

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ Single Plate Shear Connection

#### ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทนี้มีเนื้อหาประกอบไปด้วยผลการวิเคราะห์ Single Plate Shear Connection ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 ส่วนหลักคือ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง อภิปรายอยู่ในหัวข้อที่ 4.1 ผลการตรวจสอบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของจุดต่อ Single Plate Shear Connection อภิปรายอยู่ในหัวข้อที่ 4.2 และผลที่ตำแหน่งสลักเกลียว มีต่อแรงกระทำต่อสลักเกลียว และความเหนียวของจุดต่อ Single Plate Shear Connection อภิปรายอยู่ในหัวข้อที่ 4.3

#### 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Single Plate Shear Connection กับผลการทดสอบจริงที่ทดสอบโดย Astaneh [9] Sarkar [12] และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Ashakul [15] มีรายละเอียดอยู่ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 และผลสรุปของแต่ละแบบจำลองอธิบายอยู่ในหัวข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.3 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.1** รายละเอียดของการทดสอบจริงและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง

หมายเลข แบบ จำลอง	สลัก เกลียว	แผ่นเหล็ก		คาน			ผู้วิจัย
		ชนิด	ขนาด (หนา×กว้าง×ยาว) (นิ้ว×นิ้ว×นิ้ว)	ชนิด	ขนาด	ยาว (ฟุต)	
Astaneh-1	7-A325N	A36	3/8×4-1/4×21	A36	W24×84	16	Astaneh
Sarkar-2	4-A325N	A36	3/8×5×12	A36	W18×76	33	Sarkar
Ashakul-3	3-A325N	Gr.50	3/8×4-1/2×9	Gr.50	W18×55	28	Ashakul

หมายเหตุ

-Astaneh [9] ไม่ได้ระบุกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว

**ตารางที่ 4.2** คุณสมบัติวัสดุของตัวอย่างการทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง

หมายเลข แบบ จำลอง	สลักเกลียว A325	แผ่นเหล็ก	คาน
	หน่วยแรงเฉือน (ksi)	กำลังคราก (ksi)	กำลังคราก (ksi)
Astaneh-1	-	35.5	42.0
Sarkar-2	57.6	47.4	47.4
Ashakul-3	52.8	50	50

หมายเหตุ

- Astaneh [9] ไม่ได้ระบุกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว

**ตารางที่ 4.3** กำลังรับแรงเฉือนระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการวิเคราะห์

แบบ จำลอง	สลักเกลียว ที่ใช้ใน แบบจำลอง	สลักเกลียวที่ ใช้ทดสอบ จริง	ผลการ ทดสอบ (kips)	ผลการ วิเคราะห์ (kips)	อัตราส่วนผล การวิเคราะห์/ ผลทดสอบ	ผู้วิจัย
Astaneh-1	7-A325N	7-A325N	160	155.45	0.97	Astaneh
Sarkar-2	4-A325N	4-A325N	81.6	79.20	0.97	Sarkar
Ashakul-3	3-A325N	-	59.5	59.12	0.99	Ashakul

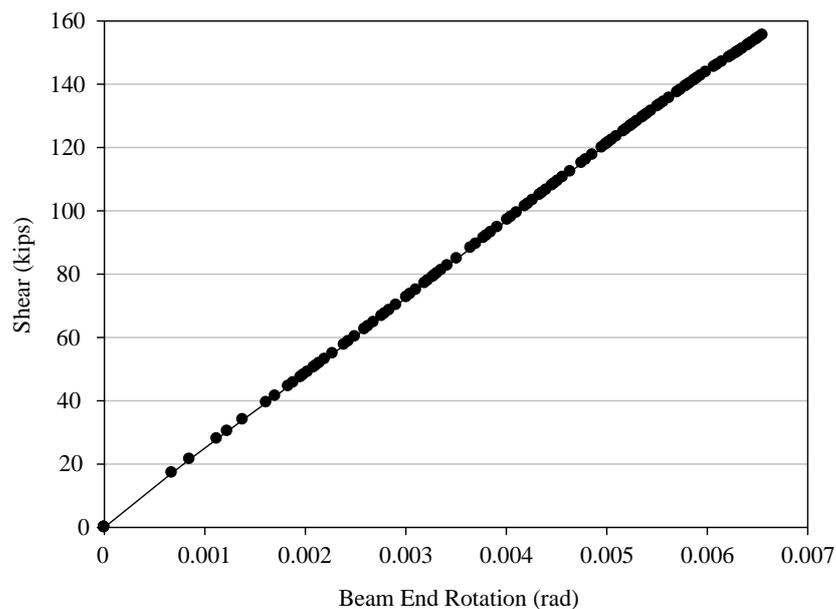
หมายเหตุ

- Astaneh [9] ไม่ได้ระบุกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว
- Ashakul [15] ใช้โปรแกรมสร้างวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นแบบจำลองที่ 43
- กำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์มาจากผลรวมของแรงแนวตั้งที่กระทำกับสลักเกลียวแต่ละตัว

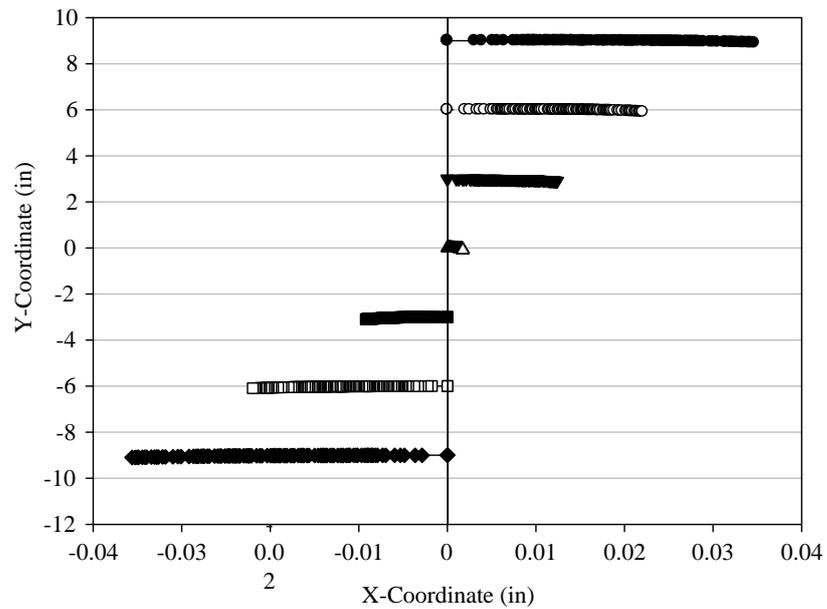
ตารางที่ 4.4 ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการวิเคราะห์

หมายเลข แบบจำลอง	ผลการทดสอบ (rad)	ผลการวิเคราะห์ (rad)
Astaneh-1	0.026	0.0066
Sarkar-2	0.038	0.0291
Ashakul-3	-	0.0210

**4.1.1 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Astaneh -1 กับผลการทดสอบจริงของ Astaneh**  
 การสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองการทดสอบของ Astaneh [8] [9] จำเป็นต้องสมมติค่าหน่วยแรงดึง  
 ประลัยของสลักเกลียวที่ใช้วิเคราะห์ เนื่องจาก Astaneh ไม่ได้แสดงค่าหน่วยแรงดึงประลัยของสลัก  
 เกลียวที่ใช้ในการทดสอบ การวิเคราะห์แบบจำลอง Astaneh-1 โดยใช้สลักเกลียวชนิด A325N ซึ่งมีค่า  
 หน่วยแรงดึงประลัยเท่ากับ 88 ksi พบว่า อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากผลการวิเคราะห์เทียบ  
 กับผลการทดสอบจริงมีค่า 0.97 ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนที่ได้น้อยกว่าการทดสอบจริงร้อยละ 3  
 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 และ  
 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวแต่ละตัวในแบบจำลอง Astaneh-1 มีลักษณะดังรูปที่ 4.2



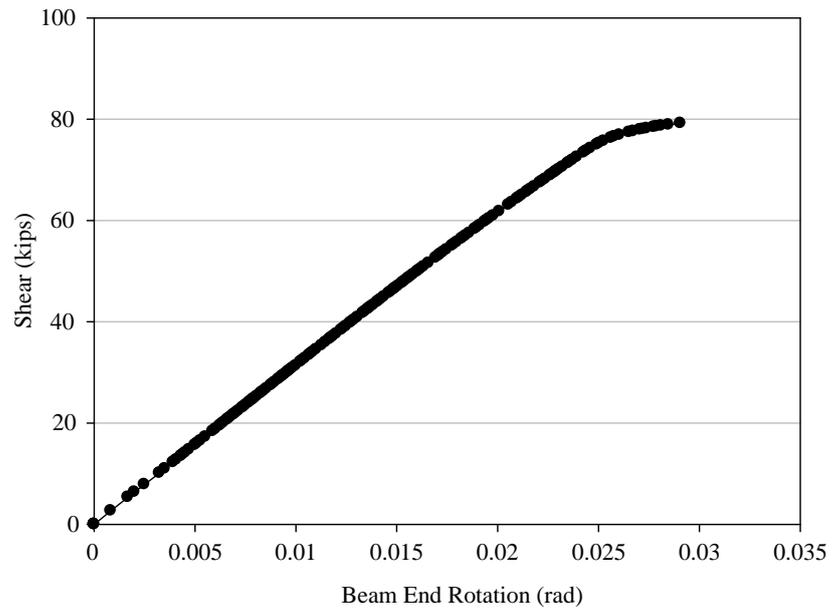
รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงเฉือนกับการหมุนตัวของคานในแบบจำลอง Astaneh-1



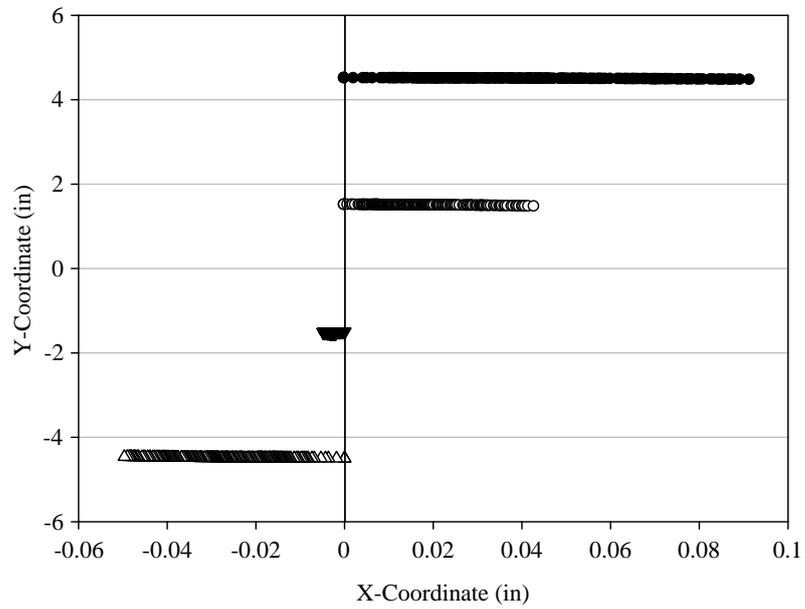
รูปที่ 4.2 การเคลื่อนตัวของสลักเกลียวแต่ละตัวในแบบจำลอง Aстанеh-1

#### 4.1.2 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Sarkar-2 กับผลการทดสอบจริงของ Sarkar

การสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองการทดสอบจริงของ Sarkar [12] พบว่าอัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบจริงมีค่า 0.97 หมายความว่ากำลังรับแรงเฉือนของแบบจำลอง Sarkar-2 มีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบจริงร้อยละ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าหมุนตัวของคานที่จุดรองรับแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวของแบบจำลอง Sarkar-2 มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียวแสดงอยู่ในตารางที่ 4.5



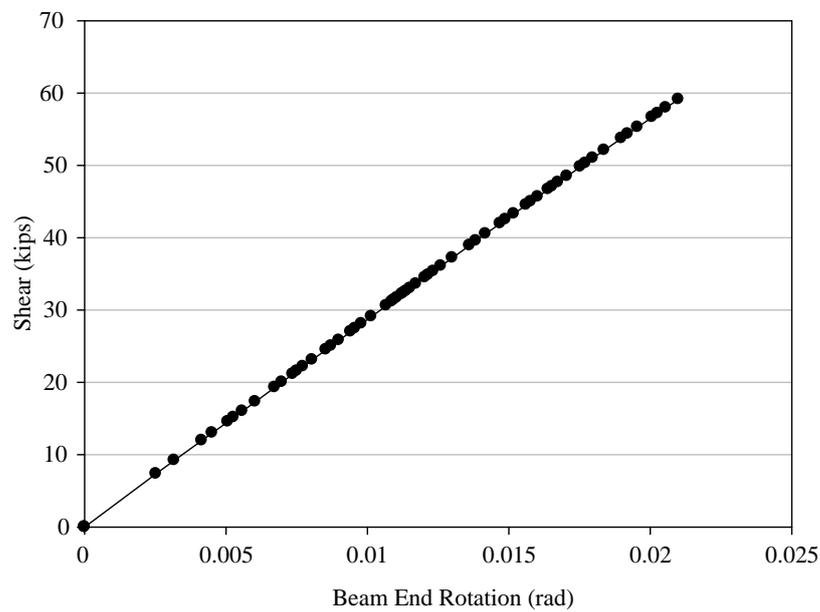
รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงเฉือนกับการหมุนตัวของคานในแบบจำลอง Sarkar-2



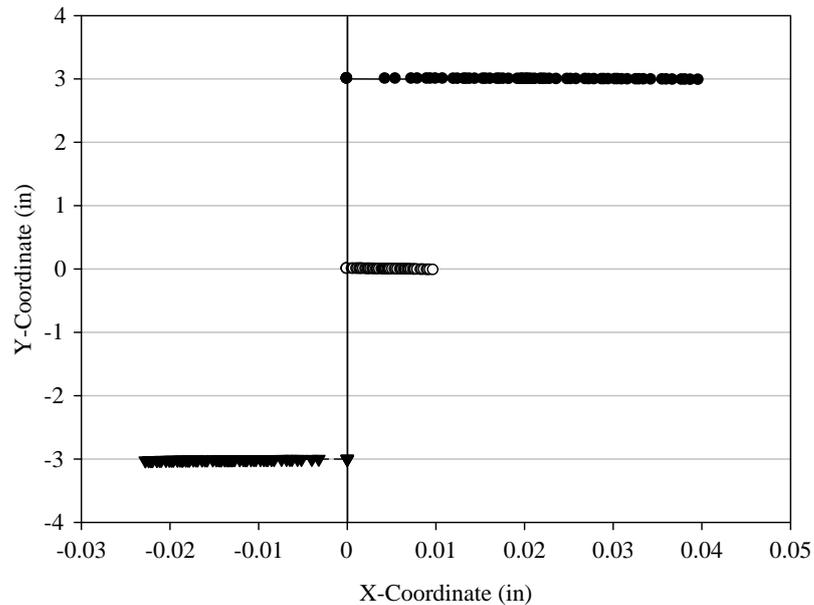
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนตัวของสลักเกลียวแต่ละตัวในแบบจำลอง Sarkar-2

### 4.1.3 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Ashakul-3 กับแบบจำลองของ Ashakul

การสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Single Plate Shear Connection ของ Ashakul [15] พบว่า อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนของแบบจำลองเทียบกับผลการวิเคราะห์ของ Ashakul [15] มีค่าเกือบเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ อยู่ในรูปที่ 4.5 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวของแบบจำลอง Ashakul-3 อยู่ในรูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงดัดที่กระทำต่อสลักเกลียว อยู่ในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงเฉือนกับการหมุนตัวของคานของแบบจำลอง Ashakul-3



รูปที่ 4.6 การเคลื่อนที่ของสลักเกลียวแต่ละตัวของแบบจำลอง Ashakul-3

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพธ์ที่กระทำต่อ

##### สลักเกลียวของแบบจำลองที่ใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบในอดีต

แรงที่กระทำกับสลักเกลียวมีอยู่สองทิศทางคือ แรงแนวราบ แรงนี้เกิดขึ้นจากรูเจาะด้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวในแนวราบ และแรงแนวตั้ง เกิดขึ้นจากรูเจาะด้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวในแนวตั้ง ผลรวมเวกเตอร์ของแรงแนวราบและแรงแนวตั้งเป็นแรงลัพธ์ที่กระทำกับสลักเกลียว เมื่อแรงลัพธ์มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว สลักเกลียวจะเกิดการวิบัติ ผลรวมของแรงในแนวตั้งที่กระทำกับสลักเกลียวจะเป็นกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อ เนื่องจากแรงที่กระทำกับสลักเกลียวมีทั้งค่าบวกและค่าลบ [19] ดังนั้น การใช้เครื่องหมายบ่งบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของสลักเกลียว เมื่อแรงมีค่าบวกหมายถึงแรงจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวตามหัวลูกศรและแรงมีค่าลบจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับหัวลูกศร ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพธ์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลอง Astanceh-1 ที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัว แบบจำลอง Sarkar-2 ที่มีสลักเกลียวจำนวน 4 ตัว และแบบจำลอง Ashakul-3 อยู่ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แรงเฉือนในแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวนอน และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียว  
ของแบบจำลองที่ใช้เปรียบเทียบผลกับการทดสอบ

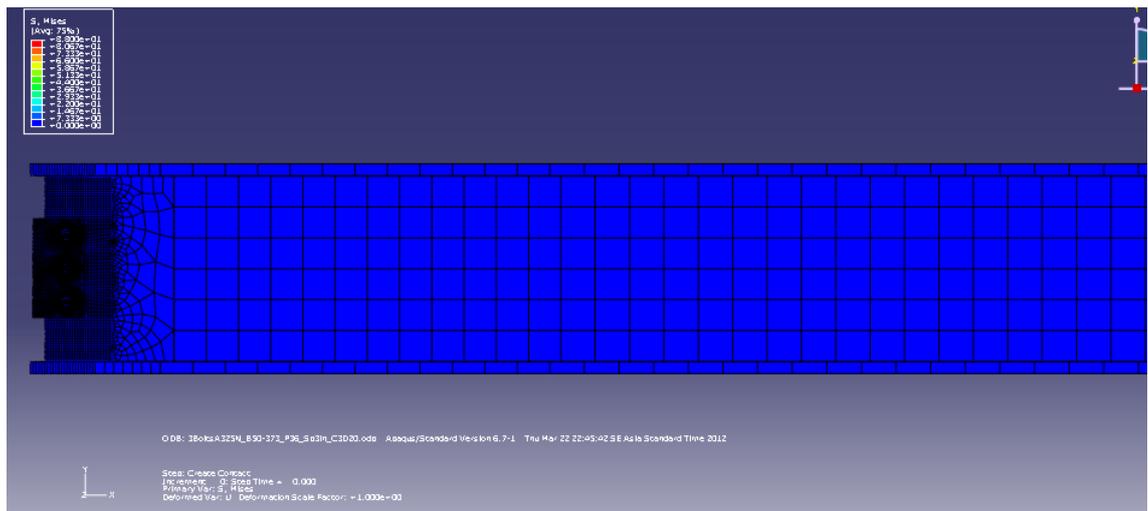
สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวตั้ง (kips)		
	Astaneh-1	Sarkar-2	Ashakul-3
1	22.50		
2	22.81	17.34	
3	22.71	20.45	19.27
4	22.44		19.43
5	22.01	21.52	20.42
6	21.65	19.89	
7	21.34		
<b>รวม</b>	<b>155.45</b>	<b>79.20</b>	<b>59.12</b>
สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวนอน (kips)		
1	6.27		
2	4.54	18.13	
3	2.06	13.55	13.31
4	0.79		2.28
5	-3.42	-1.88	-8.29
6	-5.73	-15.37	
7	-6.64		
สลักเกลียวตัวที่	แรงลัพท์ (kips)		
<b>Nominal</b>	<b>23.33</b>	<b>25.44</b>	<b>23.33</b>
1	23.35		
2	23.26	25.09	
3	22.80	24.53	23.42
4	22.45		19.56
5	22.27	21.60	22.04
6	22.40	25.14	
7	22.35		

หมายเหตุ

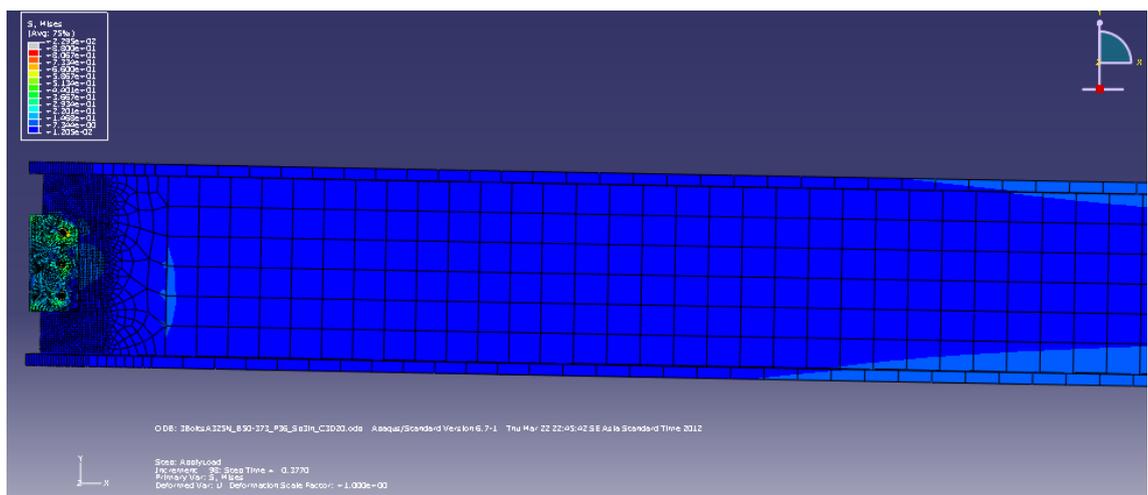
- Nominal คือกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว 1 ตัวเท่ากับ  $0.6F_u A_b$
- เครื่องหมายลบแสดงการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวมีทิศทางตรงกันข้าม

#### 4.1.5 ประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ผล

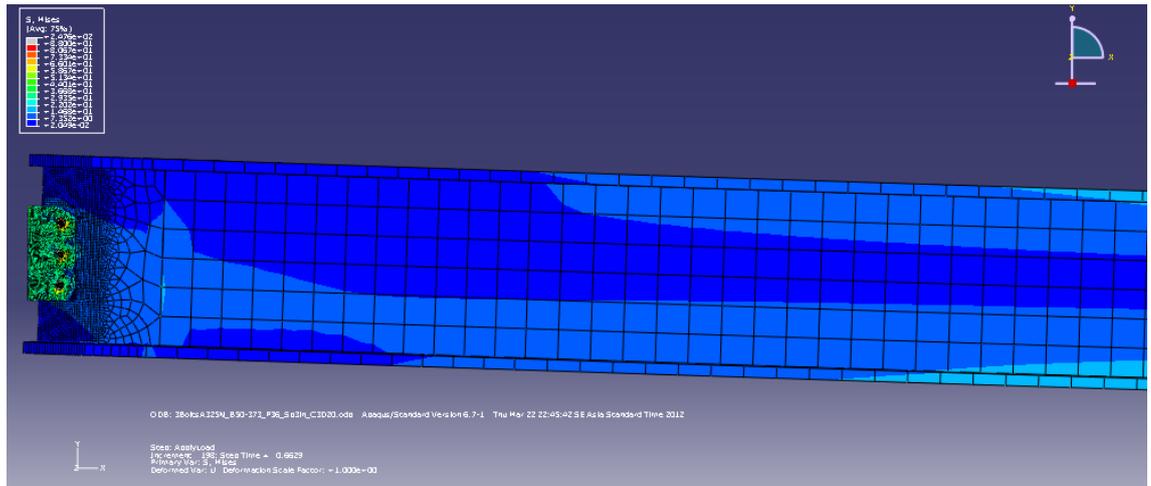
การเปรียบเทียบแบบจำลอง Single Plate Shear Connection กับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงถึงร้อยละ 95 ซึ่งลักษณะแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ผล ที่จุดรองรับเกิดการหมุนตัวเกิดขึ้น เป็นดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.10



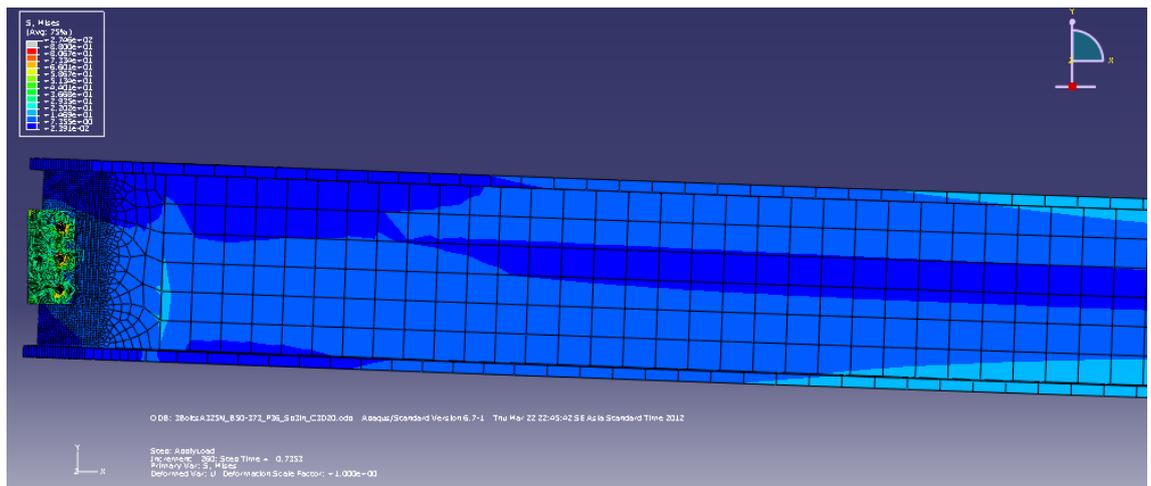
รูปที่ 4.7 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ผล เมื่อกานที่จุดรองรับยังไม่เกิดการหมุนตัว



รูปที่ 4.8 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ผล เมื่อกานที่จุดรองรับเกิดการหมุนตัวร้อยละ 35



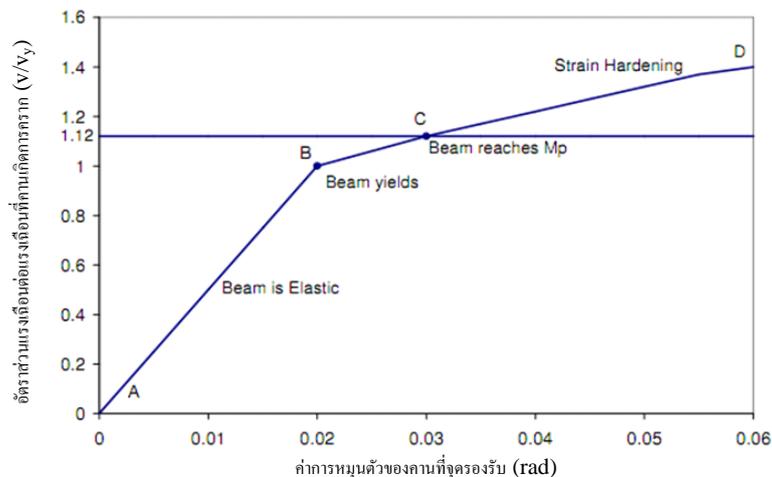
รูปที่ 4.9 ลักษณะแบบจำลองที่วิเคราะห์ผล เมื่อคานที่จุดรองรับเกิดการหมุนตัวร้อยละ 70



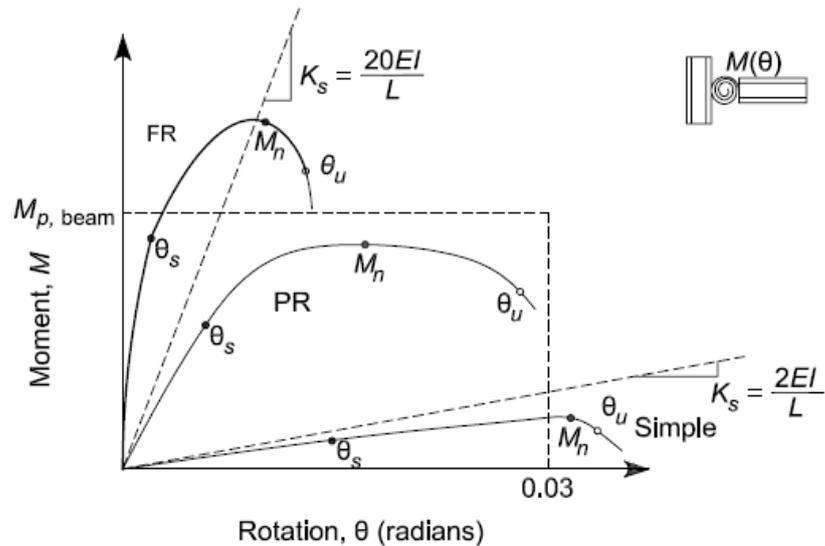
รูปที่ 4.10 ลักษณะแบบจำลองที่วิเคราะห์ผล เมื่อคานที่จุดรองรับเกิดการหมุนตัวสูงสุด ในขณะที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก

## 4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของจุดต่อ Single Plate Shear Connection

การตรวจสอบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ ทำโดยสร้างแบบจำลองจุดต่อเปรียบเทียบกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับและความยาวต่อความลึกคานกับกราฟของ Astanteh [8] ที่ใช้คอมพิวเตอร์สร้าง (รูปที่ 4.11) ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคาน ( $L/d$ ) เท่ากับ 25 รวมทั้งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับ Commentary ในคู่มือการออกแบบ AISC 2005 [21] ที่แนะนำว่า ขณะคานที่จุดรองรับสามารถรับโมเมนต์ค้ดระบุม ( $M_n$ ) จุดต่อรับแรงเฉือนประเภท Simple Shear Connection ควรมีค่าการหมุนตัวไม่น้อยกว่า 0.03 เรเดียน หากไม่สามารถคำนวณค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับได้ ซึ่งเมื่อจุดต่อมีการค้ำยันอย่างเพียงพอ หน้าตัดคานที่จุดรองรับจะสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_n = M_p$ ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าการหมุนตัวของจุดต่อรับแรงเฉือนแบ่งเป็น 3 ประเภทเป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของ Astanteh [1]

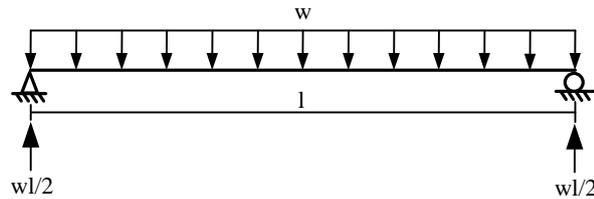


**รูปที่ 4.12** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าการหมุนตัวของจุดต่อรับแรงเฉือน 3 ประเภท คือ Fully Restrained (FR) Partially Restrained (PR) และ Simple Shear Connections ใน Commentary ของคู่มือการออกแบบ AISC 2005 [21]

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้สร้างแบบจำลองจุดต่อที่รับแรงกระทำแบบจุดเพื่อเปรียบเทียบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ กับผลการทดสอบของ Astanteh [9] ซึ่งทดสอบโดยใช้คานยื่นซึ่งให้แรงกระทำโดย Actuator สองตำแหน่งคือ บริเวณใกล้กับจุดต่อรับแรงเฉือนควบคุมปริมาณแรงกระทำ และปลายคานอีกด้านหนึ่งควบคุมการหมุนตัวของคาน และเปรียบเทียบการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับกับผลการทดสอบของ Metzger [18] ที่ทดสอบโดยให้แรงกระทำลงบนคาน 3 ตำแหน่ง

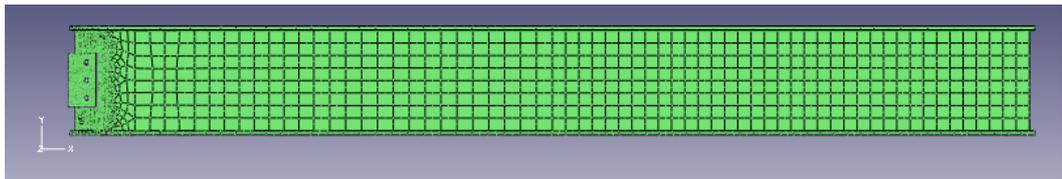
การออกแบบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Single Plate Shear Connection จะเลือกใช้ความยาวคานที่ทำให้การหมุนตัวของคานที่จุดรองรับหมุนตัวไปได้มากที่สุด โดยออกแบบให้จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนสูงสุด ขณะที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) แรงกระทำกับคานมี 2 ชนิดคือ แบบแรงกระจาย (Uniform Load) ซึ่งมีแผนภาพ Free Body Diagram ดังรูปที่ 4.13 สมการที่ใช้ในการออกแบบคือ  $wl^2/8 = M_p Z_x$  ลักษณะคานที่ใช้สร้างแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.14 และแรงกระทำแบบจุด (Point Load) ซึ่งมีแผนภาพ Free Body Diagram ดังรูปที่ 4.15 สมการที่ใช้ในการออกแบบคือ  $Pl/4 = M_p Z_x$

ตัวอย่างการออกแบบความยาวคานของแบบจำลองที่รับแรงกระจาย และแรงแบบจุดเป็นแรงกระทำอย่างละหนึ่งตัวอย่าง ส่วนการออกแบบความยาวคานของแบบจำลองที่เหลืออยู่ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.13 แผนภาพ Free Body Diagram สำหรับคานที่รับแรงกระทำแบบแรงกระจาย

ตัวอย่าง 1 การออกแบบความยาวคานของแบบจำลอง 3BA/3-W18X55-L320 ซึ่งคานรับแรงกระทำแบบแรงกระจาย



รูปที่ 4.14 ลักษณะคานที่มีความลึกเพียงพอสำหรับการจัดวางสลักเกลียว 3 ตัว สำหรับสร้างแบบจำลอง 3BA/3-W18X55-L320

เลือกขนาดคาน W18×55

ออกแบบให้หน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ )

$$\text{สมการ } \frac{wl^2}{8} = M_p \left( \frac{wl}{2} \right) \left( \frac{l}{4} \right) = v \left( \frac{l}{4} \right) = Z_x F_y$$

เมื่อ

$wl/2$  คือค่าแรงเฉือนที่จุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัวมีค่า 69.99 kips

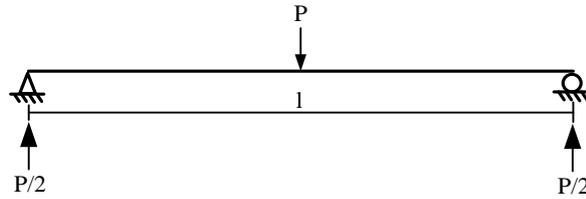
$Z_x$  คือค่าโมดูลัสพลาสติกหน้าตัดคาน (Plastic Section Modulus) W18×55 มีค่า 112 นิ้ว<sup>3</sup>

$F_y$  คือกำลังครากของคาน Gr50 มีค่า 50 ksi

$$\text{แทนค่าสมการ } 69.9 \times (l/4) = 112 \times 50$$

$$l = 320 \text{ นิ้ว}$$

จากการออกแบบจะได้ความยาวคานเท่ากับ 320 นิ้ว ( $L/d = 18$ )



รูปที่ 4.15 Free Body Diagram สำหรับการออกแบบคานเมื่อรับแรงกระทำแบบจุด

ตัวอย่าง 2 การออกแบบความยาวคานของแบบจำลอง 3BA/3<sup>p</sup>-W18X55-L160 ซึ่งคานรับแรงกระทำแบบจุด

เลือกคานขนาด W18×55

ออกแบบให้หน้าตัดคานสามารถรับเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ )

$$\text{ใช้สมการ } \frac{Pl}{4} = M_p \quad \left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) = v\left(\frac{l}{2}\right) = Z_x F_y$$

เมื่อ

$P/2$  คือค่าแรงเฉือนที่จุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัวมีค่า 69.99 ksi

$Z_x$  คือค่าโมดูลัสพลาสติกของหน้าตัดคาน W18×55 มีค่า 112 นิ้ว<sup>3</sup>

$F_y$  คือกำลังครากของคาน Gr50 มีค่า 50 ksi

$$\text{แทนค่าสมการ } 69.9 \times (l/2) = 112 \times 50$$

$$l = 160 \text{ นิ้ว}$$

จากการออกแบบจะได้ความยาวคานเท่ากับ 160 นิ้ว ( $L/d=9$ )

หมายเลขแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Single Plate Shear Connection ที่ใช้ตรวจสอบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6 พร้อมผลการวิเคราะห์แสดงอยู่ในตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.6** หมายเลขแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผลเพื่อตรวจสอบค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว

หมายเลขแบบจำลอง	คาน	ยาว (นิ้ว)	L/D	สลักเกลียว จำนวน (ตัว)	กำลังสลัก เกลียว (ksi)
3BA/3-W18X55-L320	W18×55	320	18	3	88
3BA/3-W18X55-L454	W18×55	454	25	3	88
3BA/3-W18X119-L746	W18×119	746	39	3	88
3BA/3*-W18X55-L320	W18×55	320	18	3	96
3BA/3*-W18X119-L648	W18×119	648	34	3	96
3BA/3 <sup>p</sup> -W18×55-L160	W18×55	160	9	3	88
3BA/3 <sup>p</sup> *-W18×55-L160	W18×55	160	9	3	96
5FBA/6-W18×35-L114	W18×35	114	6	5	88
5FBA/6-W18×55-L192	W18×55	192	11	5	88
5FBA/6-W33×118-L712	W33×118	712	22	5	88
5FBA/6*-W18×55-L192	W18×55	192	11	5	96
5FBA/6*-W18×55-L176	W18×55	176	10	5	96
7FBA/9-W24×62-L189	W24×62	189	8	7	88
7FBA/9-W44×230-L1048	W44×230	1048	24	7	88
7FBA/9*-W24×62-L189	W24×62	189	8	7	96
9FBA/12-W30×90-L270	W30×90	270	9	9	88
9FBA/12*-W30×90-L270	W30×90	270	9	9	96

หมายเหตุ

L/D คืออัตราส่วนความยาวต่อความลึกคาน

p คือ แบบจำลองที่มีแรงแบบจุด (Point Load) เป็นแรงกระทำ

\* คือ แบบจำลองที่ใช้กำลังวิกฤติ ( $F_u$ ) ของสลักเกลียวเท่ากับ 96 ksi

ตารางที่ 4.7 ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับและกำลังรับแรงเฉือน  
ของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว

หมายเลขแบบจำลอง	ยาว (นิ้ว)	L/D	สลักเกลียววิบัติที่ $0.6F_u A_b$ (kips)	ค่าการหมุนตัวของ คานที่จุดรองรับ (rad)	กำลังรับแรง เฉือน (kips)
3BA/3-W18×55-L320	320	18	Bolt Fail	0.0213	65.33
3BA/3-W18×55-L454	454	25	Bolt not Fail	0.0277	43.27
3BA/3-W18×119-L746	746	39	Bolt Fail	0.0388	51.01
3BA/3*-W18×55-L320	320	18	Bolt Fail	0.0279	67.19
3BA/3*-W18×119-L648	648	34	Bolt not Fail	0.0215	34.18
3BA/3 <sup>p</sup> -W18×55-L160	160	9	Bolt Fail	0.0084	68.94
3BA/3 <sup>p</sup> *-W18×55-L160	160	9	Bolt Fail	0.0193	74.03
5FBA/6-W18×35-L114	114	6	Bolt Fail	0.0077	112.13
5FBA/6-W18×55-L192	192	11	Bolt Fail	0.0121	109.92
5FBA/6-W33×118-L712	712	22	Bolt Fail	0.0205	78.56
5FBA/6*-W18×55-L192	192	11	Bolt Fail	0.0148	119.50
5FBA/6*-W18×55-L176	176	10	Bolt Fail	0.0113	121.86
7FBA/9-W24×62-L189	189	8	Bolt Fail	0.0088	151.28
7FBA/9-W44×230-L1048	1048	24	Bolt Fail	0.0197	119.19
7FBA/9*-W24×62-L189	189	8	Bolt Fail	0.0108	164.24
9FBA/12-W30×90-L270	270	9	Bolt Fail	0.0083	165.12
9FBA/12*-W30×90-L270	270	9	Bolt Fail	0.015	174.90

หมายเหตุ

L/D คืออัตราส่วนความยาวต่อความลึกคาน

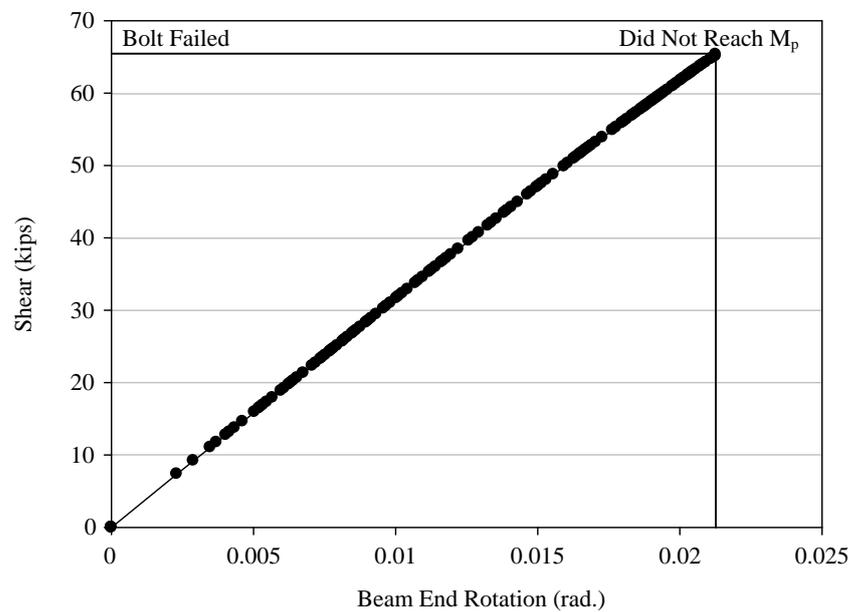
p คือ แบบจำลองที่มีแรงแบบจุด (Point Load) เป็นแรงกระทำ

\* คือ แบบจำลองที่ใช้กำลังวิบัติ ( $F_u$ ) ของสลักเกลียวเท่ากับ 96 ksi

ผลการวิเคราะห์ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ สามารถอภิปรายผลสรุปเป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้

#### 4.2.1 ค่าการหมุนตัวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองที่จุดต่อมีสลักเกลียว 3 ตัว

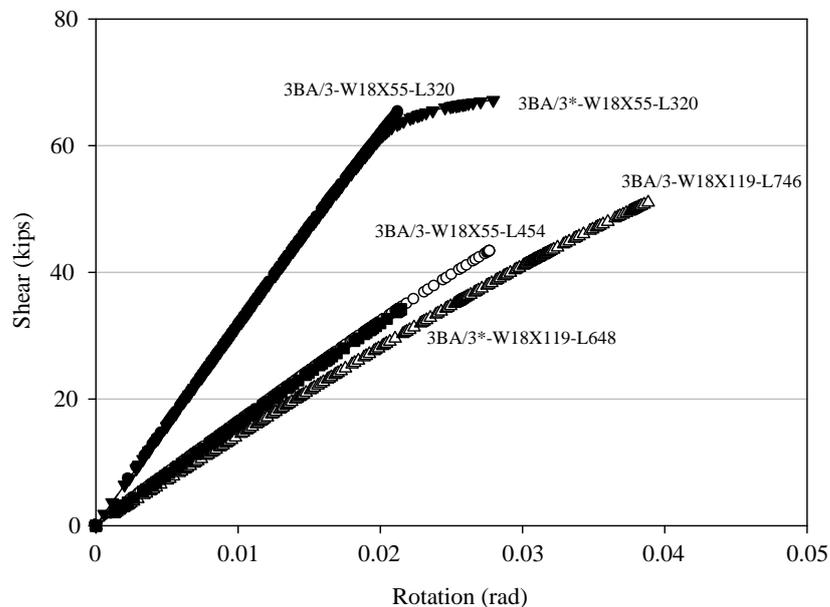
แบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L320 จุดต่อมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว กำลังวิบัติ ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi [15] คาน W18X55 มีความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เท่ากับ 320 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) และค่าการหมุนตัวที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.0214 เรเดียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L320 เป็นดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลอง 3BA/3-W18X55-L320

ดังนั้น เพื่อให้หน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ผู้วิจัยจึงทดลองเลือกใช้อัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานเท่ากับ 25 เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ของ Astanteh [8] ในแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L454 จุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว กำลังวิบัติ ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi [15] คาน W18X55 ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อไม่สามารถรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  และหน้าตัดคานไม่สามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ได้ กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อที่ได้มีค่าลดลง จนมีค่าเท่ากับ 43.27 kips เห็นได้ว่าการเพิ่มความยาวคาน ค่าการหมุนตัวจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 0.0277 เรเดียน แต่สลักเกลียวที่จุดต่อจะไม่วิบัติ เนื่องจากในแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L454 สลักเกลียวไม่วิบัติ และค่าการหมุนตัวที่ได้ยังมี

ค่าน้อยกว่า 0.03 เรเดียน ดังนั้น เพื่อให้ค่าการหมุนตัวมีค่าถึง 0.03 เรเดียน ผู้วิจัยจึงเพิ่มขนาดคานเป็น W18X119 ซึ่งมีค่าโมดูลัสหน้าตัดพลาสติก ( $Z_p$ ) เพิ่มขึ้น ในแบบจำลอง 3BA/3-W18×119-746 ซึ่งจุดต่อมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว กำลังวิบัติ ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi ความยาวคานที่ได้จากการออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 746 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_uA_b$  แต่หน้าตัดคานไม่สามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติกได้ เนื่องจากสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_uA_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0388 เรเดียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของแบบจำลองจุดต่อทั้งหมดที่มีสลักเกลียว 3 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว

เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L320 ซึ่งใช้คานขนาดเล็กกว่า เห็นได้ว่าจุดต่อที่ใช้คานที่มีขนาดใหญ่จะให้ค่าการหมุนตัวที่สูงกว่า เนื่องจากค่าโมดูลัสหน้าตัดพลาสติกของคานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้คานที่มีความยาวมาก เพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เมื่อคานมีความยาวมาก ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้น และเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานเพิ่มขึ้น ผลของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จะมีค่าลดลงจาก 65.33 kips เป็น 51.01 kips เนื่องจากแรงเฉือนในราบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนในแนวตั้งลดลง ทำให้กำลังรับ

แรงเฉือนของจุดต่ออลดลง ซึ่งแรงเฉือนในแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L320 และ 3BA/3-W18×119-746 อยู่ในตารางที่ 4.8 และแรงเฉือนในแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลองทั้งหมด อยู่ในหัวข้อการตรวจสอบ สมดุลแรงเฉือนแนวตั้ง (Equilibrium) ของภาคผนวก ข

**ตารางที่ 4.8** แรงเฉือนในแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ที่ใช้เปรียบเทียบ เมื่อคานขนาดเพิ่มขึ้น

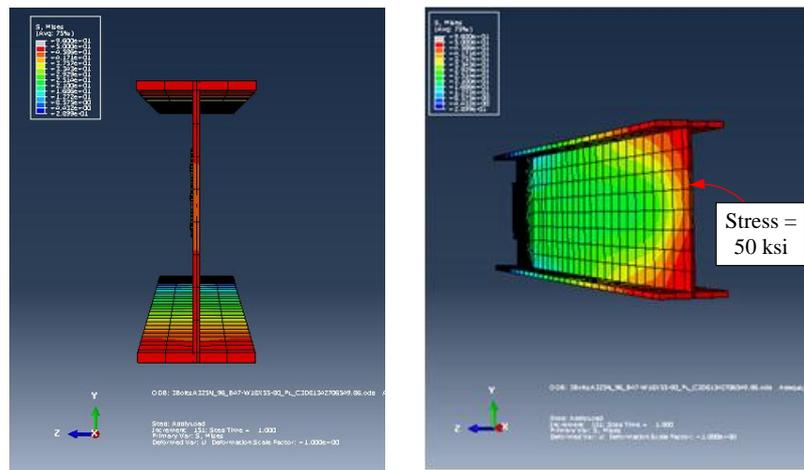
สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวตั้ง (kips)	
	3BA/3-W18×55-L320	3BA/3-W18×119-L746
1	21.89	14.79
2	22.06	16.78
3	21.37	19.44
<b>รวม</b>	<b>65.33</b>	<b>51.01</b>
สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวราบ (kips)	
1	8.07	18.09
2	1.05	16.85
3	-4.39	2.32
สลักเกลียวตัวที่	แรงลัพท์ (kips)	
<b>Nominal</b>	<b>23.33</b>	<b>23.33</b>
1	23.33	23.36
2	22.09	23.78
3	21.82	19.58

หมายเหตุ

- Nominal คือกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว 1 ตัวเท่ากับ  $0.6F_u A_b$
- เครื่องหมายลบแสดงการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวมีทิศทางตรงกันข้าม

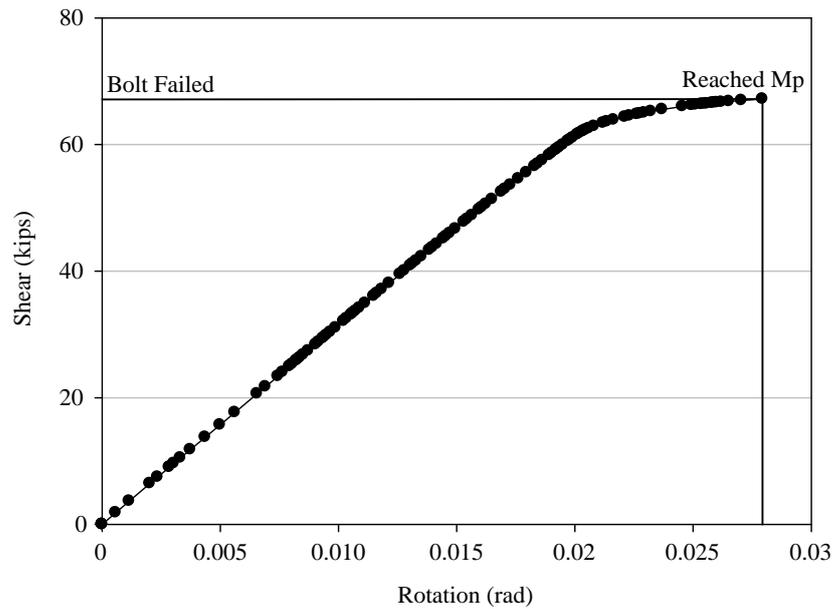
เพื่อให้หน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ผู้วิจัยจึงเพิ่มกำลังของสลักเกลียวขึ้นเป็น 96 ksi [15] ในแบบจำลอง 3BA/3\*-W18×119-L648 ความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เท่ากับ 648 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อไม่สามารถรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ได้

จากนั้นผู้วิจัยได้เพิ่มกำลังของสลักเกลียวขึ้นเป็น 96 ksi [15] ในแบบจำลอง 3BA/3\*-W18×55-L320 ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุด สลักเกลียววิบัติที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเท่ากับ  $0.6F_u A_b$  ขณะที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ซึ่งผลของหน่วยแรงเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดคาน ช่วงกลางคาน จะมีค่าเท่ากับ 50 ksi (Gr50) ตลอดทั้งหน้าตัด ซึ่งแสดงว่าหน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) โดยลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดคานของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18×55-L160 เป็นดังรูปที่ 4.18 เห็นได้ว่าลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวช่วงแรกยังคงเป็นเส้นตรง แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง ที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ความชันระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับจะไม่เป็นเส้นตรง แต่กำลังรับแรงเฉือนจะค่อยๆ เพิ่มถึงจุดสูงสุดจนสลักเกลียววิบัติ



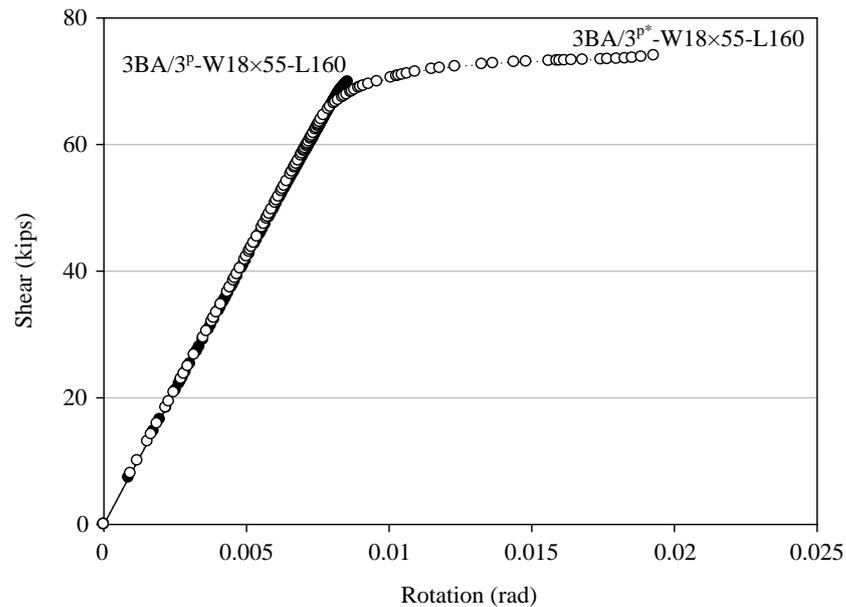
รูปที่ 4.18 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดคาน ในช่วงกลางความยาวคาน  
ของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18×55-L160

ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับมีค่าเท่ากับ 0.0279 เรเดียน กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อมีค่าสูงเท่ากับ 67.19 kips กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัว เป็นดังรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 3BA/3-W18×55-L320 ที่จุดต่อรับแรงเฉือนสูงสุดจนสลักเกลียววิบัติ แต่หน้าตัดคานไม่สามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ได้ เห็นได้ว่า ในแบบจำลอง 3BA/3\*-W18×55-L320 ที่มีกำลังสลักเกลียวสูงขึ้น กำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
เมื่อหน้าตัดคานสามารถรับ โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ )  
ของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18X55-L320

ต่อมาผู้วิจัยได้เปลี่ยนชนิดแรงกระทำเป็นแรงแบบจุดในแบบจำลอง 3BA/3<sup>p</sup>-W18×55-L160 ซึ่งจุดต่อมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว กำลังวิบัติ ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi ใช้คาน W18X55 ความยาวที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับ โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 160 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียวเกิดการวิบัติก่อนที่หน้าตัดคานจะรับ โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ที่ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับเท่ากับ 0.084 เรเดียน ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวเป็นดังรูปที่ 4.20



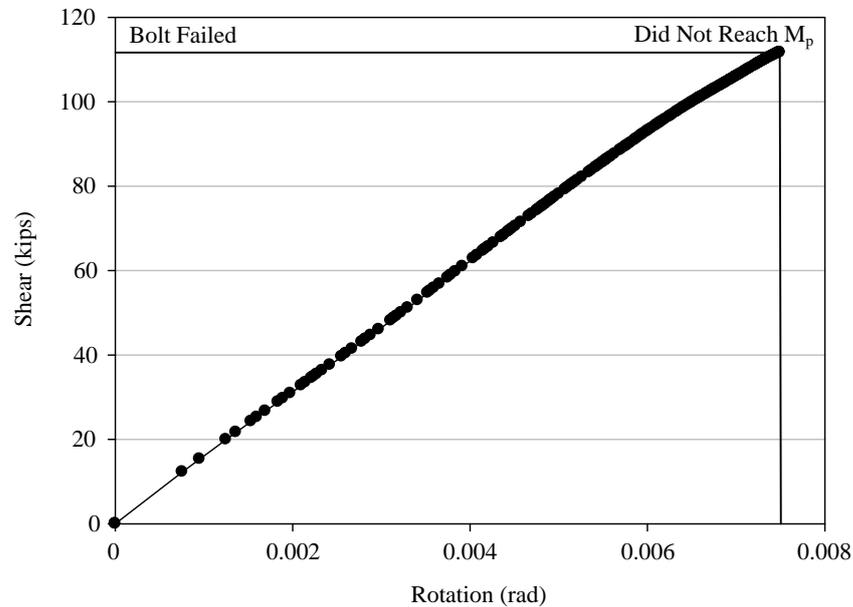
**รูปที่ 4.20** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
ของแบบจำลอง 3BA/3<sup>p</sup>-W18x55-L160

เมื่อเพิ่มกำลังวิบัติของสลักเกลียวเป็น 96 ksi [15] ในแบบจำลอง 3BA/3<sup>p</sup>-W18x55-L160 โดยความยาวคานเท่าเดิม ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ขณะที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับมีค่าเท่ากับ 0.0193 เรเดียน ซึ่งน้อยกว่าผลการทดสอบของ Astanteh [9] ที่ได้ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับระหว่าง 0.026 ถึง 0.061 เรเดียน และ Metzger [17] ที่ได้ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว เท่ากับ 0.032 เรเดียน ทำนองเดียวกันกับแบบจำลองที่รับแรงกระจายเป็นแรงกระทำ กำลังวิบัติของสลักเกลียว ( $F_u$ ) มีผลทำให้หน้าตัดคานที่ที่จุดรองรับสามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) และทำให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อและค่าการหมุนตัวเพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 ค่าการหมุนตัวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองที่จุดต่อมีสลักเกลียว 5 ตัว

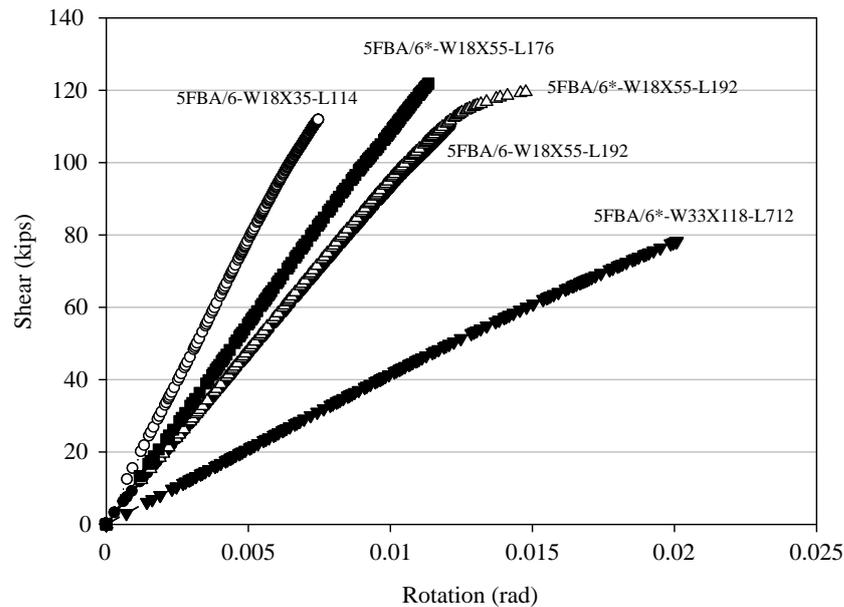
สำหรับแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัว ในแบบจำลอง 5FBA/6-W18x35-L114 ใช้คาน W18X35 ความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 114 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการ

หมุนตัวที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.0077 เรเดียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุกรองรับ ของแบบจำลอง 5FBA/6-W18×35-L114 เป็นดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุกรองรับของแบบจำลอง 5FBA/6-W18×35-L114

ดังนั้นผู้วิจัยได้ทดลองเปลี่ยนขนาดหน้าตัดคาน โดยใช้คาน W18X55 ในจุดต่อมีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัว กำลังวิบัติสลักเกลียว ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi ในแบบจำลอง 5FBA/6-W18×55-L192 แรงเฉือนแนวตั้งที่ใช้ออกแบบมีค่าเท่ากับ 116.65 ksi ความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เท่ากับ 192 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานที่จุกรองรับจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0121 เรเดียน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 5FBA/6-W18×35-L114 ที่ใช้คาน W18X35 จากสมการการออกแบบความยาวคานเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) แบบจำลองที่ใช้คานที่มีค่าโมดูลัสพลาสติกของหน้าตัดสูง จะได้ความยาวที่มากกว่า เห็นได้ว่าค่าการหมุนตัวจะเพิ่มขึ้นจาก 0.0077 เป็น 0.0121 เรเดียน แต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงจาก 112.13 เป็น 109.92 kips กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุกรองรับ ของแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียว 5 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัว

จากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่มขนาดคานเป็น W33X118 ในแบบจำลอง 5FBA/6-W33×118-L712 ความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เท่ากับ 712 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_s$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เช่นเดิม ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0205 เรเดียน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้คาน W18X35 และ W18X55 ยิ่งค่าโมดูลัสหน้าตัดพลาสติกมีค่าสูง ความยาวคานที่ออกแบบจะสูงด้วย และให้เห็นได้ว่าเมื่อขนาดคาน และความยาวคาน (L/D) เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ของค่าการหมุนตัวที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 0.0077 เป็น 0.0121 และ 0.0205 เรเดียน ตามลำดับ แต่กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อมีแนวโน้มลดลงจาก 112.13 เป็น 109.92 kips และลดลงเหลือ 78.56 kips ตามลำดับ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อจุดต่อโครงสร้าง เนื่องจากเมื่อความยาวและขนาดคานเพิ่มขึ้น แรงเฉือนในราบยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนในแนวตั้งลดลง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อลดลง ซึ่งแรงเฉือนในแนวตั้ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพธ์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัวที่ใช้คาน W8X35 W18X55 และ W33X118 อยู่ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แรงเฉือนในแนวดิ่ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงดัดพ้ที่กระทำต่อสลักเกลียว  
ของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัว ที่ใช้เปรียบเทียบ เมื่อขนาดคานเพิ่มขึ้น

สลักเกลียวตัว ที่	แรงเฉือนในแนวดิ่ง (kips)		
	5FBA/6-W18×35-L114	5FBA/6-W18×55-L192	5FBA/6-W33×118-L712
1	23.27	22.11	13.01
2	22.36	22.47	15.62
3	22.08	22.33	17.41
4	22.12	21.88	17.32
5	22.30	21.13	15.20
<b>รวม</b>	<b>112.13</b>	<b>109.92</b>	<b>78.56</b>
สลักเกลียวตัว ที่	แรงเฉือนในแนวราบ (kips)		
1	1.85	7.47	19.42
2	0.54	4.14	16.35
3	-1.04	-0.5	4.21
4	-2.50	-4.76	-6.61
5	-3.07	-7.01	-16.92
สลักเกลียวตัว ที่	แรงดัดพ้ (kips)		
<b>Nominal</b>	<b>23.33</b>	<b>23.33</b>	<b>23.33</b>
1	23.33	23.34	23.37
2	22.37	22.85	22.61
3	22.10	22.34	17.91
4	22.26	22.39	18.53
5	22.51	22.26	22.75

หมายเหตุ

-Nominal คือกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว 1 ตัวเท่ากับ  $0.6F_u A_b$

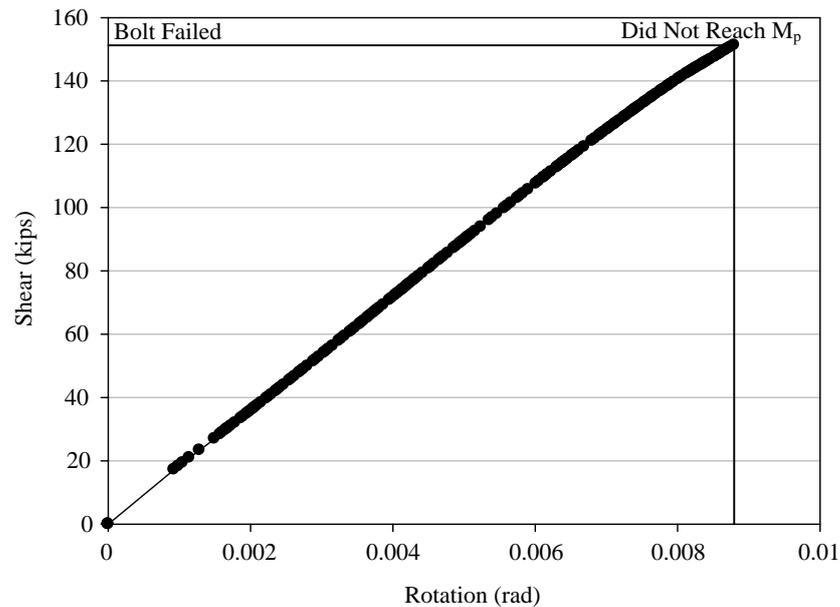
-เครื่องหมายลบแสดงการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวมีทิศทางตรงกันข้าม

เพื่อให้จุดต่อสามารถรับกำลังรับแรงเฉือนได้สูงสุด ในขณะที่หน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์ได้เต็ม ประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ผู้วิจัยได้ทดลอง เพิ่มกำลังวิบัติของสลักเกลียว ( $F_u$ ) ขึ้นเป็น 96 ksi ในแบบจำลอง 5FBA/6\*-W18×55-L176 ความยาวคานที่ได้จากการออกแบบมีค่าเท่ากับ 176 นิ้ว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 5FBA/6-W18×55-L192 จากการออกแบบความยาวคานเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) เมื่อจุดต่อมีกำลังวิบัติสลักเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 88 ksi เป็น 96 ksi แรงเฉือนแนวตั้งที่ใช้ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าจาก 69.99 เป็น 127.2 kips ความยาวที่ออกแบบได้จะลดลงจาก 192 นิ้ว เป็น 176 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าหุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0113 เรเดียน

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำแบบจำลอง 5FBA/6-W18×55-L192 มาเพิ่มกำลังวิบัติของสลักเกลียว ( $F_u$ ) ขึ้นเป็น 96 ksi ในแบบจำลอง 5FBA/6\*-W18×55-L192 โดยแบบจำลองยังคงมีความยาวเท่าเดิมคือ 192 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ขณะหน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ได้เห็นได้ว่า ในแบบจำลองจุดต่อ 5FBA/6\*-W18×55-L192 ลักษณะความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหุนตัวจะไม่เป็นเส้นตรง ถึงจุดหนึ่งกำลังรับแรงเฉือนจะค่อยๆเพิ่มขึ้น และค่าการหุนตัวก็เพิ่มขึ้น จนสลักเกลียววิบัติในที่สุด ซึ่งค่าการหุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0148 เรเดียน

#### 4.2.3 ค่าการหุนตัวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองที่จุดต่อมีสลักเกลียว 7 ตัว

ในทำนองเดียวกัน สำหรับแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัว ในแบบจำลอง 7FBA/9-W24×62-L189 กำลังวิบัติของสลักเกลียวเท่ากับ 88 ksi ใช้คาน W24X62 ความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 189 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อรับแรงเฉือนสูงสุดจนสลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6 F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0088 เรเดียน กำลังรับแรงเฉือนที่ได้เท่ากับ 151.28 kips กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับค่าการหุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลอง 7FBA/9-W24×62-L189 เป็นดังรูปที่ 23



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
ของแบบจำลอง 7FBA/9-W24×62-L189

เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 7FBA/9-W44×230-L1048 ซึ่งใช้คาน W44X230 โดยความยาวคานที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 1048 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียววิบัติที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ที่ค่าการหมุนตัวเท่ากับ 0.0197 เรเดียน เห็นได้ว่า เมื่อจุดต่อใช้คานที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสหน้าตัดพลาสติกที่ใช้ในการออกแบบมีค่าสูงขึ้น ทำให้ความยาวที่ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 189 เป็น 1048 นิ้ว ค่าการหมุนตัวที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 0.0088 เป็น 0.0197 เรเดียน แต่ในด้านกำลังรับแรงเฉือนพบว่า กำลังรับแรงเฉือนลดลงจาก 151.28 เป็น 119.19 kips ความยาวที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการหมุนตัวเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อก็ลดลง เนื่องจากแรงเฉือนในราบบังเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนในแนวดิ่งลดลง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อลดลง ซึ่งแรงเฉือนในแนวดิ่ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงลัพท์ที่กระทำต่อสลักเกลียวของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัวที่ใช้คาน W8X24 และ W44X230 อยู่ใน

ตารางที่ 4.10

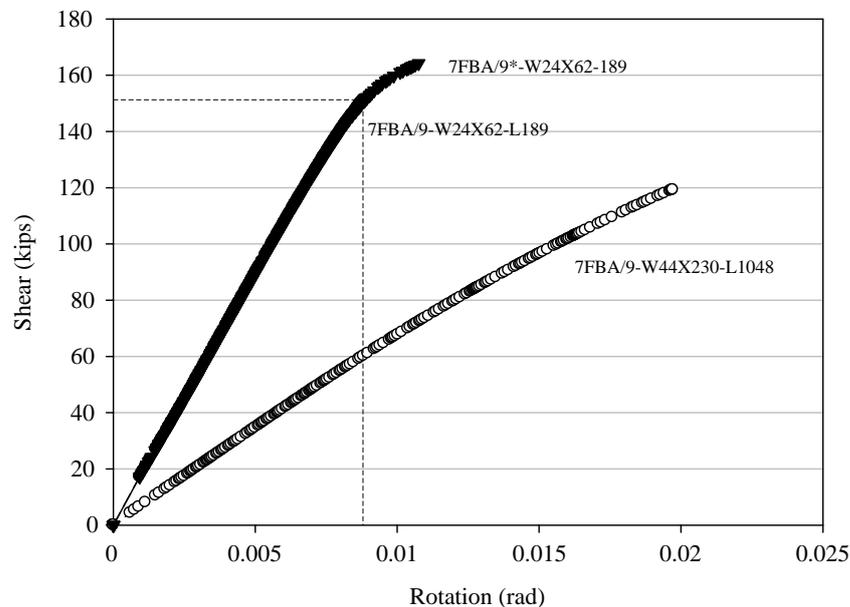
ตารางที่ 4.10 แรงเฉือนในแนวดิ่ง แรงเฉือนในแนวราบ และแรงดัดพ้องที่กระทำต่อสลักเกลียว  
ของแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียว 7 ตัว ที่ใช้เปรียบเทียบ เมื่อขนาดคานเพิ่มขึ้น

สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวดิ่ง (kips)	
	7FBA/9-W24X62-L189	7FBA/9-W44X230-L1048
1	21.74	14.36
2	22.21	15.50
3	22.21	16.97
4	21.94	16.68
5	21.42	19.32
6	21.12	17.64
7	20.63	15.72
<b>รวม</b>	<b>151.28</b>	<b>119.19</b>
สลักเกลียวตัวที่	แรงเฉือนในแนวราบ (kips)	
1	8.48	17.89
2	6.01	18.02
3	2.59	15.94
3	-1.17	5.70
3	-4.69	-4.34
3	-7.75	-14.28
3	-8.91	-18.27
สลักเกลียวตัวที่	แรงดัดพ้อง (kips)	
<b>Nominal</b>	<b>23.33</b>	<b>23.33</b>
1	23.34	22.94
2	23.01	23.77
3	22.37	23.29
3	21.98	20.49
3	21.93	19.80
3	22.50	22.70
3	22.48	24.10

หมายเหตุ

- Nominal คือกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว 1 ตัวเท่ากับ  $0.6F_u A_b$
- เครื่องหมายลบแดงการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวมีทิศทางตรงกันข้าม

ดังนั้นเพื่อให้หน้าตัดคานสามารถรับ โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มกำลังบิดของสลักเกลียว ( $F_u$ ) เป็น 96 ksi ในแบบจำลอง 7FBA/9\*-W24×62-L189 โดยความยาวคานยังคงเดิม ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดจนสลักเกลียวบิดที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ขณะหน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.0108 เรเดียน การเพิ่มกำลังสลักเกลียวขึ้น และความยาวยังคงเท่าเดิมทำให้ จุดต่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ไม่เกิดการบิดก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.24

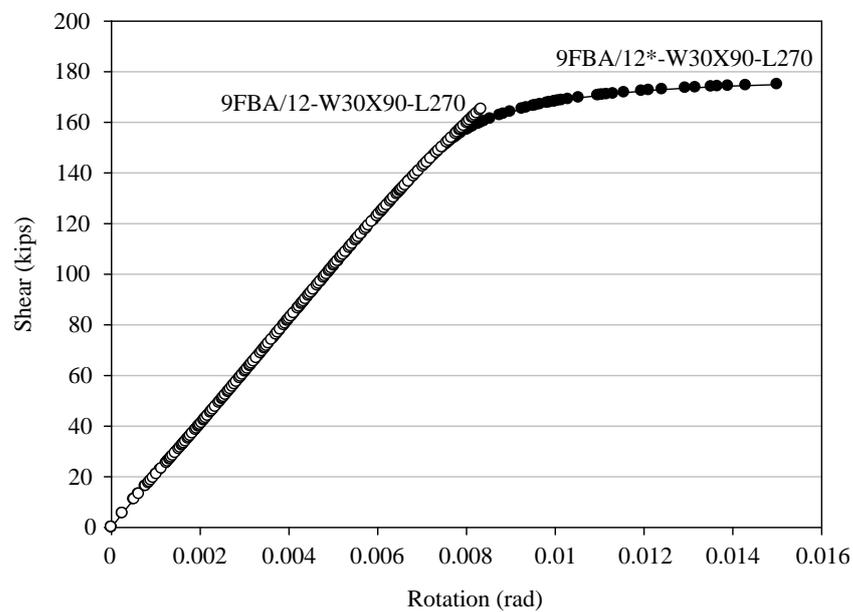


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัว

#### 4.2.4 ค่าการหมุนตัวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองที่จุดต่อมีสลักเกลียว 9 ตัว

สำหรับแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 9 ตัว ในแบบจำลอง 9FBA/12-W30X90-L270 ใช้คาน W30X90 กำลังบิดของสลักเกลียว ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi ความยาวคานที่ใช้ออกแบบเพื่อให้หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มีค่าเท่ากับ 270 นิ้ว ผลการวิเคราะห์พบว่า สลักเกลียวบิดที่ค่า  $0.6F_u A_b$  ก่อนที่หน้าตัดคานจะรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0083 เรเดียน ดังนั้น เพื่อให้จุดต่อมีพฤติกรรมทางด้านความ

เหนียวที่คืบขึ้น ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มกำลังของสลักเกลียวเป็น 96 ksi ในแบบจำลอง 9FBA/12\*-W30X90-L270 ผลการวิเคราะห์พบว่า จุดต่อสามารถรับแรงเฉือนสูงสุด ในขณะที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.015 เรเดียน เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังวิบัติของสลักเกลียวขึ้น พฤติกรรมทางด้านความแข็งแรงของจุดต่อคืบขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อเพิ่มขึ้นจาก 165.12 เป็น 174.9 kips และค่าการหมุนตัวที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 0.0083 เป็น 0.015 เรเดียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 9 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.25

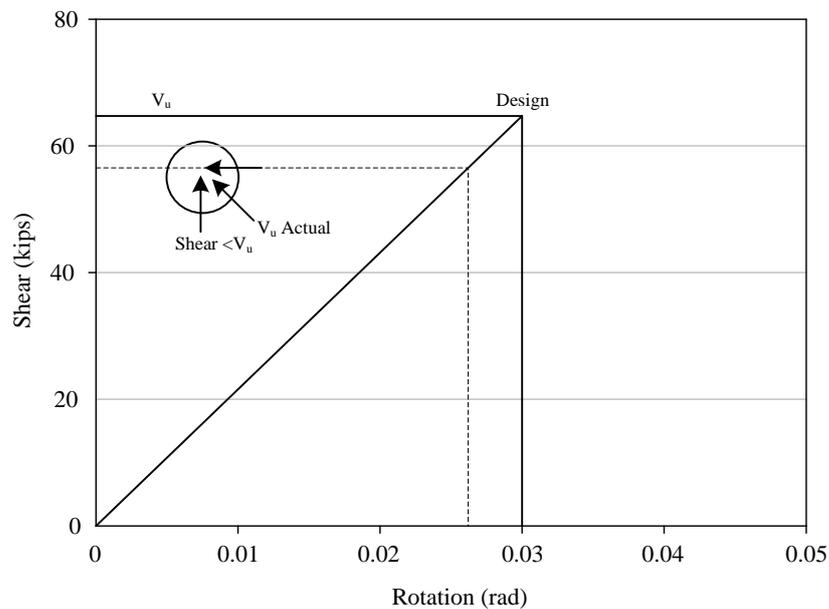


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 9 ตัว

#### 4.2.5 ผลกระทบจากแรงเฉือนในแนวราบ

จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว เมื่อใช้กำลังวิบัติสลักเกลียว ( $F_u$ ) เท่ากับ 88 ksi พบว่า จุดต่อสามารถรับกำลังรับแรงเฉือนจนสลักเกลียววิบัติ แต่คานไม่สามารถรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการใช้แรงเฉือนในแนวคิ่งออกแบบ ( $V_u$ ) เพื่อให้จุดต่อรับแรงเฉือนสูงสุด ขณะหน้าตัดคานรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ซึ่งแรงเฉือนนี้ไม่ได้รวมผลของแรงแนวราบที่เกิดขึ้น แต่ผลการวิเคราะห์ของกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อที่ได้คือ ผลของแรงเฉือนในแนวราบที่เกิดขึ้น ทำให้ผลของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้มีค่าลดลงกว่าที่ออกแบบ ดังนั้น สลักเกลียวที่จุดต่อจึงเกิดการวิบัติก่อนที่คานจะสามารถรับ

โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ดังนั้นการเพิ่มกำลังบิดของสลักเกลียวเป็น 96 ksi ในแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว ทำให้จุดต่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สลักเกลียวเกิดการบิดซ้ายลง จุดต่อจึงสามารถรับแรงเฉือนได้เพิ่มขึ้น หน้าตัดคานสามารถรับโมเมนต์เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติกได้ ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS) มีลักษณะดังรูปที่ 4.26

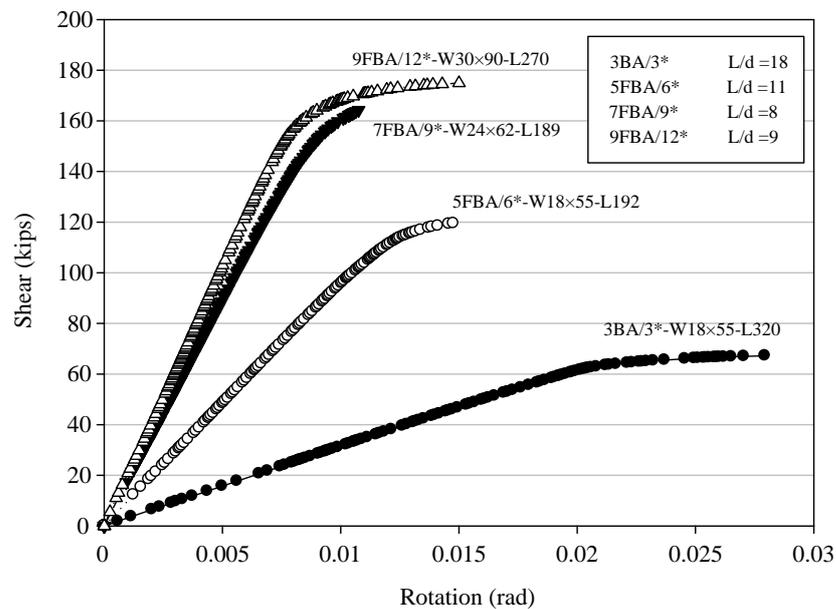


รูปที่ 4.26 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ ( $V_u$ ) และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS)

#### 4.2.6 ค่าการหมุนตัวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองที่จุดต่อมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานต่างๆ

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่า จุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานเท่ากับ 18 และจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 7 และ 9 ตัว ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานเท่ากับ 11 8 และ 9 ตามลำดับ สามารถรับแรงเฉือนสูงสุดจนสลักเกลียวบิด ในขณะที่หน้าตัดคานยังคงรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ในแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว มีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานน้อยกว่า 25 ให้ค่าการหมุนตัวน้อยกว่า 0.03 เรเดียน เห็นได้ว่า ค่าการหมุนตัวที่จุดรองรับที่สูง หรือมีค่าเท่ากับ 0.03 เรเดียน ในจุดต่อ Single Plate

Shear Connection เกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากต้องใช้อัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคานที่มาก ซึ่งในการใช้งานโครงสร้างจริง การใช้อัตราส่วนความยาวต่อความลึกคานเท่ากับ 25 หรือมากกว่า เป็นไปได้ยาก ดังนั้นโอกาสที่ค่าการหมุนตัวจะมีค่าเท่ากับ 0.03 เรเดียน จึงมีน้อยมาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวของคานสูงสุดที่จู่รองรับ ที่ใช้อัตราส่วนความยาวต่อความลึกคาน เมื่อหน้าตัดคานยังคงรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) ของแบบจำลอง 3 5 7 และ 9 เป็นดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จู่รองรับ และอัตราส่วนความยาวต่อความลึกคาน ที่ทำให้หน้าตัดคานยังคงรับ โมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ )

#### 4.2.7 การเปรียบเทียบค่าการหมุนตัวและกำลังรับแรงเฉือน จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองเปรียบเทียบกับการคำนวณจากวิธี Classical

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของค่าการหมุนตัวและกำลังรับแรงเฉือนของแบบจำลองกับวิธี Classical ที่คำนวณโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองจุดต่อที่สามารถรับแรงเฉือนสูงสุด ขณะหน้าตัดคานรับโมเมนต์ได้เต็มประสิทธิภาพหน้าตัดพลาสติก ( $M_p$ ) มาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับทางทฤษฎี โดยสมการการคำนวณหาค่าการหมุนตัวของจุดต่อโดยวิธี Classical คือ  $\theta = w l^3 / 24EI$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการหมุนตัวด้วยวิธี Classical ของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18X55-L320

$$\theta = \frac{wl^3}{24EI}$$

$$\theta = \frac{(76.34/160) \times 320^3}{24 \times 29000 \times 890} = 0.0252 \text{ rad.}$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเท่ากับ 29000 ksi

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน W18X55 เท่ากับ 890 in<sup>4</sup>

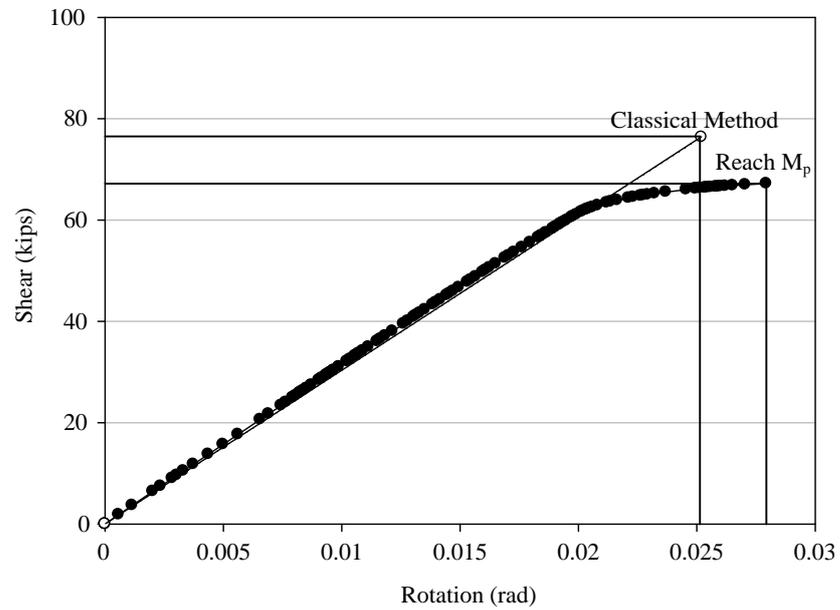
การเปรียบเทียบค่าการหมุนตัวและกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากผลวิเคราะห์ของแบบจำลองกับวิธี Classical ที่คำนวณโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static) จะพิจารณาในช่วงที่ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวมีความชันเป็นเส้นตรง พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองจะอยู่สูงกว่า เส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยวิธี Classical ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง Single Plate Shear Connection มีความแข็งแรง (Stiffness) มากกว่าจุดต่อที่มีลักษณะยึดหมุน (Pin Connection) เล็กน้อย ซึ่งผลวิเคราะห์ของค่าการหมุนตัวและกำลังรับแรงเฉือนของแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว กับการคำนวณโดยวิธี Classical อยู่ในตารางที่ 4.11 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับของแบบจำลองเปรียบเทียบกับวิธี Classical ในแบบจำลองจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 7 และ 9 ตัว มีลักษณะดังรูปที่ 4.28 ถึง 4.31

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าการหมุนตัวและกำลังรับแรงเฉือนจากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองกับวิธี Classical

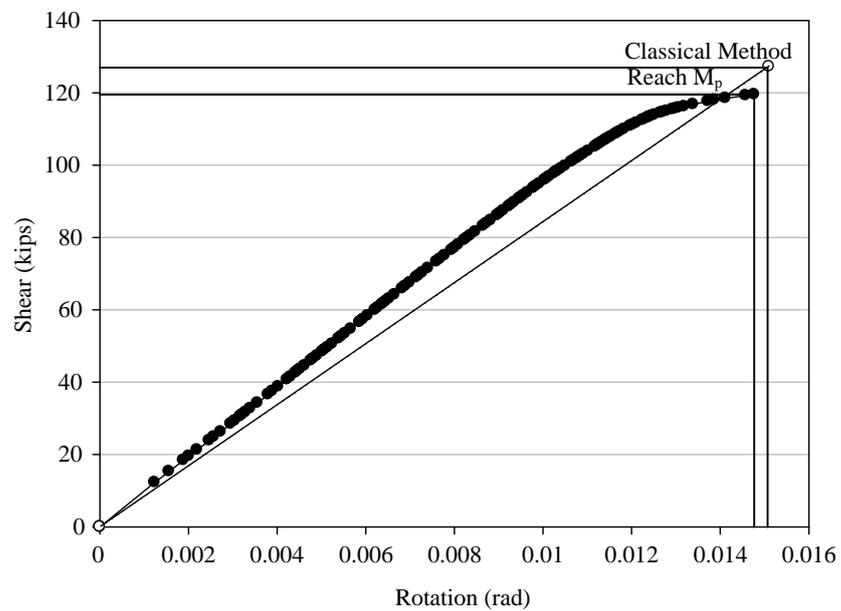
หมายเลข แบบจำลอง	วิธี Classical		ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง	
	กำลังรับแรงเฉือน (kips)	ค่าการหมุนตัว (rad.)	กำลังรับแรงเฉือน (kips)	ค่าการหมุนตัว (rad.)
3BA/3*-W18X55-L320	76.34	0.0252	67.19	0.0279
5FBA/6*-W18X55-L192	127.23	0.0151	119.50	0.0148
7FBA/9*-W24X62-L189	178.08	0.0118	164.24	0.0108
9FBA/12*-W30X90-L270	228.96	0.0133	174.90	0.0150

หมายเหตุ

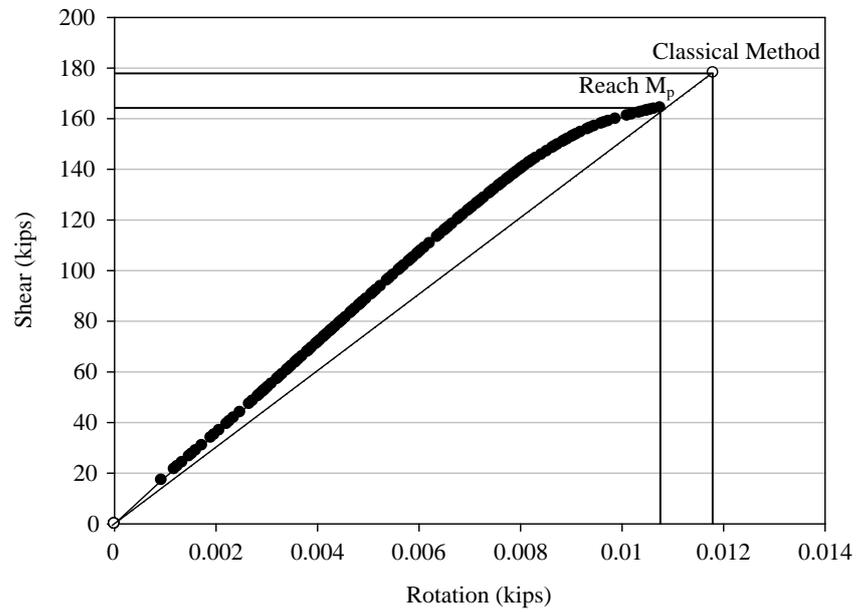
-กำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว 1 ตัวเท่ากับ  $0.6F_u A_b = 25.44 \text{ kips}$



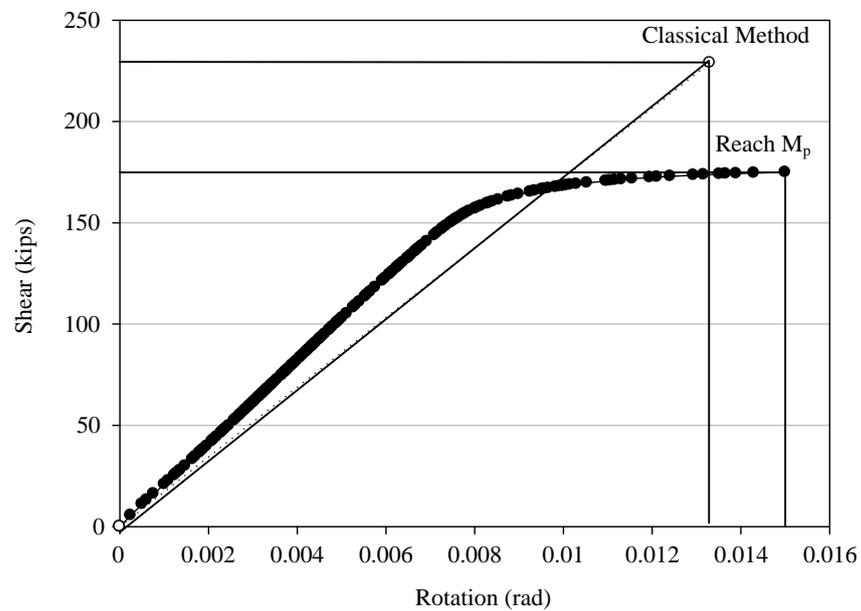
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
เปรียบเทียบกับวิธี Classical ของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18X55-L320



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
เปรียบเทียบกับวิธี Classical ของแบบจำลอง 5FBA/6\*-W18X55-L192



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
เปรียบเทียบกับวิธี Classical ของแบบจำลอง 7FBA/9\*-W24X62-L189



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ  
เปรียบเทียบกับวิธี Classical ของแบบจำลอง 9FBA/12\*-W30X90-L270

#### 4.2.8 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของจุดต่อ (Stiffness) จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองกับ Commentary ของคู่มือการออกแบบ AISC 2005 [21]

การตรวจสอบความแข็งแรงของจุดต่อ (Stiffness) ทำโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลในส่วนของ Commentary ของคู่มือการออกแบบ AISC 2005 [21] ที่ได้จำแนกประเภทจุดต่อ ตามความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานกับค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ (moment – rotation response) โดยแบ่งประเภทจุดต่อออกเป็น 3 ประเภทคือ Fully Restrained (FR) Partial Restrained (PR) และ Simple Shear Connections สำหรับ Single Plate Shear Connection ซึ่งเป็นจุดต่อเป็นประเภท Simple Shear Connection ซึ่งมีความแข็งแรงจุดต่อ (Stiffness) ที่เป็นค่า Upper limit เท่ากับ  $K_s = 2EI/L$  เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง โดยใช้สมการ  $K_s = M_s / \theta_s$  ซึ่งความแข็งแรงจุดต่อ (Stiffness) ที่เป็นค่า Upper limit และความแข็งแรงของจุดต่อ (Stiffness) ของแบบจำลองที่คำนวณได้ อยู่ในตารางที่ 4.14

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่า Stiffness ที่เป็นค่า Upper limit

และผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง 3BA/3\*-W18X55-L320

$$K_s = \frac{2EI}{L} = \frac{2 \times 29000 \times 890}{320} = 161,313 \text{ kips in}$$

$$K_s = \frac{M_s}{\theta_s} = \frac{252.5}{0.0279} = 9052 \text{ kips in}$$

เมื่อ  $M_s$  คือโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

$\theta_s$  คือค่าการหมุนตัวที่เกิดขึ้นจากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

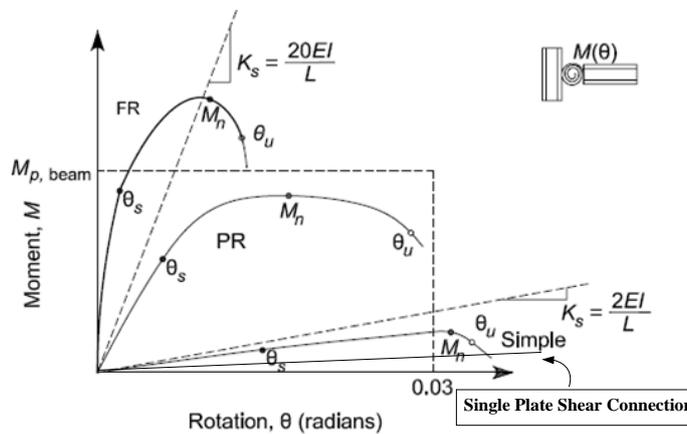
ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งแรง (Stiffness) ที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธี Classical กับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

หมายเลขแบบจำลอง	ค่าความแข็งแรง (Stiffness) (kips in)	
	วิธี Classical	ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง
3BA/3*-W18X55-L320	161,313	9,052
5FBA/6*-W18X55-L192	268,854	33,975
7FBA/9*-W24X62-L189	475,661	75,038

หมายเหตุ

-โมเมนต์ที่รอยเชื่อม ( $M_s$ ) ของแบบจำลอง 3 5 และ 7 เท่ากับ 252.5 502.8 และ 810.4 kips in ตามลำดับ

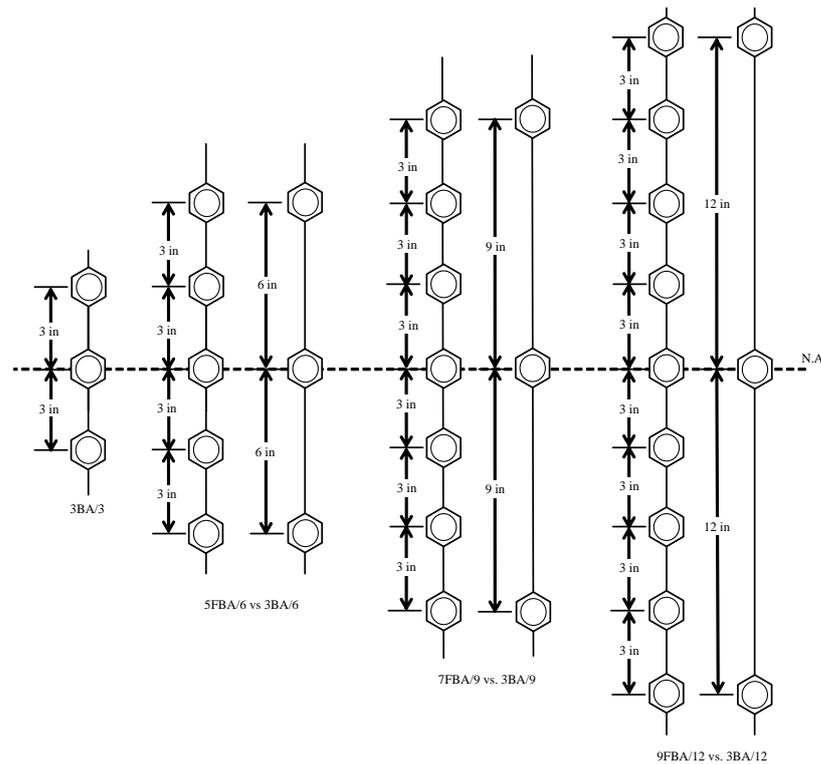
จากการเปรียบเทียบความแข็งแรงของจุดต่อ (Stiffness) กับเทียบกับค่าความแข็งแรงที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองพบว่า ค่าความแข็งแรงที่คำนวณได้โดยวิธี Classical มีค่าสูงกว่ามาก โดยความแข็งแรงของจุดต่อ (Stiffness) ที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 5 และ 7 ตัว ที่คำนวณได้โดยวิธี Classical เท่ากับ 161,313 268,854 และ 475,661 kips in ตามลำดับและค่าความแข็งแรงที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองเท่ากับ 9,052 33,975 และ 75,038 kips in ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟในส่วนของ Commentary ของคู่มือ AISC 2005 [21] ดังในรูปที่ 4.30 เห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ได้จาก แบบจำลอง Single Plate Shear Connection อยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟของ  $K_s = 2EI/L$  มาก ดังนั้นจึงสามารถจำแนกได้ว่า จุดต่อ Single Plate Shear Connection เป็นจุดต่อประเภท Simple Shear Connection ตามที่ข้อมูลในส่วน Commentary ของคู่มือ AISC ได้แนะนำไว้



รูปที่ 4.32 ลักษณะเส้นกราฟ ความแข็งแรง (Stiffness) ที่ได้แบบจำลอง Single Plate Shear Connction เทียบกับเส้นกราฟความแข็งแรง (Stiffness) ของจุดต่อ Simple Shear Connections ในส่วน Commentary ของคู่มือการ ออกแบบ AISC 2005 [21]

### 4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษา ผลที่ตำแหน่งสลักเกลียว มีต่อแรงกระทำต่อสลักเกลียว ของจุดต่อ Single Plate Shear Connection

โดยทั่วไป Single Plate Shear Connection มีระยะห่างระหว่างสลักเกลียวเท่ากับ 3 นิ้ว อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยของ Ashakul [16] พบว่าตำแหน่งของสลักเกลียวมีผลกับแรงที่กระทำต่อสลักเกลียว ซึ่งย่อมส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อ งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลที่ตำแหน่งของสลักเกลียวมีต่อแรงกระทำของสลักเกลียว และความเหนียวของจุดต่อ (Ductility) โดยเพิ่มตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดจากแกนสะเทินคานขึ้นเป็นระยะ 6 9 และ 12 นิ้ว ในจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว เพื่อเปรียบเทียบกับจุดต่อที่มีสลักเกลียวตัวบนสุดจากแกนสะเทินคานเท่ากัน โดยมีจำนวน 5 7 และ 9 ตัว ซึ่งเป็นลักษณะจุดต่อที่ใช้งานทั่วไป ดังรูปที่ 4.33 หมายเลขแบบจำลองที่ใช้ศึกษาแสดงอยู่ในตารางที่ 4.13 และผลการวิเคราะห์แสดงอยู่ในตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานเท่ากันที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.13 หมายเลขแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผล เปรียบเทียบที่สลักเกลียวตัวบนสุด ห่างจากแกนสะเทินคานเท่ากัน

จำนวนสลักเกลียว (ตัว)	หมายเลขแบบจำลอง			
	ตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน (นิ้ว)			
	3	6	9	12
3	3BA/3	3BA/6	3BA/9	3BA/12
5	-	5FBA/6	-	-
7	-	-	7FBA/9	-
9	-	-	-	9FBA/12

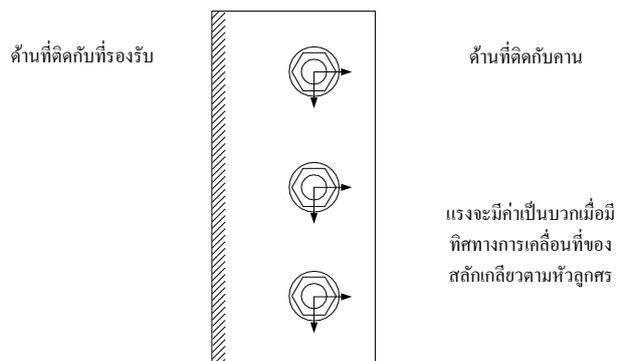
ตารางที่ 4.14 กำลังรับแรงเฉือนและค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ

จำนวนสลักเกลียว (ตัว)	กำลังรับแรงเฉือน (kips) (ค่าการหมุนตัวของคานที่จุดรองรับ (rad))			
	ตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน (นิ้ว)			
	3	6	9	12
3	65.32(0.0214)	57.44(0.0178)	52.14(0.0121)	47.44(0.0121)
5	-	109.92(0.0121)	-	-
7	-	-	151.28(0.0088)	-
9	-	-	-	165.12(0.0083)

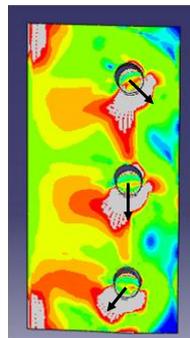
ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งของสลักเกลียวที่มีผลต่อแรงกระทำต่อสลักเกลียวและความเหนียวของจุดต่อสามารถอภิปรายผลสรุปเป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้

### 4.3.1 ผลที่ตำแหน่งของสลักเกลียว มีต่อแรงที่กระทำกับสลักเกลียว

แรงที่กระทำกับสลักเกลียวมีอยู่สองทิศทางคือ แรงแนวราบ แรงนี้เกิดขึ้นจากรูเจาะด้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวในแนวราบ และแรงแนวตั้ง เกิดขึ้นจากรูเจาะด้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวในแนวตั้ง ผลรวมเวกเตอร์ของแรงแนวราบและแรงแนวตั้งเป็นแรงลัพธ์ที่กระทำกับสลักเกลียว เมื่อแรงลัพธ์มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว สลักเกลียวจะเกิดการวิบัติ ผลรวมของแรงในแนวตั้งที่กระทำกับสลักเกลียวจะเป็นกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อ เนื่องจากแรงที่กระทำกับสลักเกลียวมีทั้งค่าบวกและค่าลบ [19] ดังนั้น การใช้เครื่องหมายบ่งบอกถึงทิศทางเคลื่อนที่ของสลักเกลียว เมื่อแรงมีค่าบวกหมายถึงแรงจะมีทิศทางเคลื่อนที่ของสลักเกลียวตามหัวลูกศรและแรงมีค่าลบจะมีทิศทางเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับหัวลูกศรดังรูปที่ 4.34 และลักษณะทิศทางเคลื่อนตัวของสลักเกลียวในแบบจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 ลักษณะแรงและทิศทางเคลื่อนตัวของสลักเกลียว



รูปที่ 4.35 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสลักเกลียวในแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์ค่าแรงในแนวตั้ง แรงในแนวราบและแรงลัพธ์ที่กระทำกับสลักเกลียวแต่ละตัว แสดงอยู่ในตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของแบบจำลอง 5FBA/6 7FBA/9 และ 9FBA/12 มีระยะห่างระหว่างสลักเกลียวเท่ากับ 3 นิ้ว โดยมีสลักเกลียวจำนวน 5 7 และ 9 ตัว พบว่า สลักเกลียวตัวบนสุดจะวิบัติก่อน แต่เมื่อเพิ่มตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานเป็น 6 9 และ 12 นิ้ว โดยจุดต่อมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ในแบบจำลอง 3BA/3 3BA/6 และ 3BA/9 พบว่า สลักเกลียวตัวล่างสุดจะเกิดการวิบัติก่อนสลักเกลียวตัวอื่น เนื่องจากขนาดแรงในแนวราบที่สลักเกลียวตัวล่างสุดมีค่ามากกว่าสลักเกลียวตัวบนสุด

เมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวมีระยะห่างจากแกนสะเทินคานเพิ่มขึ้น แรงแนวราบที่กระทำกับสลักเกลียวตัวบนสุดจะเพิ่มขึ้นด้วย แรงในแนวราบที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อลดลง เนื่องจากเมื่อแรงในแนวราบเพิ่มขึ้น แรงในแนวตั้งยิ่งลดลง เมื่อแรงในแนวตั้งลดลง กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อ ที่ได้จากผลรวมแรงในแนวตั้งจะลดลงด้วย

ตารางที่ 4.15 แรงกระทำต่อสลักเกลียวเปรียบเทียบที่ตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากการสะเทินเท่ากัน

ตำแหน่งสลักเกลียวห่างจากแกนสะเทินคาน (นิ้ว)	แรงเฉือนแนวตั้ง (kips)						
	3BA/3	5FBA/6	3BA/6	7FBA/9	3BA/9	9FBA/12	3BA/12
15							
12						17.86	13.63
9				21.74	16.17	18.45	
6		22.11	18.46	22.20		19.02	
3	21.89	22.47		22.21		19.32	
0	22.06	22.33	20.77	21.94	19.61	19.17	19.85
-3	21.37	21.88		21.42		18.85	
-6		21.13	18.22	21.12		18.17	
-9				20.63	16.35	18.06	
-12						16.22	13.96
-15							
<b>รวม</b>	<b>65.33</b>	<b>109.92</b>	<b>57.44</b>	<b>151.28</b>	<b>52.14</b>	<b>165.12</b>	<b>46.85</b>

ตำแหน่งสลัก เกลียวห่างจาก แกนสะเทิน คาน (นิ้ว)	แรงเฉือนแนวราบ (kips)						
	3BA/3	5FBA/6	3BA/6	7FBA/9	3BA/9	9FBA/12	3BA/12
15							
12						15.03	18.06
9				8.48	16.35	12.64	
6		7.47	13.84	6.01		8.78	
3	8.07	4.14		2.59		4.20	
0	-1.05	-0.50	1.40	-1.17	0.91	-0.3	1.54
-3	4.39	-4.76		-4.69		-4.59	
-6		-7.01	-14.64	-7.75		-8.9	
-9				-8.91	-16.70	-12.46	
-12						-15.70	-18.69
-15							
	แรงดัดพ้ (kips)						
Nominal	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33
15							
12						23.34	22.63
9				23.33	23.00	22.37	
6		23.34	23.07	23.01		20.94	
3	23.33	22.85		22.37		19.77	
0	22.09	22.34	20.81	21.98	19.63	19.18	19.91
-3	21.82	22.39		21.93		19.4	
-6		22.26	23.37	22.50		20.23	
-9				22.48	23.37	21.94	
-12						22.58	23.33
-15							

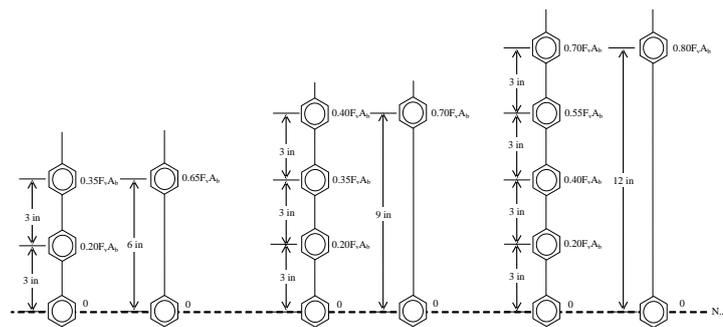
หมายเหตุ

-Nominal คือกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวที่วิบัติเท่ากับ  $0.6F_u A_s$

เมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงในแนวราบที่ตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน 6 นิ้ว ในจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 และ 3 ตัว ในแบบจำลอง 5FBA/6 และ 3BA/6 พบว่า แรงในแนวราบมีค่า 7.01 และ 14.64 kips เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวหนึ่งตัวที่รับได้เท่ากับ  $0.35F_v A_b$  และ  $0.65F_v A_b$  ตามลำดับ เห็นได้ว่า เมื่อตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดจากแกนสะเทินคานมีระยะห่างเพิ่มขึ้น ในแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ทำให้แรงในแนวราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 30

เมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงในแนวราบที่ตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน 9 นิ้ว ในจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 และ 3 ตัว ในแบบจำลอง 7FBA/9 และ 3BA/9 พบว่า แรงเฉือนในแนวราบมีค่า 8.91 และ 16.70 kips เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเท่ากับ  $0.40F_v A_b$  และ  $0.70F_v A_b$  ตามลำดับ เห็นได้ว่า เมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวจากแกนสะเทินคานมีระยะเพิ่มขึ้น ในแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ทำให้แรงในแนวราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 30

เปรียบเทียบขนาดแรงในแนวราบที่ตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน 12 นิ้ว ในจุดต่อที่มีสลักเกลียวจำนวน 9 และ 3 ตัว ในแบบจำลอง 9FBA/12 และ 3BA/12 พบว่า แรงเฉือนในแนวราบมีค่า 18.69 และ 15.70 kips เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเท่ากับ  $0.70F_v A_b$  และ  $0.80F_v A_b$  ตามลำดับ เห็นได้ว่า เมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวจากแกนสะเทินคานมีระยะเพิ่มขึ้น ในแบบจำลองที่มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ทำให้แรงในแนวราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดแรงในแนวราบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว ดังรูปที่ 4.36



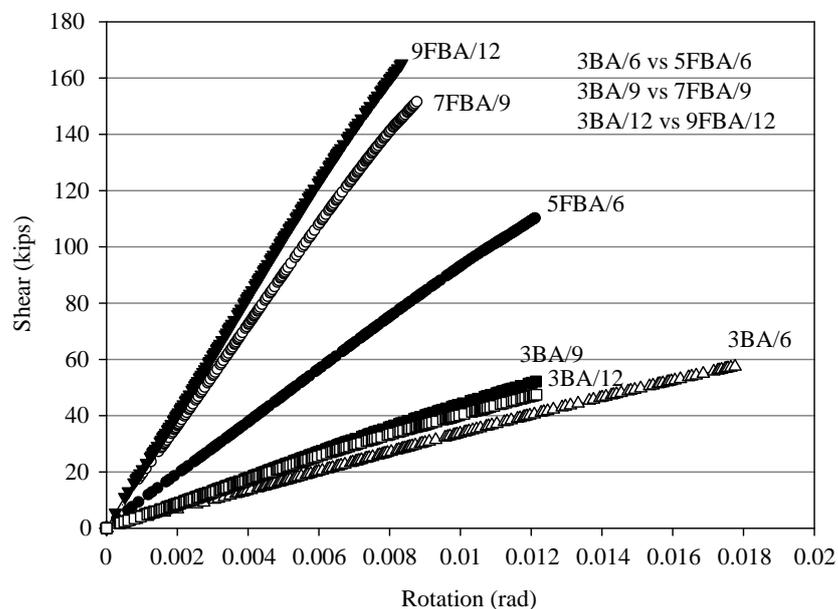
รูปที่ 4.36 สัมประสิทธิ์ขนาดแรงในแนวราบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวที่ตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานเท่ากัน

เปรียบเทียบแบบจำลอง 5FBA/6 7FBA/9 และ 9FBA/12 เมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดจากแกนสะเทินคานามีระยะเพิ่มขึ้น พบว่า แรงแนวราบเพิ่มขึ้น และแรงแนวตั้งลดลง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวตัวบนสุดลดลง

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง 3BA/6 3BA/9 และ 3BA/12 เมื่อตำแหน่งของสลักเกลียวตัวบนสุดจากแกนสะเทินคานามีระยะเพิ่มขึ้น โดยจำนวนสลักเกลียวมี 3 ตัวเท่าเดิม พบว่า แรงในแนวราบเพิ่มขึ้น แรงแนวตั้งจะลดลง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวตัวบนสุดลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อลดลงด้วย

#### 4.3.2 การหมุนตัวของคานาที่จุดรองรับ

เมื่อตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานาเท่ากัน เห็นได้ว่าการหมุนตัวของคานาที่จุดรองรับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในจุดต่อที่มีตำแหน่งสลักเกลียวจากแกนสะเทินคานามีระยะเพิ่มขึ้น โดยมีจำนวนสลักเกลียว 3 ตัว เนื่องจากจำนวนสลักเกลียวที่ลดลง ทำให้แรงในแนวราบที่ต้านการเคลื่อนที่ของสลักเกลียวลดลง ส่งผลให้การหมุนตัวของคานาที่จุดรองรับเพิ่มขึ้น ซึ่งกราฟความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับการหมุนตัวของคานาดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับการหมุนตัวของคานา เปรียบเทียบที่ตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานาเท่ากัน

แบบจำลอง 3BA/6 ที่มีตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคาน 6 นิ้ว และมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว ค่าการหมุนตัวเท่ากับ 0.0178 เรเดียน ซึ่งมากกว่า แบบจำลอง 5FBA/6 ที่มีสลักเกลียวจำนวน 5 ตัว มีค่าการหมุนตัว 0.0121 เรเดียน

แบบจำลอง 3BA/9 ที่มีตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานเป็น 9 นิ้ว และมีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว จะมีค่าการหมุนตัว 0.0121 เรเดียน ซึ่งมากกว่า แบบจำลอง 7FBA/9 ที่มีสลักเกลียวจำนวน 7 ตัว มีค่าการหมุนตัว 0.0088 เรเดียน

ในทำนองเดียวกัน แบบจำลอง 3BA/12 ที่มีตำแหน่งสลักเกลียวตัวบนสุดห่างจากแกนสะเทินคานเป็น 12 นิ้ว มีสลักเกลียวจำนวน 3 ตัว มีค่าการหมุนตัว 0.0121 เรเดียน ซึ่งมากกว่า แบบจำลอง 9BA/12 ที่มีสลักเกลียวจำนวน 9 ตัว มีค่าการหมุนตัว 0.0083 เรเดียน