



พฤติกรรมการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

DEFLECTION BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SLAB STRENGTHENED WITH CFRP PLATES

สมบุญชัย เชียงจิน¹ และปริดา ไชยมหาวัน^{1*}
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอพฤติกรรมการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ขึ้นทดสอบประกอบด้วยพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งใช้เป็นตัวแทนพื้นระบบไร้คานที่มักพบปัญหาการแอ่นตัวมากจากการใช้งานเป็นเวลานาน และมักแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แผ่นพื้นทดสอบที่ไม่ได้เสริมและเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จำนวน 4 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อตรวจสอบความสามารถในการลดการแอ่นตัวของพื้น ผลการทดลองพบว่า การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตด้วยแผ่น CFRP สามารถลดการแอ่นตัวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดการแอ่นตัวได้ถึงร้อยละ 38 และ 50 เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จำนวน 1 และ 2 แผ่น ตามลำดับ นอกจากนี้ สมการโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพของมาตรฐาน ACI440.1R-06 โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแตกร้าวนำมาคำนวณถึงหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ถูกนำมาใช้ทำนายการแอ่นตัวของแผ่นพื้นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ซึ่งพบว่าสามารถทำนายการแอ่นตัวของพื้นเสริมกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

คำสำคัญ : การแอ่นตัว พื้นไร้คาน การเสริมกำลัง วัสดุคอมโพสิตเสริมกำลัง

ABSTRACT

This paper presents the deflection behavior of reinforced concrete slab strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plates to increase service load. The tested specimens represent the reinforced concrete flat slab which always have problem with large deflection after long term use. CFRP strengthening was the famous technique for solving this problem. Four slab specimens without and with CFRP plates were tested in order to investigate the ability of slab deflection reduction. The tested result show that the strengthening method by CFRP plate can significantly reduce the slab deflection. The deflection was reduced about 38 and 50 percent for slab strengthened with 1 CFRP plate and 2 CFRP plates, respectively. Furthermore, the equation of the effective moment of inertia from ACI440.1R-06 considering CFRP section in the calculation of moment inertia of

Somboon Shaingchin¹ and Preeda Chaimahawan^{1*}

¹Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Phayao

crack section has been applied to predict the deflection of slab strengthened with CFRP plate. It was found that the given effective moment of inertia can be used to predict the slab deflection very well compared to the experimental results.

KEYWORDS: Deflection, Flat slab, Strengthening, Fiber reinforced polymer

1. บทนำ

อาคารที่ใช้ระบบพื้นไร้คาน (Flat slab) ทั้งที่มีการใช้เหล็กเสริมอัดแรงภายหลัง (post tension) และไม่มีการใช้เหล็กเสริมอัดแรง ที่ก่อสร้างมาเป็นระยะเวลา 10-30 ปี มักพบปัญหา เช่น เกิดรอยร้าวที่ผิวด้านบนเนื่องจากกำลังต้านทาน โมเมนต์ลบไม่เพียงพอ หรือกำลังต้านทานแรงเฉือนทะลุไม่เพียงพอ (รูปที่ 1(ก)) โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบพื้นไร้คานที่ไม่มีเป็นหัวเสารองรับ บางครั้งจะพบรอยร้าวที่ผิวด้านล่าง เนื่องจากการแอ่นตัวของพื้น (รูปที่ 1(ข)) ความล้าของคอนกรีต การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง การเสื่อมสภาพจากการใช้งาน การควบคุมงานที่ไม่ดีพอ เหล็กเสริมล้าอยู่ชิดผิวล่างของคอนกรีต ทำให้เป็นสนิมได้ง่าย หรือบางที่อาคารดังกล่าว ต้องการเสริมกำลังให้อาคารสามารถใช้งาน โดยมีน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ระบบพื้นดังกล่าวจึงต้องทำการซ่อมและเสริมกำลังด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใช้แผ่นเหล็ก (steel plate) หรือใช้คานเหล็ก (steel beam) ซึ่งปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต หรือ Fiber Reinforced Concrete polymer (FRP) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถติดตั้งได้ง่าย น้ำหนักเบา ให้อายุการใช้งานสูง และไม่เป็สนิม สามารถนำไปติดตั้งที่ภายนอกของพื้นอาคาร ที่ผิวบนเพื่อเสริมกำลังต้านทาน โมเมนต์ลบ และที่ผิวล่างเพื่อเสริมกำลังต้านทาน โมเมนต์บวก ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) ด้านบนพื้นเนื่องจากกำลังต้านทาน โมเมนต์ลบและแรงเฉือนทะลุไม่เพียงพอ



(ข) ใต้ท้องพื้นมีการแอ่นตัวและรอยร้าว

รูปที่ 1 การแตกร้าวของแผ่นพื้นไร้คานอาคารลานจอดรถ

อย่างไรก็ตาม การเสริมกำลังพื้นด้วยแผ่นวัสดุคอมโพสิต วิศวกรจะไม่พิจารณาผลของการลดการแอ่นตัวของพื้น เนื่องจากพิจารณาว่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัสดุคอมโพสิตนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการเสริมกำลังด้วยวัสดุอื่น เช่น การใช้แผ่นเหล็ก หรือ

การใช้คานเหล็กในการเสริมกำลัง แต่พฤติกรรมการแอ่นตัวจริงของพื้นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตนั้น จะมีการแอ่นตัวที่ลดลงได้ เนื่องจากมีอิพ็อกซีที่เคลือบผิวด้านล่างทำให้การยึดตัวที่ผิวล่างของพื้นที่เป็นไปได้อย่างมาก ในทางปฏิบัติสำหรับการตรวจสอบการแอ่นตัวของพื้นที่ มักนิยมทำการเสริมกำลังพื้นที่ให้แล้วเสร็จเสียก่อน แล้วจึงทำการตรวจสอบการแอ่นตัวของพื้นที่ในสนาม ว่ามีค่ามากเกินไปหรือไม่ ด้วยการใช้การทดสอบน้ำหนักบรรทุก (load test) ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายสูง และระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 4-5 วัน ทำให้ต้องใช้เวลานาน และต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบ



(ก) การเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่ด้านบนเพื่อเสริมกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัด



(ข) การเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุคอมโพสิตผิวล่างเพื่อเสริมกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัด

รูปที่ 2 ภาพถ่ายการเสริมกำลังพื้นด้วยแผ่นวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณได้ตามมาตรฐาน ACI318 [1] โดยสร้างสมการสมดุลของแรงกระทำที่กระทำหน้าตัด เพื่อคำนวณหาระยะช่วงที่คอนกรีตรับแรงอัด แล้วนำแรงที่กระทำบนหน้าตัดหาค่าโมเมนต์ดัดรอบแกนใดๆ ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสามารถคำนวณได้ตาม ACI440.2R [2] ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับมาตรฐาน ACI318 [1] โดยเพิ่มแรงดึงของแผ่น CFRP ในสมการสมดุลของแรงบนหน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ (1) เพื่อใช้คำนวณระยะช่วงที่คอนกรีตรับแรงอัด (c) และคำนวณโมเมนต์ดัดประลัย (M_n) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$0.85f'_c b \beta_1 c = f_y A_s + \psi E_f A_f \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \quad (1)$$

$$M_n = 0.85f'_c b \beta_1 c \left(c - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + f_y A_s (d - c) + \psi E_f A_f \epsilon_{cu} \frac{(h-c)^2}{c} \quad (2)$$

- เมื่อ
- b เป็นความกว้างของหน้าตัด
 - c เป็นระยะช่วงที่คอนกรีตรับแรงอัด
 - d เป็นความลึกประสิทธิภาพ
 - h เป็นความหนาของหน้าตัด

A_s	เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง
E_f	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิต
f_c'	เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีต
f_y	เป็นกำลังดึงครากเหล็กเสริมรับแรงดึง
β_1	เป็นค่าปรับระยะช่วงที่คอนกรีตรับแรงอัดเมื่อพิจารณาความเค้นอัดแบบคงที่
ϵ_{cu}	เป็นความเครียดที่คอนกรีตเกิดการอัดแตก (0.003)
ν	ตัวคูณลดกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต (0.85)

มาตรฐานการออกแบบและการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต ACI440.2R [2] ไม่ได้ให้สมการสำหรับการคำนวณการแอ่นตัวของคานหรือพื้นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตภายนอก (externally bonded FRP system) แต่ได้ให้สมการสำหรับการคำนวณการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น (FRP rod) ภายในคาน [3] สมมติฐานการคำนวณให้คานอยู่ในสถานะที่คอนกรีตแตกแล้ว โดยใช้พื้นฐานการแอ่นตัวเช่นเดียวกับทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้าง แต่เปลี่ยนโมเมนต์ความเฉื่อยให้อยู่ในรูปของโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล (I_e) และสมมติให้ตลอดหน้าตัดคานมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยคงที่ตลอดทั้งหน้าตัด โดยสมการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล คือ

$$I_e = I_{cr} + (\beta_d I_g - I_{cr}) \left[\frac{M_{cr}}{M_a} \right]^3 \leq I_g \quad (3)$$

เมื่อ	M_{cr}	เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน้าตัดคานเกิดการแตกร้าว สามารถคำนวณได้จาก $M_{cr} = 0.5\sqrt{f_c'} I_g / y_b$ (MPa)
	M_a	เป็นโมเมนต์ที่กระทำ
	I_g	เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรวม
	I_{cr}	เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับหน้าตัดแตกร้าว
	β_d	เป็นสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นที่ฝังในคอนกรีต สามารถคำนวณได้จาก

$$\beta_d = \alpha_b \left[\frac{E_f}{E_s} + 1 \right] \quad (4)$$

เมื่อ	E_s	เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมรับแรงดึง
	E_f	เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น
	α_b	เป็นสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุรับแรงดึงกับคอนกรีต ซึ่ง ACI440.1R [3] แนะนำให้ใช้ค่า 0.5 สำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น และ เหล็กเสริมธรรมดา

จากสมการที่ (3) หากค่าอัตราส่วน M_{cr} / M_a มากกว่า 1.0 หมายความว่าขณะนั้นหน้าตัดยังไม่แตกร้าว ทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล I_e จะมีค่าเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรวม I_g ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับหน้าตัดแตกร้าว I_{cr} ที่พิจารณาวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น ตามสมการที่ (5)

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + \frac{A_f E_f}{E_c} (d_f - kd)^2 \quad (5)$$

เมื่อ	kd	เป็นระยะความลึกคอนกรีตเนื้อแกนสะเทินของหน้าตัดแปลง
	b	เป็นความกว้างของหน้าตัด
	A_f	เป็นพื้นที่หน้าตัดวัสดุคอมโพสิต
	E_f	เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น
	E_c	เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
	d_f	เป็นความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดวัดจากผิวคอนกรีตรับแรงอัดถึงตำแหน่งของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น

การศึกษางานวิจัยที่ทำการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงคดและแสดงผลของการแอ่นตัวด้วย โดยส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมกำลังโครงสร้างคาน เช่น งานวิจัยของ Balamuralilrishnan and Jeyasehar [4] ทำการเสริมกำลังคานด้วยแผ่น CFRP ที่มีความหนา 0.3 mm ผลการทดลองพบว่า คานที่ไม่เสริมกำลังมีการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ย 21.1 mm ส่วนคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 1 ชั้น และ 2 ชั้น มีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 20.1 และ 17.6 mm ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP นั้นช่วยลดการแอ่นตัวได้ประมาณ 5 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีงานวิจัยอีกมากมาย [5-9] ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตทั้งรูปแบบแผ่น (CFRP plate) และแบบเส้น (CFRP rod) แล้วพบว่า การแอ่นตัวของคานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตจะช่วยลดการแอ่นตัวลงได้เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงพยายามศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตไร้คานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลังพื้นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ช่วยประหยัดงบประมาณ และลดระยะเวลาในการเลือกใช้จำนวนแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสม ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกที่หน้างาน ซึ่งแม้ว่าการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถทำนายการแอ่นตัวได้เช่นกัน แต่เสียเวลาในการการป้อนข้อมูล และสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้แล้วผลการทดสอบยังเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการนำไปสร้างเป็นสมการทำนายการแอ่นตัวพื้นเสริมกำลังได้อีกด้วย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

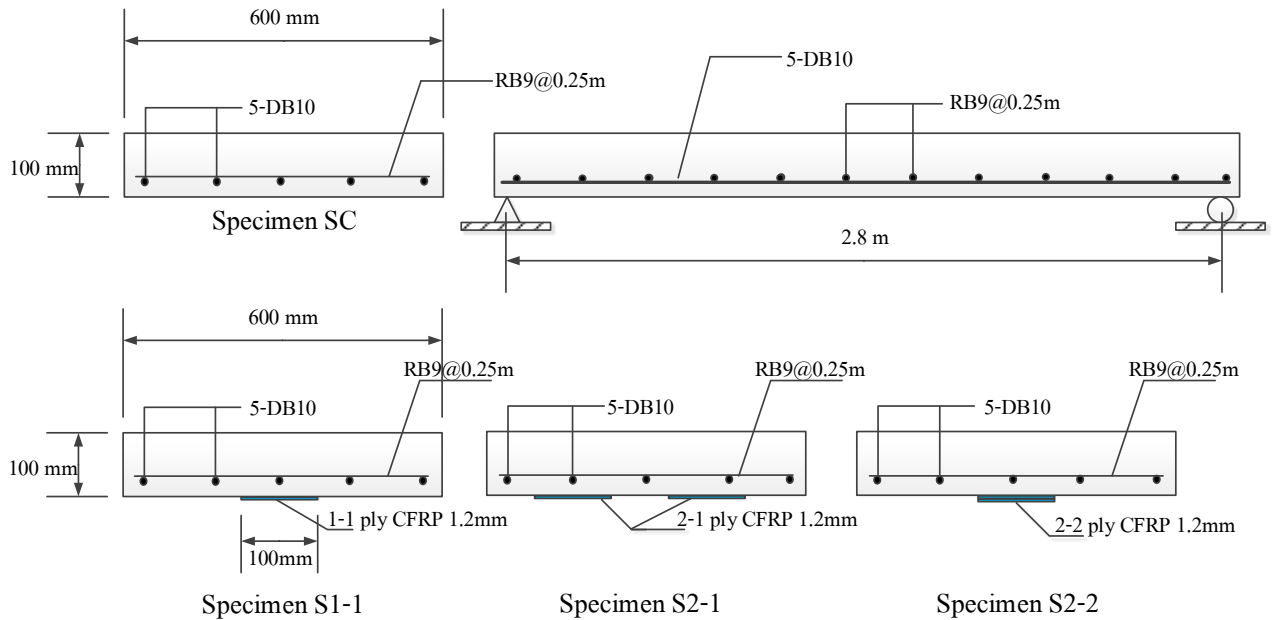
ทำการสร้างชิ้นทดสอบควบคุม (Specimen SC) ที่ใช้เป็นตัวแทนของพื้นไร้คาน ให้มีขนาดความกว้าง มิติ อัตราส่วนเหล็กเสริม ให้ใกล้เคียงกับลักษณะของแบบอาคารที่มีใช้มากที่สุด โดยทำการย่อส่วนในอัตรา 1:2 ของโครงสร้างจริง โดยพื้นดังกล่าวถูกออกแบบให้เกิดการวิบัติด้วยแรงคัต ทำการทดสอบพฤติกรรมการแอ่นตัวจนกระทั่งพื้นวิบัติ ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3 พื้นมีความกว้าง 600 mm หนา 100 mm ความยาวประสิทธิภาพ 2,800 mm เหล็กเสริมตามยาว 5 เส้น DB10 ($\rho = 0.010$) เหล็กเสริมตามขวาง 12 เส้น RB9 โดยอัตราส่วนเหล็กเสริม และความหนาของพื้นดังกล่าว เป็นอัตราส่วนสำหรับพื้นไร้คานที่มีช่วงเสาประมาณ 6 m คุณสมบัติวัสดุ กำลังดึงเหล็กเสริม วัสดุคอมโพสิต (กว้าง 100 mm และ หนา 1.2 mm) และ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติของเหล็กเสริม	DB10	RB9	คุณสมบัติของแผ่น CFRP		คุณสมบัติของคอนกรีต	
กำลังดึงคราก (MPa)	502.5	353.2	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	1.65×10^5	กำลังอัดประลัย (MPa)	23.4
กำลังดึงประลัย (MPa)	538.0	497.5	กำลังดึงประลัย (MPa)	3,000		

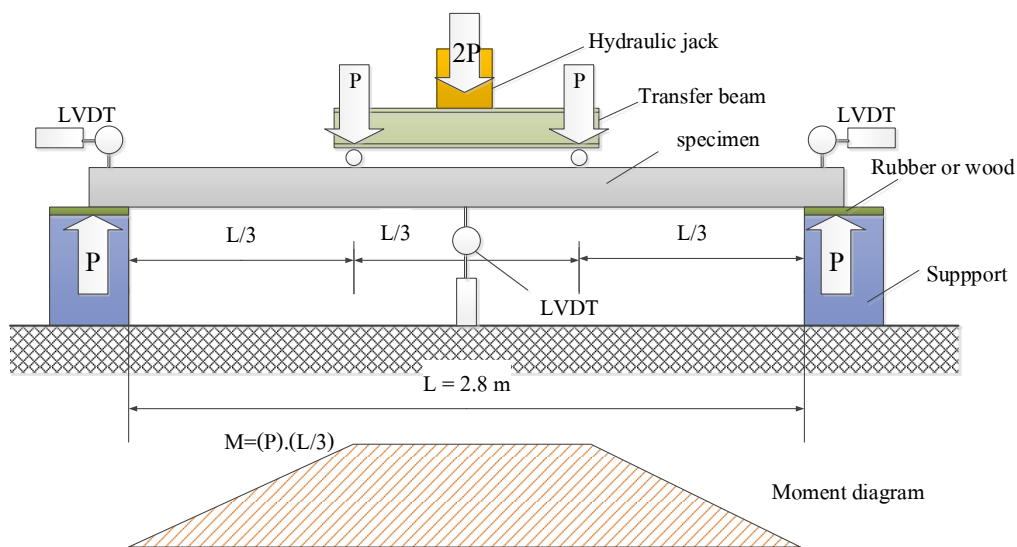
สำหรับชิ้นทดสอบเสริมกำลังมีขนาดหน้าตัด ปริมาณเหล็กเสริม ความยาว เช่นเดียวกับชิ้นทดสอบควบคุม โดยมีรูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 3 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น ประกอบด้วยชิ้นทดสอบเสริมกำลัง 1 แผ่น (Specimen S1-1) ชิ้นทดสอบเสริมกำลัง 2 (Specimen S2-1) และชิ้นทดสอบเสริมกำลัง 2 แผ่น โดยวางซ้อนทับตำแหน่งเดียวกัน (Specimen S2-2) รายละเอียดหน้าตัดการเสริมกำลังแสดงดังรูปที่ 3

วิธีการติดแผ่น CFRP ได้ทำตามมาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1508-51) [10] โดยเริ่มจากทำความสะอาดผิวพื้นคอนกรีตที่จะทำการติดตั้ง ทาวัสดุรองพื้น (primer) 1 ชั้น เพื่อให้ซึมลงไปในรูเปิดบนพื้นผิวคอนกรีต ทาวัสดุยึดประสานให้สม่ำเสมอและทั่วผิวคอนกรีตที่ติดตั้ง นำแผ่น CFRP วางและทำการไล่อากาศที่ถูกขังอยู่ระหว่างแผ่น CFRP และคอนกรีต และกำจัดวัสดุยึดประสานที่เกินออกมา ทำการทดสอบภายหลังอายุการติดตั้งแล้ว 7 วัน

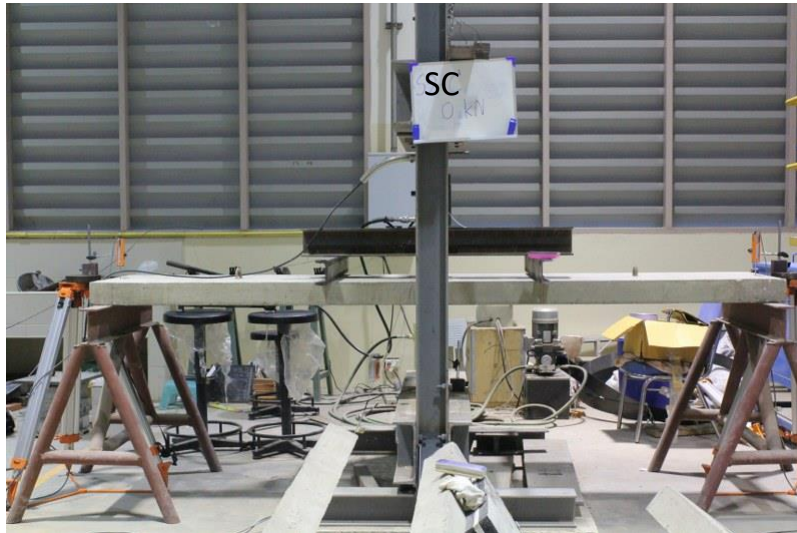


รูปที่ 3 หน้าตัดสำหรับขั้นตอนทดสอบความค้ม และขั้นตอนทดสอบเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

รูปแบบการทดสอบให้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบกระทำเป็นจุด 4 จุด (four point bending) โดยใช้แม่แรงขนาด 100 ตัน ให้น้ำหนักบรรทุกผ่านคานถ่ายแรงเพื่อให้น้ำหนักแบบจุด 2 จุดบนขั้นตอนทดสอบ รายละเอียดการติดตั้งขั้นตอนทดสอบและอุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแสดงในรูปที่ 4 ภาพถ่ายขั้นตอนทดสอบที่ได้ติดตั้งเครื่องมือ และทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 5



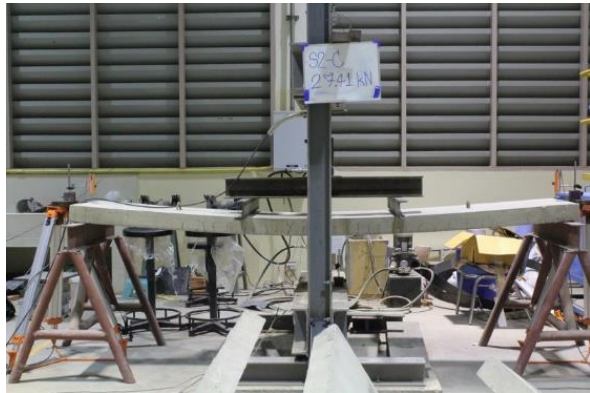
รูปที่ 4 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 5 การติดตั้งขั้นตอนทดสอบและเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

3. ผลการทดสอบ

ขั้นตอนทดสอบควบคุม (SC) พบรอยร้าวแรกที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าที่ใต้ท้องพื้น บริเวณใต้คานถ่ายแรง เกิดขึ้นที่แรงกระทำที่ 3.15 kN โดยพื้นมีการแอ่นตัวประมาณ 9 mm เมื่อเพิ่มแรงกระทำเป็น 4.57 kN เริ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้นนอกช่วงคานถ่ายแรง โดยเมื่อเพิ่มแรงกระทำอย่างต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ พบว่ารอยร้าวมีจำนวนและขนาดที่กว้างมากขึ้น เมื่อแรงกระทำถึงค่า 13.71 kN แผ่นพื้นยังสามารถต้านทานแรงกระทำได้โดยที่แรงกระทำยังไม่ตก แต่การแอ่นตัวของพื้นมีค่ามากถึง 62 mm ซึ่งอุปกรณ์ให้แรงกระทำไม่สามารถยืดออกเพื่อให้แรงกระทำต่อไปได้ เมื่อตรวจสอบค่าความเครียดจากอุปกรณ์วัดความเครียด (strain gauge) ที่ได้ติดตั้งในเหล็กเสริมตามยาว พบว่ามีค่าประมาณ 0.0085 และเมื่อทำการคำนวณค่าความโค้งและความเครียดอัดในคอนกรีตที่ผิวบนสุด (ϵ_c) มีค่ามากกว่า 0.003 แล้ว จึงหยุดการทดสอบ จากการทดสอบได้แรงกระทำสูงสุด $P = 13.71$ kN ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_u) ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 12.79 kN-m โดยมีรูปแบบการวิบัติด้วยแรงดึงในเหล็กเสริมเป็นหลัก (tension failure) ภาพถ่ายการแอ่นตัวสูงสุดของขั้นตอนทดสอบควบคุมแสดงในรูปที่ 6(ก) และภาพรอยแตกร้าวใต้ท้องพื้นขณะทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 6(ข)



(ก) การแอนตัวสูงสุด



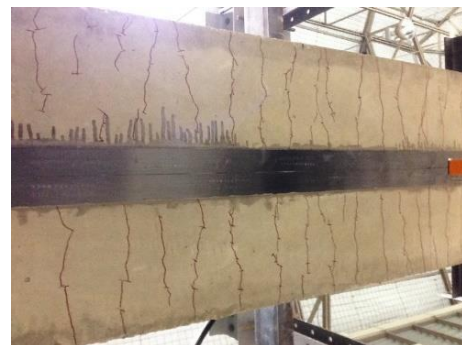
(ข) ความเสียหายบริเวณใต้ท้องพื้น

รูปที่ 6 การวิบัติของชิ้นทดสอบควบคุม (SC)

ชิ้นทดสอบเสริมกำลัง S1-1 ซึ่งเป็นชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จำนวน 1 แผ่น พบว่าเกิดรอยร้าวแรกที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า บริเวณท้องพื้นใต้คานถ่ายแรง ที่แรงกระทำ 4.89 kN ด้วยการแอนตัว 9 mm เช่นเดียวกับชิ้นทดสอบควบคุม และเมื่อเพิ่มแรงกระทำถึง 6.30 kN ชิ้นทดสอบมีการแอนตัว 12 mm พบรอยร้าวด้านข้างพื้นคอนกรีต ทั้งระหว่างในช่วงและนอกช่วงคานถ่ายแรง โดยพื้นสามารถต้านทานแรงได้สูงสุด 22.84 kN ด้วยการแอนตัว 49 mm ก่อนที่แผ่น CFRP จะหลุดลอกออกมา จึงได้ทำการหยุดการทดสอบ เมื่อคำนวณ โมเมนต์ต้านทานสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 21.32 kN-m ภาพถ่ายการแอนตัวของชิ้นทดสอบ S1-1 แสดงในรูปที่ 7



(ก) การแอนตัวสูงสุด



(ข) ความเสียหายบริเวณใต้ท้องพื้น

รูปที่ 7 ภาพถ่ายการทดสอบของชิ้นทดสอบ S1-1



(ก) การแอนตัวสูงสุด

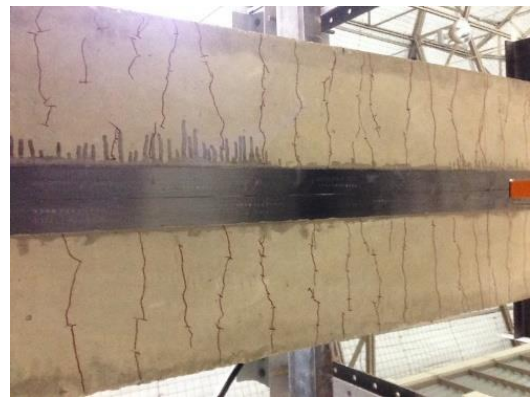


(ข) ความเสียหายบริเวณใต้ท้องพื้น

รูปที่ 8 ภาพถ่ายการทดสอบของชิ้นทดสอบ S2-1



(ก) การแอนตัวสูงสุด



(ข) ความเสียหายบริเวณใต้ท้องพื้น

รูปที่ 9 ภาพถ่ายหลังการทดสอบของชิ้นทดสอบ S2-2

ชิ้นทดสอบเสริมกำลัง S2-1 เป็นชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 2 แผ่น โดยวางห่างกัน 200 mm พบว่าเมื่อรับแรงกระทำถึง 8.35 kN ด้วยการแอนตัว 12 mm พบรอยร้าวแรกที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ตำแหน่งใต้ท้องพื้นบริเวณภายในช่วงคานถ่ายแรง และเมื่อเพิ่มแรงกระทำถึง 9.14 kN ด้วยการแอนตัว 13 mm เริ่มพบรอยร้าวด้านข้างแผ่นพื้น และเมื่อเพิ่มแรงถึง 9.93 kN พบรอยร้าวเกิดขึ้นนอกช่วงคานถ่ายแรง จนกระทั่งเพิ่มแรงสูงสุด 30.24 kN ที่การแอนตัว 58 mm จึงได้ทำการหยุดการทดสอบ เมื่อคำนวณโมเมนต์ที่กระทำกับพื้นพบว่ามีค่า 28.22 kN-m ภาพถ่ายการแอนตัวของชิ้นทดสอบ S2-1 แสดงในรูปที่ 8

สำหรับชิ้นทดสอบเสริมกำลัง S2-2 ซึ่งเป็นชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 2 แผ่น เท่ากับ ชิ้นทดสอบ S2-1 แต่ทำการวางซ้อนทับที่ตำแหน่งเดียวกันเป็นแผ่น CFRP 2 ชั้น ไม่ได้ติดแยกกันเหมือนชิ้นทดสอบ S2-1 ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มแรงกระทำถึง 6.46 kN ที่การแอนตัว 7 mm เริ่มพบรอยร้าวแรกที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ใต้ท้องพื้นในช่วงใต้คานถ่ายแรง และเมื่อเพิ่มแรงกระทำถึง 7.09 kN ที่การแอนตัว 9 mm พบรอยแตกร้าวด้านข้างแผ่นพื้นคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มแรงถึง 20.48 kN ที่การแอนตัว 31 mm แผ่น CFRP ได้หลุดลอกออกจากแผ่นพื้น จึงได้หยุดการทดสอบ เมื่อคำนวณจากแรงกระทำเป็น โมเมนต์กระทำ

ที่พื้น พบว่ามีค่าเพียง 19.11 kN-m ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังต้านทาน โมเมนต์คัตในชั้นทดสอบ S1-1 แต่มีค่าน้อยกว่าชั้นทดสอบ SC2-1 ภาพถ่ายการแอ่นตัวของชั้นทดสอบ S2-2 แสดงในรูปที่ 9

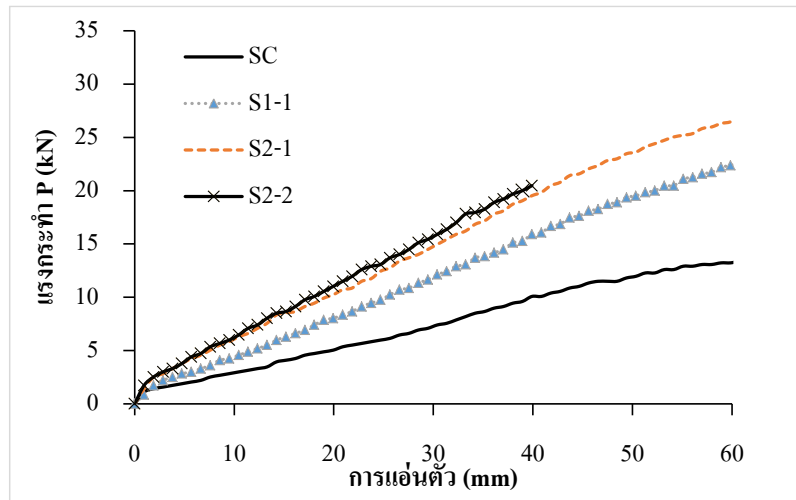
4. อภิปรายผลการทดสอบ

การทำนายกำลังต้านทาน โมเมนต์คัตตามมาตรฐานการออกแบบ ACI318-14 [10] และ ACI440.2R-08[1] แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของชั้นทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 2 จากผลการทำนายจะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP 1 แผ่น จะเพิ่มกำลังขึ้น 1.7 เท่า และจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 2.2 เท่า ถ้าเสริมกำลังด้วย CFRP 2 แผ่น โดยมีสมมติฐานในการทำนายว่าแผ่น CFRP จะไม่หลุดลอกออกจากชั้นตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบพบว่า ผลการทดสอบของชั้นทดสอบควบคุม SC ชั้นตัวอย่าง SC1-1 และชั้นตัวอย่าง SC2-1 สอดคล้องกับผลการทำนาย ในขณะที่ผลการทดสอบของชั้นตัวอย่าง SC2-2 จะได้น้อยกว่าผลการทำนาย โดยมีอัตราส่วนผลการทดสอบต่อผลการทำนายเท่ากับ 0.79 เนื่องจากแผ่น CFRP เกิดการหลุดลอกออกจากชั้นทดสอบ ดังนั้นการทำนายกำลังต้านทาน โมเมนต์คัตจากการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จะต้องคำนึงถึงกำลังยึดเหนี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย และมีข้อสังเกตว่าชั้นตัวอย่าง SC1-1 และชั้นตัวอย่าง SC2-2 มีกำลังต้านทาน โมเมนต์คัตที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ชั้นตัวอย่าง SC2-2 จะเสริมแผ่น CFRP 2 แผ่น แต่วางซ้อนทับกัน จึงทำให้มีพื้นที่ยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่น CFRP และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เท่ากับชั้นตัวอย่าง SC1-1

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้และผลการคำนวณกำลังต้านทานตามมาตรฐานการออกแบบ

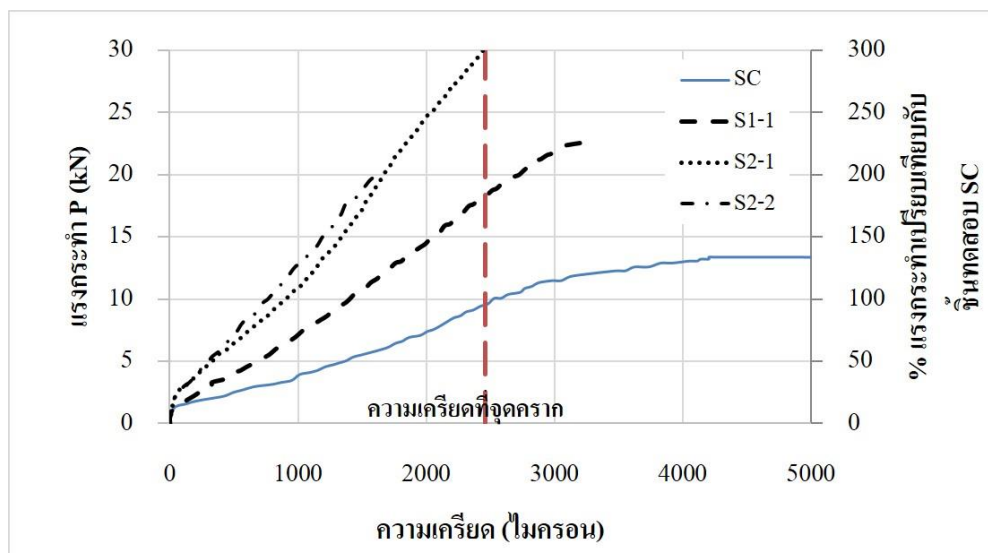
รายการ	SC		SC1-1		SC2-1		SC2-2	
	ทดสอบ	ACI318	ทดสอบ	ACI440	ทดสอบ	ACI440	ทดสอบ	ACI440
แรงกระทำสูงสุด P (kN)	13.71	12.00	22.84	21.21	30.24	25.56	20.48	25.91
โมเมนต์สูงสุด M (kN-m)	12.79	11.20	21.32	19.80	28.22	23.86	19.11	24.18
ผลทดสอบ/ผลการทำนาย	1.14		1.08		1.18		0.79	

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวของชั้นทดสอบของแต่ละชั้นทดสอบแสดงในรูปที่ 10 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการแอ่นตัว จะเห็นว่า ชั้นทดสอบเสริมกำลังสามารถลดการแอ่นตัวของพื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ หากพิจารณาที่แรงกระทำสูงสุดในช่วงอิลาสติกของชั้นทดสอบควบคุม SC ที่แรงกระทำ 13 kN จะมีการแอ่นตัวสูงสุด 40 mm พบว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถลดการแอ่นตัวเป็น 25 mm (ลดลง 38%) 20 mm (ลดลง 50%) และ 19 mm (ลดลง 52%) สำหรับชั้นทดสอบเสริมกำลัง S1-1 S2-1 และ S2-2 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเคียวในเหล็กเสริมตามยาวในชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่าที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 13 kN ความเคียวของเหล็กเสริมในชิ้นทดสอบควบคุม มีประมาณ 2,500 ไมครอน ซึ่งเป็นความเคียวที่จุดคราก และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงความเคียวพลาสติก เมื่อถึงค่ากำลังต้านทาน โมเมนต์ค้ดสูงสุด ในขณะที่ความเคียวของเหล็กเสริมในชิ้นทดสอบเสริมกำลังทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่น้ำหนักบรรทุก 13 kN ความเคียวมีค่าน้อยกว่าจุดครากอยู่มาก ซึ่งสอดคล้องกับระยะการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังจะมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเคียวของเหล็กเสริม

5. การทำนายการแอ่นตัวของแผ่นพื้น

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างตามทฤษฎีอิลาสติกเพื่อคำนวณระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางแผ่นพื้น (Δ) จะได้ตามสมการที่ (6) โดยขึ้นอยู่กับแรงกระทำ (P) ความยาวช่วงพาด (L) ระยะของตำแหน่งแรงกระทำเป็นจุดโดยวัดจากฐานรองรับ (a) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L/3$ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) และ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (I)

$$\Delta = \frac{Pa}{24E_c I} (3L^2 - 4a^2) \quad (6)$$

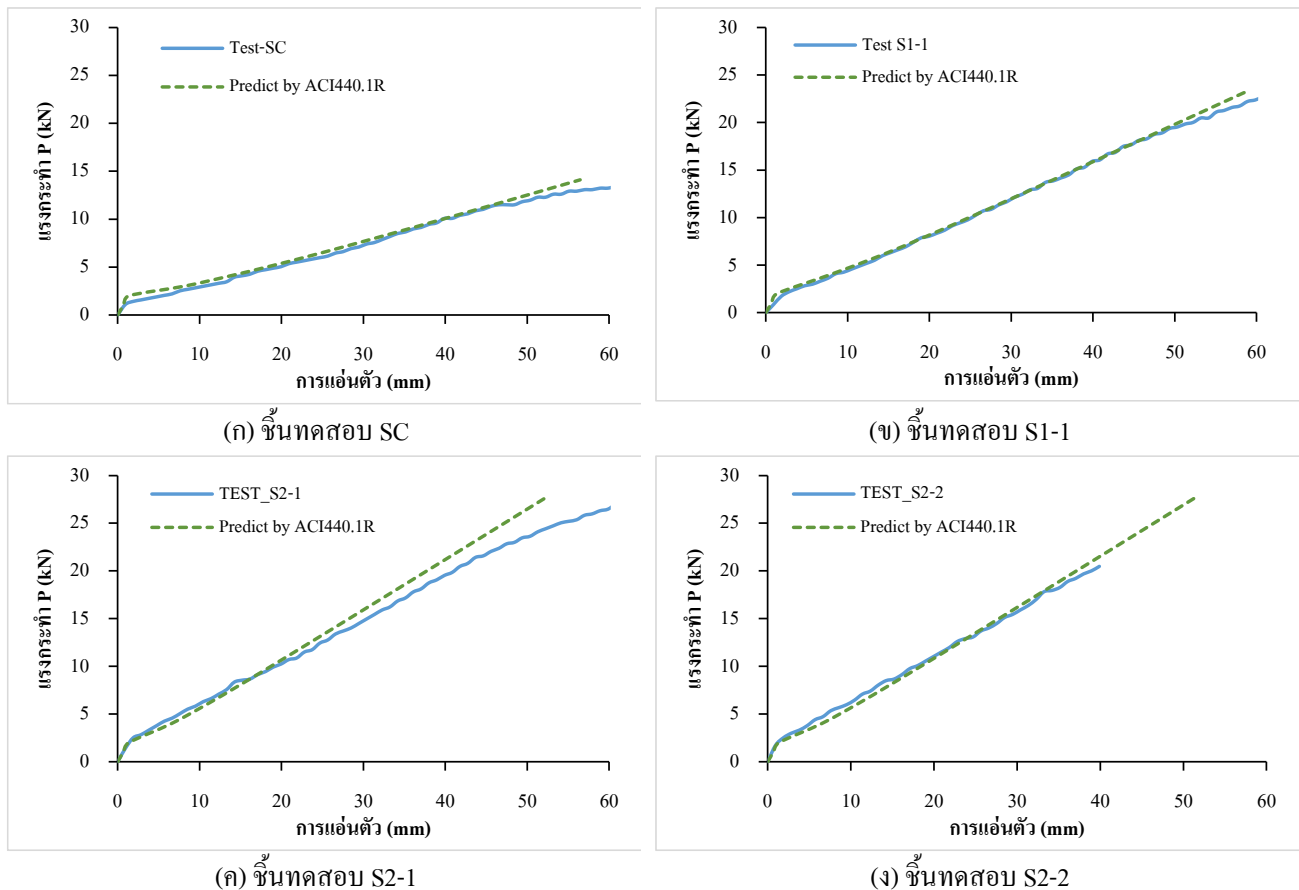
ในการศึกษานี้จะคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (I) โดยใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล (I_e) จากมาตรฐานการออกแบบและเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น (ACI440.1R [2]) ดังแสดงในสมการที่ (3) มาประยุกต์ใช้ และคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกร้าว (I_{cr}) โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด โดยแปลงหน้าตัดเหล็กและแผ่น CFRP เป็นหน้าตัดคอนกรีต ทำให้ได้ระยะรับแรงอัด (kd) ตามสมการที่ (7) และได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแตกร้าว (I_{cr}) ตามสมการที่ (8) เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3) โดยผู้วิจัยได้ทดลองปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยว α_b เนื่องจากแผ่น CFRP เป็นการติดตั้งที่ผิวนอก มิได้ฝังเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเช่นเดียวกับเหล็กเส้นหรือวัสดุคอมโพสิตแบบเส้น พบว่า จะได้ผลการทำนายระยะแอ่นตัวใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยว α_b เท่ากับ 0.30 แล้วนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่ได้ไปใช้คำนวณระยะการแอ่นตัวตามสมการที่ (6)

$$k = \sqrt{(n_s \rho_s + n_f \rho_f)^2 + 2(n_s \rho_s + n_f \rho_f)(h/d)} - (n_s \rho_s + n_f \rho_f) \quad (7)$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + n_s A_s (d - kd)^2 + n_f A_f (h - kd)^2 \quad (8)$$

เมื่อ	E_c	เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
	E_s	เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมคอนกรีต
	A_s	เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีต
	E_f	เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)
	A_f	เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)
	$n_s = E_s / E_c$	และ $n_f = E_f / E_c$
	$\rho_s = A_s / (bd)$	และ $\rho_f = A_f / (bd)$
	d	เป็นความลึกประสิทธิผลวัดจากผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัดถึงตำแหน่งเหล็กเสริม
	h	เป็นความหนาของแผ่นพื้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น CFRP

เมื่อนำผลการทำนายระยะการแอ่นตัวเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในช่วงอิลาสติก จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าได้ผลการทำนายการแอ่นตัวที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวสามารถคำนวณการแอ่นตัวได้เฉพาะช่วงที่โครงสร้างพื้นยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น และก่อนถึงกำลังต้านทานโมเมนต์สูงสุดเท่านั้น ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวในช่วงหลังจากเหล็กเสริมครากไปแล้วได้ ซึ่งเพียงพอแล้วสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสริมกำลังหน้าตัดพื้นด้วยวัสดุคอมโพสิตในช่วงใช้งาน



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบผลการทำนายระยะการแอ่นตัวกับผลการทดสอบ

6. ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ

ในการออกแบบหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต จะสมมติให้วัสดุคอมโพสิตยึดติดกับผิวคอนกรีตกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในการออกแบบนอกจากกำลังต้านทานที่ได้ (ϕM_n) จะต้องมากกว่าโมเมนต์ประลัยที่เกิดขึ้น (M_u) จะต้องตรวจสอบ ความเครียดประสิทธิผลในวัสดุคอมโพสิต และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ ดังนี้

- (ก) ความเครียดประสิทธิผลในวัสดุคอมโพสิต ไม่เกินร้อยละ 90 ของความเครียดประลัยของวัสดุคอมโพสิต

- (ข) หน่วยแรงอัดในคอนกรีตต้องไม่เกินร้อยละ 45 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต
- (ค) หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องไม่เกินร้อยละ 80 ของกำลังดึงครากของเหล็กเสริม
- (ง) หน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดต้องไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังดึงครากของเหล็กเสริม
- (จ) หน่วยแรงดึงในวัสดุคอมโพสิต (คาร์บอนไฟเบอร์) ต้องไม่เกินร้อยละ 33 ของกำลังดึงประลัยวัสดุคอมโพสิต

นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยแนะนำให้ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนในแนวราบระหว่างผิวสัมผัสระหว่างกาวยีพ็อกซ์กับพื้นผิวคอนกรีตเปรียบเทียบกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bonding strength) ที่ผู้ผลิตระบุไว้ หน่วยแรงเฉือน (τ) คำนวณได้จาก

$$\tau = VQ / (Ib) \tag{9}$$

เมื่อ	V	เป็นแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น
	Q	เป็นโมเมนต์ของพื้นที่โดยใช้พื้นที่หน้าตัดแปลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $n_f A_f (h - kd)$
	I	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง โดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับหน้าตัดเดกกร้าว (I_{cr})
	b	เป็นความกว้างของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุคอมโพสิต

ในการศึกษาผู้ผลิตได้ระบุหน่วยแรงยึดเหนี่ยวไว้ที่ 3.4 MPa จากผลการคำนวณหน่วยแรงเฉือนสำหรับชั้นทดสอบเสริมกำลังพบว่า ได้ค่าหน่วยแรงเฉือนในแนวราบเท่ากับ 3.4 2.1 และ 2.8 MPa สำหรับชั้นทดสอบเสริมกำลัง S1-1 S2-1 และ S2-2 ตามลำดับ ซึ่งหน่วยแรงเฉือนที่คำนวณได้สำหรับชั้นทดสอบ S1-1 จะมีค่าเท่ากับที่ผู้ผลิตระบุไว้พอดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่เมื่อรับแรงเฉือนสูงสุด 22.84 kN เกิดการแอ่นตัว 49 mm ได้เกิดการหลุดลอกของแผ่น CFRP ในขณะที่ชั้นทดสอบ S2-1 ซึ่งเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 2 แผ่น คำนวณหน่วยแรงเฉือน 2.1 MPa จะมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ผู้ผลิตระบุไว้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของชั้นตัวอย่างดังกล่าว คือไม่ได้รับความเสียหายจากการหลุดลอกของแผ่น CFRP เนื่องจากใช้ความกว้างผิวสัมผัสในการคำนวณ (b) เท่ากับ 200 mm ในขณะที่ชั้นทดสอบเสริมกำลัง S2-2 เป็นชั้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP 2 แผ่น เท่ากับ ชั้นทดสอบ S2-1 แต่ทำการติดเป็น 2 ชั้น รูปแบบการวิบัติเป็นการหลุดลอกของแผ่น CFRP ที่แรงเฉือน 20.48 kN เมื่อใช้ความกว้างผิวสัมผัสในการคำนวณ (b) เท่ากับ 100 mm พบว่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2.8 MPa ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 82 ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซ์ตามที่ผู้ผลิตระบุ

ดังนั้นสำหรับแนวทางปฏิบัติในการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตเสริมด้วยวัสดุคอมโพสิตแบบแผ่น ผู้วิจัยแนะนำให้ทำการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนในแนวราบ (τ) ควบคู่กับการตรวจสอบหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยอาจเพิ่มตัวคูณลดกำลังสำหรับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของกาวยีพ็อกซ์ประมาณ 0.70-0.80 เพื่อใช้ควบคุมการแอ่นตัว และกำลังต้านทานแรงสูงสุดของหน้าตัดภายหลังจากทำการเสริมกำลังแล้ว ซึ่งจะเพิ่มความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุกมากยิ่งขึ้น

7. สรุป

จากการทดสอบพฤติกรรมการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นตัวแทนพื้นคอนกรีตระบบไร้คาน ซึ่งมักประสบปัญหาการแอ่นตัวมีค่ามากเกินไป ภายหลังจากที่มีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนาน และนิยมซ่อมเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยภายนอก ผลการทดสอบพื้นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตภายนอก ในรูปแบบเสริมจำนวน 1 แผ่น และเสริมจำนวน 2 แผ่น รูปแบบการติดได้ท้องพื้นวางห่างกัน และรูปแบบติดซ้อนทับกัน 2 ชั้น ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำ 2 จุด โดยทำการเปรียบเทียบกับขั้นตอนทดสอบที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง พบว่า ขั้นตอนทดสอบที่เสริมกำลังสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ 1.7 เท่า และ 2.2 เท่าของกำลังต้านทานพื้นที่ที่ไม่ได้เสริมกำลัง ขั้นตอนทดสอบเสริมกำลังสามารถลดการแอ่นตัวสูงได้ 38% 50% และ 52% สำหรับขั้นตอนทดสอบเสริมกำลัง 1 แผ่น 2 แผ่นวางห่างกัน และ 2 แผ่นวางซ้อนทับกัน ตามลำดับ รูปแบบการวางซ้อนทับกัน พบปัญหาการวิบัติด้วยการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่น้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า และเมื่อนำสมการทำนายการแอ่นตัวของ ACI440.1R [2] ซึ่งเป็นสมการสำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นเสริมภายในคอนกรีตมาประยุกต์ใช้ทำนายและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ พบว่าสามารถทำนายการแอ่นตัวของขั้นตอนทดสอบเสริมกำลังได้อย่างแม่นยำ โดยจะต้องคำนวณความลึก kd และโมเมนต์ความเฉื่อยแตกร้าวใหม่ (I_{cr}) เนื่องจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยทำให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากขึ้น และปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยว (α_b) เท่ากับ 0.30 โดยผู้วิจัยแนะนำให้ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนในแนวราบของผิวสัมผัสสกาอิฟอกซ์กับผิวคอนกรีต เพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉียบพลันจากการหลุดลอก และช่วยควบคุมการแอ่นตัวสำหรับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก โครงการวิจัยแผ่นดินมหาวิทยาลัยพะเยา ประจำปีงบประมาณ 2560 สัญญาเลขที่ RD60056 โครงการ “การทำนายการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต” และ บริษัท พี.อาร์.เอ็ม.คอนกรีต จำกัด สำหรับการเตรียมขั้นตอนทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, (ACI318-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014.
- [2] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* (ACI440.2R-08), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- [3] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars* (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006.
- [4] R. Balamuralikrishnan and C. A. Jeyasehar. Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics, *The Open Civil Engineering Journal*, 2009, 3, pp. 102-109.
- [5] M. Daugevicius, J. Valivonis, G. Marciukaitis. Deflection analysis of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer under long-term load action, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2012, 13(8); pp. 571-583.

- [6] S. El-Gamal, B. AbdulRahman, and B. Benmokrane. Deflection Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Different Types of GFRP Bars, *The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2010)*, 2010, Sept 27-29, Beijing, China.
- [7] I. Kalkan. Deflection Prediction for Reinforced Concrete Beams Through Different Effective Moment of Inertia Expressions, *International Journal Engineering Research & Development*, 2010, 2(1), Jan.
- [8] M. M. Bhunga and N. K. Arora. Comparative Study of ER-FRP Laminated Beam Design Using ACI440-2R-08 and ISIS Canada Method, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies (E-ISSN2249-8974)*, 2012, 1(3), April-June, pp. 200-203.
- [9] M. S. Gorji. Analysis of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Using Energy Variation Method, *World Applied Sciences Journal*, 2009, 6(1), pp. 105-111.
- [10] Department of Public Works and Town &Country Planning. Standard for Strengthening Concrete Structures Using Fiber Composite Materials (DPT. 1508-51), Structural Engineering and System Bureau, Department of Public Works and Town &Country Planning, Bangkok, 2008.