

บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยผลการทดสอบวัสดุ ผลการทดสอบแรงกดในแนวตั้ง (Vertical Push off Test) การอภิปรายผลเนื่องจากขนาด Shear Connector กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น (Gap) และความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูป รวมทั้งการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับสมการจากงานวิจัยของ Limwuttigrajirat งานวิจัยของ Lam และคณะ สมการในข้อกำหนด AISC มาตรฐาน EC4 และ BS5950

4.1 ผลการทดสอบวัสดุ

ผลการทดสอบวัสดุประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตหน้าทรงลูกบาศก์และกำลังรับแรงดึงของ Shear Connector แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ยกเว้นตัวอย่าง RB9-25-70-HC150 มีค่าที่ได้สูงกว่าที่กำหนดไว้มาก เนื่องจากรายการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตผิดพลาด สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของ Shear Connector ส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงดึงระบุ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตและกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเส้น

ตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (MPa)		กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (MPa)
	กำหนด	ทดสอบ	
RB9-25-70-HC150	25	37.7	414.8
DB12-25-50-HC100	25	24.5	554.6
DB12-25-70-HC100	25	26.0	554.6
DB12-25-100-HC100	25	24.6	554.6
DB12-28-70-HC100	28	33.8	518.8
DB16-25-70-HC100	25	23.9	445.1
DB16-28-70-HC100	28	28.4	480.4
DB12-25-70-HC150	25	25.5	464.9
DB12-28-70-HC150	28	28.4	554.6
DB16-25-70-HC150	25	25.0	443.6
DB16-28-70-HC150	28	26.9	469.7
DB16-28-70-HC100*	28	27.8	444.3

* ตัวอย่างทดสอบเสริมเหล็กป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Wire Mesh)

4.2 ผลการทดสอบแรงกด (Push off Test)

ผลการทดสอบได้ค่าแรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ ค่าระยะการเคลื่อนตัว ค่า Strain ที่ได้จากการติด Strain Gage ที่ผิวของ Shear Connector และค่าแรงกระทำสูงสุดต่อระยะเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ Push-off

ตัวอย่าง	แรงกระทำสูงสุด (kN)	แรงกระทำสูงสุดต่อ Shear connector (kN)	ระยะเคลื่อนตัวที่แรงกระทำสูงสุด (mm)	แรงกระทำต่อระยะเคลื่อนตัว (kN/mm)**
RB9-25-70-HC150	455.9	27.9	6.2	4.50
DB12-25-50-HC100	548.1	23.2	1.3	17.85
DB12-25-70-HC100	372.0	34.3	6.3	5.44
DB12-25-100-HC100	387.0	24.2	4.6	5.26
DB12-28-70-HC100	490.0	30.6	3.5	8.74
DB16-25-70-HC100	552.0	32.6	4.3	7.58
DB16-28-70-HC100	551.0	34.4	3.0	11.47
DB12-25-70-HC150	488.0	30.5	3.7	8.24
DB12-28-70-HC150	461.0	28.8	1.9	15.16
DB16-25-70-HC150	496.0	31.0	4.5	6.89
DB16-28-70-HC150	544.0	34.0	4.4	7.73
DB16-28-70-HC100*	639.0	39.9	5.2	7.67

* ตัวอย่างทดสอบเสริมเหล็กป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Wire Mesh)

** แรงกระทำต่อระยะการเคลื่อนตัว = แรงกระทำสูงสุดต่อ Shear Connector / ระยะการเคลื่อนตัวที่แรงกระทำสูงสุด

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะมีตัวอย่างที่ใช้ Shear Connector RB9 เพียง 1 ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาที่แรงกระทำสูงสุดจะพบว่าค่าระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็น Shear Connector ในคานเหล็กเชิงประกอบได้

4.2.1 การวิเคราะห์ค่า Strain ของ Shear Connector

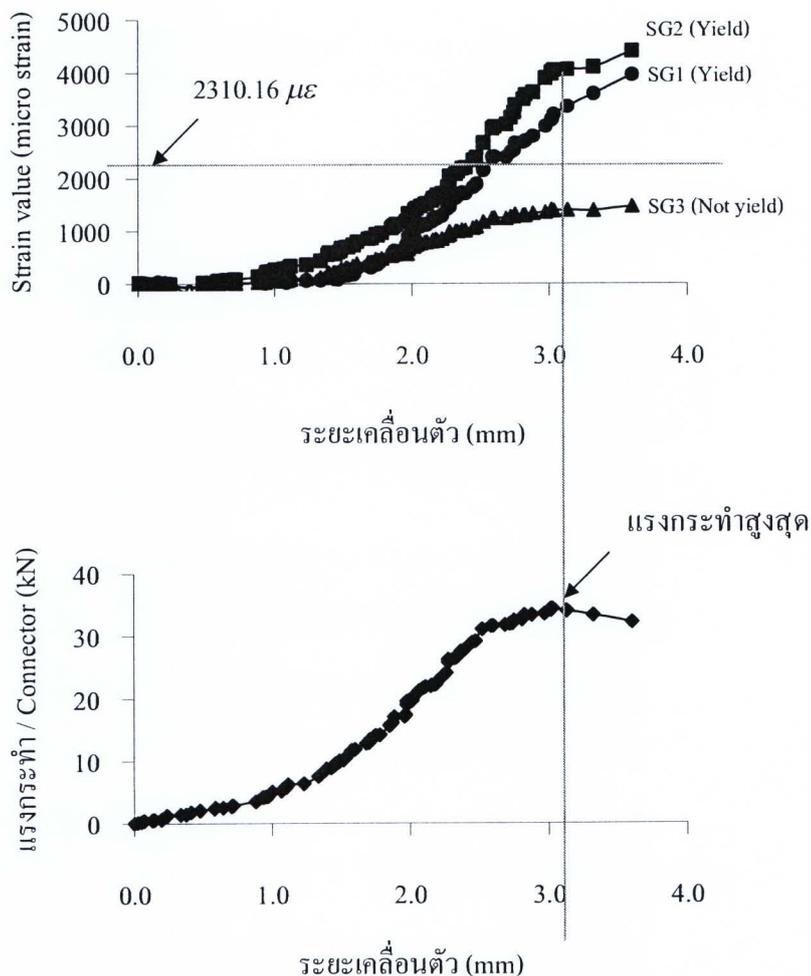
ค่า Strain ที่อ่านได้ขณะทดสอบ และรูปแบบการวิบัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า Strain ที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบตัวอย่าง

ตัวอย่าง	Yield Strain ($\mu\epsilon$)	ค่า Strain จากการทดสอบ ($\mu\epsilon$)		ประเภทของการวิบัติ
		Strain at max. load ($\mu\epsilon$)	Yield Strain ($\mu\epsilon$)	
RB9-25-70-HC150	1994.70	-	2052	SCF
DB12-25-50-HC100	2666.97	2115	3217	ไม่สามารถสรุปได้
DB12-25-70-HC100	2666.97	-	2733	SCF
DB12-25-100-HC100	2666.97	-	2870	SCF
DB12-28-70-HC100	2494.77	1480	-	VCS
DB16-25-70-HC100	2140.41	-	2339	SCF
DB16-28-70-HC100	2310.16	1383	2405	ไม่สามารถสรุปได้
DB12-25-70-HC150	2235.57	-	2248	SCF
DB12-28-70-HC150	2666.97	1202	2766	ไม่สามารถสรุปได้
DB16-25-70-HC150	2133.19	1183	2181	ไม่สามารถสรุปได้
DB16-28-70-HC150	2258.70	1352	2284	ไม่สามารถสรุปได้
DB16-28-70-HC100*	2136.56	-	2158	SCF

* ตัวอย่างทดสอบเสริมเหล็กป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Wire Mesh)

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างมีรูปแบบการวิบัติ 2 รูปแบบ คือเกิดการวิบัติโดย Shear Connector (SCF) หมายถึง Shear Connector สามารถรับแรงถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว ซึ่งเกิดขึ้น 6 ตัวอย่าง และมีรูปแบบการวิบัติโดยคอนกรีตทับหน้า (VCS) หมายถึง Shear Connector รับแรงถึงจุดครากหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งมี 1 ตัวอย่าง คือตัวอย่างทดสอบ DB12-28-70-HC100 ส่วนอีก 5 ตัวอย่างยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าเกิดการวิบัติรูปแบบใดเนื่องจากอาจพิจารณาเป็นการวิบัติได้ทั้ง 2 กรณี เช่น ตัวอย่างทดสอบ DB16-28-70-HC100 ติด Strain Gages จำนวน 3 ตัว มี Strain Gages หนึ่งตัวอ่านค่า Strain ได้น้อยกว่า ค่า Yield Strain ที่คำนวณได้แสดงว่า Shear Connector รับน้อยกว่ากำลังครากในขณะที่เกิดการแตกร้าวที่คอนกรีต แต่ Strain Gages อีก 2 ตัว อ่านค่า Strain ได้มากกว่า ค่า Yield Strain ที่คำนวณได้แสดงว่า Shear Connector รับแรงถึงจุดครากก่อนคอนกรีตแตกร้าว เรียกว่าการวิบัติโดย Shear Connector รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างข้อมูล Strain ของตัวอย่างที่ไม่สามารถสรุปรูปแบบการวิบัติได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่า Strain และแรงกระทำ กับระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่าง DB16-28-70-HC100

4.3 อภิปรายผลการทดสอบ

การอภิปรายผลการทดสอบจะอภิปรายแยกในแต่ละตัวแปร คือ ขนาด Shear Connector กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น (Gap) และความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูป ที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector เนื่องจากขนาด Shear Connector และกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าจะมีผลสอดคล้องกันอย่างน้อยสำคัญ ดังนั้นจึงทำการสรุปผลของทั้งสองตัวแปรในหัวข้อเดียวกัน

4.3.1 ขนาด Shear Connector และกำลังอัดคอนกรีตทับหน้าที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการเพิ่มขนาด Shear Connector จาก DB12 เป็น DB16 โดยจะเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector เป็นคู่ เช่นตัวอย่าง DB12-25-70-HC100 และ DB16-25-70-HC100 ซึ่งจะมีตัวแปรที่เหมือนกันยกเว้นขนาด Shear Connector

ตารางที่ 4.4 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนขนาด Shear Connector

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงเฉือน (kN)	ประเภทของการวิบัติ	ผลต่าง (ร้อยละ)
DB12-25-70-HC100	34.3	SCF**	ลดลงร้อยละ 5
DB16-25-70-HC100	32.6	ไม่สามารถสรุปได้	
DB12-25-70-HC150	30.5	SCF	เพิ่มขึ้นร้อยละ 2
DB16-25-70-HC150	31.0	ไม่สามารถสรุปได้	
DB12-28-70-HC100	30.6	VCS**	เพิ่มขึ้นร้อยละ 12
DB16-28-70-HC100	34.4	ไม่สามารถสรุปได้	
DB12-28-70-HC150	28.8	ไม่สามารถสรุปได้	เพิ่มขึ้นร้อยละ 18
DB16-28-70-HC150	34.0	ไม่สามารถสรุปได้	
DB16-28-70-HC100	34.4	ไม่สามารถสรุปได้	เพิ่มขึ้นร้อยละ 16
DB16-28-70-HC100*	39.9	SCF	

* ตัวอย่างทดสอบเสริมเหล็กป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Wire Mesh)

** SCF คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่ Shear Connector

VCS คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่คอนกรีตทับหน้า

จากตารางที่ 4.4 การเพิ่มขนาดเหล็ก Shear Connector จาก DB12 เป็น DB16 โดยใช้กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า 25 MPa พบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงประมาณร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าน้อยมากหรืออาจสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาการเพิ่มขนาด Shear Connector จาก DB12 เป็น DB16 ในกรณีที่ใช้กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า 28 MPa จะพบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12-18 จะเห็นได้ว่าขนาดของ Shear Connector จะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector เฉพาะกรณีที่ใช้คอนกรีตทับหน้าที่ 28 MPa ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ขนาดของ Shear Connector และกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าจะต้องสัมพันธ์กัน

เมื่อนำผลการทดสอบมาจัดเรียงใหม่เพื่อแสดงผลกระทบของการเปลี่ยนกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า โดยจะเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector เป็นคู่ตามขนาดของ Shear Connector จะได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงเฉือน (kN)	ประเภทของการวิบัติ	ผลต่าง (ร้อยละ)
DB12-25-70-HC100	34.3	SCF**	ลดลงร้อยละ 10
DB12-28-70-HC100	30.6	VCS**	
DB16-25-70-HC100	32.6	ไม่สามารถสรุปได้	เพิ่มขึ้นร้อยละ 5
DB16-28-70-HC100	34.4	ไม่สามารถสรุปได้	
DB12-25-70-HC150	30.5	SCF	ลดลงร้อยละ 6
DB12-28-70-HC150	28.8	ไม่สามารถสรุปได้	
DB16-25-70-HC150	31.0	ไม่สามารถสรุปได้	เพิ่มขึ้นร้อยละ 9
DB16-28-70-HC150	34.0	ไม่สามารถสรุปได้	

** SCF คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่ Shear Connector

VCS คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่คอนกรีตทับหน้า

จากตารางที่ 4.5 พิจารณาผลของการเปลี่ยนกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าตัวอย่างที่ใช้ Shear Connector DB12 คือตัวอย่าง DB12-25-70-HC100 เทียบกับตัวอย่าง DB12-28-70-HC100 และตัวอย่าง DB12-25-70-HC150 เทียบกับตัวอย่าง DB12-28-70-HC150 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ลดลงประมาณร้อยละ 6-10 เมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าจาก 25 MPa เป็น 28 MPa ทั้งนี้เมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่ใช้เหล็ก DB12 เป็น Shear Connector พบว่า Shear Connector DB12 จะรับแรงถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ดังนั้นการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าจึงไม่ได้ทำให้กำลังรับแรงโดยรวมสูงขึ้น ส่วนผลการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ Shear Connector DB16 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตจาก 25 เป็น 28 MPa โดยจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 6-9 ถึงแม้จะยังไม่สามารถสรุปได้ว่า Shear Connector DB16 สามารถรับแรงจนถึงจุดครากหรือไม่

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลเนื่องจากขนาด Shear Connector และค่ากำลังของคอนกรีตทับหน้าได้ว่า ที่กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า 25 MPa ควรใช้ Shear Connector DB12 เนื่องจากที่กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า 25 MPa Shear Connector DB12 จะสามารถรับแรงจนถึงจุดครากก่อนคอนกรีตแตกร้าวได้แล้ว หากใช้กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าที่เกิน 25 MPa จะเป็นการสิ้นเปลืองเนื่องจากไม่ส่งผลในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector แต่เมื่อใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าที่เกิน 25 MPa เช่น 28 MPa ตามการศึกษานี้ก็ควรเพิ่มขนาด Shear Connector เป็น DB16 เพื่อที่จะเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ให้สัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าที่สูงขึ้น

4.3.2 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector

ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นนับว่ามีความสำคัญไม่น้อยกว่าขนาดของ Shear Connector และกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้าที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน ในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น 3 ค่า คือ 50 70 และ 100 mm ดังตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบที่จัดเรียงตามระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น

ตารางที่ 4.6 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงเฉือน (kN)	ประเภทของการวิบัติ	ผลต่าง (ร้อยละ)
DB12-25-50-HC100	23.2	ไม่สามารถสรุปได้	เพิ่มขึ้นร้อยละ 48
DB12-25-70-HC100	34.3	SCF**	
DB12-25-70-HC100	34.3	SCF	ลดลงร้อยละ 29
DB12-25-100-HC100	24.2	SCF	

** SCF คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่ Shear Connector

VCS คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่คอนกรีตทับหน้า

ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector แต่เนื่องจากข้อมูลการทดสอบจำกัด จึงยังไม่สามารถสรุปอิทธิพลของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นต่อกำลังรับแรงเฉือนได้ นอกจากนี้การหล่อคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบในแนวตั้งสำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นน้อย ๆ สามารถกระทำได้อย่างยากเนื่องจากคอนกรีตไม่เข้าแบบจึงอาจทำให้ผลการทดสอบมีความแปรปรวนได้มาก ในการใช้งานจริงในกรณีที่ยังไม่มีผลการศึกษาวิจัยมายืนยันควรจะเลือกใช้ ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นที่เหมาะสมตามงานวิจัยของ Lam และคณะ [9] คือไม่น้อยกว่า 30 mm และไม่เกิน 70 mm

4.3.3 ผลของความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูปต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector
ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้แผ่นพื้นคอนกรีต 2 ชนิด คือ HC100 และ HC150 ที่มี ความหนาเท่ากับ 100 และ 150 mm ตามลำดับ ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบที่นำมาจัดเรียงเป็นคู่ตามขนาดของความหนาของแผ่นพื้น

ตารางที่ 4.7 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูป

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงเฉือน (kN)	ประเภทของการวิบัติ	ผลต่าง (ร้อยละ)
DB12-25-70-HC100	34.3	SCF**	ลดลงร้อยละ 11
DB12-25-70-HC150	30.5	SCF	
DB12-28-70-HC100	30.6	VCS**	ลดลงร้อยละ 6
DB12-28-70-HC150	28.8	ไม่สามารถสรุปได้	
DB16-25-70-HC100	32.6	ไม่สามารถสรุปได้	ลดลงร้อยละ 5
DB16-25-70-HC150	31.0	ไม่สามารถสรุปได้	
DB16-28-70-HC100	34.4	ไม่สามารถสรุปได้	ลดลงร้อยละ 1
DB16-28-70-HC150	34.0	ไม่สามารถสรุปได้	

** SCF คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่ Shear Connector

VCS คือ ตัวอย่างทดสอบวิบัติที่คอนกรีตทับหน้า

จากตารางที่ 4.7 การเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นจะทำให้ความชะลูดของ Shear Connector สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลง พิจารณาตัวอย่าง DB12-25-70-HC100 และ DB12-25-70-HC150 ผลต่างของค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงร้อยละ 11 เนื่องจาก Shear Connector ของตัวอย่าง DB12-25-70-HC150 มีการเสียรูปมากกว่า Shear Connector ของตัวอย่าง DB12-25-70-HC100 ผลของความหนาของแผ่นพื้นจะน้อยลงในกรณีที่ใช้ขนาด Shear Connector เป็น DB16

4.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก Shear Connector กับสมการ

มาตรฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยครั้งนี้จะนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ งานวิจัยของ Limwuttigrajirat ข้อกำหนด AISC มาตรฐาน EC4 และ BS5950 ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4.8 โดยการเปรียบเทียบในแต่ละกรณีเป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector จากการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบที่เทียบกับมาตรฐานและข้อกำหนด										
	แรงกระทำสูงสุด / Shear Connector (kN)	P_{LAM}	P_{test}/P_{LAM}	$P_{Vorsait}$	$P_{test}/P_{Vorsait}$	P_{AISC}	P_{test}/P_{AISC}	P_{EC4}	P_{test}/P_{EC4}	P_{BSS950}	P_{test}/P_{BSS950}
RB9-25-70-HC150	28.50	15.67	1.78	30.33	0.92	35.86	0.78	21.18	1.32	20.42	1.23
DB12-25-50-HC100	34.30	21.58	1.08	32.59	0.71	46.12	0.50	27.25	0.85	26.26	0.50
DB12-25-70-HC100	23.20	25.88	1.32	33.63	1.02	48.34	0.71	28.56	1.20	27.52	0.74
DB12-25-100-HC100	24.20	25.23	0.96	32.68	0.74	46.31	0.52	27.36	0.88	26.37	0.52
DB12-28-70-HC100	30.60	29.18	1.05	38.32	0.80	58.79	0.52	34.73	0.88	33.47	0.66
DB16-25-70-HC100	32.60	49.85	0.65	42.96	0.76	80.60	0.40	47.62	0.69	45.89	0.42
DB16-28-70-HC100	34.40	53.83	0.64	46.84	0.74	91.74	0.38	54.20	0.64	52.24	0.43
DB12-25-70-HC150	30.50	25.64	1.19	33.28	0.92	47.59	0.64	28.12	1.08	27.10	0.66
DB12-28-70-HC150	28.80	26.91	1.07	35.13	0.82	51.61	0.56	30.49	0.94	29.39	0.62
DB16-25-70-HC150	31.00	50.58	0.61	43.95	0.71	83.39	0.37	49.27	0.63	47.49	0.39
DB16-28-70-HC150	34.00	52.54	0.65	45.60	0.75	88.14	0.39	52.07	0.65	50.19	0.42
DB16-28-70-HC100*	39.90	53.33	0.75	46.36	0.86	90.33	0.44	53.37	0.75	51.44	0.46

4.4.1 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ

สมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ ที่จะนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบนั้นคือสมการดังนี้

$$P_{RD} = 0.29\alpha\beta\lambda d^2 \sqrt{(\omega f_{cp} E_{cp})} / \gamma_v \leq 0.8 f_u \times \pi d^2 / 4 \gamma_v \quad (4.4)$$

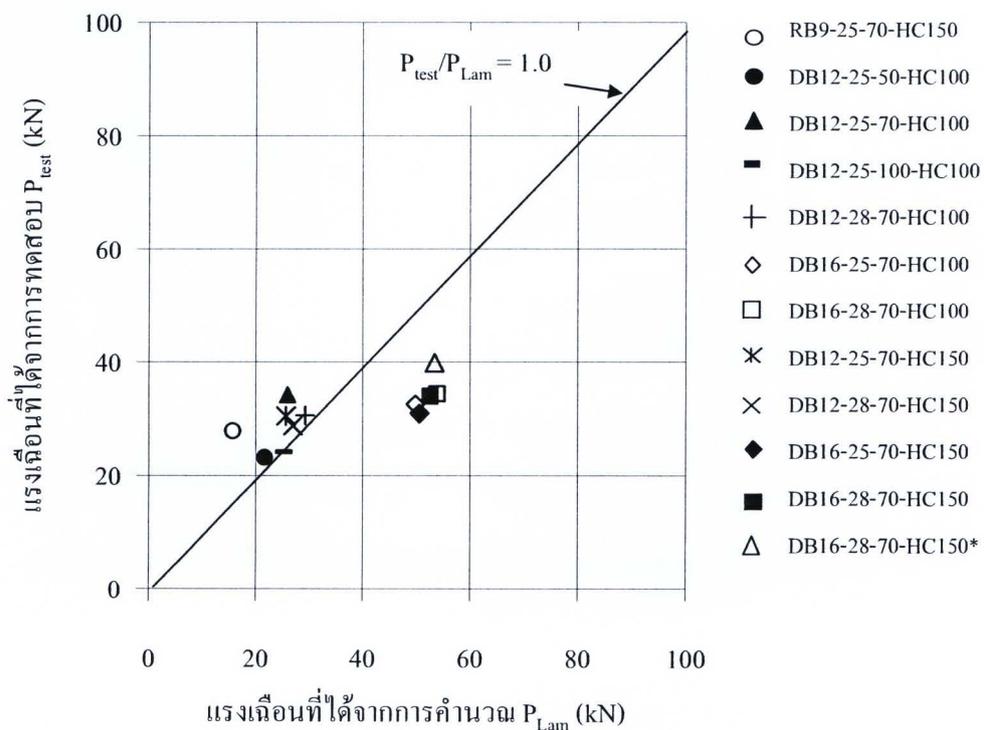
สมการที่ 4.4 เป็นสมการที่พัฒนาจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง โดยจะพิจารณารูปแบบการวิบัติ 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่คอนกรีตได้กำลังรับแรงดังสมการที่ 4.5

$$P_{RD} = 0.29\alpha\beta\lambda d^2 \sqrt{(\omega f_{cp} E_{cp})} / \gamma_v \quad (4.5)$$

กรณีที่ 2 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่ Shear Stud ได้กำลังรับแรงดังสมการที่ 4.6

$$P_{RD} = 0.8 f_u \times \pi d^2 / 4 \gamma_v \quad (4.6)$$

ในการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการนั้นจะใช้ค่าน้อยที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ (P_{test}) และกำลังรับแรงเฉือนจากงานวิจัยของ Lam และคณะ (P_{Lam})



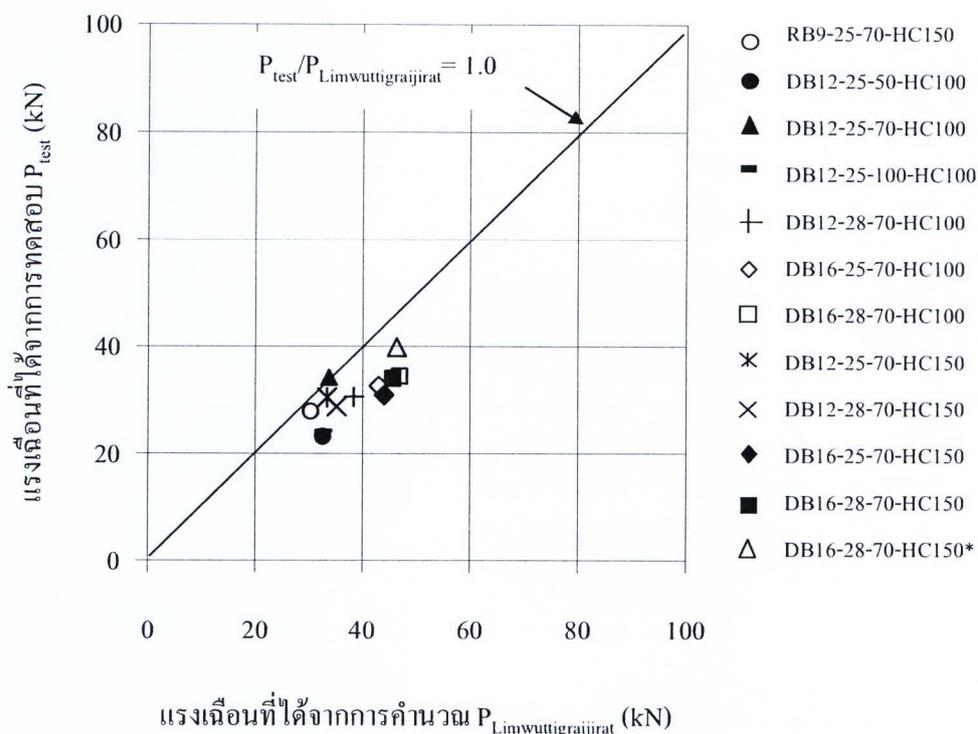
จากรูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB12 ค่า P_{test} / P_{Lam} ที่ได้จะมีค่ามากกว่า 1 หมายถึงค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณซึ่งจะสังเกตได้จากค่า P_{test} / P_{Lam} ที่อยู่เหนือเส้น 45 องศา ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB16 ค่า P_{test} / P_{Lam} จะต่ำกว่า 1 มาก เนื่องจากเหล็ก DB16 รับแรงถึงจุดครากหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เหล็ก DB16 เป็น Shear Connector ไม่สามารถใช้สมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ มาคำนวณได้

4.4.2 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสมการในงานวิจัยของ Limwuttigraijirat

สำหรับสมการจากงานวิจัยของ Limwuttigraijirat ที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้นได้มาจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตรูปตัว U ในแผ่นพื้นคอนกรีตตัน (Solid RC) ซึ่งถือว่ามีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยครั้งนี้มากเนื่องจากใช้เหล็ก Shear Connector ชนิดเดียวกันคือเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตแตกต่างกันเพียงลักษณะการเชื่อมยึดเหล็ก Shear Connector กับคานเหล็กรูปพรรณ โดยสมการที่ได้จากงานวิจัยของ Limwuttigraijirat คือ

$$P_u = 715D\sqrt{f'_c} \quad (4.7)$$

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบกับสมการที่ 4.7 แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ (P_{test}) และกำลังรับแรงเฉือนจากงานวิจัยของ Limwuttigrajirat ($P_{Limwuttigrajirat}$)

จากรูปที่ 4.3 ค่า $P_{test} / P_{Limwuttigrajirat}$ ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียง 1 มาก เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณสมการที่ 4.7 ได้จากการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนของ Shear Connector ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยครั้งนี้ ดังนั้น การประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector สามารถนำสมการที่ 4.7 มาประยุกต์ใช้ได้

4.4.3 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสมการข้อกำหนด AISC

ในข้อกำหนด AISC และมาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กรูปพรรณโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กำหนดสมการสำหรับประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud คือ

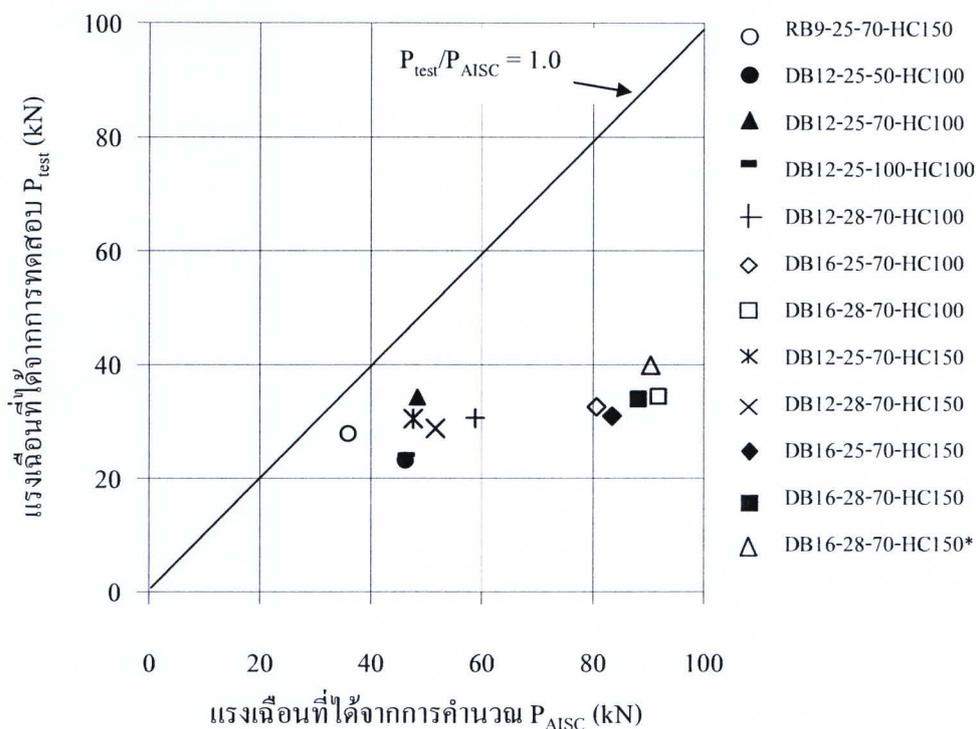
$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc}F_u \quad (4.8)$$

สมการที่ 4.8 จะครอบคลุมรูปแบบการวิบัติ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่คอนกรีต ดังสมการที่ 4.9 และกรณีที่ 2 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่ Shear Stud ดังสมการที่ 4.10

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f_c'E_c} \quad (4.9)$$

$$Q_n = A_{sc}F_u \quad (4.10)$$

ในการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการนั้นจะใช้ค่าน้อยที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 โดยการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ (P_{test}) และกำลังรับแรงเฉือนจากสมการข้อกำหนด AISC (P_{AISC})

ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าการเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่า P_{test} / P_{AISC} ต่ำกว่า 1 มาก ดังนั้นการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก Shear Connector โดยใช้สมการที่ 4.9 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยใช้เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตได้เนื่องจากค่าที่ได้จากสมการมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ อีกทั้งสมการที่ 4.6 เป็นสมการที่พัฒนามาจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยใช้พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของ Shear Connector ประเภทเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต โดยใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจึงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นมาก นอกจากนี้สำหรับตัวอย่างทดสอบ

ทั้ง 12 ตัวอย่าง รูปแบบการวิบัติที่ได้จากสมการ AISC จะเป็นรูปแบบการวิบัติที่คอนกรีตทั้งชิ้น ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมจริงที่สังเกตได้ในงานวิจัยนี้

4.4.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสมการมาตรฐาน EC 4

สมการในมาตรฐาน EC 4 เป็นสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่ (RC Solid) แสดงดังสมการที่ 4.11

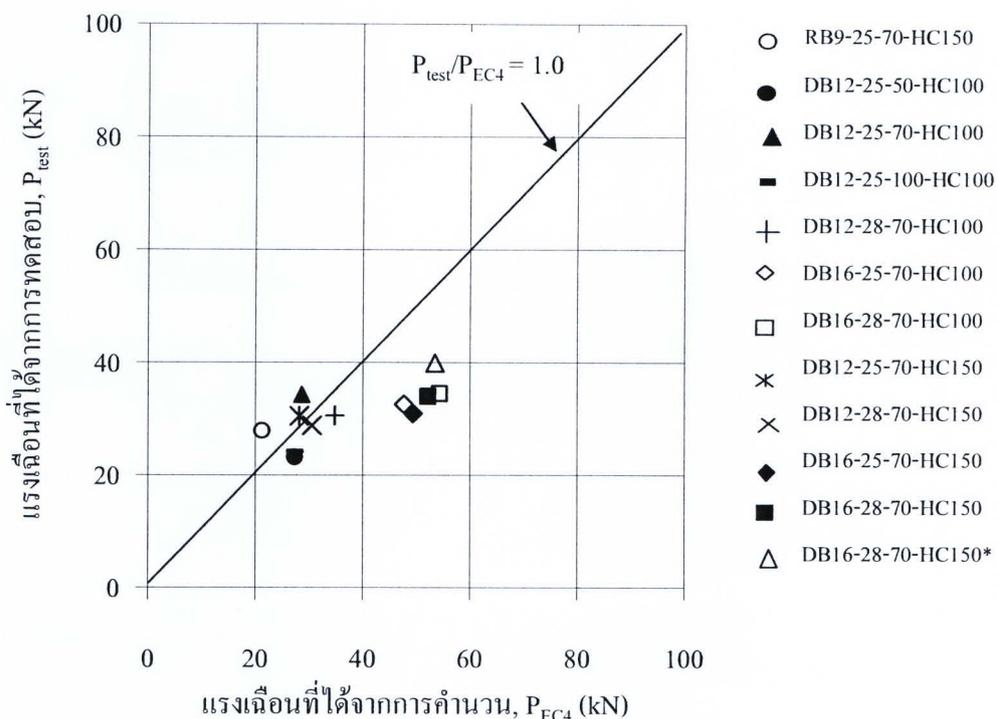
$$P_{RD} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{(f_{ck} E_c)} / \gamma_v \leq 0.8 f_u \pi d^2 / 4\gamma_v \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.11 มีการคำนวณแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่คอนกรีต ดังสมการที่ 4.12 และกรณีที่ 2 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่ Shear Stud ดังสมการที่ 4.13

$$P_{RD} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{(f_{ck} E_c)} / \gamma_v \quad (4.12)$$

$$P_{RD} = 0.8 f_u \pi d^2 / 4\gamma_v \quad (4.13)$$

การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector ที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการนั้นจะใช้ค่าน้อยที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.12 และ 4.13 เป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ (P_{test}) และกำลังรับแรงเฉือนจากสมการมาตรฐาน EC4 (P_{EC4})

จากรูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบจะคล้ายกับกรณีที่สมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4.1 กล่าวคือตัวอย่างที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB12 ค่า P_{test} / P_{EC4} ที่ได้จะมีค่ามากกว่า 1 สังเกตได้จากค่า P_{test} / P_{EC4} ที่อยู่เหนือเส้น 45 องศา ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB16 ค่า P_{test} / P_{EC4} จะต่ำกว่า 1 มาก เนื่องจากเหล็ก DB16 รับแรงถึงจุดครากหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว อนึ่งสมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง ส่วนสมการในมาตรฐาน EC 4 เป็นสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่ (RC Solid)

4.4.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนกับสมการมาตรฐาน BS5950

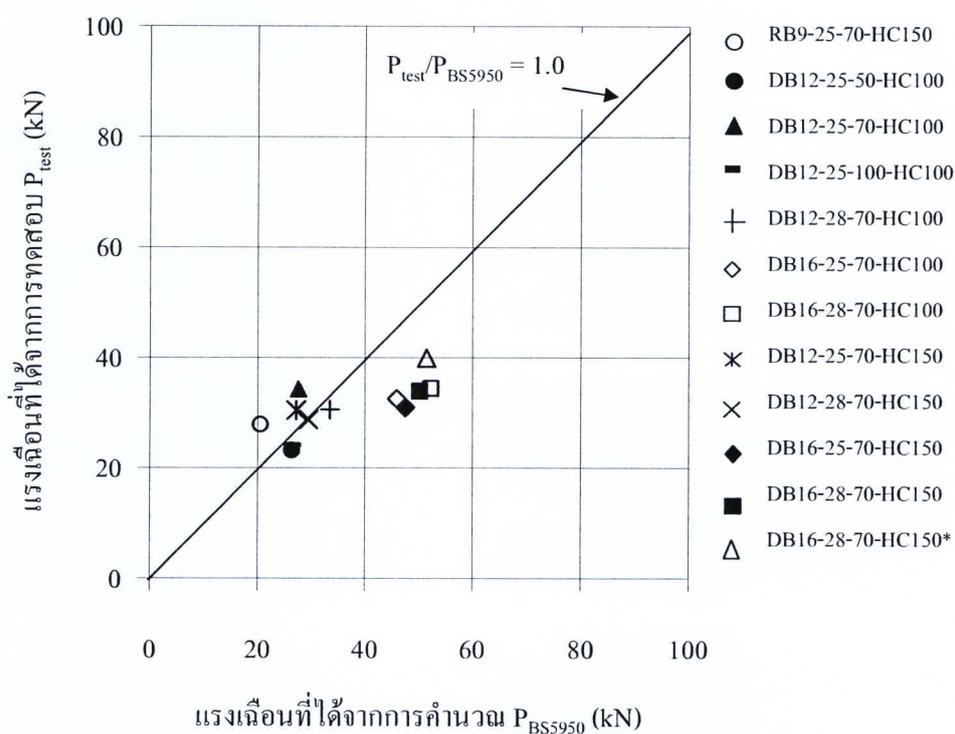
สมการในมาตรฐาน BS5950 เป็นสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่ (RC Solid) เช่นเดียวกับสมการในมาตรฐาน EC4 แสดงดังนี้

$$Q_k = 0.25\alpha d^2 \sqrt{0.8f_{cu}E_c} \leq 0.6f_u \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.14)$$

สมการที่ 4.14 มีการคำนวณแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่คอนกรีต ดังสมการที่ 4.15 และกรณีที่ 2 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่ Shear Stud ดังสมการที่ 4.16

$$Q_k = 0.25\alpha d^2 \sqrt{0.8f_{cu}E_c} \quad (4.15)$$

$$Q_k = 0.6f_u \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ (P_{test}) และกำลังรับแรงเฉือนจากสมการมาตรฐาน BS5950 (P_{BS5950})

จากรูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบจะคล้ายคลึงกับในกรณีที่เปรียบเทียบกับสมการจากงานวิจัยของ Lam และคณะ สมการมาตรฐาน EC4 และ BS5950 กล่าวคือ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB12 ค่า P_{test} / P_{BS5950} ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ส่วนกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB16 ค่า P_{test} / P_{BS5950} จะต่ำกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการงานวิจัยของ Lam และคณะ

สมการมาตรฐาน EC4 และ BS5950 สามารถนำมาประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนได้เฉพาะกรณีที่ใช้เหล็ก Shear Connector ขนาด DB 12 เท่านั้น

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณได้จากสมการข้อกำหนด AISC มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมากดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ สำหรับการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับสมการในงานวิจัยของ Lam สมการมาตรฐาน EC4 และ BS5950 จะมีลักษณะคล้ายกัน คือค่าที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่ใช้เหล็ก Shear Connector DB12 เท่านั้น ส่วนกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการในงานวิจัย Limwutti-grajirat มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้