

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องค์ประกอบสำคัญของคานเหล็กเชิงประกอบ คือ Shear Connector ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนระหว่างคานเหล็กรูปพรรณและแผ่นพื้นคอนกรีต ค่ากำลังรับแรงเฉือนของอุปกรณ์ต้านทานแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการจากข้อกำหนดและมาตรฐานต่าง ๆ รวมถึงสมการจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ตามมาตรฐานสากล

ข้อกำหนด AISC [1] และมาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กรูปพรรณ โดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ [10] กำหนดสมการสำหรับค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud คือ

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc}F_u \quad (2.1)$$

เมื่อ A_{sc} คือพื้นที่หน้าตัดของ Shear Stud (mm^2)

f'_c คือกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก (MPa)

E_c คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)

F_u คือกำลังรับแรงดึงประลัยของ Shear Stud (MPa)

มาตรฐาน BS5950 [2] กำหนดให้คำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q_k = 0.25\alpha d^2 \sqrt{0.8f_{cu} E_c} \leq 0.6f_u \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\alpha = 0.2(h/d + 1) < 1.0$

h คือความสูงของ Shear Stud (mm)

d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Shear Stud (mm)

f_{cu} คือกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก (MPa)

E_c คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)

f_u คือกำลังรับแรงดึงประลัยของ Shear Stud (MPa)

นอกจากนี้มาตรฐาน BS5950 [2] ได้กำหนดค่าในการรับแรงเฉือนของ Shear Stud ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคอนกรีตธรรมดา หากใช้คอนกรีตน้ำหนักเบาจะต้องลดค่ากำลังรับแรงเฉือนลง 10 % หมายถึงให้ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เท่ากับ 90% ของค่าในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud (kN) ตามมาตรฐาน BS5950 [2]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Shear Stud (mm)			กำลังอัดของคอนกรีต (MPa)			
Diameter	Nominal Height	As-Welded Height*	25	30	35	≥ 40
25	100	95	146	154	161	168
22	100	95	119	236	132	139
19	100	95	95	100	104	109
19	75	70	82	87	91	96
16	75	70	70	74	78	82
13	65	60	44	47	49	52

* As-Welded Height คือ ความสูงของ Shear Stud ภายหลังจากเชื่อมติดกับเหล็กรูปพรรณ

มาตรฐาน EC 4 [7] กำหนดให้คำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ดังนี้

$$P_{RD} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_c} / \gamma_v \leq 0.8 f_u \pi d^2 / 4 \gamma_v \quad (2.3)$$

เมื่อ f_{ck} คือกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก (MPa)

γ_v คือค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.25

α และ d เหมือนกับค่าที่แสดงในสมการที่ 2.2

สมการที่ 2.1 ถึงสมการที่ 2.3 เป็นสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทแผ่นพื้นคอนกรีตตัน (Solid Reinforced Concrete) วางบนหลังคานเหล็กรูปพรรณเท่านั้น

2.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Lam และคณะ [3] ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวงวางบนหลังคาน โดยทำการทดสอบแรงกดแบบ Component จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยศึกษาตัว

แปร์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น (Gap) ขนาดเหล็กเสริมแนวขวาง และกำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า ดังตารางที่ 2.2 รายละเอียดในการจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบในการศึกษาของ Lam และคณะ [3]

ตัวอย่างทดสอบ	ชนิดของแผ่นพื้น	ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น (mm)	เหล็กเสริมแนวขวาง	จำนวน Shear Stud (ตัว)
T8-25-40	600 HCU	40	4 No. T8	6
T8-25-65	600 HCU	65	4 No. T8	6
T8-25-65P	1200 HCU	65	4 No. T8	6
T8-25-65	1200 HCU	65	4 No. T8	6
T8-25-120	600 HCU	120	4 No. T8	6
T16-25-65*	600 HCU	65	4 No. T16	6
T16-25-65	600 HCU	65	4 No. T16	6
T16-25-65	1200 HCU	65	4 No. T16	6
T25-25-40	1200 HCU	40	4 No. T25	6
T25-25-65	600 HCU	65	4 No. T25	6
T8-38-RC	Solid RC	N/A	4 No. T8	6
T16-25-RC	Solid RC	N/A	4 No. T8	6

หมายเหตุ

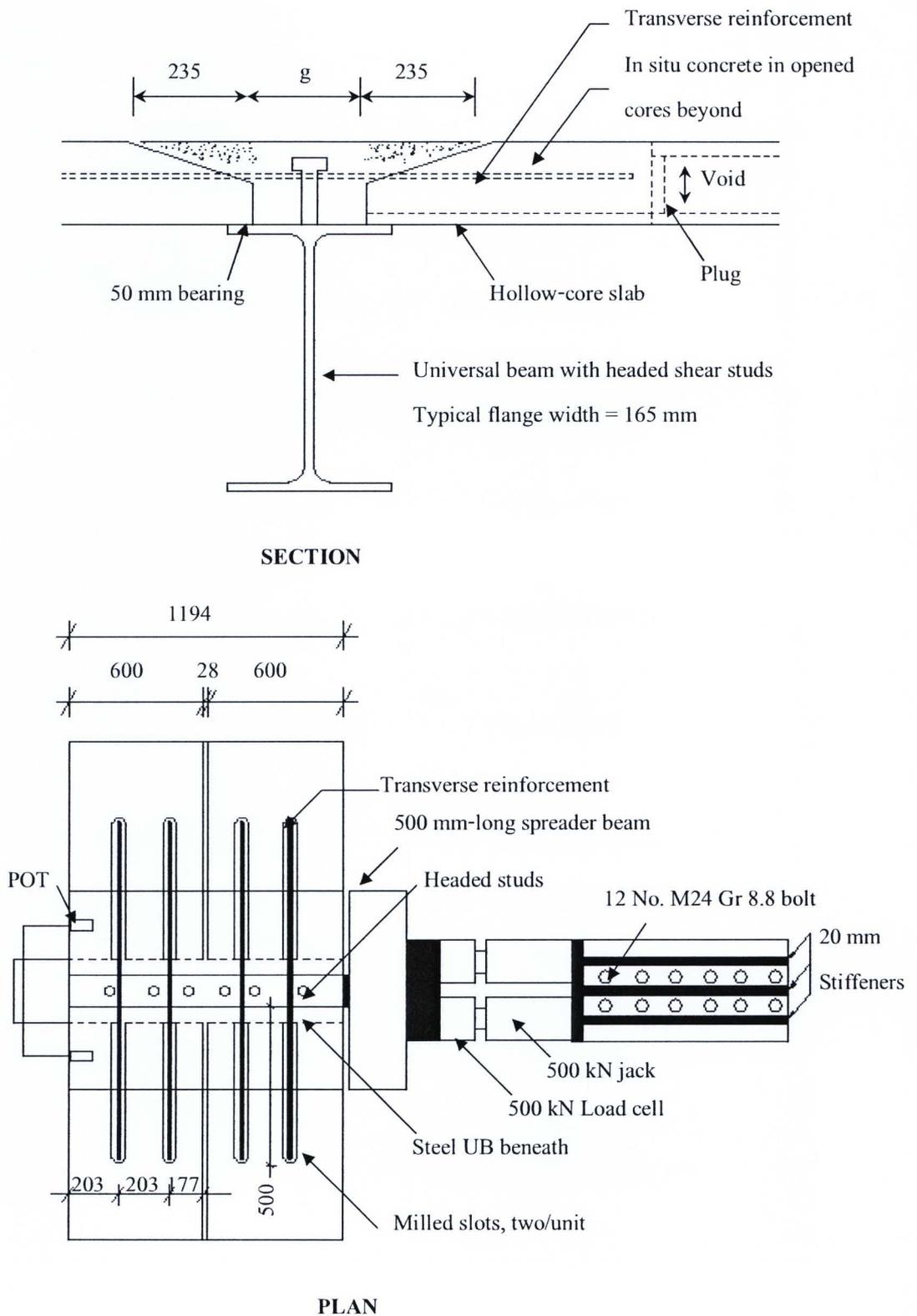
สัญลักษณ์* ต้องทำการทดสอบซ้ำเนื่องจากเกิดการผิดพลาดในการทดสอบ

สัญลักษณ์ P หมายถึง ใช้ polyethylene ป้องกันการแตกร้าวเริ่มแรก

สัญลักษณ์ T8-25-65 หมายถึง เหล็กเส้นแรงดึงสูงขนาด 8 mm, กำลังอัดคอนกรีต 25 MPa และ ระยะห่างระหว่างขอบแผ่นพื้น 65 mm

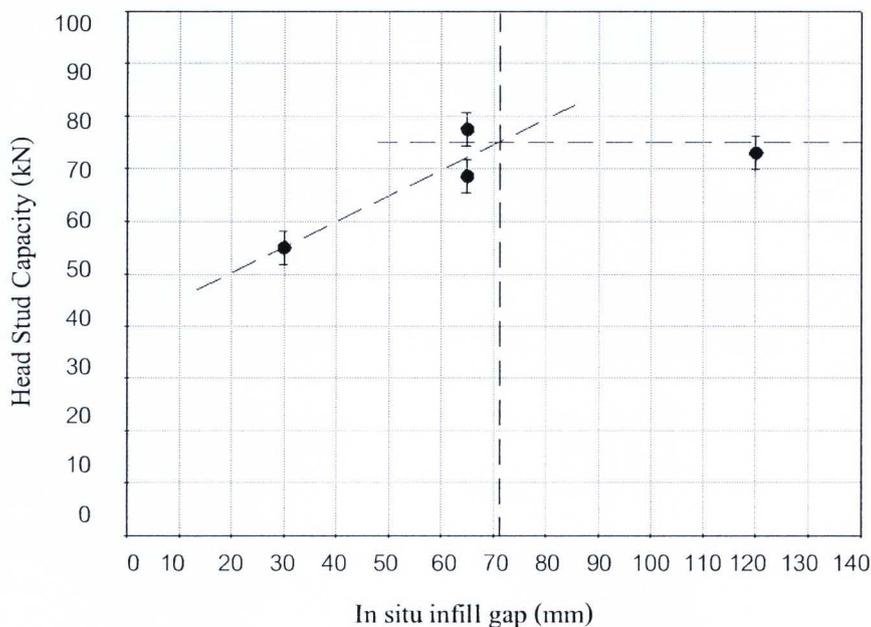
สัญลักษณ์ RC หมายถึง พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

สัญลักษณ์ hcu หมายถึง พื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง



รูปที่ 2.1 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างทดสอบในการศึกษาของ Lam และคณะ [3]

ผลการทดสอบการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น โดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น 70 mm จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ดีที่สุด เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นมากกว่า 70 mm ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ที่ใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นมากกว่า 70 mm ขึ้นไปมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังได้แนะนำค่าระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นในทางปฏิบัติจริงไม่ควรน้อยกว่า 30 mm



รูปที่ 2.2 กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เทียบกับระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น ในการศึกษาของ Lam และคณะ [3]

ผลการทดสอบการเปลี่ยนขนาดเหล็กเสริมแนวขวางที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud พบว่าการเพิ่มขนาดเหล็กเสริมแนวขวางทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบคือ การเพิ่มขนาดเหล็กเสริมแนวขวางจะส่งผลให้ระยะหุ้มคอนกรีตลดลงเมื่อวางเหล็กเสริมในช่องของแผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง (Milled Slot) ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำค่าอัตราส่วนสูงสุดในการเสริมเหล็กแนวขวางเท่ากับร้อยละ 0.66 ของพื้นที่คอนกรีต

ผลการทดสอบการเปลี่ยนกำลังอัดคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยพิจารณาตัวอย่าง T8-25-120 และ T8-38-RC ที่มีค่ากำลังอัดคอนกรีตต่างกัน 13 N/mm^2 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ไม่มีความแตกต่างกัน (72.8 kN และ 72.9 kN ตามลำดับ)

ในงานวิจัยครั้งนี้ Lam และคณะ [3] ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ที่ได้จากการทดสอบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณสมการมาตรฐาน BS5950 และ EC4 คือสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จากการทดสอบและสมการมาตรฐาน BS5950 และ EC4 ในการศึกษาของ Lam และคณะ [3]

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด Q_T (kN)	ระยะเคลื่อนตัว (mm)	อัตราส่วน $Q_T /$ BS5950, $Q_k^{(1)}$	อัตราส่วน $Q_T /$ EC4, $P_{RD}^{(2)}$
T8-25-40	56.5	2.3	0.60	0.71
T8-25-65	69.6	3.2	0.73	0.87
T8-25-65P	54.3	1.2	0.57	0.68
T8-25-65	78.0	2.8	0.82	0.98
T8-25-120	72.8	2.5	0.77	0.91
T16-25-65*	60.5	10.9	0.64	0.76
T16-25-65	88.7	11.4	0.93	1.11
T16-25-65	88.4	17.7	0.93	1.11
T25-25-40	97.1	10.6	1.02	1.22
T25-25-65	100.9	16.0	1.06	1.26
T8-38-RC	72.9	2.2	0.70 ⁽³⁾	0.79 ⁽⁴⁾
T16-25-RC	97.0	19.4	1.02	1.22

หมายเหตุ

สัญลักษณ์* ต้องทำการทดสอบซ้ำเนื่องจากเกิดการผิดพลาดในการทดสอบ

(1) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยคำนวณจากสมการที่ 2.2, Q_k from BS5950 = 95 kN

(2) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยคำนวณจากสมการที่ 2.3, P_{RD} from EC4 = 95 kN

(3) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยคำนวณจากสมการที่ 2.2, Q_k from BS5950 = 104 kN

(4) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยคำนวณจากสมการที่ 2.3, P_{RD} from EC4 = 91.8 kN with γ_v taken as 1.0

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและผลการเปรียบเทียบกับสมการมาตรฐาน BS5950 และ EC4 ผู้วิจัยเสนอสมการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทแผ่นพื้น

คอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง โดยเพิ่มเติมตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของขนาดเหล็กเสริมแนวขวางและขนาดแผ่นพื้นสำเร็จรูปจากสมการมาตรฐาน EC4 ดังสมการที่ 2.4

$$P_{RD} = 0.29\alpha\beta\epsilon d^2 \sqrt{(\omega f_{cp} E_{cp})} / \gamma_v \quad (2.4)$$

เมื่อ $\beta = 0.5(g/70+1) < 1.0$ $\epsilon = 0.5(\phi/20+1) < 1.0$ $\omega = 0.5(w/600+1)$ และ $\gamma_v = 1.25$

f_{cp} คือกำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยระหว่างคอนกรีตทับหน้าและคอนกรีตสำเร็จรูป (MPa)

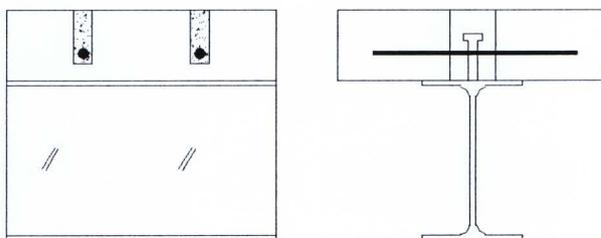
E_{cp} คือค่าเฉลี่ยโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทับหน้าและคอนกรีตสำเร็จรูป (MPa)

Lam และคณะ [4] ศึกษาคานเหล็กเชิงประกอบโดยพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวงวางบนหลังคาน โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Finite Element Method) และการทดสอบแบบ Full Scale ต่อเนื่องจากงานวิจัย Lam และคณะ [3] โดยเพิ่มตัวแปรและจำนวนตัวอย่างทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบพบว่าตัวแปร 3 ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานเชิงประกอบคือ อัตราส่วนระหว่างเหล็กเสริมตามขวางต่อคอนกรีตทับหน้า(Reinforcement Ratio) ขนาดคานเหล็ก รูปพรรณและความหนาของพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดของคานเหล็กเชิงประกอบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และการเพิ่มระยะห่างของ Shear Stud จะทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดลดลง การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามขวางจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เพิ่มขึ้นแต่จะส่งผลให้ Ductility ของคานลดลงและทำให้พื้นคอนกรีตเปราะและแตกร้าวได้ง่าย

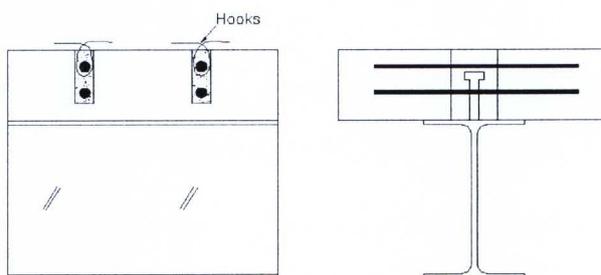
ตารางที่ 2.4 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบในการศึกษาของ Lam และคณะ [4]

ขนาดคานเหล็ก รูปพรรณ	ระยะห่างของ Shear Stud (mm)	ความหนาของแผ่นพื้น และขนาดเหล็กเสริมแนวขวาง (mm)					
		150		200		250	
		T8	T16	T8	T16	T8	T16
356x171x51 UB	150	PS1	PS19	PS4	PS22	PS7	PS25
	300	PS2	PS20	PS5	PS23	PS8	PS26
	450	PS3	PS21	PS6	PS24	PS9	PS27
533x210x82 UB	150	PS10	PS28	PS13	PS31	PS16	PS34
	300	PS11	PS29	PS14	PS32	PS17	PS35
	450	PS12	PS30	PS15	PS33	PS18	PS36
762x267x147 UB	150	PS37	-	PS40	-	PS43	-
	300	PS38	-	PS41	-	PS44	-
	450	PS39	-	PS42	-	PS45	-

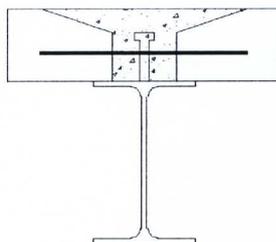
Lam [5] ศึกษากำลังรับแรงของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบโดยพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง โดยทำการทดสอบแบบ Component จำนวน 72 ตัวอย่าง โดยเพิ่มประเภทของขอบแผ่นพื้น ความสูงและขนาดของ Shear Stud และประเภทการเสริมเหล็กแนวขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.5



a) เหล็กเสริมตามขวาง 1 ชั้น กรณีขอบพื้นแบบสี่เหลี่ยม



b) เหล็กเสริมตามขวาง 2 ชั้น กรณีขอบพื้นแบบสี่เหลี่ยม



c) เหล็กเสริมตามขวาง 1 ชั้น กรณีขอบพื้นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

รูปที่ 2.3 รายละเอียดเหล็กเสริมตามขวางและประเภทของขอบพื้นสำเร็จรูปในการศึกษาของ Lam [5]

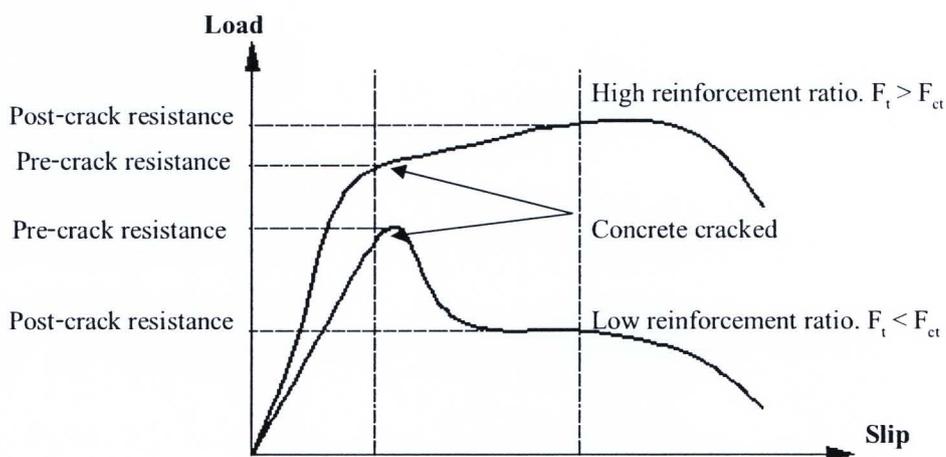
ตารางที่ 2.5 ตัวแปรหลักที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดย Lam [5]

Main Parameter	Variables
เหล็กเสริมในแนวขวาง	T10, T12, 2T10, T16, 2T12, T20
ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น, Gap (mm)	40, 60, 65, 80, 100, 120, 140
กำลังอัดของคอนกรีตทับหน้า (MPa)	20, 40, 50
ความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูป (mm)	150, 200, 250, 300
ชนิดของขอบแผ่นพื้นสำเร็จรูป	Square-end , Chamfered-end

หมายเหตุ สัญลักษณ์ T10 คือ เหล็กเส้นแรงดึงสูงขนาด 10 mm

ผลการทดสอบการเปลี่ยนเหล็กเสริมแนวขวางที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud การเสริมเหล็กแนวขวางนั้นมีวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ ทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนระหว่างคานเหล็ก รูปพรรณกับพื้นคอนกรีต และลดการแตกร้าวของคอนกรีต ผลจากการทดสอบพบว่าการเพิ่มขนาดเหล็กเสริมแนวขวางจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Lam เสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ โดยพิจารณาปริมาณการเสริมเหล็กแนวขวาง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบในการศึกษาของ Lam [5]



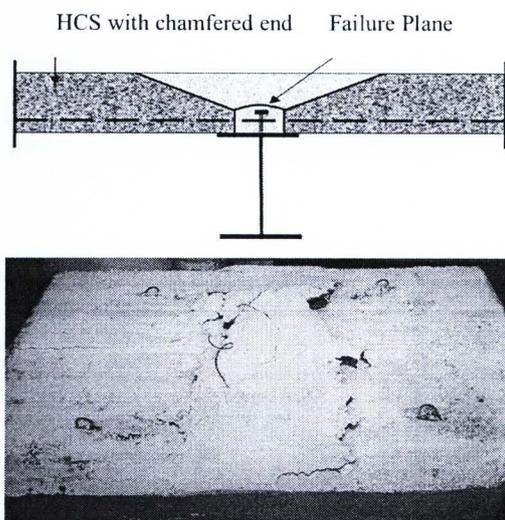
จากรูปที่ 2.4 กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในตัวอย่างที่มีอัตราเสริมเหล็กตามขวางต่ำ หมายถึง ($F_t < F_{ct}$) กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในตัวอย่างที่มีอัตราเสริมเหล็กตามขวางสูง หมายถึง ($F_t > F_{ct}$) หลังจากจุด Pre-Crack Resistance กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะยังคงต้านทานแรงได้จนกว่าจะเกิดการเคลื่อนตัวของ Shear Stud อย่างน้อย 6 mm จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยเหล็กเสริมแนวขวางมีกำลังถึงจุดประลัย

ผลการทดสอบการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น (Gap) ที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นพื้น ซึ่งจะคล้ายกับงานวิจัย Lam [4] โดย Lam สรุปว่าระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเสริมเหล็กแนวขวาง 2 ชั้น ประมาณ 80 mm มากกว่าการเสริมเหล็กแนวขวาง 1 ชั้น 10 mm ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการเสริมเหล็กแนวขวาง 2 ชั้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบการเปลี่ยนกำลังอัดคอนกรีตทับหน้าที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตทับหน้าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบประเภทของขอบแผ่นพื้นที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยพิจารณาจากตัวอย่างทดสอบที่ใช้ขนาดความสูงของ Shear Stud 100 mm และ 125 mm ร่วมกับประเภทของขอบแผ่นพื้นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู พบว่าตัวอย่างที่ใช้ขนาดความสูงของ Shear Stud 100 mm จะเกิดการวิบัติก่อนตัวอย่างที่ใช้ขนาดความสูงของ Shear Stud 125 mm เนื่องจากคอนกรีตทับหน้าจะถูกผลักไปตามระนาบของแรงเฉือนที่อยู่เหนือ Shear Stud ดังรูปที่ 2.5 จึงเป็นเหตุให้ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ Shear Stud ที่สั้นกว่าเกิดการวิบัติก่อน ดังนั้น Lam จึงแนะนำให้ใช้ระยะหุ้มคอนกรีตดังรูปที่ 2.5 ไม่น้อยกว่า 35 mm





รูปที่ 2.5 ตัวอย่างทดสอบบีบอัดโดยคอนกรีตทับหน้าในการศึกษาของ Lam [5]

จากงานวิจัยครั้งนี้ Lam ได้เสนอสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบกลวงโดยประยุกต์จากสมการที่ 2.4 [9] ดังนี้

$$P_{RD} = 0.29\alpha\beta\lambda d^2 \sqrt{(\omega f_{cp} E_{cp})} / \gamma_v \leq 0.8f_u \times \pi d^2 / 4\gamma_v \quad (2.5)$$

เมื่อ $\lambda = 0.5(\phi / 20 + 1) < 1.0$

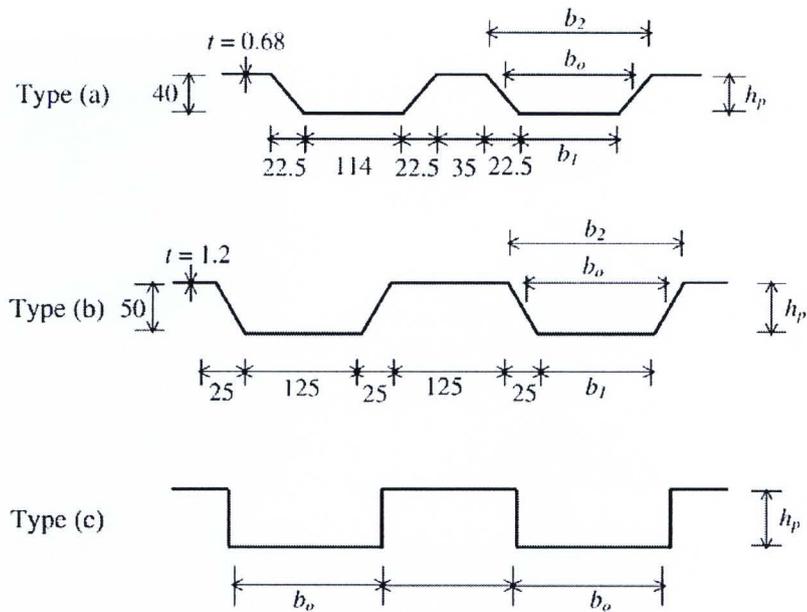
Ellobody และ Young [6] ศึกษาพฤติกรรมของ Shear Stud ของคานเหล็กเชิงประกอบที่ใช้กับพื้นคอนกรีตแบบหล่อเหล็กพับ (Steel Sheeting) ใช้โปรแกรม ABAQUS โดยศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้คือรูปทรงของ Steel Sheeting ขนาดและความสูง Shear Stud และกำลังของคอนกรีต โดยการศึกษาครั้งนี้จะประมวลผลโดยโปรแกรมจำนวน 44 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 11 กลุ่ม กลุ่มละ 4 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.6 ในกลุ่มที่ 1 ถึง กลุ่มที่ 3 จะใช้ Steel Sheeting แบบ Type a ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และกลุ่มที่ 4 ถึง กลุ่มที่ 11 จะใช้ Steel Sheeting แบบ Type c ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Shear Stud เท่ากับ 13 mm ยาว 75 mm สำหรับกลุ่มที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ยาว 75 mm สำหรับกลุ่มที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ยาว 100 mm สำหรับกลุ่มที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ยาว 127 mm สำหรับกลุ่มที่ 4 ถึง กลุ่มที่ 7 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ยาว 100 mm สำหรับกลุ่มที่ 8 ถึง กลุ่มที่ 11 โดยใช้พื้นคอนกรีตกว้าง 600 mm ความลึกเท่ากับ ความสูงของ Shear Stud บวกระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากับ 25 mm และใช้คานเหล็กรูปพรรณขนาด 254x254 UC 73 (W10x49)

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรที่ใช้ประมวลผลในการศึกษาของ Ellobody และ Young [6]

กลุ่ม	ตัวอย่าง	Dimensions								กำลังอัด คอนกรีต (MPa)
		Sheeting (mm)				Stud (mm)		Slab (mm)		
		Type	bo	hp	t	d	h	B	D	
G1	P1	(a)	136.5	40	0.68	13	75	600	100	25
	P2	(a)	136.5	40	0.68	13	75	600	100	30
	P3	(a)	136.5	40	0.68	13	75	600	100	35
	P4	(a)	136.5	40	0.68	13	75	600	100	40
G2	P5	(a)	136.5	40	0.68	16	75	600	100	25
	P6	(a)	136.5	40	0.68	16	75	600	100	30
	P7	(a)	136.5	40	0.68	16	75	600	100	35
	P8	(a)	136.5	40	0.68	16	75	600	100	40
G3	P9	(a)	136.5	40	0.68	19	100	600	125	25
	P10	(a)	136.5	40	0.68	19	100	600	125	30
	P11	(a)	136.5	40	0.68	19	100	600	125	35
	P12	(a)	136.5	40	0.68	19	100	600	125	40
G4	P13	(c)	224.5	76	0.91	19	127	600	152	25
	P14	(c)	224.5	76	0.91	19	127	600	152	30
	P15	(c)	224.5	76	0.91	19	127	600	152	35
	P16	(c)	224.5	76	0.91	19	127	600	152	40
G5	P17	(c)	224.5	40	0.91	19	127	600	152	25
	P18	(c)	224.5	40	0.91	19	127	600	152	30
	P19	(c)	224.5	40	0.91	19	127	600	152	35
	P20	(c)	224.5	40	0.91	19	127	600	152	40
G6	P21	(c)	143.5	76	0.91	19	127	600	152	25
	P22	(c)	143.5	76	0.91	19	127	600	152	30
	P23	(c)	143.5	76	0.91	19	127	600	152	35
	P24	(c)	143.5	76	0.91	19	127	600	152	40

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรที่ใช้ประมวลผลในการศึกษาของ Ellobody และ Young [6] ต่อ

กลุ่ม	ตัวอย่าง	Dimensions								กำลังอัด คอนกรีต (Mpa)
		Sheeting (mm)				Stud (mm)		Slab (mm)		
		Type	bo	hp	t	d	h	B	D	
G7	P25	(c)	143.5	40	0.91	19	127	600	152	25
	P26	(c)	143.5	40	0.91	19	127	600	152	30
	P27	(c)	143.5	40	0.91	19	127	600	152	35
	P28	(c)	143.5	40	0.91	19	127	600	152	40
G8	P29	(c)	224.5	40	0.91	19	100	600	125	25
	P30	(c)	224.5	40	0.91	19	100	600	125	30
	P31	(c)	224.5	40	0.91	19	100	600	125	35
	P32	(c)	224.5	40	0.91	19	100	600	125	40
G9	P33	(c)	143.5	65	0.91	19	100	600	125	25
	P34	(c)	143.5	65	0.91	19	100	600	125	30
	P35	(c)	143.5	65	0.91	19	100	600	125	35
	P36	(c)	143.5	65	0.91	19	100	600	125	40
G10	P37	(c)	143.5	50	0.91	19	100	600	125	25
	P38	(c)	143.5	50	0.91	19	100	600	125	30
	P39	(c)	143.5	50	0.91	19	100	600	125	35
	P40	(c)	143.5	50	0.91	19	100	600	125	40
G11	P41	(c)	143.5	40	0.91	19	100	600	125	25
	P42	(c)	143.5	40	0.91	19	100	600	125	30
	P43	(c)	143.5	40	0.91	19	100	600	125	35
	P44	(c)	143.5	40	0.91	19	100	600	125	40



รูปที่ 2.6 ชนิดของ Steel Sheeting ในการศึกษาของ Ellobody และ Young [6]

การศึกษาทำโดยเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ที่ได้จากการประมวลโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการคำนวณสมการในมาตรฐาน BS5950 (สมการที่ 2.2) และสมการในมาตรฐาน EC4 (สมการที่ 2.3) และสมการในข้อกำหนด AISC (สมการที่ 2.1) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud โดยใช้พื้นที่คอนกรีตแบบหล่อเหล็กพับ ดังนี้

$$P_{AISC} = r_1 0.5 A_s \sqrt{f_c E_c} \leq A_s f_u \quad (2.6)$$

โดยที่

$$r_1 = \frac{0.85}{\sqrt{N}} \left(\frac{b_o}{h_p} \right) \left[\left(\frac{h}{h_p} \right) - 1.0 \right] \leq 1.0 \quad (2.7)$$

เมื่อ r_1 คือตัวคูณลดกำลังของ Shear Stud

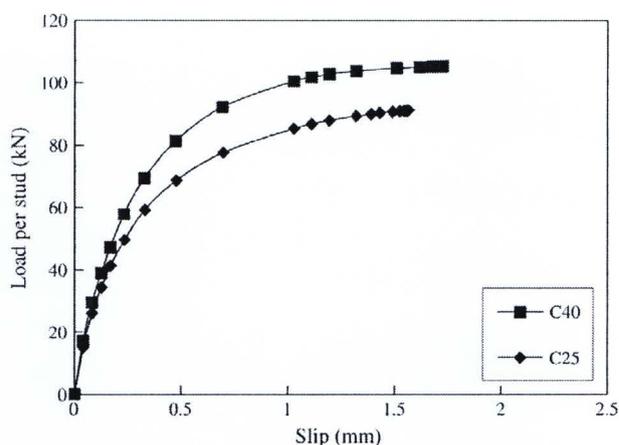
A_s คือพื้นที่หน้าตัดของ Shear Stud (mm^2)

f_c คือกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (MPa)

N คือจำนวนของ Shear Stud ในหนึ่งร่องของ Steel Sheeting

b_o คือความกว้างเฉลี่ยระหว่าง b_1 และ b_2 (ดูรูปที่ 2.6)

h_p คือความสูงของร่อง Steel Sheeting (mm)



รูปที่ 2.7 ผลเนื่องจากการกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้พฤติกรรม Load-Slip ของ Shear Stud ในกลุ่มที่ 5 ในการศึกษาของ Ellobody และ Young [6]

ผลการศึกษาพบว่าความแข็งแรงและกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตดังรูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ของตัวอย่าง P17 และ P20 ในกลุ่มที่ 5 จะได้ว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่าง (Slip) 1.56 mm กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เท่ากับ 91.2 kN สำหรับตัวอย่าง P17 และที่ระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่าง 1.72 mm กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เท่ากับ 105.4 kN สำหรับตัวอย่าง P20 โดยจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 16 เมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจาก 25 เป็น 40 MPa

จากงานวิจัยนี้ขนาดและความสูงของ Shear Stud ที่เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการประมาณค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน Shear Stud ตามข้อกำหนด AISC BS5950 และ EC4 จะมีค่าสูงกว่าการวิเคราะห์โดย Finite Element ร้อยละ 27 25 และ 11 ตามลำดับ

Limwuttigrajirat [8] ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตรูปตัว U ในแผ่นพื้นคอนกรีตตัน (Solid RC) โดยการทดสอบแบบ Component จำนวน 27 ตัวอย่าง แบ่งเป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud จำนวน 9 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.7 และการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตจำนวน 18 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.8 โดยจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในการศึกษาของ

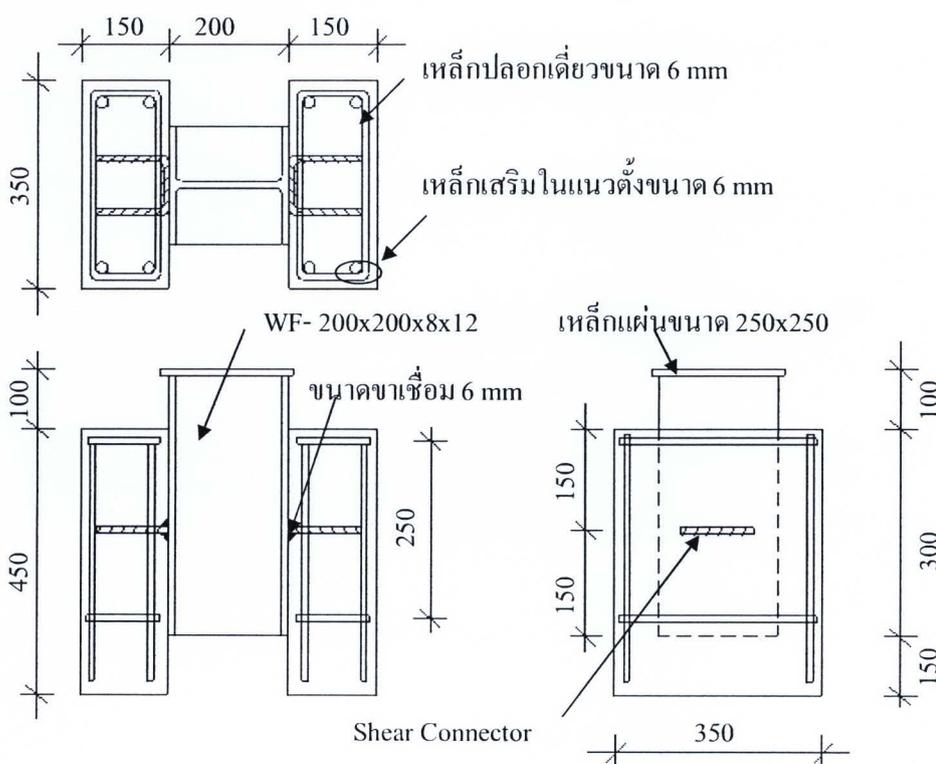
Limwuttigraijirat [8]

ชื่อตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	ขนาด Shear Stud (mm)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ
S-1	210	16	3
S-2	245	16	3
S-3	280	16	3

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมคอนกรีตในการศึกษาของ

Limwuttigraijirat [8]

ชื่อตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	ขนาดเหล็ก Shear Connector (mm)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ
D-1	210	12	3
D-2		16	3
D-3	245	12	3
D-4		16	3
D-5	280	12	3
D-6		16	3



รูปที่ 2.8 การเตรียมตัวอย่างทดสอบในการศึกษาของ Limwuttigraijirat [8]



ตารางที่ 2.9 ผลการทดสอบ Push-out ในการศึกษาของ Limwuttigrajiratt [8]

ชื่อตัวอย่าง	ชนิดของ Shear Connectors	กำลังอัด คอนกรีต (ksc)	กำลังรับแรงเฉือนประลัย (kg)					รูปแบบการวิบัติ*
			ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	เฉลี่ย	ยอมรับ (ร้อยละ 80)	
S-1	Stud	210	10234	9373	9084	9564	7651	1
S-2	Stud	245	12022	11562	11739	11774	9419	1
S-3	Stud	280	12782	13079	12654	12838	10271	1
D-1	DB12	210	16743	14578	13728	15016	12013	2
D-2	DB16	210	21842	19827	21095	20921	16737	2
D-3	DB12	245	16992	17741	16579	17104	13683	2
D-4	DB16	245	23577	22187	22569	22778	18222	2
D-5	DB12	280	19243	18226	17597	18355	14684	2
D-6	DB16	280	24282	23109	24922	24104	19283	2

*หมายเหตุ 1 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบวิบัติโดย Shear Stud และ 2 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบวิบัติโดยคอนกรีต

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector จะนำค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยที่ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจะต้องเป็นค่าที่ยอมรับได้ร้อยละ 80 อ้างอิงตามมาตรฐาน BS5400 จากตารางที่ 2.9 ยกตัวอย่าง S-1 จะมีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector 3 ค่า คือ 10234 9373 และ 9084 kg โดยมีค่าเฉลี่ยและค่าที่ยอมรับได้ร้อยละ 80 คือ 9564 และ 7651 kg ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจาก 210 เป็น 245 kg/cm^2 จะส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 9-14 และจาก 245 เป็น 280 kg/cm^2 เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 6-7.3

ผลการทดสอบขนาดเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Connector คือที่กำลังอัดของคอนกรีต 210 kg/cm^2 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตขนาด DB16 จะมากกว่า DB12 ประมาณร้อยละ 39 ที่กำลังอัดของคอนกรีต 245 kg/cm^2 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตขนาด DB16 มากกว่า DB12 ประมาณร้อยละ 33 และที่กำลังอัดของคอนกรีต 280 kg/cm^2 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตขนาด DB16 มากกว่า DB12

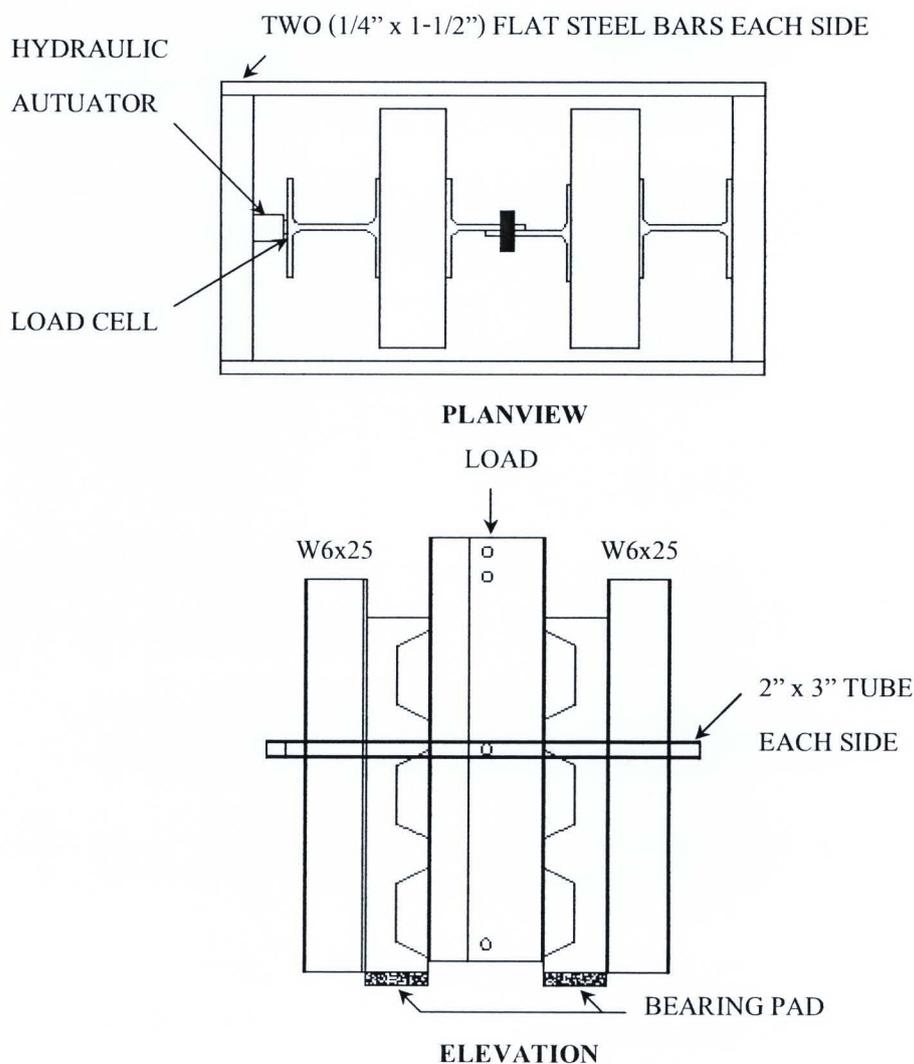
ประมาณร้อยละ 31 จากผลการวิจัย Limwuttigraijirat ได้เสนอสมการการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนประลัยของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ดังนี้

$$P_u = 715D\sqrt{f'_c} \quad (2.8)$$

เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (cm)

f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (kg/cm^2)

Easterling และคณะ [9] ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud ของคานเชิงประกอบที่ใช้กับพื้นคอนกรีตแบบหล่อเหล็กพับ (Steel Deck) วางตั้งฉากกับแนวคานเหล็กรูปพรรณ โดยทำการทดสอบแบบ Component จำนวน 8 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ข้อมูลในการเตรียมตัวอย่างทดสอบมี 2 กลุ่มตัวอย่างทดสอบแยกตามลักษณะการวางตำแหน่งของ Shear Stud ดังตารางที่ 2.10

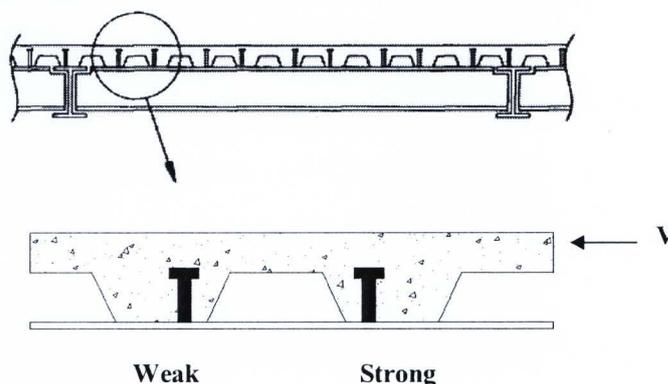


รูปที่ 2.9 การเตรียมตัวอย่างทดสอบแบบ Component ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบแบบ Component ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]

ตัวอย่าง	ตำแหน่ง Shear Stud	ขนาดพื้นที่คอนกรีตแบบหล่อเหล็กพับ		จำนวนตัวอย่างทดสอบ (ตัว)
		กว้าง (นิ้ว)	หนา (นิ้ว)	
กลุ่มที่ 1	Strong	24	6	4
กลุ่มที่ 2	Weak	24	6	4

การทดสอบครั้งนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการวางตำแหน่งของ Shear Stud ที่มีผลต่อการรับแรงเฉือนของ Shear Stud ในคานเหล็กเชิงประกอบประเภทใช้พื้นคอนกรีตแบบหล่อเหล็กพับ และเพื่อสะดวกในการเรียกชื่อตำแหน่งของ Shear Stud ผู้วิจัยจึงกำหนดไว้ว่าในกรณีที่ Shear Stud วางอยู่ด้านข้างของ Stiffener ที่อยู่ใกล้กับขอบคาน (End Span) ให้เรียกตำแหน่งนี้ว่า “Strong” และวางอยู่ด้านข้างของ Stiffener ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่มีโมเมนต์สูงสุดให้เรียกตำแหน่งนี้ว่า “Weak” ดังรูปที่ 2.10



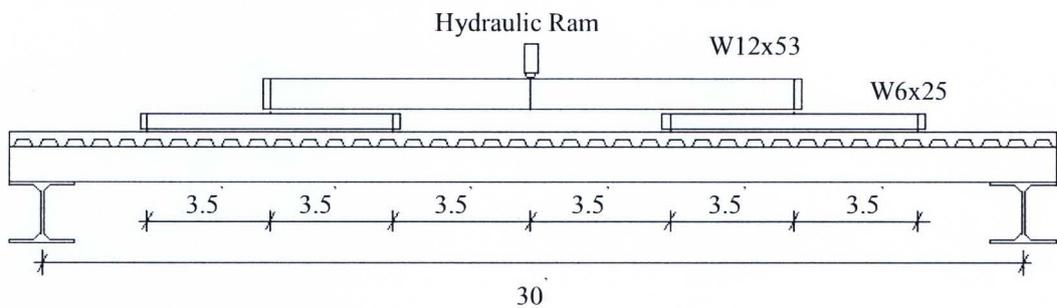
รูปที่ 2.10 การวางตำแหน่งของ Shear Stud ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]

นอกจากการทดสอบแบบ Component จำนวน 8 ตัวอย่าง W.Samuel Easterling และคณะ [9] ได้ศึกษาการทดสอบแบบ Full Scale อีก 4 ตัวอย่าง โดยใช้ขนาดเหล็กรูปพรรณขนาดเดียวกันทุกตัวอย่าง คือ W16x31 ซึ่งข้อมูลองค์ประกอบตัวอย่างเช่นในตารางที่ 2.11 และการเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12

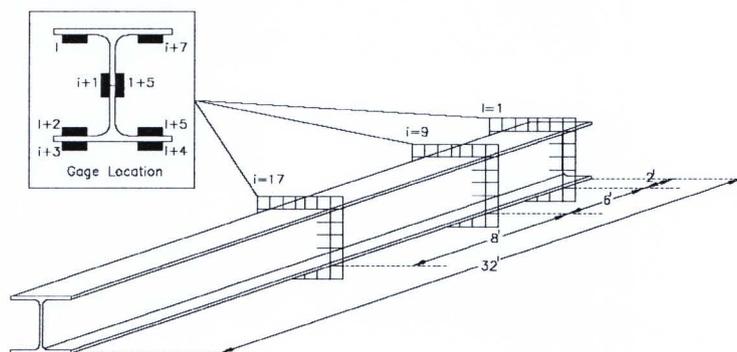
ตารางที่ 2.11 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบแบบ Full Scale ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]

ตัวอย่าง	ตำแหน่ง Shear Stud	ความหนาพื้น คอนกรีตแบบหล่อ เหล็กพับ (นิ้ว)	ขนาด Shear Stud (นิ้ว)	จำนวน Shear Stud (ตัว)	จำนวนการติด Strain Gages (ตัว)	ความกว้าง ของพื้น (นิ้ว)
Test 1	Strong	6	Ø3/4 x 5	12	24	81
Test 2	Weak	6	Ø3/4 x 5	12	24	81
Test 3	Alternate	6	Ø3/4 x 5	12	24	81
Test 4	Alternate	6	Ø3/4 x 5	12	24	81

*หมายเหตุ Alternate หมายถึงการวางตำแหน่งของ Shear Stud ผสมกันระหว่าง Strong กับ Weak



รูปที่ 2.11 การติดตั้ง loading frame ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gage ในการศึกษาของ Easterling และคณะ [9]

ผลการทดสอบแบบ Component พบว่า 4 ตัวอย่างที่วางตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Weak กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เฉลี่ยเท่ากับ 13.55 kips โดยการวิบัติจะเกิด Punching ที่เอวของพื้นแบบหล่อเหล็กพับ (Web of Steel Deck) และอีก 4 ตัวอย่างที่วางตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Strong กำลังรับแรงเฉือนของ Shear Stud เฉลี่ยเท่ากับ 18.82 kips โดยการวิบัติจะเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าของคอนกรีต

ผลการทดสอบแบบ Full Scale พบว่าตัวอย่างทดสอบที่วางตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Weak จะเกิดการวิบัติที่ร่องของพื้นแบบหล่อเหล็กพับ (Rib of Steel Deck) คือตัวอย่าง Test 2 ส่วนตัวอย่าง Test 1 Test 3 และ Test 4 ที่วางตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Strong จะเกิดการวิบัติโดยคอนกรีตแตกเป็นรูปกรวยหรือเกิด Shearing ที่บริเวณขาของ Shear Stud

ผลจากการทดสอบทั้ง 2 กรณี คือ แบบ Full scale และแบบ Component สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Weak จะมี Ductile มากกว่าที่ตำแหน่ง Strong เรียกว่า Bearing Failure Mode และตำแหน่งของ Shear Stud ที่ตำแหน่ง Strong จะทำให้คอนกรีตแตกเร็วได้ง่ายเรียกว่า Concrete Failure Mode จากนั้น Easterling และคณะ ได้เสนอค่าตัวคูณลดจำนวน Shear Stud SRF ไม่ควรเกิน 0.75 ในกรณีที่มีจำนวนแถวของ Shear Stud หนึ่งแถวในหนึ่งร่องของแบบหล่อเหล็กพับ และค่าของ $\sum Q_n / A_s F_y$ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 และเสนอสมการประมาณค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของ Shear Stud คือ

$$Q_{po} = 18.82 \sqrt{\frac{f'_c}{4.57}} \quad (2.9)$$

เมื่อ Q_{po} คือกำลังต้านทานของสลักรับแรงเฉือน (kips)

f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบคานเหล็กเชิงประกอบ (ksi)

18.82 คือกำลังต้านทานเฉลี่ยของสลักรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Push-out (kips)

4.57 คือกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ Push-out test (ksi)