

การตรวจสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริม กำลังภายนอกด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย คาร์บอนภายใต้แรงกระทำตามขวาง*

สิทธิชัย แสงอาทิตย์¹⁾ และ นริศ พิเชียรโชติ²⁾

¹⁾ รองศาสตราจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²⁾ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Email: sitichai@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่สภาวะใช้งานของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบจำนวน 20 ตัวอย่างได้ถูกทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยความยาวช่วงของพื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP และความยาวของแผ่น CFRP ตัวอย่างทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มตามลักษณะการวิบัติของพื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง จากการทดสอบพบว่า พื้นี่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP มีพฤติกรรมการรับแรงแบบ trilinear ซึ่งแตกต่างจากพื้นที่ไม่มีการเสริมกำลังที่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบ bilinear และพื้นดังกล่าวมีค่ากำลังรับแรงกระทำและความแรงแรงสูงขึ้นจากพื้นที่ไม่มีการเสริมกำลัง โดยขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรที่ใช้ศึกษา

คำสำคัญ : การเสริมกำลัง, พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป, แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 20 เมษายน 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม 2549

INVESTIGATION ON PRECAST PRESTRESSED CONCRETE SLABS STRENGTHENED WITH CFRP PLATES SUJECTED TO TRANSVERSE LOADS^{*}

Sittichai Seangatith¹⁾ and Naris Pichianchote²⁾

¹⁾ Associate Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²⁾ Graduate Student, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Email: sitichai@sut.ac.th

ABSTRACT

The objective of this paper is to present the experimental results of the precast prestressed concrete slabs strengthened by using carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates. The total of 20 specimens was tested by using four-point loading test. The specimen variables included the span length of the slab, the cross-sectional area and the length of the CFRP plate. The precast prestressed concrete slab specimens were categorized into five groups according to the modes of failure predicted by using an analytical model. It was found that the flexural behavior of the strengthened concrete slabs was in the form of trilinear response which is different from that of the concrete slabs without strengthening, which was in the form of bilinear response, and the strength and the stiffness of the strengthened concrete slabs were increased from those of the concrete slabs without strengthening, depending on the specimen variables.

Keywords : Strengthening, Precast prestressed concrete slab, Carbon fiber reinforced plastic

*

Original manuscript submitted: April 20, 2006 and Final manuscript received: July 17, 2006

บทนำ

ในปัจจุบัน พลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic, FRP) ประเภทแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) ได้ถูกนำมาใช้แทนการใช้เหล็กโครงสร้างในการเสริมกำลัง (strengthening) และซ่อมแซม (repair) โครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมากขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจาก CFRP เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูงและมีน้ำหนักเบา ซึ่งทำให้ง่ายในการติดตั้ง นอกจากนั้นแล้ว CFRP ยังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (เทียบเท่าเหล็กโครงสร้าง) และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี ตัวอย่างของโครงสร้างที่ต้องการการเสริมกำลังที่มักพบคือ การเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้งานโครงสร้างไปจากเดิม ซึ่งทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ถูกออกแบบไว้ และตัวอย่างของโครงสร้างที่ต้องการการซ่อมแซมที่มักพบคือ โครงสร้างที่ได้รับความเสียหายจากการเสื่อมสภาพของวัสดุตามอายุการใช้งานหรือการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างลดลง



รูปที่ 1 ตัวอย่างการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสา คาน ผนัง และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย
พลาสติกเสริมเส้นใย

จากการทำปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังขององค์อาคารของโครงสร้างจะเป็นการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีต (Hamoush *et al.*, 1990; An *et al.*, 1991; Ritchie *et al.* 1991; Saadatmanesh *et al.*, 1991; Ziraba *et al.*, 1994; Chjes *et al.*, 1995; Malek *et al.*,

1998; Bonacci *et al.*, 2000) การศึกษาพฤติกรรมของการใช้พลาสติกเสริมเส้นใยรับแรงในโครงสร้างต่างๆ (Saadatmanesh *et al.*, 1994) การพัฒนามาตรฐานการออกแบบเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยให้กับสะพานและโครงสร้างอาคาร (Cheung *et al.*, 2000) การทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวระยะยาวขององค์อาคาร (Hall *et al.*, 2000) การศึกษาการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Arduini *et al.*, 1997; Robert *et al.*, 1989; Malek *et al.*, 1998) ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการต่างๆ ที่ได้รับการศึกษาสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังภายนอกให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่น CFRP นั้นพบว่ามีศึกษาน้อยมาก วิมลและสิทธิชัย (2544) ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กและเปรียบเทียบกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การกระทำของแรงแบบ four-point loading จากการทดสอบแผ่นพื้นพบว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 25.9 เปอร์เซ็นต์ และมีความแกร่ง (stiffness) โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 31.7 เปอร์เซ็นต์ โดยแผ่นพื้นจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการดัดในบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพื้น โดยการแตกร้าวจะค่อยๆ เกิดขึ้นในช่วงแรก และจะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้แผ่นพื้นเกิดการโก่งตัวอย่างรวดเร็วในช่วงที่สอง โดยที่แรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และสิทธิชัยและวิมล (2546) ได้เสนอแบบจำลองการวิเคราะห์พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเหล็กและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ ซึ่งพบว่า ผลการวิเคราะห์ของพื้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติทางกลของแผ่น CFRP และแผ่นเหล็กและเพื่อให้วิศวกรที่เกี่ยวข้องได้เกิดความเข้าใจและมีข้อมูลประกอบการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ดังนั้น จุดประสงค์ของบทความนี้คือ เพื่อนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมรับแรงลักษณะการวิบัติ และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่สภาวะใช้งานของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ภายใต้แรงกระทำ 4 จุด

การทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP

ในการศึกษานี้ตัวอย่างทดสอบได้ถูกออกแบบโดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ดังที่แสดงเป็นแผนผังการคำนวณในภาคผนวก ซึ่งได้ถูกพัฒนามาจากแบบจำลองของสิทธิชัยและวิมล (2546) โดยตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบตามรูปแบบการวิบัติของพื้นที่กำหนดขึ้น 5 รูปแบบดังต่อไปนี้

1. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังเป็นพื้นควบคุม (พื้นกลุ่ม G1)
2. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมแผ่น CFRP ที่ออกแบบให้วิบัติโดยการแตกร้าวที่ผิวรับแรงดึงโดยเสริมแผ่น CFRP 1 ชั้น (พื้นกลุ่ม G2)

3. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมแผ่น CFRP ที่ออกแบบให้วิบัติโดยการแตกร้าวที่ผิวรับแรงดึงโดยเสริมแผ่น CFRP 2 ชั้น (พื้นกลุ่ม G3)
4. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมแผ่น CFRP ที่ออกแบบให้วิบัติโดยการหลุดลอกของแผ่น CFRP (Debonding Failure) (พื้นกลุ่ม G4)
5. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมแผ่น CFRP ที่ออกแบบให้วิบัติโดยแรงเฉือนขวาง (พื้นกลุ่ม G5)

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างทดสอบ และตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุต่างๆที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยสมบัติทางกลของคอนกรีตทับหน้าได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนสมบัติทางกลของวัสดุอื่นๆ ที่เหลือได้มาจากผู้ผลิตที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างทดสอบ		ความยาวของแผ่นพื้น (m)	ขนาดของแผ่น CFRP (กว้างxหนาxยาว) (cm)	ลักษณะการวิบัติที่กำหนด
G1	S-T0-3.0	3.0	-	Flexural tensile cracks
	S-T0-4.0	4.0	-	
G2	S-T1-3.0	3.0	5.0x0.12x250	Flexural tensile cracks
	S-T1-4.0	4.0	5.0x0.12x350	
G3	S-T2-3.0	3.0	5.0x0.12x250, (180)*	Flexural tensile cracks
	S-T2-4.0	4.0	5.0x0.12x350, (280)*	
G4	S-D-3.0	3.0	5.0x0.12x130	Debonding of CFRP plate
	S-D-4.0	4.0	5.0x0.12x180	
G5	S-S-3.0	3.0	10.0x0.12x200	Transverse shear cracks
	S-S-4.0	4.0	10.0x0.12x260	

หมายเหตุ * แผ่นพื้นที่เพิ่มแผ่น CFRP อีกหนึ่งชั้น โดยมีหน้าตัดของแผ่น CFRP เท่ากับชั้นแรก แต่ความยาวเปลี่ยนแปลงตามที่เราระบุไว้วงเล็บ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

นอกจากนั้นแล้ว ข้อมูลรายละเอียดของแผ่นพื้นและวัสดุที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้

- แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป มีความยาว 3 เมตรและ 4 เมตร มีความหนา 5 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร เสริมด้วยลวดอัดแรง เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 5 เส้น โดยใช้แรงดึงลวดอัดแรงถึง 70 % ของกำลังรับแรงดึงประลัย (ultimate strength) และมีระยะจากผิวบนสุดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปถึงลวดอัดแรง 3 เซนติเมตร
- คอนกรีตทับหน้า (topping) มีความหนา 5 เซนติเมตรกว้าง 35 เซนติเมตร
- แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เป็นของบริษัท Sika (Thailand) จำกัด ประเภท Sika CarboDur S512 (กว้าง 5 เซนติเมตร หนา 1.2 มิลลิเมตร) และ S1012 (กว้าง 10 เซนติเมตร หนา 1.2 มิลลิเมตร)

- กาวอีพอกซี (epoxy adhesive) เป็นของบริษัท Sika (Thailand) จำกัด ประเภท Sikadur-30 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) สูงและมีกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) ระหว่างผิวของคอนกรีตและผิวของแผ่น CFRP สูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

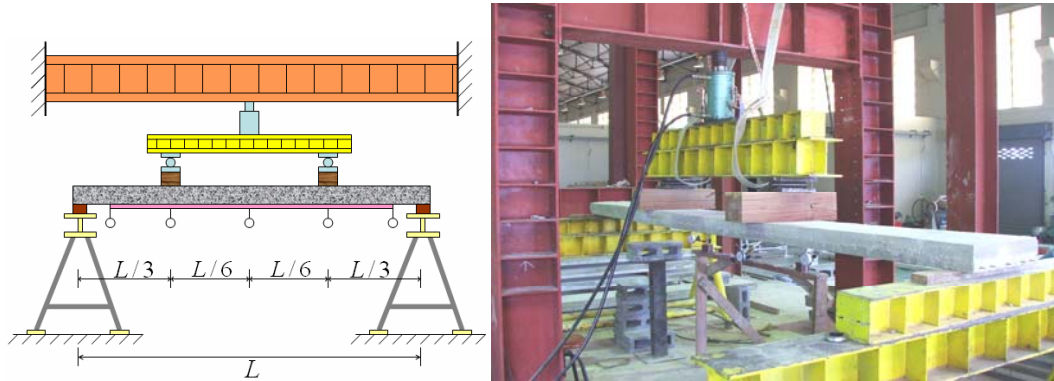
วัสดุ	Ultimate strength (ksc)	Yielding strength (ksc)	Modulus of elasticity (ksc)	หมายเหตุ
คอนกรีตของแผ่นพื้น	$f'_c = 350$	-	300,000	TIS 828-2531 standard
คอนกรีตทับหน้า	$f'_c = 250$	-	226,000	ASTM C39-94 standard
ลวดอัดแรง	$f_{su} = 18,500$	$f_{sy} = 15,500$	2,047,000	TIS 95-2534 standard
แผ่น CFRP	$f_{CFRP} = 31,800$	-	1,920,000	ASTM 3039 standard
	Shear strength (ksc)	Bond Strength (ksc)	Shear modulus (ksc)	หมายเหตุ
epoxy	152.9	40.8	2,970	F.I.P.* standard

หมายเหตุ * Fédération Internationale de la Précontrainte

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่มถูกทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four-point loading test) โดยมีความยาวประสิทธิผลระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 2.8 เมตร สำหรับพื้นยาว 3.0 เมตรและ 3.8 เมตร สำหรับพื้นยาว 4.0 เมตร รูปที่ 2 แสดงแผนภาพการทดสอบและรูปภาพของการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้

ในการทดสอบ พื้นที่มีความยาว L ค่าหนึ่งจะถูกทำการทดสอบ 2 ตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบจะเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงหนึ่งแผ่นซึ่งถูกก่อสร้างบนพื้นอาคารที่เรียบและได้ระดับ ทำการตีแบบข้างให้แน่นหนา จากนั้น ทำการเทคอนกรีตทับหน้าและทำการบ่มคอนกรีตดังกล่าวโดยใช้น้ำยาบ่มคอนกรีตของบริษัท Rocco Thai จำกัด เป็นเวลา 26 วัน ก่อนทำการทดสอบ ในกรณีพื้นที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP บริเวณของพื้นที่จะติดตั้งแผ่น CFRP จะถูกทำความสะอาด และแผ่น CFRP จะถูกติดตั้งเข้ากับพื้นคอนกรีตอัดแรงในสภาวะที่แผ่นพื้นไม่ถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุกทุกในวันที่ 27 โดยขณะติดตั้งแผ่น CFRP พื้นคอนกรีตอัดแรงถูกวางราบบนพื้นคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ และปล่อยให้กาวอีพอกซีบ่มตัวเป็นระยะเวลาประมาณ 1 วันก่อนการทดสอบ ในขณะเดียวกัน มาตราวัดความเครียด (strain gauge) จะถูกนำมาติดตั้งที่กึ่งกลางความยาวของพื้น ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อตรวจสอบความเครียดของแผ่น CFRP ภายใต้แรงกระทำ



รูปที่ 2 แผนภาพและรูปภาพของการทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบ four-point loading



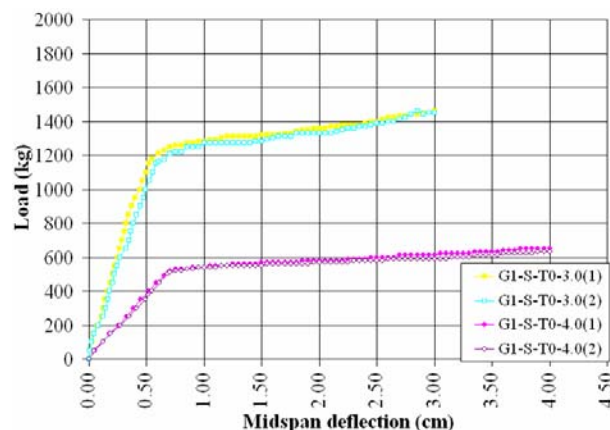
รูปที่ 3 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดบนแผ่น CFRP ที่กึ่งกลางความยาวช่วงของแผ่นพื้น

ในแต่ละการทดสอบ พื้นถูกนำมาติดตั้งบนฐานรองรับ โดยแรงกระทำจะกระทำต่อพื้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อย โดยใช้ hydraulic pump แบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับ hydraulic jack ขนาด 30 ตัน จากนั้น ทำการวัดค่าแรงกระทำค่าความเครียด และระยะการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่างๆของพื้น จากนั้น ทำการตรวจสอบหารอยร้าวที่อาจเกิดขึ้น และทำการบันทึกข้อมูล จากนั้น ทำการเพิ่มแรงกระทำในรอบถัดไป และดำเนินการเช่นเดิมไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ โดยจุดสิ้นสุดการวัดค่าการแอ่นตัวของการทดสอบ แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ เมื่อพื้นเกิดการวิบัติโดยสมบูรณ์ โดยไม่สามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้น หรือเมื่อการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางความยาว L ของพื้นมีค่าประมาณ $L/100$ ซึ่งมีค่าเป็น 2.4 เท่าของค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ในมาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของแผ่นพื้น

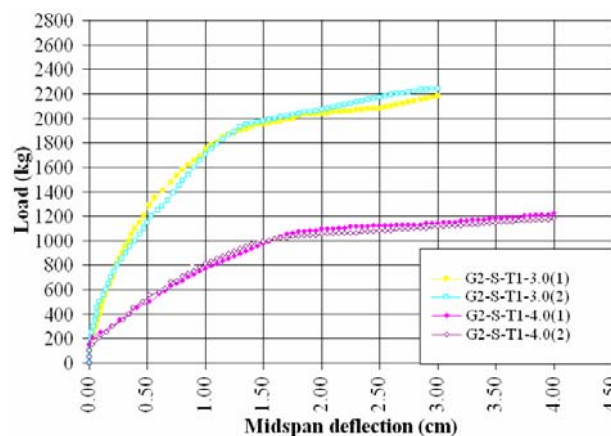
จากการทดสอบพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาว L ของพื้นกลุ่มทดสอบ มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8 ตามลำดับ จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ากราฟของพื้นกลุ่ม G1(พื้นอ้างอิง) มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นกลุ่ม G1 มีพฤติกรรมแบบ bilinear โดยช่วงแรกพื้นมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงค่าประมาณ 80-85 เปอร์เซ็นต์ของ $P_{L/100}$ โดยที่ $P_{L/100}$ คือแรงกระทำต่อพื้นที่ทำให้พื้นมีค่าการแอ่นตัว $L/100$ ที่กึ่งกลางพื้น การแตกร้าวของพื้นมีค่าน้อยมาก ทำให้พื้นช่วงนี้มีความแข็งแกร่งค่อนข้างสูง จากนั้นในช่วงที่ 2 พื้นยังคงมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง โดยที่ผิวด้านล่างของพื้นเกิดรอยร้าวซึ่งส่วนใหญ่อยู่ระหว่างจุดให้แรงกระทำ และเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดพื้นมีค่าลดลง ซึ่งแรงกระทำต่อพื้นมีค่าเพิ่มขึ้นช้ามากในขณะที่การแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้พื้นช่วงนี้ความแข็งแกร่งลดลงอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากการที่ความชันของกราฟเส้นตรงในช่วงนี้ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับความชันของกราฟในช่วงแรก



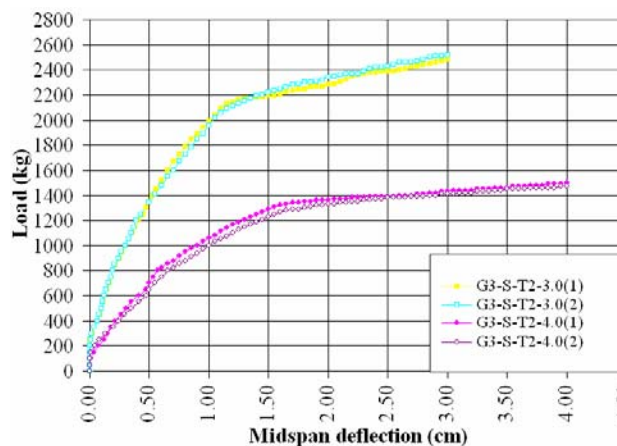
รูปที่ 4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ G1

ส่วนกราฟของพื้นกลุ่ม G2, G3, G4 และ G5 ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 8 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงสามเส้นที่มีความชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นมีพฤติกรรมแบบ trilinear โดยช่วงแรกพื้นมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงจนถึงค่าประมาณ 40-45 เปอร์เซ็นต์ของ $P_{L/100}$ โดยที่ตำแหน่งสุดท้ายของเส้นกราฟในช่วงนี้ ผิวด้านล่างของพื้นซึ่งรับแรงดึงที่อยู่ระหว่างจุดให้แรงกระทำมีรอยร้าวจำนวนน้อยและมีขนาดเล็กทำให้พื้นช่วงนี้มีความแข็งแกร่งค่อนข้างสูง จากนั้น ในช่วงที่ 2 พื้นยังคงมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงจนถึงค่าประมาณ 80-85 เปอร์เซ็นต์ของ $P_{L/100}$ โดยรอยร้าวมีจำนวนมากขึ้นและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่อยู่ระหว่างจุดให้แรงกระทำ ระยะห่างของรอยร้าวมีระยะใกล้เคียงกันมากกว่าระยะห่างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในพื้นกลุ่ม G1 ทำให้พื้นช่วงนี้มีความแข็งแกร่งลดลงจากช่วงแรกเล็กน้อย ดังจะเห็นได้จากการที่

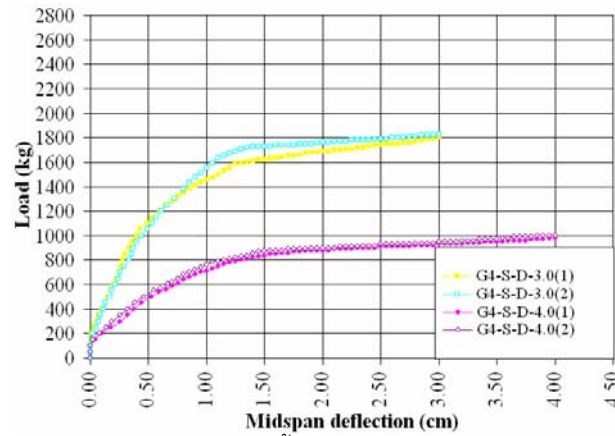
ความชันของกราฟเส้นตรงช่วงนี้ลดลงจากความชันของกราฟในช่วงแรกเล็กน้อย สุดท้ายในช่วงที่ 3 พื้นยังคงมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง แต่รอยร้าวที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดพื้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากรอยร้าวที่ขยายตัวมากขึ้น ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีต ลวดอัดแรง และแผ่น CFRP ไม่สมบูรณ์ ซึ่งพฤติกรรมของพื้นในช่วงนี้แรงดึงที่เกิดขึ้นในส่วนล่างของหน้าตัดของพื้นถูกรองรับโดยเส้นลวดอัดแรงและแผ่น CFRP เป็นส่วนใหญ่ เป็นผลให้แผ่น CFRP ที่เสริมกำลังพื้นมีค่าความเครียดที่กึ่งกลางความยาวแผ่น CFRP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แรงกระทำต่อพื้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังที่แสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางแผ่น CFRP และพื้นเกิดการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นช่วงนี้มีความแกร่งลดลงจากช่วงที่ 2 มาก ดังจะเห็นได้จากการที่ความชันของกราฟเส้นตรงช่วงนี้ลดลงอย่างมากจากความชันของกราฟในช่วงแรกและช่วงที่ 2



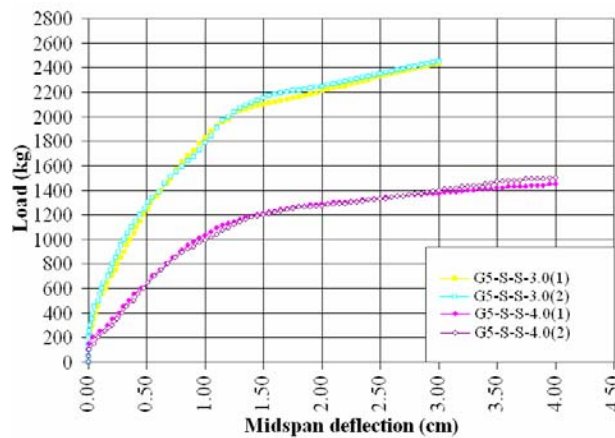
รูปที่ 5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ G2



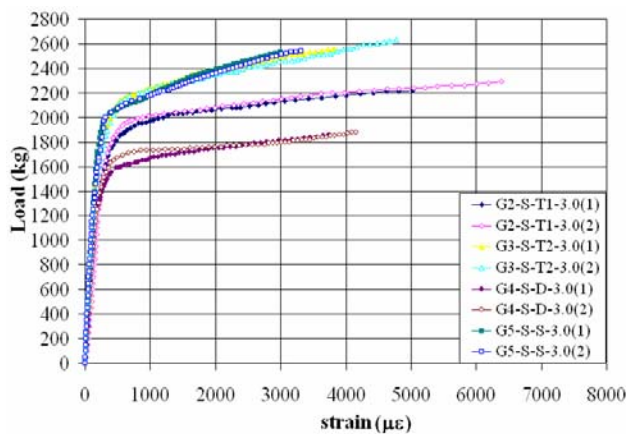
รูปที่ 6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ G3



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ G4



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ G5



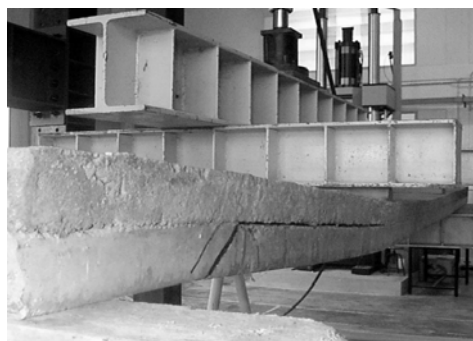
รูปที่ 9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางแผ่น CFRP ของตัวอย่างทดสอบที่มีความยาว $L = 2.8 \text{ m}$



(a) การแตกร้าวโดยการดัดบริเวณช่วงกึ่งกลางของแผ่นพื้น



(b) Debonding ของแผ่น CFRP



(c) การแตกร้าวของแผ่นพื้นโดยแรงเฉือนขวางที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP

รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มต่างๆ

โดยรวมแล้ว ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างทดสอบเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งลักษณะการวิบัติของพื้นกลุ่ม G1 G2 และ G3 เป็นการวิบัติที่ผิวรับแรงดึงของพื้น ดังที่แสดงในรูปที่ 10 (a) ส่วนพื้นกลุ่ม G4 เกิดการวิบัติแบบการหลุดลอกของแผ่น CFRP ดังที่แสดงในรูปที่ 10 (b) โดยการวิบัติในลักษณะนี้เมื่อปลายของแผ่น CFRP หลุดออกจากพื้นเพียงเล็กน้อยและพื้นจะไม่สามารถรับแรงกระทำเพิ่มได้อีก หลังจากนั้นการหลุดลอกของแผ่น CFRP เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และพื้นเกิดการวิบัติ

แบบทันทีทันใด ส่วนพื้นกลุ่ม G5 เกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนขวาง ดังที่แสดงในรูปที่ 10 (c) โดยตำแหน่งที่เกิดการวิบัติเกิดที่ตำแหน่งปลายของแผ่น CFRP ซึ่งการวิบัตินี้เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด

กำลังรับแรงกระทำของพื้น

ในการศึกษานี้ กำลังรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน ($P_{L/240}$) หมายถึง ความสามารถของพื้นในการต้านทานต่อแรงกระทำ เมื่อพื้นมีการแอ่นตัวที่กึ่งกลางพื้นเท่ากับ $L/240$ ตารางที่ 3 แสดงค่า $P_{L/240}$ ของพื้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และแผ่นเหล็ก เมื่อพิจารณาค่า $P_{L/240}$ ภายในกลุ่มพื้น G2 G3 G4 และ G5 พบว่า การเสริมกำลังพื้นด้วยแผ่น CFRP นั้น พื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร มีค่า $P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร ประมาณ 1.8-2.0 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP นั้น เมื่อพื้นที่มีความยาวมาก ผลของการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ยังมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตัวอย่างทดสอบ		$P_{L/240}$ (kg)	$P_{L/240}$ เมื่อเทียบกับตัวอย่าง ทดสอบอ้างอิงกลุ่มที่ G1
G1	3 m.	1,290	-
	4 m.	565	-
G2	3 m.	1,870	45.0%
	4 m.	1,010	78.8%
G3	3 m.	2,100	62.8%
	4 m.	1,290	128.3%
G4	3 m.	1,600	24.0%
	4 m.	860	52.2%
G5	3 m.	2,000	55.0%
	4 m.	1,225	116.8%

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน

เมื่อพิจารณาเฉพาะพื้นที่มีความยาวเท่ากันในแต่ละกลุ่มพื้น พบว่า พื้นกลุ่มที่มีเปอร์เซ็นต์ของค่า $P_{L/240}$ เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ พื้นกลุ่ม G3 (เพิ่มขึ้น 62.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร และเพิ่มขึ้น 128.3 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร) รองลงมาคือพื้นกลุ่ม G5 (เพิ่มขึ้น 55.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร และเพิ่มขึ้น 116.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร) พื้นกลุ่ม G2 (เพิ่มขึ้น 44.96 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร และเพิ่มขึ้น 78.76 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร) และพื้นกลุ่ม G4 (เพิ่มขึ้น 24.03 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร และเพิ่มขึ้น 52.21 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร) ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว จากความชันของเส้นกราฟในช่วงแรก ดังแสดงรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP มีความแกร่งของพื้นในการรับแรงกระทำ

เพิ่มขึ้นจากพื้นกลุ่ม G1 เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ ในกรณีพื้นที่มีความยาว 2.8 เมตร พื้นกลุ่ม G3 มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากที่สุด 56.3 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย รองลงมาคือพื้นกลุ่ม G5 เท่ากับ 46.4 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย พื้นกลุ่ม G2 เท่ากับ 39.3 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย และน้อยที่สุดเป็นพื้นกลุ่ม G4 เท่ากับ 27.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย และในกรณีพื้นที่มีความยาว 3.8 เมตร พื้นกลุ่ม G3 มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากที่สุด 80.6 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย รองลงมาคือพื้นกลุ่ม G5 เท่ากับ 73.6 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย พื้นกลุ่ม G2 เท่ากับ 40.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย และน้อยที่สุดเป็นพื้นกลุ่ม G4 เท่ากับ 34.9 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย ซึ่งความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่เสริมด้วยแผ่น CFRP เทียบกับพื้นกลุ่ม G1 พื้นที่ที่มีความยาวมากกว่าจะมีความแข็งแรงของพื้นเพิ่มขึ้นมากกว่า

สรุปผล

1. จากผลการทดสอบ พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า $P_{L/240}$ คือ
 - 1.1 ขนาดหน้าตัดแผ่น CFRP - เมื่อขนาดหน้าตัดแผ่น CFRP เพิ่มขึ้น ค่า $P_{L/240}$ ก็มากขึ้นด้วย
 - 1.2 ความยาวของแผ่น CFRP - ค่า $P_{L/240}$ มีค่าลดลงเมื่อความยาวของแผ่น CFRP มีค่าลดลง และเมื่อความยาวของแผ่น CFRP ลดลงถึงค่าหนึ่ง จะเกิดการวิบัติโดยหลุดลอกของแผ่น CFRP
 - 1.3 ความยาวประสิทธิผลของพื้น - เมื่อความยาวของพื้นมากขึ้น ผลของการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- โดยแผ่นพื้นที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP มีพฤติกรรมการรับแรงกระทำตามขวางแบบ four-point loading แบบ trilinear ซึ่งแตกต่างกับแผ่นพื้นอ้างอิงที่มีพฤติกรรมแบบ bilinear ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาในการตรวจสอบการโก่งตัวของพื้นในการออกแบบพื้นด้วย
2. การทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ในแต่ละกลุ่ม พบว่า แผ่นพื้นมีลักษณะการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งพื้นที่มีความยาวเท่ากันในแต่ละกลุ่มตัวอย่างทดสอบนั้นมีค่า $P_{L/240}$ และความแข็งแรงของแผ่นพื้นที่เพิ่มขึ้นโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ พื้นกลุ่ม G3, G5, G2, และ G4 ตามลำดับ
3. ลักษณะการวิบัติในพื้นกลุ่ม G2 และ G3 เป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป ขณะที่การวิบัติในพื้นกลุ่ม G4 และ G5 เป็นแบบทันทีทันใด ดังนั้น หากทำการออกแบบการเสริมกำลังแบบพื้นกลุ่ม G4 และ G5 จะต้องมีความระมัดระวังในการออกแบบสูงกว่าการออกแบบการเสริมกำลังแบบพื้นกลุ่ม G2 และ G3 เช่น การเพิ่มส่วนความปลอดภัยให้สูงขึ้น เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ และเครื่องมือทดสอบจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และขอขอบคุณบริษัท Sika (Thailand) จำกัด ที่สนับสนุนส่วนลดราคาแผ่น CFRP และอีพอกซีที่ใช้ในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- วิมล สมสะอาดและสิทธิชัย แสงอาทิตย์. 2544. “การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ. ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวิมล สมสะอาด. 2546. “พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก.” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 10, 2: 110-124.
- An, W., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R. 1991. “R/C Beams Strengthened with FRP Plate. II: Analysis and Parametric Study.” **Journal of Structural Engineering**. 117, 11: 3434-3455.
- Arduini, M., Tommaso, A.D. and Nanni, A. 1997. “Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams.” **ACI Structural Journal**. 94, 4: 363-370.
- Bonacci, J. F. and Maalej, M. 2000. “Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams.” **ACI Structural Journal**. 97, 5: 703-711.
- Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., William, J. and Finch, W. 1995. “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics.” **ACI Structural Journal**. 92, 3: 295-303.
- Cheung, M.S. and Wiseman, A. 2000. “Development of Canadian Standard for Building Construction using FRP Composites.” **Proceeding of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures**. Ottawa, Canada: 841-848.
- Hall, T. and Ghali, A. 2000. “Long-term Deflection Prediction of Concrete Members Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars.” **Canadian Journal of Civil Engineering**. 27, October: 890-898.
- Hamoush, S. A., and Ahmad, S. H. 1990. “Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams.” **ASCE Journal of Structural Engineering**. 116: 356-371.
- Malek, A. M., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. 1998. “Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate due to Stress Concentration at Plate End.” **ACI Structural Journal**. 95, 4: 142-152.
- McGregor, J. G., and Hanson, J. M. 1969. “Proposed Changes in Shear Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Beams.” **ACI Structural Journal**. 66, 4: 276-288.
- Park, R. and Paulay, T. 1975. **Reinforced Concrete Structures**. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. W. and Connelly, G. M. 1991. “External Reinforcement of Concrete Beams Fiber-Reinforced Plastics.” **ACI Structural Journal**. 88, 4: 490-500.
- Roberts T. M. 1989. “Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in The Adhesive Layer of Plated RC Beam.” **The Structural Engineer**. 67, 12: 228-233.

- Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R. 1991. "RC Beams Strengthened with GFRP Plates.I:Experimental Study." **Journal of Structural Engineering**. 117, 11: 3417-3433.
- Saadatmanesh, H. 1994. "Fiber Composite for New and Existing Structures." **ACI Structural Journal**. 91, 3: 346-354.
- Sika CarboDur Heavy-Duty CFRP Strengthening System**. Sika(Thailand) Limited.
- Ziraba, Y.N., Baluch, M.H., Basunbul, I.A., Sharif, A.M. Azad, A.K. and Al-Sulaimani, G.J. 1994. "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates." **ACI Structural Journal**. 91, 6:639-646.