

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้มีเนื้อหาประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Single Plate Shear Connection ตั้งแต่ปี ค.ศ 1968 ถึงปี 2010 ในหัวข้อ 2.1 รายละเอียดการออกแบบ Single Plate Shear Connection ตามคู่มือการออกแบบของ AISC (2005) [21] ในหัวข้อที่ 2.2

2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับ Single Plate Shear Connection ในอดีต

ในปีค.ศ.1968 Lipson [1] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อรับแรงเฉือนประเภท Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบตัวอย่าง ซึ่งพิจารณาถึงความเหนียวของจุดต่อ ลักษณะจุดต่อใช้ปลายแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับชิ้นส่วนที่รองรับ ส่วนแผ่นเหล็กอีกด้านจะยึดด้วยสลักเกลียวเข้ากับเอวของคาน ผู้วิจัยจำแนกรูปแบบการวิบัติของจุดต่อรับแรงเฉือน Single Plate Shear Connection ได้ 3 รูปแบบ คือ การวิบัติจากการครากของหน้าตัดแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงดึง (Tensile Yielding of Plate) การวิบัติของรอยเชื่อมเนื่องจากการฉีกขาด (Weld Rupture) และการวิบัติของสลักเกลียวเนื่องจากการฉีกขาด (Vertical Bolt Tear Out of the Bottom Bolt) Lipson สังเกตเห็นการเสียรูปของรูเจาะอย่างมีนัยสำคัญและสรุปว่า โมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณที่จุดรองรับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.จำนวนและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และรูปร่างลักษณะการวางตัวของสลักเกลียว
- 2.ความหนาของแผ่นเหล็กและเอวของคาน
- 3.อัตราส่วนของความยาวต่อความลึกของคาน
- 4.รูปแบบการวางตัวของแรงกระทำหรือน้ำหนักบรรทุก
- 5.ความยืดหยุ่นของบริเวณจุดรองรับ

ปีค.ศ. 1975 Cacavale [2] ศึกษาพฤติกรรมของ Single Plate Shear Connection โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (INELAS) และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Lipson [1] ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังนั้น Cacavale จึงสรุปว่าความเหนียวจุดต่อจะเกิดจากการที่สลักเกลียวคว้านเข้าไปในรูเจาะแผ่นเหล็ก ดังนั้นเพื่อให้จุดต่อมีความเหนียวสลักเกลียวต้องมีความแข็งแรงที่พอเพียง

ปีค.ศ.1980 Richard [3] ศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงของ Single Plate Shear Connection โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงแบบ Full Scale จำนวน 5 ตัวอย่าง ซึ่งใช้สลักเกลียวชนิด A325 จำนวน 3 ถึง 7 ตัว รูเจาะแบบมาตรฐาน แผ่นเหล็กและคานใช้เกรดเหล็กชนิด A36 การทดสอบทำโดยให้ปลายคานด้านหนึ่งต่อยึดเข้ากับเสาด้วยจุดต่อรับแรงเฉือน Single

Plate Shear Connection ส่วนปลายคานอีกด้านหนึ่งวางบนที่รองรับ (Roller) จากนั้นให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrated Load) บริเวณกึ่งกลางคาน จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Richard เสนอทฤษฎี Beam Line ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คัตและความสามารถในการหมุนตัวที่ปลายคาน (Moment-Rotation Curves) ที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อคานรับแรงกระทำแบบแผ่กระจาย (Distributed Load) จากผลการทดสอบจริงซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดต่อรับแรงเนื้อมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับทฤษฎี Beam-Line Richard ได้เสนอวิธีการออกแบบจุดต่อรับแรงเนื้อมาใช้รูเจาะแบบมาตรฐาน ต้องพิจารณาถึงความหนาของแผ่นเหล็กเพื่อให้จุดต่อมีความเหนียวที่เพียงพอ Richard เสนอข้อจำกัดความหนาของแผ่นเหล็ก A36 โดยแนะนำให้ใช้ความหนาที่เปลี่ยนไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว ดังตารางที่ 2.1 และเสนอวิธีคำนวณหาค่า Eccentricity ของกลุ่มสลักเกลียวด้วย

ตารางที่ 2.1 ความหนาแผ่นเหล็กสำหรับเกรดเหล็กชนิด A36 ที่ Richard [3] แนะนำ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว (นิ้ว)	ความหนาแผ่นเหล็ก (นิ้ว)	
	สลักเกลียวชนิด A325	สลักเกลียวชนิด A490
3/4	3/8	1/2
7/8	7/16	5/8
1	9/16	11/16

Richard เสนอวิธีคำนวณหาค่า Eccentricity ของกลุ่มสลักเกลียวดังนี้

$$\frac{e}{h} = \left(\frac{e}{h}\right)_{ref} \times \left(\frac{n}{N}\right) \times \left(\frac{S_{ref}}{S}\right)^{0.4} \quad (2.1)$$

โดยที่

e = Eccentricity

$$\left(\frac{e}{h}\right)_{ref} = 0.06L/d - 0.15 \quad \text{เมื่อ } L/d \geq 6$$

$$= 0.035L/d \quad \text{เมื่อ } L/d < 6$$

L/d คือ อัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน

n คือ จำนวนสลักเกลียว

N = 5 เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ 3/4 นิ้ว และ 7/8 นิ้ว

= 7 เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ 1 นิ้ว

$$\begin{aligned}
 S_{ref} &= 100 \text{ เมื่อ เส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ } 3/4 \text{ นิ้ว} \\
 &= 175 \text{ เมื่อ เส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ } 7/8 \text{ นิ้ว} \\
 &= 450 \text{ เมื่อ เส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ } 1 \text{ นิ้ว}
 \end{aligned}$$

S คือ โมดูลัสหน้าตัดของคาน

ค่าโมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบรอยเชื่อม สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M = V(e + a) \quad (2.2)$$

โดยที่ V คือ แรงเฉือนที่ถ่ายจากคานลงสู่จตุรรองรับ

a คือ ระยะจากแนวกึ่งกลางของสลักเกลียวถึงตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อม

ปี ค.ศ.1982 Richard และคณะ [4] ศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงของจุดต่อประเภท Single Plate Shear Connection ที่ใช้สลักเกลียวชนิด A307 และรูเจาะแบบ Shot Slot โดยการทดสอบ จะให้ปลายคานอีกด้านหนึ่งต่อยึดเข้ากับเสาด้วย Single Plate Shear Connection ส่วนปลายคานอีกด้านหนึ่งวางบนที่รองรับ (Roller) และให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrated Load) บริเวณกึ่งกลางคาน ผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของจุดต่อ ให้ผลทางด้านความเหนียวได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ โดยสลักเกลียวเกิดการเคลื่อนที่ในรูเจาะและคานสามารถหมุนตัวได้อย่างพอเพียง อย่างไรก็ตาม คู่มือการออกแบบ AISC (2005) [20] ไม่แนะนำให้ใช้สลักเกลียวชนิด A307 ในการออกแบบ

ปี ค.ศ. 1984 Horiby และคณะ [5] ศึกษาและทดสอบหาจุดศูนย์กลางการหมุนตัวของกลุ่มสลักเกลียวใน Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่าง ใช้คาน Gr50 และสลักเกลียวชนิด A325 การทดสอบทำโดยใช้ Single Plate เชื่อมติดที่ปลายด้านหนึ่งเข้ากับปีกของเสา ส่วนแผ่นเหล็กอีกด้านยึดด้วยสลักเกลียวเข้ากับเอวของคาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางการหมุนตัวของกลุ่มสลักเกลียวอยู่ที่จุดศูนย์กลางของกลุ่มสลักเกลียว Horiby [5] ได้แนะนำให้คำนวณหา Eccentricity เมื่อใช้คานเกรดเหล็กชนิด Gr50 ดังนี้

$$e_{50} = e_{36} \times \left(\frac{36}{60} \right) \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.3)$$

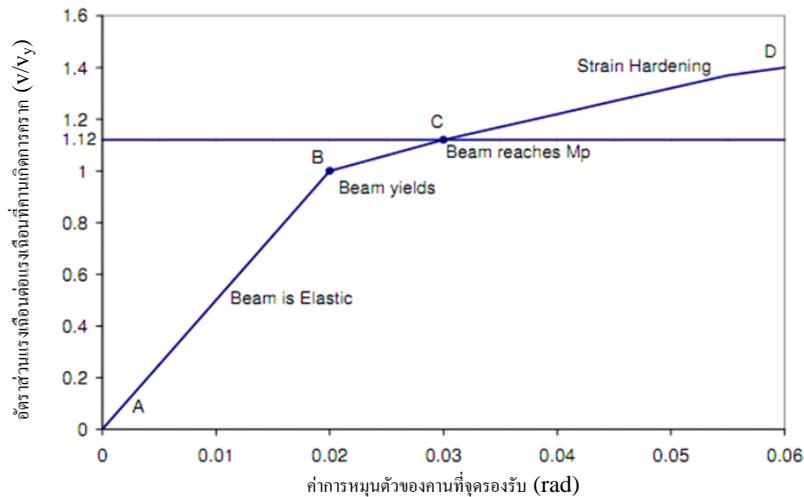
โดยที่ e_{36} คำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

ในปี ค.ศ.1985 Flatt [6] ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic Loading) ของ Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบ Single Plate Shear Connection ที่มีสลักเกลียวจำนวน 2 และ 3 ตัว ซึ่งเชื่อมติดปลายด้านหนึ่งเข้ากับปีกของเสา ส่วนแผ่นเหล็กอีกด้านยึดด้วยสลักเกลียวเข้ากับเอวของคาน ให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrated Load) ลงบริเวณกึ่งกลางคาน จากการทดสอบพบว่าที่แผ่นเหล็ก เกิดการวิบัติแบบ Tensile Crack ซึ่งค่าการหมุนตัวของคานมากที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่า

0.0021 เรเดียน และ Single Plate Shear Connection สามารถทนต่อ Cyclic Loading ได้หลังจากการ Crack เกิดขึ้นแล้ว

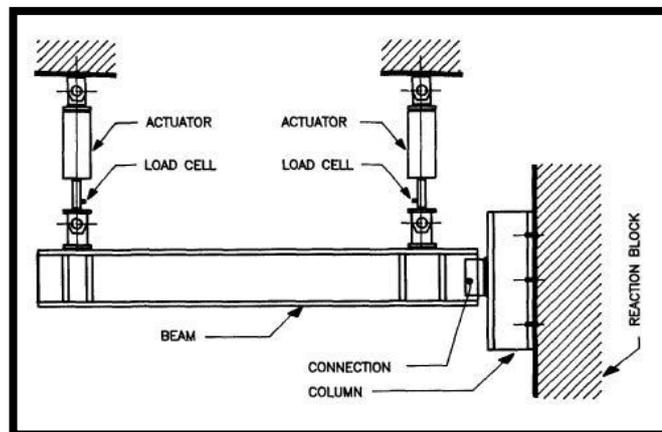
ในปี ค.ศ.1986 Patrick และคณะ [7] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของ Single Plate Shear Connection ที่ออกแบบตามคู่มือ Australian Welding Research Association โดยทำการทดสอบตัวอย่างแบบ Full Scale ที่ใช้สลักเกลียวจำนวน 6 และ 9 ตัว เรียงตามแนวตั้งแบบแถวเดียวและใช้สลักเกลียวจำนวน 12 และ 18 ตัวเรียงตามแนวตั้งแบบสองแถว ลักษณะจุดต่อ จะใช้ Single Plate เชื่อมติดที่ปลายด้านหนึ่ง เข้ากับปีกของเสา ส่วนอีกด้านของแผ่นเหล็กยึดด้วยสลักเกลียวเข้ากับเอวของคาน และให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrated load) บริเวณกึ่งกลางคาน จากผลการทดสอบพบว่าการวิบัติของคานเกิดขึ้นที่ค่าการหมุนตัวของคาน 0.01 เรเดียน โดยจุดต่อที่มีสลักเกลียวแบบแถวเดียวนั้น การวิบัติจะเกิดที่สลักเกลียวเนื่องมาจากแรงเฉือนที่กระทำต่อสลักเกลียว ส่วนจุดต่อที่มีสลักเกลียวแบบสองแถว การวิบัติจะเกิดที่แผ่นเหล็กเนื่องจากการเฉือนขาดของแผ่นเหล็กตามแนวรอยต่อของสลักเกลียว

ปีค.ศ.1989 Astaneh และคณะ[8] พัฒนาขั้นตอนการออกแบบ Single Plate Shear Connection และปรับปรุงทฤษฎี Beam Line ของ Richard [3] โดยพิจารณาขอบเขตพฤติกรรมการรับแรงของคานถึงช่วงอินเอลลาสติกด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อเทียบกับความสามารถในการหมุนตัวของคานบริเวณจุดรองรับเพื่อแสดงถึงพฤติกรรมทางด้านความเหนียวของจุดต่อ สำหรับคานหน้าตัด H-Beam ขนาดตั้งแต่ W16 ถึง W33 ซึ่งมีอัตราส่วน L/d (ความยาวคานต่อความลึกของคาน) อยู่ในช่วง 4 ถึง 38 รับแรงกระทำแบบแรงกระจาย (Uniform Load) จากนั้นผู้วิจัยได้เลือกอัตราส่วน L/d เท่ากับ 25 เป็นมาตรฐานในการอธิบายผลการศึกษา กราฟความสัมพันธ์นี้มีพฤติกรรมลักษณะเฉพาะแบ่งได้ 3 ช่วง คือ เมื่อคานเริ่มรับแรงกระทำหน้าตัดคาน จะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง อินเอลลาสติก คือค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อเทียบกับค่าการหมุนตัวของคานที่บริเวณจุดรองรับมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นจนทำให้หน้าตัดคานเกิดการคราก โมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นในขณะนี้คือ โมเมนต์คัตสูงสุด M_y (Yield Moment) ค่าการหมุนตัวของคานที่บริเวณจุดรองรับประมาณ 0.02 เรเดียน หลังจากนั้นเมื่อคานต้องรับน้ำหนักบรรทุกหรือโมเมนต์เพิ่มมากขึ้นต่อไปอีก พฤติกรรมของหน้าตัดคานจะเข้าสู่ช่วง อินเอลลาสติก จนกระทั่งถึงจุดที่ตลอดหน้าตัดคานเกิดการครากตลอดทั้งหน้าตัด โมเมนต์ที่กระทำในขณะนี้ถือเป็นค่าสูงสุดที่หน้าตัดคานสามารถรับได้ในช่วงพลาสติก เรียกว่า โมเมนต์คัตพลาสติก M_p (Plastic Moment) ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับประมาณ 0.03 เรเดียน จากนั้นพฤติกรรมของหน้าตัดคานจะเข้าสู่ช่วง Strain Hardening จนกระทั่งวิบัติในที่สุดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ

Astaneh [9] ได้ทดสอบ Single Plate Shear Connection แบบ Full Scale ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ใช้จำนวนสลักเกลียวตั้งแต่ 3 ถึง 9 ตัว รูปร่างแบบมาตรฐาน แต่ละตัวอย่างมีระยะ a (a -distance) ซึ่งเป็นระยะที่วัดจากแนวรอยเชื่อมถึงแนวกึ่งกลางสลักเกลียวเท่ากับ 2.75 นิ้ว ดังข้อมูลที่แสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 การทดสอบทำโดยใช้คานยื่นซึ่งให้แรงกระทำโดย Actuator สองตำแหน่งคือ บริเวณใกล้กับจุดต่อรับแรงเฉือนซึ่งควบคุมการให้ปริมาณแรงกระทำ และบริเวณปลายคานอีกด้านหนึ่งซึ่งควบคุมการหมุนตัวของคานดังรูปที่ 2.2 ผลการทดสอบพบว่าคานจะสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดเมื่อค่าการหมุนตัวของหน้าตัดคานที่บริเวณจุดรองรับอยู่ระหว่าง 0.026 ถึง 0.061 เรเดียน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การติดตั้งการทดสอบตัวอย่างของ Astaneh [9]

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดการทดสอบของ Astaneh [9]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว	แผ่นเหล็ก A36 (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	ระยะขอบ (นิ้ว)	รอยเชื่อม (นิ้ว)	คาน	
					ชนิด	ขนาด
1	3-A325-N	3/8×4-1/4×9	1-1/2	1/4	A36	W18×55
2	5-A325-N	3/8×4-1/4×15	1-1/2	1/4	A36	W18×55
3	7-A325-N	3/8×4-1/4×21	1-1/2	1/4	A36	W24×84
4	3-A490-N	3/8×3-7/8×8-1/4	1-1/8	7/32	Gr. 50	W18×55
5	5-A490-N	3/8×3-7/8×14-1/4	1-1/8	7/32	Gr. 50	W18×55
6	9-A490-N	3/8×4-1/4×27	1-1/2	9/32	N/A	W24×84

หมายเหตุ

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียวเท่ากับ 3/4 นิ้ว
- แผ่นเหล็กชนิด A36 มีค่ากำลังคราก 35.5 ksi และค่ากำลังประลัย 61 ksi
- ระยะ a เท่ากับ 2.75 นิ้ว

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบของ Astaneh [9]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว (ตัว)	รูปแบบการวิบัติ	กำลังรับ แรงเฉือน (kips)	ค่าการหมุน ตัว(เรเดียน)
1	3	สลักเกลียวขาด	94	0.056
2	5	สลักเกลียวขาด	137	0.054
3	7	สลักเกลียวขาด	160	0.026
4	3	รอยเชื่อมและสลัก เกลียวขาด	79	0.061
5	5	สลักเกลียวขาด	130	0.053
6	9	สลักเกลียวขาด	260	0.045

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดสอบ Astaneh [9] เสนอสถานะจำกัดในการออกแบบ Single Plate Shear Connection ได้แก่

1. การวิบัติด้วยแรงเฉือนของสลักเกลียว (Shear Failure of Bolts)
2. การวิบัติจากการครากของแผ่นเหล็ก (Yielding of Gross Area of Plate)
3. การฉีกขาดบริเวณหน้าตัดสุทธิของแผ่นเหล็ก (Fracture of Net Area of Plate)
4. การร่อนขาดของรอยเชื่อม (Fracture of welds)
5. การวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของรูเจาะ (Bearing Failure of Beam Web or Plate)

Astaneh [9] จำแนกจุดต่อเป็นสองลักษณะได้แก่ ลักษณะที่ Single Plate เชื่อมติดที่ปลายด้านหนึ่งเข้ากับเสา เรียกว่า จุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Rigid Support) และลักษณะที่ Single Plate เชื่อมติดที่ปลายด้านหนึ่งเข้ากับคาน เรียกว่า จุดต่อที่มีจุดรองรับแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) รวมทั้งเสนอขั้นตอนการออกแบบทั้งรอยเชื่อมและกลุ่มสลักเกลียวของ Single Plate Shear Connection ให้ต้องคำนึงถึงค่า Eccentricity ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ สำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น ค่า Eccentricity คำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) และสำหรับจุดรองรับแบบยึดหยุ่น ค่า Eccentricity คำนวณได้จากสมการที่ (2.6) และ (2.7)

ค่า Eccentricity ของกลุ่มสลักเกลียวสำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น

$$e_b = (n-1) - a \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.4)$$

ค่า Eccentricity ของรอยเชื่อมสำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น

$$e_w = (n-1) \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.5)$$

ค่า Eccentricity ของสลักเกลียวสำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดหยุ่น

$$e_b = \text{Max}\{(n-1) - a, a\} \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.6)$$

ค่า Eccentricity ของรอยเชื่อมสำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดหยุ่น

$$e_w = \text{Max}\{n, a\} \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.7)$$

โดย a คือ ระยะระหว่างแนวกึ่งกลางของกลุ่มสลักเกลียวถึงแนวกึ่งกลางรอยเชื่อม

n คือ จำนวนสลักเกลียวที่ใช้แบบแถวเดียวในแนวตั้ง

Astaneh และ Nadah [10] เสนอให้ใช้ความหนาของแผ่นเหล็กไม่เกินกว่า $\left(\frac{d_b}{2} + \frac{1}{16}\right)$ นิ้ว เพื่อให้

จุดต่อมีความเหนียวพอเพียงในขณะที่คานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก (M_p)

ในปี ค.ศ. 1990 Porter และ Astaneh [11] ศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงของ Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบตัวอย่าง ซึ่งใช้สลักเกลียวชนิด A325 และ A490 จำนวนตั้งแต่ 3 ถึง 9 ตัว ในรูเจาะแบบ Short Slot ดังข้อมูลตัวอย่างการทดสอบที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดการทดสอบของ Porter และ Astaneh [11]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว	ชนิดแผ่นเหล็ก	ขนาดแผ่นเหล็ก (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	รอยเชื่อม (นิ้ว)	ชนิดกาน
1	9-A325	A36	3/8×4-1/4×27	1/4	Gr.50
2	7-A490	A36	3/8×4-1/4×21	1/4	Gr.50
3	5-A490	A36	3/8×4-1/4×15	1/4	Gr.50
4	3-A325	A36	3/8×3-7/8×9	1/4	Gr.50

หมายเหตุ

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ 3/4 นิ้ว

ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบของ Porter และ Astaneh [11]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว	รูปแบบการวิบัติ	กำลังรับแรงเฉือน (kips)	ค่าการหมุนตัว (เรเดียน)
1	9-A325	สลักเกลียวขาด	193	0.103
2	7-A490	สลักเกลียวขาด	189	0.030
3	5-A490	สลักเกลียวขาด	152	0.038
4	3-A325	สลักเกลียวขาดและวิบัติเนื่องจากแรงเบงทวน	92	0.057

Porter และ Astaneh เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาค่า Eccentricity ของสลักเกลียวในรูเจาะชนิด Short Slot สำหรับจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่นและจุดรองรับแบบยึดหลวม [9] ดังสมการที่ 2.8 และสมการ 2.9 ตามลำดับ

ค่า Eccentricity ของสลักเกลียวในรูเจาะแบบ Short Slot สำหรับจุดต่อที่เป็นจตุรรองรับแบบยึดแน่น

$$e_b = \left| \frac{2n}{3} - a \right| \quad (2.8)$$

ค่า Eccentricity ของสลักเกลียวในรูเจาะแบบ Short Slot สำหรับจุดต่อที่เป็นจตุรรองรับแบบยึดหย่อน

$$e_b = \left| \frac{2n}{3} - a \right| \geq a \quad (2.9)$$

ในปีค.ศ.1992 Sarkar [12] ทดสอบ Single Plate Shear Connection แบบ Full Scale ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งออกแบบตามวิธีของ Astanteh [9] ตัวอย่างการทดสอบ ใช้สลักเกลียวชนิด A325 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว จำนวนตั้งแต่ 2 ถึง 6 ตัว รูเจาะแบบมาตรฐานและแบบ Shot Slot ใช้แผ่นเหล็กและคานชนิด A36 ระยะ a (a-distance) เท่ากับ 3.5 นิ้ว ลักษณะจุดต่อเป็นจตุรรองรับแบบยึดแน่น [9] การทดสอบทำโดยให้แรงกระทำแบบจุด (Concentrate Load) สองตำแหน่งบนคานแบบ Simple Support: ตำแหน่งแรกบริเวณกึ่งกลางคาน หากจุดต่อไม่เกิดการวิบัติที่ค่าการหมุนตัวของคานที่จตุรรองรับ เท่ากับ 0.03 เรเดียน จะหยุดให้แรงกระทำ แล้วย้ายตำแหน่งมาให้แรงกระทำบริเวณใกล้กับจตุรรองรับ เพื่อเพิ่มแรงเฉือนให้กับจุดต่อจนตัวอย่างการทดสอบวิบัติในที่สุด ซึ่งแตกต่างกับวิธีการทดสอบของ Astanteh [9] ข้อมูลตัวอย่างการทดสอบและผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 ตามลำดับ จากผลการทดสอบ Sarkar สรุปว่ารูปแบบการวิบัติของจุดต่อมีความคล้ายกับ Astanteh [9] และได้สังเกตการวิบัติของแผ่นเหล็กแบบ Lateral Buckling เพิ่มเติม

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดการทดสอบของ Sarkar [12]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว	แผ่นเหล็ก A36 (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	ชนิดของรูเจาะ	คาน A36	
				ขนาด	ความยาว(ฟุต)
1	2-A325-X	3/8×5×6	มาตรฐาน	W12×35	21
2	2-A325-N	3/8×5×6	มาตรฐาน	W12×35	21
3	4-A325-N	3/8×5×12	มาตรฐาน	W18×76	33
4	4-A325-N	3/8×5×12	Short Slot	W18×76	33
5	6-A325-N	3/8×5×18	มาตรฐาน	W21×93	25
6	6-A325-N	3/8×5×18	Short Slot	W21×93	25

หมายเหตุ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวเท่ากับ 3/4 นิ้ว

ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบของ Sarkar [12]

ตัวอย่างที่	รูปแบบการวิบัติ	กำลังรับแรง เฉือน (kips)	การหมุนตัวที่จุด รองรับ (เรเดียน)
1	แผ่นเหล็กเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน	64.3	0.025
2	รอยเชื่อมเกิดการฉีกขาด	51.8	0.033
3	สลักเกลียวขาด	81.6	0.038
4	สลักเกลียวขาด	129	0.042
5	สลักเกลียวขาด	119	0.027
6	สลักเกลียวขาด	194	0.03

Sarkar เสนอให้ใช้อัตราส่วนความหนาแผ่นเหล็กต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวมีค่า 0.42 และ 0.52 สำหรับสลักเกลียวชนิด A325 และ A490 ตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ เพื่อให้จุดต่อที่ใช้รูเจาะแบบมาตรฐานมีความเหนียวที่พอเพียง

ความหนาแผ่นเหล็ก สำหรับสลักเกลียวชนิด A325

$$t_p \leq 0.42d_b \quad (2.10)$$

ความหนาแผ่นเหล็ก สำหรับสลักเกลียวชนิด A490

$$t_p \leq 0.52d_b \quad (2.11)$$

ปีค.ศ.1996 Duggal และ Wallace [13] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของ Single Plate Shear Connection ที่ใช้รูเจาะชนิด Shot Slot ขยายผลจากงานวิจัยของ Sarkar [12] โดยการสร้างแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้สลักเกลียว A325 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 และ 1 นิ้ว เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Sarkar [12] ผู้วิจัยสรุปว่าค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของจุดต่อ Single Plate Shear Connection ที่ใช้รูเจาะแบบ Shot Slot จะดีกว่ารูเจาะมาตรฐาน และได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวในรูเจาะแบบ Shot Slot ดังนี้

$$F_L = \mu T + \mu_{1s} P + K D_L \quad (2.12)$$

โดย

F_L คือ แรงที่ใช้ในการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวในรูเจาะแบบ Shot Slot

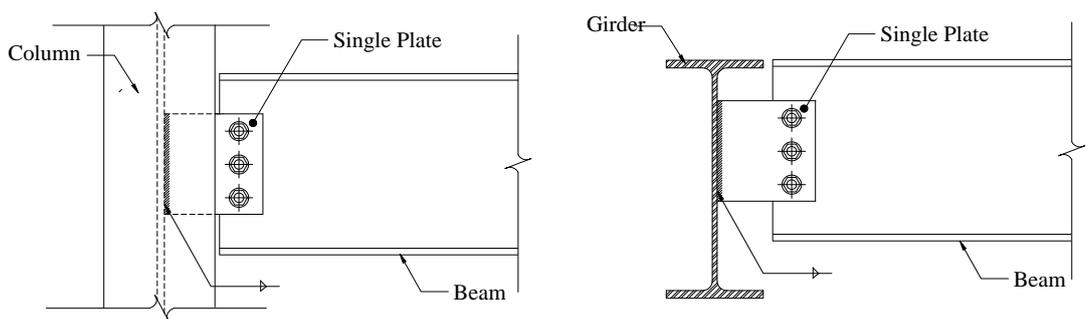
μ คือ สัมประสิทธิ์เสียดทาน

T คือ แรงดึงสลักเกลียว

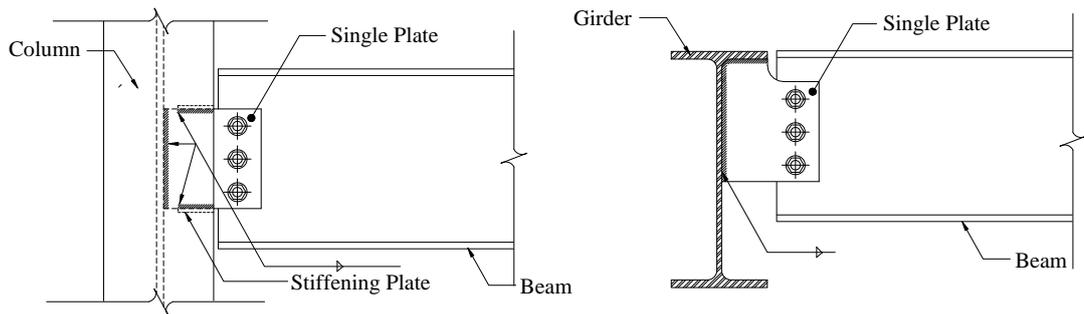
μ_{1s} คือ สัมประสิทธิ์เสียดทานการขยายตัวด้านข้างเท่ากับ 0.25

- P คือ แรงกระทำมีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของคาน
- K คือ ความแข็งแรงของรูเจาะแบบ Shot Slot
- D_L คือ ระยะการเคลื่อนที่ในรูเจาะแบบ Shot Slot

ในปี ค.ศ. 2003 Sherman และ Ghorbapoor [14] ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Extended Single Plate Shear Connection ประเภท Unstiffened และ Stiffened จำนวน 4 และ 13 ตัวอย่าง ตามลำดับ ลักษณะจุดต่อประเภท Unstiffened ใช้ปลายแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับเอวของคานหลัก (Girder) หรือเอวของเสา แผ่นเหล็กอีกด้านยึดต่อด้วยสลักเกลียวเข้ากับคานย่อย แสดงดังรูปที่ 2.2 ส่วนจุดต่อประเภท Stiffened ใช้ปลายแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับเอวของเสาและ Stiffening Plate ส่วนแผ่นเหล็กอีกด้านยึดต่อด้วยสลักเกลียวเข้ากับเอวของคานย่อย แสดงดังรูปที่ 2.3 ตามลำดับ การทดสอบจะใช้สลักเกลียว 3 ถึง 5 ตัว รูเจาะแบบ Shot Slot และมีระยะยื่น (a-distance) อยู่ระหว่าง 6.3 ถึง 10 นิ้ว ใช้แผ่นเหล็ก A36 และคาน Gr50 ขนาดรอยเชื่อมมากกว่า 5/8 เท่าของความหนาแผ่นเหล็ก ให้แรงกระทำแบบจุดลงกึ่งกลางคาน ผลการทดสอบพบว่า จุดต่อประเภท Unstiffened รับแรงเฉือนได้มากกว่าน้ำหนักออกแบบ (Design Load) ค่า Eccentricity ที่วัดได้จาก Strain gages มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณโดยสมการของ Astateh [9] ผู้วิจัยจึงสรุปว่าการคำนวณค่า Eccentricity ของรอยเชื่อม ตามวิธีดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย และขนาดรอยเชื่อม 3/4 เท่าของความหนาแผ่นเหล็กที่ Astateh [9] เสนอสามารถใช้งานได้ ลักษณะและรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างการทดสอบคือ สลักเกลียวขาดเนื่องจากแรงเฉือน (Bolt Shear Rupture) และการวิบัติเนื่องจากการบิดตัว (Twisting) เกิดขึ้นเนื่องจากค้ำยันบริเวณคานไม่เพียงพอ

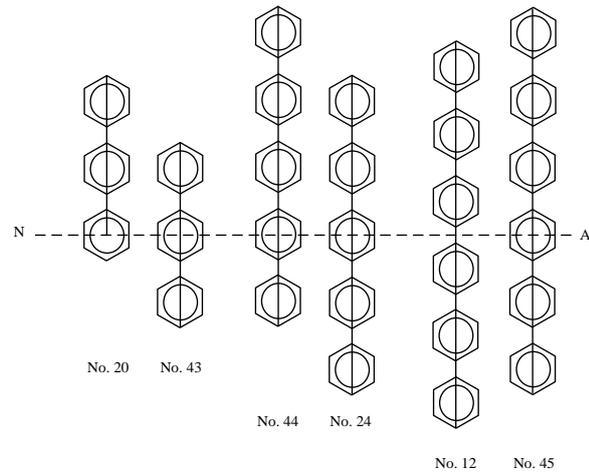


รูปที่ 2.3 ลักษณะ Unstiffened Extended Single Plate Shear Connection



รูปที่ 2.4 ลักษณะ Stiffened Extended Single Plate Shear Connection

ปีค.ศ. 2004 Ashakul [15] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของ Single Plate Shear Connection โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Astaneh [9] และ Sarkar [12] เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบหาผลกระทบที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Single Plate Shear Connection ได้แก่ ระยะยื่น (a-distance) สมบัติทางด้านกำลังทางวัสดุของแผ่นเหล็ก ความหนาแผ่นเหล็ก และการจัดวางตำแหน่งของกลุ่มสลักเกลียวที่ห่างจากแกนสะเทินของคาน การวิเคราะห์ใช้สลักเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ชนิด A325N แผ่นเหล็ก A36 และ Gr50 ระยะยื่นอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 5 นิ้ว จากผลการวิเคราะห์ Ashakul สรุปว่าระยะยื่น (a-distance) ไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียว การวิเคราะห์ผลเนื่องจาก สมบัติทางด้านกำลังทางวัสดุของแผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กที่มีกำลังครากเท่ากับ 36 43 50 ksi และความหนาแผ่นเหล็กอยู่ในช่วง 3/8 ถึง 3/4 นิ้ว Ashakul สรุปว่าเมื่อความหนาและกำลังครากของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวลดลง และลักษณะการจัดวางตำแหน่งของกลุ่มสลักเกลียวที่ห่างจากแกนสะเทินของคาน แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในตารางที่ 2.8 และผลการวิเคราะห์ห้อยู่ในตารางที่ 2.9



รูปที่ 2.5 การจัดวางตำแหน่งของกลุ่มสลักเกลียวที่ห่างจากแกนสะเทินของคานในภาวเคราะห์ของ Ashakul [15]

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ผลของตำแหน่งของกลุ่มสลักเกลียวที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Ashakul [15]

แบบจำลองที่	สลักเกลียว	แผ่นเหล็ก		คาน		
		ชนิด	ขนาด (นิ้ว× นิ้ว× นิ้ว)	ชนิด	ขนาด	ยาว (ฟุต)
43	3-A325-N	Gr.50	3/8×4-1/2×9	Gr.50	W18×55	28
20	3-A325-N	Gr.50	3/8×4-1/2×9	Gr.50	W18×55	28
24	5-A325-N	Gr.50	3/8×5-1/2×15	Gr.50	W18×55	17
44	5-A325-N	Gr.50	3/8×5-1/2×15	Gr.50	W24×84	33
12	6-A325-N	A36	3/8×5×18	A36	W21×93	23.5
45	6-A325-N	Gr.50	3/8×5×18	Gr.50	W24×84	28

หมายเหตุ

- สลักเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3/4 นิ้ว

ตารางที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์ ผลของตำแหน่งของกลุ่มสลักเกลียวที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Ashakul [15]

แบบจำลองที่	สลักเกลียว	ตำแหน่งสลักเกลียวจาก แกนสะเทินคาน (นิ้ว)	กำลังรับแรงเฉือน (kips)
43	3-A325-N	3	59.5
20	3-A325-N	6	58.7
24	5-A325-N	6	96.9
44	5-A325-N	9	84.5
12	6-A325-N	7.5	104.1
45	6-A325-N	9	101.5

Ashakul พบว่าเมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคานเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวจะมีแนวโน้มที่ลดลง Ashakul สรุปว่าเมื่อตำแหน่งสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคานเพิ่มขึ้น จะมีแรงแนวราบเกิดขึ้นด้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียว ขนาดแรงในแนวราบแปรผันตามตำแหน่งสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคาน ทำให้สลักเกลียวคว้านเข้าไปในเนื้อแผ่นเหล็กได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนของสลักเกลียวมีค่าลดลง Ashakul [16] เสนอขั้นตอนในการออกแบบ Single Plate Shear Connection โดยพิจารณาและคำนึงถึงผลกระทบจากความหนา กำลังครากของแผ่นเหล็ก และตำแหน่งการวางตัวของกลุ่มสลักเกลียว ที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวดังนี้

$$t_p \leq \left(\frac{d_b}{2}\right)\left(\frac{36}{F_y}\right) \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.13)$$

เมื่อความหนาแผ่นเหล็กมีค่ามากกว่าสมการที่ 2.13 เพื่อทำให้เกิดความมั่นใจว่าจุดต่อรับแรงเฉือนจะมีความเหนียวที่เพียงพอ ดังนั้น Ashakul เสนอสมการความหนาของแผ่นเหล็กไม่ควรมีค่ามากกว่า

$$t_p \leq (0.7d_b)\left(\frac{36}{F_y}\right) \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.14)$$

ถ้าความหนาของแผ่นเหล็กมีค่าน้อยกว่าตามสมการที่ 2.13 การออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวไม่จำเป็นต้องพิจารณาโมเมนต์จากค่า Eccentricity และกำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวสามารถคำนวณได้จาก

$$V_n = 0.95F_v A_b n \quad (2.15)$$

และในการออกแบบรอยเชื่อมให้ใช้ค่า Eccentricity ดังนี้

$$e_w = a \quad (2.16)$$

$$\text{เมื่อ } \left(\frac{d_b}{2}\right)\left(\frac{36}{F_y}\right) \leq t_p \leq (0.7d_b)\left(\frac{36}{F_y}\right)$$

กำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนสลักเกลียวที่ใช้ในการออกแบบและตำแหน่งของสลักเกลียวเทียบกับแกนสะเทินของคาน (Neutral axis) และต้องมีการปรับลดค่ากำลังของการรับแรงเฉือนกลุ่มสลักเกลียวลงเนื่องจากผลกระทบดังกล่าว ซึ่งวิธีคำนวณหา กำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวได้จากสมการที่ 2.17 และ 2.18

สำหรับ $n \leq 5$

$$V_n = 0.84F_v A_b n \quad (2.17)$$

สำหรับ $5 \leq n \leq 7$

$$V_n = \sum r_n \quad (2.18)$$

ค่า r_n สามารถคำนวณได้จาก

ก. เมื่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคานมากกว่า 6 นิ้ว

$$r_n = 0.64F_v A_b n \quad (2.19)$$

ข. เมื่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคานไม่เกิน 6 นิ้ว

$$r_n = 0.70F_v A_b n \quad (2.20)$$

และในการออกแบบโมเมนต์ที่กระทำกับรอยเชื่อมให้ใช้ค่า Eccentricity ดังนี้

$$e_w = a + \frac{M_b}{V_n} \quad (2.21)$$

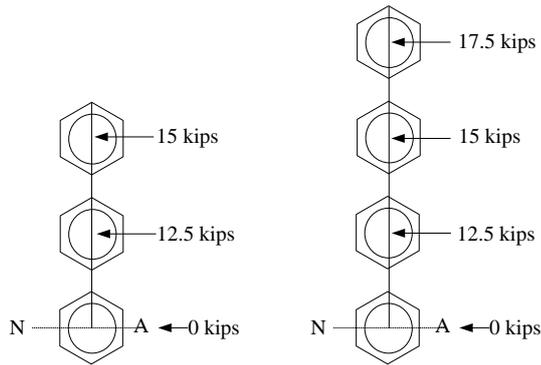
เมื่อ A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียว

F_v คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวต่อหนึ่งตัว

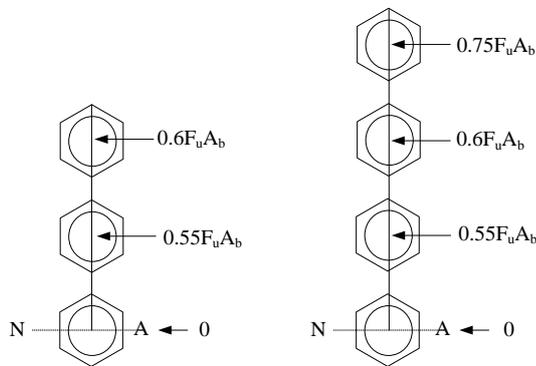
M_b คือ โมเมนต์ของกลุ่มสลักเกลียวที่คำนวณได้จากแรงในแนวราบดังรูปที่ 2.6

V_n คือ กำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียว

n คือ จำนวนสลักเกลียว



ก. ค่าเฉลี่ยแรงในแนวราบที่กระทำกับสลักเกลียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3/4 นิ้ว



ข. ขนาดแรงในแนวราบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว

รูปที่ 2.6 แรงในแนวราบของสลักเกลียวที่ตำแหน่งห่างจากแกนสะเทินคานเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว

ปีค.ศ. 2005 Creech [17] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อ Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบตัวอย่าง Full Scale จำนวน 10 ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการออกแบบตามวิธี LRFD ในคู่มือ AISC (2001) [20] และวิธีการออกแบบในประเทศสหราชอาณาจักร ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ และนำผลการทดสอบมาทำการตรวจสอบหาค่า Eccentricity และเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหย่อน [9] รวมทั้งเปรียบเทียบจุดต่อที่ใช้รูเจาะมาตรฐานกับ Shot Slot การทดสอบทั้งหมดใช้สลักเกลียวชนิด A325 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว จำนวนตั้งแต่ 3 ถึง 7 ตัว ใช้แผ่นเหล็ก A36 และคาน Gr50 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.10 การทดสอบทำโดยให้แรงกระทำโดยใช้ Actuator ลงบนคาน 2 ตำแหน่ง ในกรณีที่จุดต่อไม่เกิดการวิบัติ Creech จะติดตั้ง Hydraulic Ram ใกล้เคียงกับจุดต่อ เพื่อเพิ่มแรงเฉือนจนทำให้จุดต่อเกิดการวิบัติ และในจุดต่อที่เป็นจุดรองรับแบบยึดหย่อนจะมีแผ่นพื้น (simulated slab restraint) ยึดไว้ ผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.11 จากผลการทดสอบ Creech

พบว่าจุดต่อที่ใช้รูเจาะแบบ Shot Slot มีค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับที่ต่ำกว่ารูเจาะแบบมาตรฐานแต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่แตกต่างกัน และจุดต่อที่มีจุดรองรับแบบยึดหยุ่นและแบบยึดแน่น [9] มีค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจุดต่อที่มีลักษณะจุดรองรับแบบยึดหยุ่นจะถูกยึดรั้งด้วยแผ่นพื้น (simulated slab restraint) ทำให้ความสามารถในการรับแรงของจุดต่อเพิ่มขึ้น ประมาณร้อยละ 5

ตารางที่ 2.10 รายละเอียดการทดสอบของ Creech [17]

ตัวอย่างที่	สลักเกลียว	ชนิดรูเจาะ	ขนาดแผ่นเหล็ก (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	คาน	ประเภทจุดรองรับ
1	3-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×9	W16×50	ยึดแน่น
2	3-A325-N	มาตรฐาน	3/8×4-1/2 ×9	W16×50	ยึดแน่น
3	3-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×9	W16×50	ยึดหยุ่น
4	3-A325-N	มาตรฐาน	3/8×4-1/2 ×9	W16×50	ยึดหยุ่น
5	3-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×9	W16×50	ยึดหยุ่น*
6	2-A325-N	มาตรฐาน	3/8×4-1/2 ×6	W16×50	ยึดหยุ่น
7	2-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×6	W16×50	ยึดหยุ่น
8	2-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×6	W16×50	ยึดหยุ่น*
9	7-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×21	W27×84	ยึดแน่น
10	7-A325-N	Shot Slot	3/8×4-1/2 ×21	W27×84	ยึดหยุ่น*

หมายเหตุ

- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสลักเกลียว 3/4 in แผ่นเหล็กชนิด A36 คานชนิด A992
- *การพิจารณาจุดต่อรับแรงเฉือนจะทำร่วมกับผลจากการเหนี่ยวรั้งด้วยแผ่นพื้น

ตารางที่ 2.11 ผลการทดสอบของ Creech [17]

ตัวอย่างที่	รูปแบบการวิบัติ	ค่า e ของสลักเกลียว (นิ้ว)	กำลังรับแรงเหวี่ยง (kips)	ค่าการหมุนตัวของคาน (เรเดียน)
1	คานวิบัติก่อนจุดต่อ	1.6	78.8	0.036
2	สลักเกลียวขาด	2.1	90.7	0.027
3	คานวิบัติก่อนจุดต่อ	-1.7	71.8	0.039
4	สลักเกลียวขาด	-2.0	61.4	0.023
5	คานวิบัติก่อนจุดต่อ	0.1	75.6	0.031
6	สลักเกลียวขาด	-4.4	44.2	0.012
7	คานวิบัติก่อนจุดต่อ	-2.4	45.5	0.011
8	สลักเกลียวขาด	-2.2	47.9	0.013
9	คานวิบัติก่อนจุดต่อ	5.5	166.5	0.028
10	สลักเกลียวขาด	0.5	202.5	0.027

จากผลการทดสอบ Creech พบว่าการออกแบบจุดต่อโดยการคำนวณหาค่า Eccentricity ของสลักเกลียว ตามวิธีของ Astaneh [9] มีความปลอดภัย เนื่องจากจุดต่อสามารถรับแรงเหวี่ยงได้เกินกว่าแรงเหวี่ยงออกแบบ และพบว่าจุดต่อที่มีจำนวนสลักเกลียวมากกว่า 3 ตัว จะไม่นำค่า Eccentricity มาพิจารณาแต่จะลดค่ากำลังรับแรงของสลักเกลียว (Reduction Factor) ลงร้อยละ 20 ซึ่งตัวคูณลดค่านี้หมายถึงค่า Bolt Group Action Factor (BGAF) มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งรวมอยู่ในค่ากำลังรับแรงเหวี่ยงของสลักเกลียว (Nominal Strength) ในข้อจำกัดของคู่มือ AISC 2005 [20] แล้ว

ปีค.ศ. 2006 Metzger [18] ศึกษา Single Plate Shear Connection โดยการทดสอบแบบ Full Scale จำนวน 8 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นสองกลุ่มกลุ่มละ 4 ตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มที่ออกแบบตาม Conventional Configuration และ Extended Configuration เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบตามคู่มือการออกแบบ AISC (2005) [20] ซึ่งจำแนกเป็น 2 วิธีคือ Conventional Configuration และวิธี Extended Configuration การทดสอบทำโดยให้แรงกระทำลงบนคาน 3 ตำแหน่งจนกว่าคานจะวิบัติ ใช้คานและแผ่นเหล็กชนิด Gr.50 สลักเกลียวชนิด A325 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว รูเจาะแบบมาตรฐาน ซึ่งข้อมูลตัวอย่างแสดงอยู่ในตารางที่ 2.12 และผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.12 รายละเอียดตัวอย่างการทดสอบของ Metzger [18]

	หมายเลข การทดสอบ	สลักเกลียว		ระยะ a (นิ้ว)	ขนาดแผ่นเหล็ก (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	ขนาดคาน
		แถว แนวตั้ง	แถว แนวนอน			
Conventional Configuration	3B1C-3-3/8	1	3	3	3/8 x 4-1/2 x 8-1/2	W18x55
	4B1C-3-3/8	1	4	3	3/8 x 4-1/2 x 11-1/2	W24x76
	5B1C-3-3/8	1	5	3	3/8 x 4-1/2 x 14-1/2	W24x76
	7B1C-3-3/8	1	7	3	3/8 x 4-1/2 x 20-1/2	W30x108
Extended Configuration	6B2C -4.5 -1/2	2	3	4-1/2	1/2 x 7-1/2 x 8-1/2	W18x55
	10B2C -4.5 -1/2	2	5	4-1/2	1/2 x 7-1/2 x 14-1/2	W18x55
	7B1C-9 - 3/8	1	7	9	3/8 x 10-1/2 x 20-1/2	W18x55
	10B2C -10.5-1/2	2	5	10-1/2	1/2 x 13-1/2 x 14-1/2	W24X62

หมายเหตุ

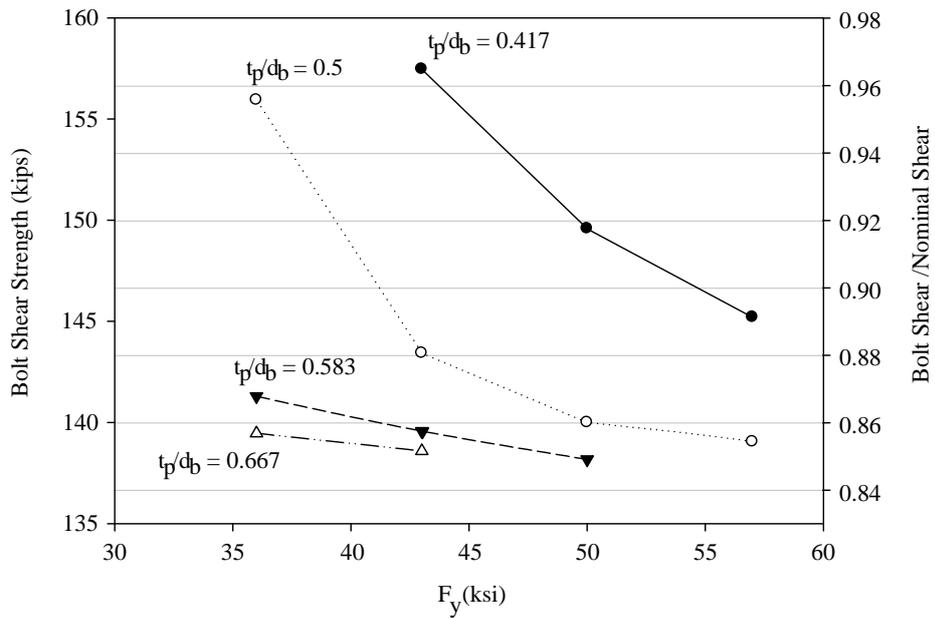
หมายเลขการทดสอบ 3B1C-3-3/8 หมายถึง มีสลักเกลียวจำนวนทั้งหมด 3 ตัววางเรียง 1 column ระยะ a เท่ากับ 3 นิ้ว และ
ความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 3/8 นิ้ว

ตารางที่ 2.13 ผลการทดสอบของ Metzger [18]

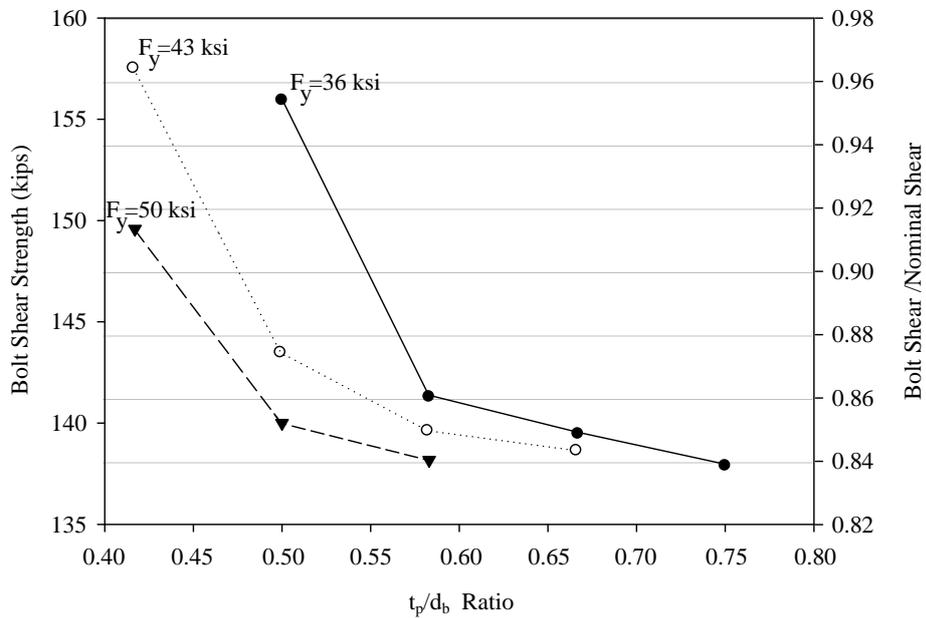
	หมายเลข การทดสอบ	จำนวน สลัก เกลียว	กำลังรับ แรงเฉือน (kips)	ค่าการ หมุนตัว (เรเดียน)	รูปแบบการวิบัติ
Conventional Configuration	3B1C-3-3/8	3	81	0.032	คานวิบัติก่อนจุดต่อ
	4B1C-3-3/8	4	110	0.027	คานวิบัติก่อนจุดต่อ
	5B1C-3-3/8	5	146	0.030	สลักเกลียวขาด
	7B1C-3-3/8	7	173	0.018	สลักเกลียวขาด
Extended Configuration	6B2C -4.5 -1/2	6	89.7	0.030	คานวิบัติก่อนจุดต่อ
	10B2C -4.5 -1/2	10	200	0.026	รอยเชื่อมฉีกขาด
	7B1C-9 - 3/8	7	97	0.034	คานวิบัติก่อนจุดต่อ
	10B2C -10.5-1/2	10	97	0.035	คานวิบัติก่อนจุดต่อ

จากผลทดสอบ Metzger พบว่าค่ากำลังรับแรงประลัย (Ultimate Strength) ของ Single Plate Shear Connection ทั้งสองกลุ่มมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการออกแบบ โดยในบางตัวอย่างทดสอบสามารถเกิดการวิบัติก่อนจุดต่อ Metzger [18] เสนอการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวไม่ควรพิจารณาค่า Bolts Group Action Factor (0.8) แต่ต้องพิจารณาค่า Eccentricity จากระยะยื่น (a-distance) ในการออกแบบ เพื่อให้ค่ากำลังรับแรงอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและไม่สิ้นเปลือง เมื่อพิจารณาถึงความเหนียวของจุดต่อที่ทำให้คานที่จุดรองรับเกิดการหมุนตัว (Rotational Ductility) Metzger พบว่าที่บริเวณรูเจาะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elongation) เมื่อใช้แผ่นเหล็กที่มีค่ากำลังครากมากกว่า 60 ksi (แผ่นเหล็กชนิด Gr.50) และการวิบัติเนื่องจากการเฉือนครากของแผ่นเหล็ก (Plate Yielding) เกิดขึ้นเพียง 2 ตัวอย่างการทดสอบ ดังนั้น Metzger จึงเสนอว่าควรทดสอบหาอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียวต่อความหนาของแผ่นเหล็ก เพื่อหาความหนาสูงสุดสำหรับแผ่นเหล็กชนิด Gr50 ที่สามารถยอมให้เกิดความเหนียวในจุดต่อได้อย่างพอเพียง

ในปีค.ศ. 2010 Khampa [19] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของ Single Plate Shear Connection โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS) วิเคราะห์ผลที่ค่ากำลังครากและความหนาของแผ่นเหล็กมีต่อกำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียว โดยกำลังครากของแผ่นเหล็กที่ใช้อยู่ระหว่าง 35 ถึง 60 ksi อัตราส่วนความหนาแผ่นเหล็กต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.75 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียวที่ใช้คือ 3/4 และ 7/8 นิ้ว จากผลการวิเคราะห์ Kriangkrai Khampa สรุปว่าเมื่อกำลังครากและความหนาของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวจะลดลง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและกำลังครากของแผ่นเหล็ก เป็นดังรูปที่ 2.6 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และ อัตราส่วนความหนาแผ่นเหล็กต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว (t_p/d_b) เป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อกับกำลังครากของแผ่นเหล็ก เมื่อใช้สลักเกลียว A325N เส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อกับอัตราส่วน t_p/d_b ที่มีค่ากำลังครากของแผ่นเหล็กเปลี่ยนไป เมื่อใช้สลักเกลียว A325-N เส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว

2.2 การออกแบบ Single Plate Shear Connection

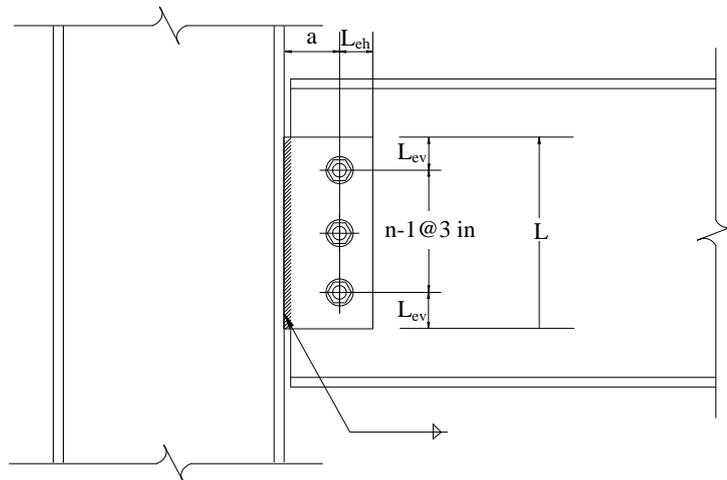
การออกแบบ Single Plate Shear Connection ตามคู่มือการออกแบบของ AISC (2005) [21] มี 2 วิธีคือ Conventional Configuration และ Extended Configuration ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.2

2.2.1 การออกแบบ Single Plate Shear Connection ตามเงื่อนไข Conventional

Configuration ของคู่มือการออกแบบ AISC (2005)

เงื่อนไข Conventional Configuration AISC (2005) [21] มีข้อกำหนดในเรื่องขนาดและสัดส่วนดังรูปที่ 2.9 ดังนี้คือ

1. สลักเกลียวต้องมีเพียง 1 แถว และจำนวนสลักเกลียวต้องอยู่ระหว่าง 2 ถึง 12 ตัว
2. ระยะยื่น (a-distance) ซึ่งวัดจากแนวกึ่งกลางของรอยเชื่อมถึงแนวกึ่งกลางของสลักเกลียว ต้องมีค่าไม่เกิน 3.5 นิ้ว
3. รูเจาะเป็นไปได้อย่างทั้งแบบมาตรฐานและรูเจาะแบบ Shot Slot
4. ระยะขอบในแนวราบของแผ่นเหล็กและเอวของคาน (Horizontal edge distance, L_{ch}) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวและไม่เกินกว่า 12 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็กโดยระยะขอบวัดจากกึ่งกลางของรูเจาะถึงขอบของแผ่นเหล็กหรือเอวของคาน



รูปที่ 2.9 ลักษณะ Single Plate Shear Connection

5. ระยะขอบในแนวตั้ง (Vertical edge distance, L_{ev}) ให้ใช้ระยะขอบอย่างต่ำตามตารางที่ 2.14

6. ความหนาของแผ่นเหล็กหรือเอวคานอย่างใดอย่างหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบควรมีค่า

$$t \leq \frac{d_b}{2} + \frac{1}{16} \quad (\text{นิ้ว})$$

7. ขนาดของรอยเชื่อมที่ใช้ควรมีขนาด $5/8$ เท่าของความหนาของแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 2.14 ระยะขอบขั้นต่ำสำหรับแผ่นเหล็กและเอวของคาน

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ของสลักเกลียว (นิ้ว)	ขอบที่ตัดโดยการเชื่อมขาด (นิ้ว)	ขอบของเหล็กรูปหรือ ขอบที่ตัดด้วยก๊าซ (นิ้ว)
5/8	1-1/8	7/8
3/4	1-3/8	1-1/16
7/8	1-1/2	1-1/8
1	1-5/8	1-1/4
1-1/8	1-7/8	1-3/8
1-1/4	2	1-1/2
1-3/4	2-1/2	1-3/4
มากกว่า 1-3/4	1.75d	1.25d

หมายเหตุ

- d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียว

การออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อต้องออกแบบโดยการตรวจสอบสภาวะจำกัดต่างๆ คือ การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่สลักเกลียว (Bolt Shear Rupture) การวิบัติเนื่องจากการเฉือนออกของแผ่นเหล็ก (Block Shear Rupture) การวิบัติเนื่องจากการกดทับของสลักเกลียวที่กระทำต่อรูเจาะ (Bolt Bearing) การวิบัติเนื่องจากการเฉือนขาดของแผ่นเหล็ก (Tear-out Failure) และการวิบัติเนื่องจากการฉีกขาดของรอยเชื่อม (Weld Rupture) การออกแบบกรณีเมื่อใช้รูเจาะแบบมาตรฐานเมื่อจำนวนสลักเกลียวน้อยกว่า 9 ตัว จะไม่คิดผลกระทบเนื่องจากจากระยะ Eccentricity และเมื่อจำนวนสลักเกลียวมีจำนวน 10 ถึง 12 ตัว ให้ใช้ค่า $e = n-4$ และตัวคูณ 1.25 ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ระยะเยื้อง C (Eccentricity coefficient C) สำหรับรูเจาะแบบ Shot Slot จะไม่คำนึงถึงผลกระทบจากระยะ Eccentricity ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อ

2.2.2 การออกแบบ Single Plate Shear Connection ตามเงื่อนไข Extended

Configuration ของคู่มือการออกแบบ AISC (2005)

ข้อจำกัดของขนาดและสัดส่วนตามเงื่อนไขที่ไม่เป็นไปตาม Conventional Configuration จะเป็นเงื่อนไข Extended Configuration AISC (2005) [21] ซึ่งมีข้อกำหนดเพิ่มเติมดังนี้

1. การออกแบบจะคิดผลกระทบจากการเยื้องศูนย์โดยให้ใช้ค่าการเยื้องศูนย์ $e = a$ เมื่อ a คือระยะห่างจากแนวรอยเชื่อมถึงแนวกึ่งกลางของสลักเกลียว
2. ความหนาสูงสุดของแผ่นเหล็กหาได้จากกำลังรับโมเมนต์ของแผ่นเหล็กที่เกิดจากแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียวดังนี้

$$t_{\max} = \frac{6M_{\max}}{F_y d^2} \quad (2.22)$$

เมื่อ $M_{\max} = 1.25F_v A_b C'$

F_v คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของกลุ่มสลักเกลียว

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียว

F_y คือ กำลังครากของแผ่นเหล็ก

d คือ ความลึกของแผ่นเหล็ก

C' คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเยื้องศูนย์ของกลุ่มสลักเกลียว หาได้จาก

$$c' = \sum \left[l_i \left(1 - e^{-\left(\frac{10l_i \Delta_{\max}}{l_{\max}} \right)^{0.55}} \right) \right]$$

เมื่อ

l_i คือระยะจากสลักเกลียวตัวที่ i ถึงศูนย์กลางของกลุ่มสลักเกลียว

Δ_{\max} คือการเสยรูปสูงสุดของสลักเกลียวตัวไกลสุดจากศูนย์กลางของกลุ่มสลักเกลียว เท่ากับ 0.34 นิ้ว

l_{\max} คือระยะห่างของสลักเกลียวตัวไกลสุดจากศูนย์กลางของกลุ่มสลักเกลียว

การออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อต้องออกแบบโดยการตรวจสอบสถานะจำกัดต่างๆคือ การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่สลักเกลียว (Bolt Shear Rupture) การวิบัติเนื่องจากการเฉือนออกของแผ่นเหล็ก (Block Shear) การวิบัติเนื่องจากการเฉือนขาดของแผ่นเหล็ก (Plate Shear Rupture) และการวิบัติเนื่องจากการครากของแผ่นเหล็ก (Plate Shear Yielding)