสอบคือ ระยะเวลาเปลี่ยนรูปของคานเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือน ปริมาณแรงสลับทิศ และจุดครากของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือน เครื่องมือทดสอบ (Actuator) สามารถอ่านค่าปริมาณแรงสลับทิศได้จาก load cell ที่ติดตั้งในตัว Actuator รวมทั้งค่าระยะเวลาเปลี่ยนตัวของคานเหล็ก (รูปที่ 3.15) อุปกรณ์ตรวจวัดในการหาจุดครากของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งประกอบด้วย สเตรนเกจ (Strain Gage) ซึ่งเป็นตัววัดค่าความเครียด (Strain) ตามแนวแรงมีลักษณะดังรูปที่ 3.16 สเตรนเกจเป็นเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง ก่อนการติดตั้งต้องทำความสะอาดพื้นผิวบริเวณที่ติดด้วยกระดาษทรายที่ละเอียด และติดด้วยกาวสำหรับติดสเตรนเกจโดยเฉพาะ งานวิจัยนี้ต้องการค่าความเครียดจากการเฉือนเพียงอย่างเดียว (Pure Shear, γ_{max}) การติดตั้งสเตรนเกจจึงต้องใช้การติดตั้งแบบ Rectangular Rosette Gage ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจแสดงอยู่ในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 เครื่องมือให้แรงทดสอบแบบสลับทิศทาง (Actuator)



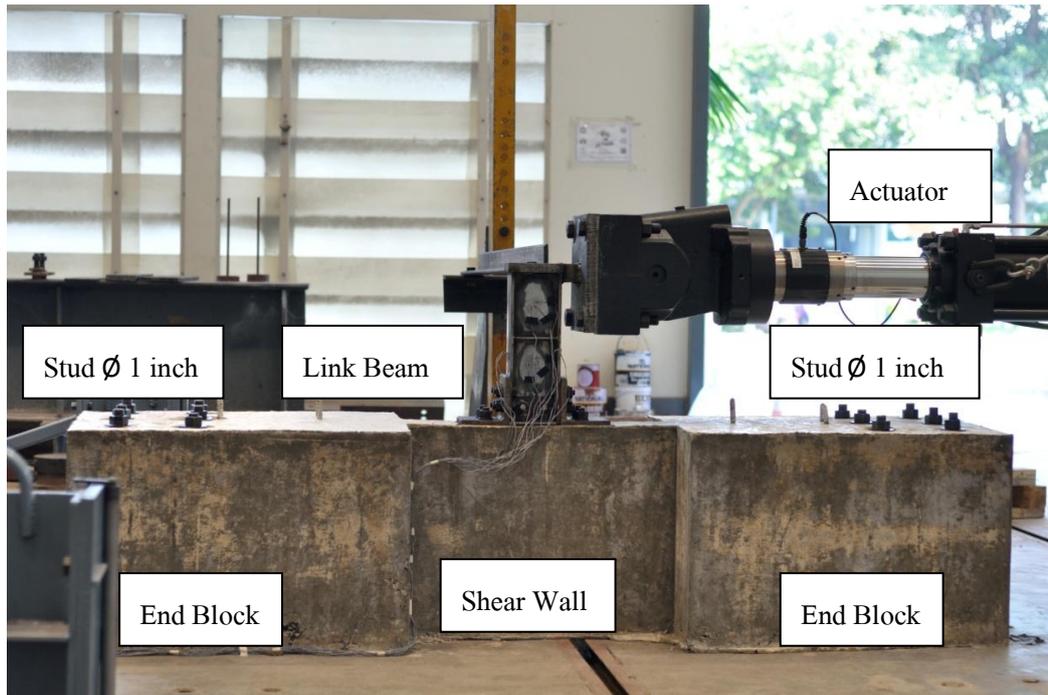
รูปที่ 3.16 สเตรนเกจ (Strain Gage)



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ

3.6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

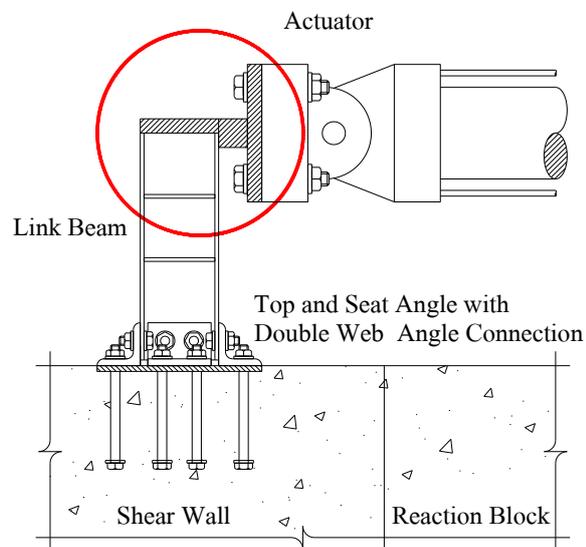
งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนที่มีความยาวของคานเหล็กครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมดและนั่งรับแรงเฉือนเพียงบางส่วน การติดตั้งตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นคานเหล็กยื่นตั้งขึ้นในลักษณะคล้ายเสา โดยวางนั่งรับแรงเฉือนกับพื้นห้องปฏิบัติการและยึดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณบล็อกรองคานกรัดด้วยสลักเกลียวที่ทำขึ้นรอยผ่านต่อเหล็กขนาด 1 นิ้วที่ฝังไว้ทั้งสองด้านก่อนทำการเทคอนกรีตดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ

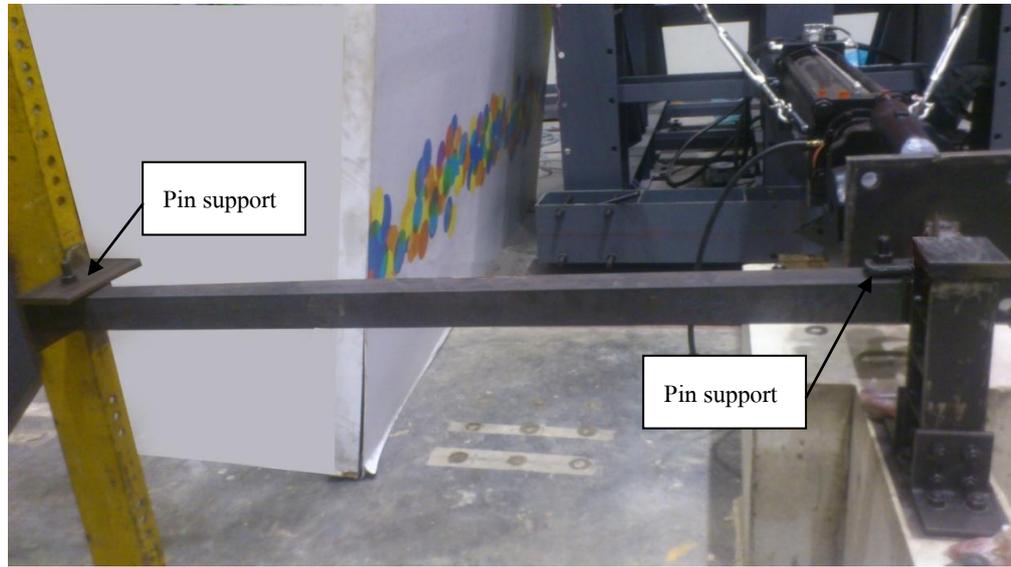
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบด้วยแรงสลับทิศ (Cyclic Load) โดยให้แรงที่บริเวณปลายคานยื่นของตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งเครื่องทดสอบ (Actuator) กับตัวอย่างทดสอบจะผ่านชุดติดตั้งที่ทำขึ้นดัง

รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ชุดติดตั้งแกนเหล็กเชื่อมต่อผนังเข้ากับเครื่องให้แรงทดสอบแบบสลับทิศทาง

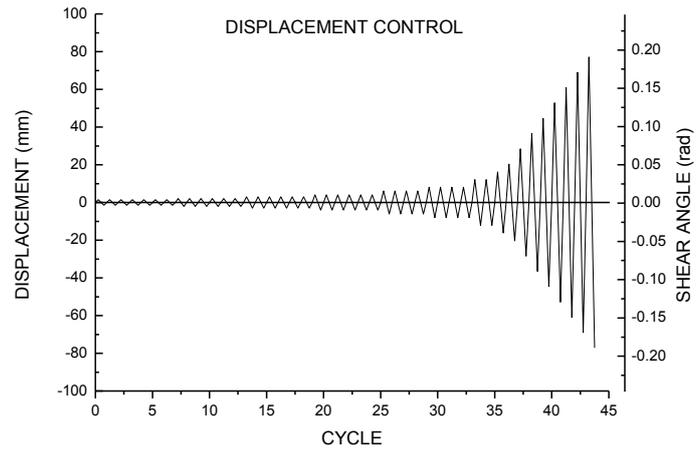
เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบคานเหล็กเชื่อมต่อผนังที่เป็นผลกระทบจากแรงด้านข้างเพียงอย่างเดียว ก่อนการทดสอบจึงต้องทำการติดตั้งตัวค้ำยันด้านข้างให้กับตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันไม่ให้คานเหล็กบิดออกนอกแกนทดสอบ โดยที่ติดตั้งคานปลายคานยื่นของตัวอย่างทดสอบ และใช้สลักเกลียวยึดให้สามารถหมุนได้ (Pin Support) เพื่อไม่ให้ค้ำยันด้านข้างรั้งคานเหล็กตัวค้ำยันจึงต้องมีความยาวมาก ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การติดตั้งค้ำยันด้านข้าง

3.7 การให้แรงสลับทิศในการทดสอบ

การให้แรงแบบสลับทิศ (Cyclic Load) กำหนดตามระยะการเคลื่อนตัวของคานเหล็ก (Displacement Control) โดยจำลองการเคลื่อนตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่ทุกๆ มุมการเสี้ยวรูป (γ) ± 0.00375 , ± 0.005 , ± 0.0075 , ± 0.01 , ± 0.015 , ± 0.02 , ± 0.03 , ± 0.04 , ± 0.05 , ± 0.07 , ± 0.09 , ± 0.11 , ± 0.13 , ± 0.15 และ ± 0.17 เรเดียน ตามคำแนะนำของ AISC 341-10 [5] ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 รูปแบบการให้แรงสลับทิศกับตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ