

พฤติกรรมการวิบัติของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำ Failure Behavior of the Low Ductility CFRP Strengthening RC-Slab

ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: chatshawal.po@spu.ac.th

ดร.ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: nuttawat.ch@spu.ac.th

มนอชญ์ สาขุม

พัฒนพงษ์ ลิงห์สง่า

ศิโรรัตน์ จิตต์สุภาพรรณ

ภาคภูมิ พิริยะภิญโญ

นักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำ ได้ทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวด้วยวิธี Third Point Loading ช่วงความยาว 2.4 เมตรจำนวน 2 ตัวอย่าง ขนาดตัวอย่างทดสอบ 0.10 x 0.63 x 2.6 เมตร ประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่ไม่เสริมกำลังด้วย CFRP รับน้ำหนักบรรทุกจร 400 kg./m² จำนวน 1 ตัวอย่าง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่เสริมกำลังด้วย CFRP กว้าง 10 cm.หนา 6 ชั้น ตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกจร 800 kg./m² จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยขึ้นทดสอบถูกออกแบบให้หลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP แล้วมีความเหนียวต่ำที่สุด ได้ค่าตัวคูณลดกำลังโมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.76 ระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกความเครียดดึง-อัดในเหล็กเสริม ในคอนกรีตบริเวณผิวบน ผิวล่าง และบนผิว CFRP รวมทั้งการโก่งตัวของแผ่นพื้น ณ น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ จนกระทั่งวิบัติ ผลการทดสอบพบว่าแผ่นพื้นเสริมกำลังด้วย CFRP มีพฤติกรรมการวิบัติโดยการครากของเหล็กเสริมแล้วตามด้วยการหลุดล่อนของ CFRP ณ กำลังรับน้ำหนักต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ โดย CFRP เกิดหลุดล่อนขณะเกิดความเครียดดึงเพียง 0.001371 น้อยกว่าค่าที่คาดหวังตามมาตรฐาน ในขณะที่ค่าตัวคูณลดกำลังโมเมนต์ดัดคิดจากความเครียดดึงในเหล็กเสริมขณะวิบัติเท่ากับ 0.75 จึงสรุปได้ว่าการเสริมกำลังพื้นด้วย CFRP แล้วมีความเหนียวต่ำมาก ๆ อาจควบคุมพฤติกรรมให้เป็นไปตามที่คาดหวังได้ยาก สมควรอยู่ภายใต้การดูแลของมืออาชีพทุกขั้นตอน และยังคงต้องการงานวิจัยเพื่อสนับสนุนข้อมูลเพิ่มเติม

คำสำคัญ: พฤติกรรมการวิบัติ ตัวคูณลดกำลังของโมเมนต์ ความเหนียว เสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน
พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

Two Reinforced concrete one-way slabs with the cross section of 0.10 m x 0.63 m and 2.4 m span length were designed for the live load of 400 kg/m². One of them was then strengthened according to ACI 318-05 with the 6 layers of CFRP to increase the live load resistance to 800 kg/m² aiming to fail by CFRP debonding at low ductility range or with the flexural strength reduction factor, ϕ , of 0.76. Third point loading test showed the debonding failure at the interface of CFRP and concrete during yielding of the rebars. The load carrying capacity of strengthen slab was less than predicted ultimate capacity. The maximum tensile strain of outermost carbon fiber sheet was 0.001371 which is also lower than expected standard value. The evaluation of the flexural strength reduction factor, ϕ , based on the ultimate strain of rebar is 0.75. The test results showed that CFRP slab strengthening in case of very low ductility may be hardly controlling failure behavior. The proper installation of strengthening system must be conducted under close supervision of licensed engineers and more research in this topic is needed.

KEYWORDS: Failure behaviors, Moment reduction factor, Ductility, CFRP, Reinforced concrete slabs

1. บทนำ

การนำอาคารเดิมมาดัดแปลงปรับปรุงสภาพการใช้งานให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มขึ้น เป็นหนึ่งในแผนงานธุรกิจก่อสร้างที่แพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน มีการนำเทคนิคการเสริมกำลังโครงสร้างวิธีต่างๆมาใช้งาน ในกรณีอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) นิยมใช้การเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) ซึ่งเป็นระบบเสริมกำลังภายนอกของอาคารที่ดำเนินการได้สะดวก น้ำหนักเบาไม่เพิ่มภาระน้ำหนักบรรทุกต่ออาคาร มีกำลังวัสดุและค่าโมดูลัสสูงสามารถเพิ่มกำลังให้โครงสร้างเดิมได้มาก แต่ข้อเสียคือ CFRP ไม่มีความหยุ่นเหนียวอาจทำให้องค์อาคารภายหลังเสริมกำลังมีสภาพแข็งเกร็งมากขึ้น ลดทอนสภาพความเหนียว (Ductility) ทำให้เปลี่ยนรูปได้น้อยลง อาจไม่มีสัญญาณเตือนผู้ใช้งานอาคารก่อนเกิดวิบัติให้ทราบล่วงหน้า รวมทั้งลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่ของชิ้นทดสอบที่พบในการทดลองคือ วิบัติโดยการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ซึ่งดูเหมือนเป็นลักษณะการวิบัติที่ยากจะควบคุมให้เกิดได้ ณ ระดับที่ต้องการแบบคงเส้นคงวาทุกครั้ง

อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ACI 318-05 ได้พิจารณาตัวคูณลดกำลังรับแรงดัด (ϕ) ตามค่าความเหนียวขององค์อาคาร และ ACI 440.2R-08 แนะนำวิธีควบคุมการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัด ซึ่งวิศวกร นำทั้งสองหลักการมาพิจารณาร่วมกันในการออกแบบเสริมกำลังตัดโครงสร้าง จึงเป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อออกแบบเสริมกำลังพื้นด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำมากๆ (ตัวคูณลดกำลังโมเมนต์ดัดน้อยๆ) และให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนแล้ว กำลังรับน้ำหนักและพฤติกรรมการวิบัติจะยังสอดคล้องกับที่ออกแบบไว้หรือไม่

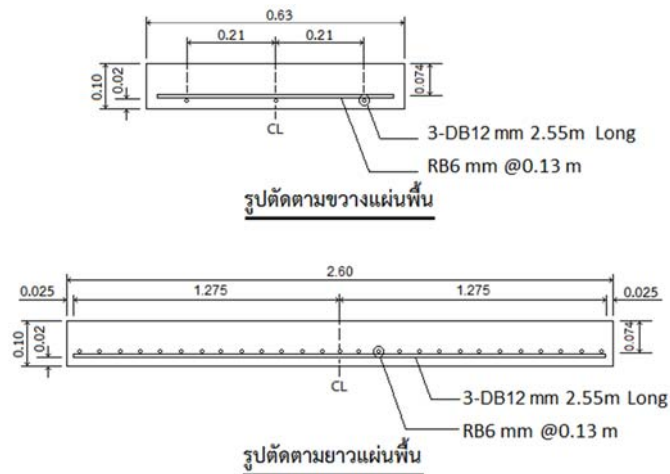
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) ออกแบบเสริมกำลังแผ่นพื้น คสล. ทางเดียวด้วย CFRP ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้จาก 400 kg/m^2 เป็น 800 kg/m^2 โดยควบคุมให้วิบัติแบบหุดล่อนและมีค่าความเหนียวหรือตัวคูณลดกำลังต่ำที่สุด
- (2) ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้น คสล. ที่เสริมกำลังรับแรงดัดด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำ ทั้งในด้านกำลัง ลักษณะการวิบัติ และความเหนียว

3. วิธีดำเนินการวิจัย

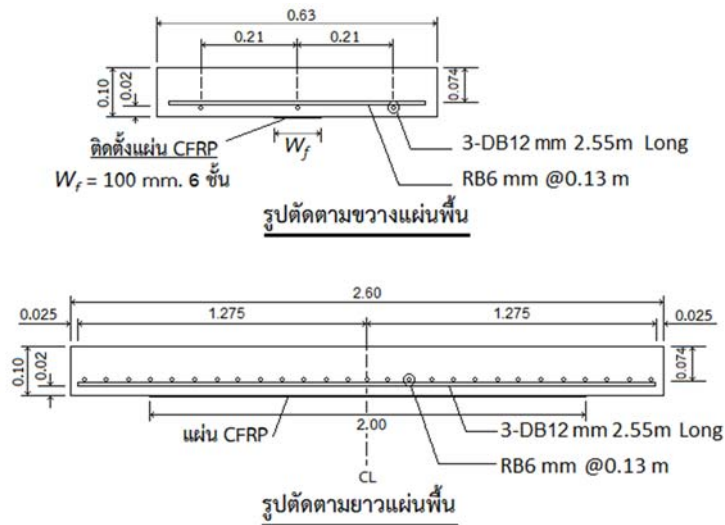
3.1 ขั้นตอนทดสอบ

การออกแบบแผ่นพื้น คสล. ทางเดียว ในเบื้องต้นกำหนดคุณสมบัติวัสดุ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 240 kg/cm^2 เหล็กเสริมกำลังรับแรงดัดชั้นคุณภาพ SD30 ภาระน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบแผ่นพื้น ประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกตายตัวเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้าง (W_{DL}) น้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติมจากวัสดุตกแต่งผิวพื้น (W_{SDL}) 80 kg/m^2 และน้ำหนักบรรทุกจร (W_{LL}) 400 kg/m^2 โดยมีช่วงความยาวพื้น (span) เท่ากับ 2.4 m ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-05 และปรับแก้เพื่อให้เกิดความเหนียวต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ในชั้นเสริมกำลังด้วย CFRP ใต้น้ำตัดแผ่นพื้น คสล. ทางเดียว (ขั้นตอนทดสอบ #1) ขนาด $0.63 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ มีเหล็กเสริมหลัก 3-DB12 หน้าตัดด้านขวางใส่เหล็กเสริมกันร้าว RB6 @0.13 m ดังในแผนภาพที่ 1



แผนภาพที่ 1 รายละเอียดแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP (ขั้นตอนทดสอบ #1)

แผ่นพื้นทดสอบชั้นที่ 2 (ขั้นตอนทดสอบ #2) ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ให้สามารถรับภาระน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 800 kg/m^2 และเน้นให้มีความเหนียวน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งขั้นตอนทดสอบ #2 ออกแบบตาม ACI 440.2R-08 ได้ความหนาจำนวน 6 ชั้น มีความกว้างของแผ่นเท่ากับ 100 mm ซึ่งจะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบหุดล่อนหลังการครากของเหล็กเสริมและมีค่าตัวคูณลดกำลังโมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.76 รายละเอียดดังแสดงในแผนภาพที่ 2 คุณสมบัติของแผ่น CFRP ที่นำมาใช้เสริมกำลังโครงสร้างนำเสนอไว้ในตารางที่ 1



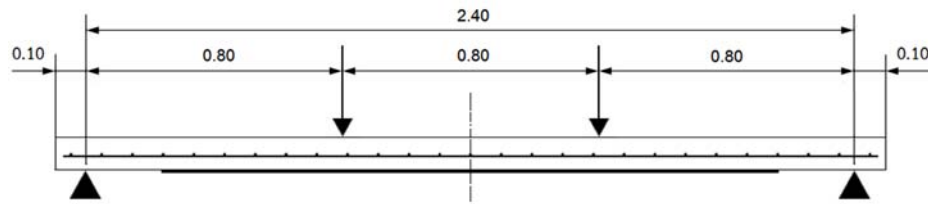
แผนภาพที่ 2 รายละเอียดแผ่นพื้นเสริมกำลังด้วย CFRP (ชั้นทดสอบ #2)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลังโครงสร้าง

System type :	dry, unidirectional sheet, installed using a wet layup procedure where the dry carbon-fiber sheets are impregnated and adhered with an epoxy resin on-site.
Fiber type :	high-strength carbon
Polymer resin :	epoxy
Mechanical properties :	Thickness per ply $t_f = 0.167$ mm ultimate tensile strength of the CFRP $f_{tu} = 35,000$ kg/cm ² tensile modulus of elasticity of the CFRP $E_f = 2,350,000$ kg/cm ² ultimate rupture strain of CFRP $\epsilon_{fu} = 1.5\%$
Design reduction factors :	environmental reduction factor $C_E = 0.95$ for interior exposure FRP strength reduction factor $\Psi = 0.85$ for flexure

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดพฤติกรรมโครงสร้างและการทดสอบ

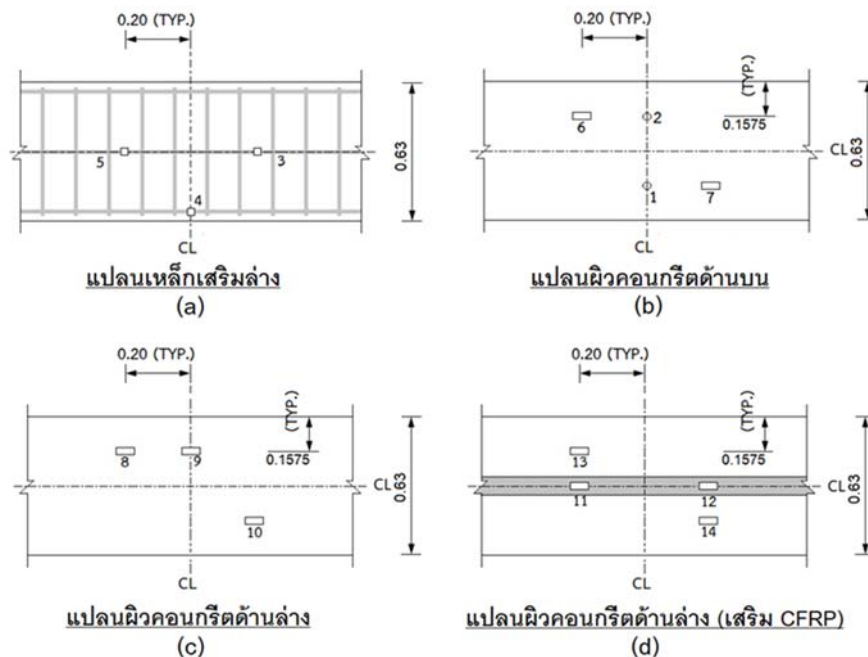
ทดสอบกำลังดัดของชั้นทดสอบทั้งหมดโดยใช้น้ำหนักบรรทุกแบบ Third point loading ดังแผนภาพที่ 3 โดยดำเนินการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกครั้งละ 40 kg จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ อุปกรณ์วัดพฤติกรรมโครงสร้างประกอบด้วย Dial gauge วัดระยะโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางแผ่นพื้น Strain gauge วัดความเครียดดึงและอัดที่ผิวบนและล่างของแผ่นพื้นคอนกรีต และติดตั้ง Strain gauge วัดความเครียดดึงในเหล็กเสริมและ CFRP รายละเอียดของการติดตั้งอุปกรณ์วัดพฤติกรรมชั้นทดสอบนำเสนอไว้ในตารางที่ 2 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ นำเสนอในแผนภาพที่ 4



แผนภาพที่ 3 Third Point Loading Test

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดการติดตั้ง อุปกรณ์วัดพฤติกรรมโครงสร้าง

No.	Instruments	Measurement items / Locations	#1	#2
1, 2	Dial gauge	Mid-span deflections	√	√
3, 4, 5	Strain gauge	Tensile strains in main steel reinforcement	√	√
6, 7	Strain gauge	Compressive strains at the top slab surface	√	√
8, 9, 10	Strain gauge	Tensile strains at the bottom slab surface	√	
11, 12	Strain gauge	Tensile strains in CFRP		√
13,14	Strain gauge	Tensile strains at the bottom slab surface		√



แผนภาพที่ 4 ฝั่งแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างในขั้นตอนสอบ

- (a) ฝั่งแสดงตำแหน่งติดตั้ง strain gauge ในเหล็กเสริม (ขั้นตอนสอบ #1 และ #2)
- (b) ฝั่งแสดงตำแหน่งติดตั้ง Strain gauge และ Dial gauge ที่ผิวบนแผ่นพื้น (ขั้นตอนสอบ #1 และ #2)
- (c) ฝั่งแสดงตำแหน่งติดตั้ง Strain gauge ที่ผิวล่างแผ่นพื้น (ขั้นตอนสอบ #1)
- (d) ฝั่งแสดงตำแหน่งติดตั้ง Strain gauge ที่แผ่น CFRP และผิวล่างแผ่นพื้น (ขั้นตอนสอบ #2)

4. ผลการทดสอบ

4.1 การออกแบบเสริมกำลัง

ผลการออกแบบเสริมกำลังด้วย CFRP และควบคุมให้วิบัติโดยการหลุดลอกที่ความเหนียวต่ำที่สุด ในชั้นทดสอบ #2 ได้ค่าความเครียดดึงใน CFRP และเหล็กเสริมขณะวิบัติเท่ากับ 0.00414 และ 0.00297 ตามลำดับ ทำให้มีตัวคูณลดกำลังโมเมนต์ดัด (ϕ) เท่ากับ 0.76 แต่ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นทดสอบทั้งสองสูงกว่าที่ต้องการคือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงเปลี่ยนเป็น 643 kg/m² และ 1395 kg/m² ในชั้นทดสอบ #1 และ #2 ตามลำดับ

4.2 กำลังอัดคอนกรีตและกำลังดึงเหล็กเสริม

กำลังอัดคอนกรีตของแผ่นพื้น คสล. ทั้งที่เสริมกำลังและไม่เสริม CFRP มีค่าเท่ากับ 340 kg/cm² กำลังรับแรงดึง ณ จุดคราก (f_t) ของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 3,171 kg/cm² ขณะที่กำลังวัสดุเบื้องต้นที่ใช้ออกแบบมีค่าเท่ากับ 240 kg/cm² และ 3000 kg/cm² ตามลำดับ นอกจากนี้ผลทดสอบการดึงเหล็กเสริมจำนวนสามตัวอย่างพบว่าความเครียด ณ จุดครากของเหล็กเสริม ϵ_{sy} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.001374

4.3 ลักษณะการวิบัติ

ลักษณะการวิบัติของชั้นทดสอบ #1 วิบัติแบบ Tension failure ชั้นทดสอบ #2 วิบัติโดยการครากของเหล็กเสริม แล้วตามด้วยการหลุดลอกของแผ่น CFRP ดังแสดงในแผนภาพที่ 5 ที่น้ำหนักบรรทุก 1440 kg และ 1960 kg หรือเทียบเท่ากับรับน้ำหนักบรรทุกจริงที่ 553 kg/m² และ 840 kg/m² ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา ณ จุดครากของเหล็กเสริมที่มีค่าความเครียดดึง $\epsilon_{sy} = 0.001374$ น้ำหนักบรรทุกของทั้งสองชั้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 916 kg และ 1348 kg ตามลำดับ

4.4 พฤติกรรมของโครงสร้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของชั้นทดสอบ ณ กึ่งกลางช่วงพื้น แสดงในแผนภาพที่ 6(a) จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ชั้นทดสอบ #1 และ #2 มีระยะโก่งตัว (Δ_u) เท่ากับ 22.89 mm และ 19.79 mm ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา ณ จุดครากของเหล็กเสริม ค่าระยะโก่งตัว (Δ_y) ของชั้นทดสอบ เท่ากับ 4.86 mm และ 6.05 mm ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงของชั้นทดสอบทั้งสอง แสดงในแผนภาพที่ 6(b) จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เหล็กเสริมในชั้นทดสอบ #1 และ #2 มีค่าความเครียดดึง (ϵ_{su}) เท่ากับ 0.005119 และ 0.002891 ตามลำดับ ส่วนความเครียด ณ จุดครากซึ่งพิจารณาที่ค่าเท่ากับ 0.001374 ก็สอดคล้องกับพฤติกรรมของกราฟ ซึ่งเปลี่ยนแปลงความชันค่อนข้างชัดเจนดังแสดงในแผนภาพที่ 6(b) ที่จุด A และ B

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความเครียดดึงของ CFRP ของชั้นทดสอบ #2 แสดงในกราฟแผนภาพที่ 6(c) จากเส้นกราฟพบว่า ณ จุดวิบัติ ค่าความเครียดสูงสุดในคาร์บอนไฟเบอร์ (ϵ_c) ในชั้นทดสอบ #2 มีค่าเท่ากับ 0.001371 ซึ่งเป็นความเครียดดึงค่าสุดท้ายที่ Strain gauge ตรวจวัดและบันทึกได้ก่อน CFRP หลุดลอก

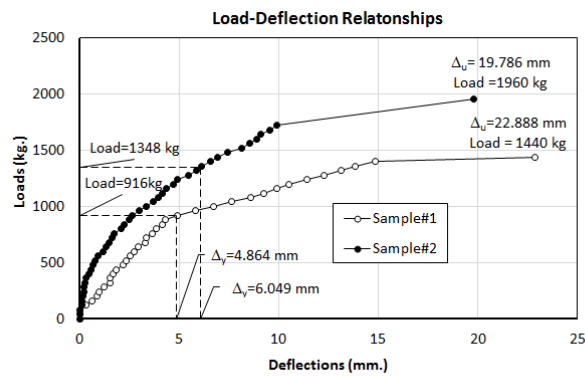


(a)

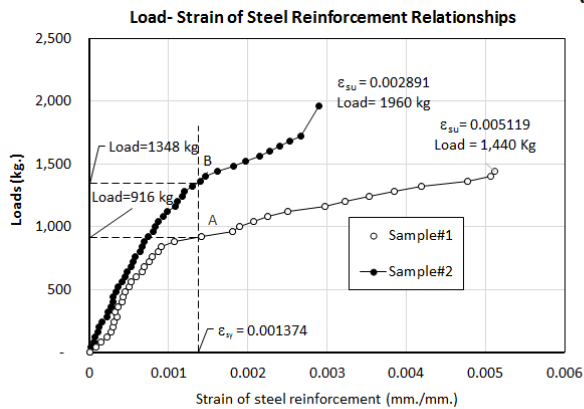


(b)

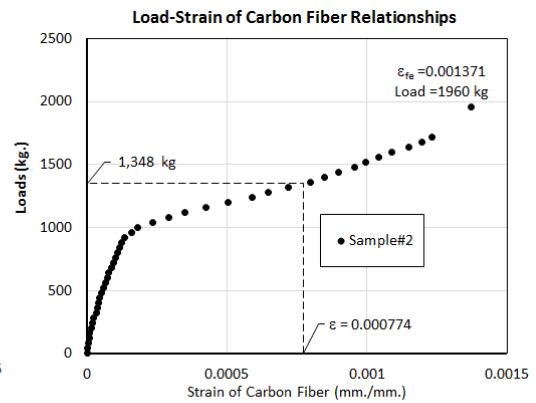
แผนภาพที่ 5 แสดงการวิบัติของชิ้นทดสอบ (a) ชิ้นทดสอบ #1 (b) ชิ้นทดสอบ #2



(a)



(b)



(c)

แผนภาพที่ 6 แสดงค่าผลตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างที่ค้ำน้ำหนักบรรทุกต่างๆ

(a) การโก่งตัวของชิ้นทดสอบ (b) ค่าความเครียดดึงในเหล็กเสริม (c) ค่าความเครียดดึงใน CFRP

5. วิเคราะห์และอภิปรายผล

5.1 กำลังรับแรงดัดสูงสุด, M_n

จากผลทดสอบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของชิ้นทดสอบทั้งสอง สามารถคำนวณเป็นค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด (M_n from load test) ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงดัดที่คำนวณตามทฤษฎี โดยใช้กำลังวัสดุตามที่ออกแบบ (Theoretical M_n (f'_c/f_y Prelim prop.)) และเมื่อปรับการคำนวณโดยใช้กำลังวัสดุจริง (Theoretical M_n (f'_c/f_y Real prop.)) จะพบว่าในชิ้นทดสอบ #1 ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีทั้ง 2 กรณีเท่ากับ 19.2% และ 24.6% ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากการเกิดน้ำหนักบรรทุกบางส่วนขึ้นกับชิ้นทดสอบในขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ ก่อนบันทึกค่าแรงกระทำจริง ขณะที่ผลการทดสอบชิ้น #2 ได้ค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีทั้ง 2 กรณีเท่ากับ 49.8% และ 56.3% ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากขณะที่วัด หน่วยแรงใน CFRP มีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดหวังตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดจากค่าความเครียดดึงจริงใน CFRP ขณะที่คำนวณ (M_n from measured ϵ_{fc}) พบว่า M_n from load test จะต่ำกว่าเพียง 4.3% ยืนยันได้ว่าค่าความเครียดดึงใน CFRP ที่ตรวจวัดได้ สอดคล้องกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริง

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นทดสอบ ระหว่างค่าที่ประเมินด้วยทฤษฎีจากค่ากำลังวัสดุ และค่าจากผลทดสอบ loading test

Summary of Results		#1	#2
Required Factored Moment, M_u	(kg-m)	464.49	757.79
Theoretical M_n (f'_c/f_y Prelim prop.)	(kg-m)	712.80	1561.81
Theoretical M_n (f'_c/f_y Real prop.)	(kg-m)	764.28	1793.32
M_n from load test	(kg-m)	576	784
M_n from measured ϵ_{fc}	(kg-m)	-	819
Theoretical ϵ_{fc} (f'_c/f_y Prelim prop.)	(mm/mm)	-	0.004140
Theoretical ϵ_{fc} (f'_c/f_y Real prop.)	(mm/mm)	-	0.004930
ϵ_{fc} (Measured strain)	(mm/mm)	-	0.001371
Theoretical ϵ_{st} (f'_c/f_y Prelim prop.)	(mm/mm)	0.02071	0.002976
Theoretical ϵ_{st} (f'_c/f_y Real prop.)	(mm/mm)	0.02876	0.003551
ϵ_{st} (Measured strain)	(mm/mm)	0.00512	0.002891
ϕ (Prelim design)		0.9	0.76
ϕ (Measuring strain estimation)		0.9	0.75
Ductility ratio ($\epsilon_{su}/\epsilon_{sy}$)		3.72	2.10
Ductility ratio (Δ_u/Δ_y)		4.71	3.27

5.2 ลักษณะการวิบัติ

ชิ้นทดสอบ #1 วิบัติแบบ Tension failure โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงครากก่อนคอนกรีตแตก ขณะที่ชิ้นทดสอบ #2 วิบัติโดยการหลุดล่อนของ CFRP จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดดึงของ CFRP ขณะหลุดล่อน (ϵ_{fc}) ที่ได้จากการวัดในชิ้นทดสอบจริง (ϵ_{fc} , Measuring strain) ของชิ้นทดสอบ #2 มีค่าเท่ากับ 0.001371 น้อย

กว่าค่าทางทฤษฎีที่คาดหวังไว้คือ 0.00414 และ 0.00493 ในการคำนวณจากกำลังวัสดุที่ออกแบบและที่เกิดขึ้นจริงตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าถึงแม้ลักษณะการวิบัติของชิ้นทดสอบ #2 จะเป็นไปตามที่ออกแบบบางส่วนคือ เหล็กเสริมครากแล้วตามด้วยการหลุดล่อนของ CFRP แต่ก็เป็น การหลุดล่อนที่เกิดก่อนเวลาอันควร ซึ่งไม่ใช่พฤติกรรมที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ก็เป็นพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่มีความหนาหลายชั้น (กรณีนี้ 6 ชั้น) ซึ่งจะทำให้แผ่น CFRP มีความแข็งแรงสูง ยึดหยุ่นได้น้อย และหลุดล่อนได้ง่ายขึ้น

5.3 ค่าความเหนียวและตัวคูณลดกำลัง

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{st} (Measured strain) จากการทดสอบเท่ากับ 0.00512 เปรียบเทียบกับค่าความเครียดดึงของเหล็กเสริมขณะวิบัติตามทีออกแบบไว้ของชิ้นทดสอบ #1 (Theoretical ϵ_{st} (f'_c/f'_y Prelim prop.)) คือ 0.02071 นั้นมีค่าน้อยกว่าอยู่มาก แต่ทั้ง 2 กรณีถือว่าเป็นการวิบัติที่ค่าความเหนียวสูงเทียบเท่ากับค่าตัวคูณลดกำลังรับแรงดัด (ϕ) 0.9 ซึ่งเป็นพฤติกรรมการวิบัติที่ดีและควบคุมได้ตามต้องการ ซึ่งถ้าพิจารณาถึงค่าความเหนียวที่คิดจาก $\epsilon_{su}/\epsilon_{sy}$ และ Δ_u/Δ_y แล้ว ก็ได้ค่าสูงมากเช่นกันเท่ากับ 3.72 และ 4.71 ตามลำดับ ขณะที่ค่า ϵ_{st} (Measured strain) ในชิ้นทดสอบ #2 เท่ากับ 0.002891 เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ออกแบบไว้คือ 0.002976 มีค่าใกล้เคียงมาก ส่งผลให้มีค่า $\phi = 0.75$ และ 0.76 ตามลำดับ ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมรับแรงดัดของชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP แล้วมีความเหนียวต่ำตามที่ต้องการ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าการออกแบบเสริมกำลังด้วย CFRP ตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 ในกรณีที่ต้องอาคารเกิดความเหนียวต่ำหรือค่าตัวคูณลดกำลังรับแรงดัด (ϕ) มีค่าน้อยๆ (ในกรณีนี้เท่ากับ 0.76) อาจไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมการวิบัติได้ตามต้องการ ซึ่งในกรณีนี้คือเกิดการหลุดล่อนของ CFRP ก่อนเวลาอันควร จึงน่าจะเกิดจากการแปะ CFRP ที่หนามากถึง 6 ชั้น ส่งผลให้ควบคุมคุณภาพของ Adhesive ได้ไม่เต็มที่และเกิดความไม่เป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของ CFRP ความเครียดดึงที่ผิว CFRP ไม่ได้เกิดสูงที่สุดในบรรดาความเครียดดึงตลอดความลึกของหน้าตัดตามที่ควรจะเป็น ดังกล่าวได้จาก ϵ_{cu} ที่วัดได้จากชั้นนอกสุดขณะวิบัติคือ 0.001371 ขณะที่ ϵ_{st} ที่วัดได้คือ 0.002891

6. สรุปผลการวิจัย

(1) การออกแบบเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นตามต้องการสามารถกระทำได้ไม่ยาก แต่ถ้าต้องการควบคุมให้มีค่าตัวคูณลดกำลังค่าที่ต่ำสุดเช่นในกรณีศึกษานี้จะทำได้ยาก ซึ่งส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักสูงขึ้นมากกว่าที่ต้องการได้

(2) การควบคุมพฤติกรรมการวิบัติของพื้น คสล. เสริมกำลังด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำ ที่มีค่าตัวคูณลดกำลังรับแรงดัด (ϕ) เพียง 0.76 ในกรณีศึกษานี้ไม่สามารถกระทำได้ตามความต้องการ เพราะถึงแม้จะวิบัติด้วยการครากของเหล็กเสริมตามด้วยการหลุดล่อนของ CFRP แต่เป็นการหลุดล่อนที่เกิดก่อนเวลาอันควร

(3) กำลังรับน้ำหนักขณะวิบัติของชิ้นทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP ถึงแม้จะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี แต่ก็สูงกว่าที่ต้องการคือเทียบเท่ากับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจรที่ 840 kg/m^2

(4) ชิ้นทดสอบเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ความเหนียวต่ำนี้ถึงแม้จะวิบัติด้วยการหลุดล่อนก่อนค่าที่กำหนด แต่ก็ยังมีอัตราส่วนความเหนียวที่คิดจากค่าความเครียดดึงในเหล็กเสริมและการโก่งตัวเท่ากับ 2.10 และ 3.27 ตามลำดับ

7. ข้อเสนอแนะ

(1) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษานำร่อง (pilot study) ขึ้นทดสอบที่ศึกษามีเพียงชนิดละ 1 ตัวอย่าง เมื่อนำค่าผลทดสอบของตัวอย่างจำนวนน้อยไปสรุปวิเคราะห์ผลอาจไม่ได้ข้อสรุปที่ถูกต้อง ต้องระมัดระวังในการนำผลวิเคราะห์ไปใช้

(2) การติดตั้ง CFRP ที่หนาและซ้อนกันหลายชั้นเพื่อรับแรงดึงในระดับสูง ยิ่งมีความเสี่ยงต่อการหลุดล่อนของแผ่นไฟเบอร์ก่อนแรงดึงวัสดุถึงค่าที่ได้ออกแบบไว้อย่างมาก จึงต้องอาศัยคุณภาพในการติดตั้งอย่างสูง โดยช่างฝีมือที่เชี่ยวชาญภายใต้การควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานอย่างเคร่งครัด

8. เอกสารอ้างอิง

ACI 318-05, "Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary," American Concrete Institute, 2004.

ACI 440.2R-08, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, 2008.