กำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

COMPRESSIVE STRENGTH OF RECTANGULAR REINFORCED CONCRETE COLUMN STRENGTHENED BY CFRP

วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
E-mail : wirat.le@spu.ac.th

โพธิ์แก้ว พิทักษ์โชคชัย
นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
E-mail : pokaew.p@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยแบ่งตัวอย่างการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ทดสอบแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยม สูง 30 ซม. ขนาดหน้าตัด 15*15, 15*20, 15*30, และ 20*20 ซม. และแบ่งลักษณะการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ออกเป็น 3 ลักษณะคือ แบบไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1ชั้น และ 2 ชั้น โดยแท่งคอนกรีตหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นจากแท่งคอนกรีตไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เฉลี่ย 38% และ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 2 ชั้น รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 48% กลุ่มที่ 2 ทดสอบเสาคอนกรีตสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 20*20 และ 15*30 ซม. สูง 90 ซม. ประกอบด้วย แบบไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วง และหุ้มแบบเต็มช่วง โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วง รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นจากเสาคอนกรีตไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เฉลี่ย 14% ส่วนการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เต็มช่วง รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 29% จากผลการทดสอบทั้งสองกลุ่มพบว่าสัดส่วนของหน้าตัดมีผลต่อกำลังการรับแรงที่เพิ่มขึ้นโดยกำลังที่เพิ่มขึ้นจะมีค่ามากถ้าสัดส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของหน้าตัดเข้าใกล้หนึ่ง

คำสำคัญ : เส้นใยเสริมกำลังคาร์บอนไฟเบอร์ การเสริมกำลัง การหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ABSTRACT

This research studies the compressive strength of rectangular reinforced concrete column strengthened by Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP). The study has two sets of experiments. The first set composes of 30 cm. height rectangular concrete samples with cross section of 15*15, 15*20, 15*30, 20*20 cm. The samples were wrapped with one layer and two layers of CFRP comparing to non wrapped concrete. The results show that one layer wrapping increases compressive strength 38% on average and two layers wrapping increase compressive strength 48% on average. The second set of the experiment composes of 90 cm. height rectangular reinforced concrete column with cross section of 15*30 and 20*20 cm. The columns were partially wrapped and fully wrapped with CFRP comparing to non wrapped column. The compressive strength of partially wrapped columns increases 14% on average and for fully wrapped columns increase 29% on average. Both sets of experiments show that the CFRP wrapping increases the compressive strength of rectangular reinforced concrete column. The result also presents the effect of cross section aspect ratio. The compressive strength increases obviously when the aspect ratio close to one.

KEYWORDS : Carbon fiber-reinforced polymer, Strengthening, CFRP wrapping, RC column.

บทนำ

โครงสร้างที่ก่อสร้างมานานแล้ว จำนวนมากกำลังเสื่อมสภาพลง เนื่องมาจากหลายสาเหตุเช่น ปัญหาที่เกิดจากสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงการใช้งานของโครงสร้าง การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่อนุญาตให้สามารถบรรทุกได้ ทำให้โครงสร้างจำนวนมากอยู่ในสภาพที่ควรได้รับการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีความสำคัญมากที่สุดส่วนหนึ่งคือเสา ซึ่งต้องรับน้ำหนักบรรทุกจากทุกส่วนของโครงสร้าง การซ่อมและเสริมกำลังเสาโดยปกติมักใช้วิธีการเพิ่มขนาดของเสาหรือการเสริมกำลังด้วยเหล็กรูปพรรณทำให้เสามีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในปัจจุบันการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ประเภทเส้นใยเสริมกำลัง (Fiber-Reinforced Polymer (FRP)) เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากวัสดุมีน้ำหนักเบาไม่เป็นการเพิ่มภาระให้กับโครงสร้าง วัสดุสามารถเข้ากับรูปร่างเดิมของโครงสร้างได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะอากาศและสารเคมี จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำไปใช้งานด้านการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามข้อมูลของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้วยเส้นใยเสริมกำลังยังมีอยู่น้อยมาก จากข้อมูลการวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ จะทำการวิจัยเสากลมรูปทรงกระบอกหุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลัง หรือแท่งคอนกรีตล้วนที่ไม่มีเหล็กเสริมและไม่มีการรวมผลกระทบจากความชะลูดของเสา งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษา พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมที่หุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ ในลักษณะเสาสั้น

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ และผลกระทบของขนาดหน้าตัดต่อการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

1.2 สมมติฐานงานวิจัย

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์จะมีความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นและสัดส่วนขนาดหน้าตัดมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษากำลังรับแรงอัดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตสูง 30 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 15*15, 15*20, 15*30, และ 20*20 ซม. หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น 2 ชั้น และไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม SRIPATUM UNIVERSITY

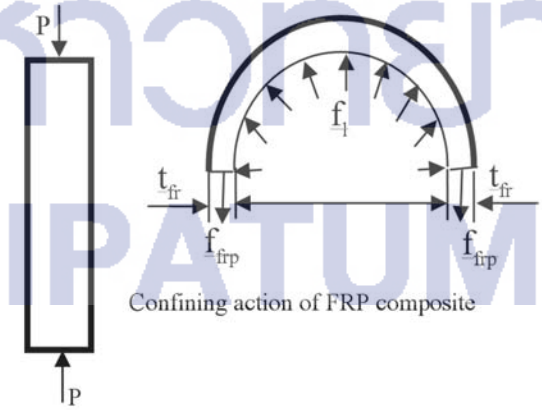
1.3.2 ศึกษากำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 90 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 20*20 และ 15*30 ซม. ที่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ทั้งหมด หุ้มบางส่วน และไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)) เป็นการนำเอาแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาหุ้มคอนกรีต โดยใช้วัสดุประสานเป็นตัวช่วยในการยึดติด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตในการรับแรงอัด แรงเฉือน แรงดึง ตลอดจนความเค้นและความเครียดของคอนกรีต โดยพฤติกรรมของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1 (J.G. Teng, J.F.Chen, S.T.Smith, L.Lam, 2002)

$$\rho_{frp} = \frac{\pi d t_{frp}}{\pi d^2/4} = \frac{4t_{frp}}{d}$$



ภาพที่ 1 พฤติกรรมของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (J.G. Teng, J.F.Chen, S.T.Smith, L.Lam, 2002)

2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

การออกแบบกำลังรับแรงอัดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมใช้มาตรฐาน ACI 318M-05 (American Concrete Institute, 2005) มีสมการในการคำนวณแรงวิกฤตดังนี้

$$\phi P_n = 0.80\phi\left(0.85 f_c^{'}\left(A_g - A_{st}\right) + f_y A_{st}\right) \quad (1)$$

ส่วนการออกแบบเสาคอนกรีตสี่เหลี่ยมหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ใช้มาตรฐาน ACI 440.2R-02 (American Concrete Institute, 2002) มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\phi P_n = 0.80\phi\left(0.85\psi_f f_{cc}^{'}\left(A_g - A_{st}\right) + f_y A_{st}\right) \quad (2)$$

$\psi_f = 0.95$ ค่าตัวคูณลดกำลังที่ ACI แนะนำให้ใช้

$$f_{cc}^{'} = f_c^{'}\left[2.25\sqrt{1+7.9\frac{f_l}{f_c^{'}}} - 2\frac{f_l}{f_c^{'}} - 1.25\right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \le 0.7\varepsilon_{fu}$$

$$f_l = \frac{K_a \rho_f f_{fe}}{2} = \frac{K_a \rho_f \varepsilon_{fe} E_f}{2} \quad (4)$$

ø = 0.7 เสาปลอกเดี่ยว

$$\rho_f = \frac{2nt_{frp}(b+h)}{bh} \quad (5)$$

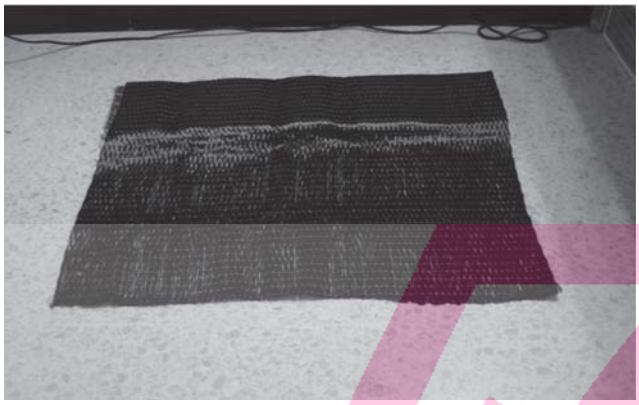
$$K_a = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_g)} \quad (6)$$

2.3 คุณสมบัติของวัสดุ

2.3.1 คุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดแผ่น (CFRP Sheet)

คุณสมบัติของแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง คาร์บอนไฟเบอร์ ที่ใช้ในงานวิจัย มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้ เป็นแผ่นกว้างประมาณ 60 ซม. ความหนา 0.17 มม.และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่ากับ 2345347 กก./ซม.^{2} มีความยืดหยุ่นสูงสามารถเข้ากับรูปร่างเดิมของโครงสร้างได้ มีน้ำหนักเบา สามารถยึดติดกับวัสดุได้ทั้ง คอนกรีต เหล็กและไม้ โดยใช้วัสดุประสานประเภทอีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin)มีลักษณะดังแสดงภาพที่ 2

มหาวิทยาลัยศรีปทุม SRIPATUM UNIVERSITY



ภาพที่ 2 คาร์บอนไฟเบอร์ชนิดแผ่น

2.3.2 คุณสมบัติของอีพ็อกซี่เรซิ่น

คุณสมบัติของอีพ็อกซี่เรซิ่นที่ใช้ในงานวิจัย เป็นวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้สูงประมาณ 305 กก/ซม.^{2} และโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 38,749 กก/ซม.^{2} ทนต่อความร้อนและสภาวะอากาศได้ (Sikadur 330)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mirmiran A. and Shahawy M. (1997) ทำการวิจัยค่ากำลังอัดในแนวแกนและแรงทางด้านข้างของแท่งคอนกรีตหุ้มเส้นใยเสริมกำลัง ในแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 6*12 นิ้ว ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ และกำลังรับแรงดึงทางด้านข้างเพิ่มขึ้นประมาณ 2.02-2.65 เปอร์เซ็นต์ จากแท่งคอนกรีตไม่หุ้มเส้นใยเสริมกำลัง ต่อมา Pessiki S. Harries A .K. Kestner T. J. and Sause R. (2001) ทำการวิจัยพฤติกรรมความเค้นและความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตกลมรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาด 6*12 นิ้ว การหุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลังทำให้ความเค้นความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 42-60 เปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบกับแท่งคอนกรีตที่ไม่ได้หุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลัง หลังจากนั้น Chaallal O.Shahawy M.and Hassan M. (2003) ทำการวิจัยกำลังรับแรงอัดในแนวแกนแท่งคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ ในแท่งคอนกรีตขนาดหน้าตัด5.25?5.25, 4.25?6.5, 3.75?7.5 นิ้วสูง 12 นิ้ว. พบว่ากำลังรับแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้น 26-33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ ต่อมา Lam, L. and Teng J.G. (2004) ทำการวิจัยกำลังอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ ในแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาด 152*305 มม.พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 37-46 เปอร์เซ็นต์ ของค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานและ Matthys S. and Toutanji H (2006) ทำการวิจัยพฤติกรรมเสาคอนกรีตกลมหุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลัง ในเสาคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มม. สูง 2000 มม. พบว่าการหุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลัง 1 ชั้นกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 43.8 N/mm^2 และการหุ้มด้วยเส้นใยเสริมกำลัง 2 ชั้น กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 55.2 N/mm^2 จากคอนกรีตไม่หุ้มเส้นใยเสริมกำลัง 33.7 N/mm^2

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ ในเสาคอนกรีตกลมสามารถเพิ่มกำลังอัดของเสาได้ 37-70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับปัจจัยทางด้านขนาดของตัวอย่างและปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ ส่วนตัวอย่างแท่งคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ที่เสริมกำลัง จะมีกำลังเพิ่มขึ้น 26-33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าเสาคอนกรีตหน้าตัดกลมมาก แต่ทั้งนี้ยังไม่มีผลการวิจัยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มากพอ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดของหน้าตัดและปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์เป็นตัวแปร

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1.1 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมสูง 30 ซม. ขนาดหน้าตัด 15*15, 15*20, 15*30, และ 20*20 ซม. ขนาดละ 7ตัวอย่าง แบ่งการทดสอบตัวอย่างแท่งคอนกรีตตามลักษณะการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ได้ดังนี้ แท่งคอนกรีตไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้นและหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 2 ชั้น รายละเอียดแท่งคอนกรีตตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1

3.1.2 ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยม สูง 90 ซม. ขนาดหน้าตัด 20*20 และ 15*30 ซม. ขนาดละ 9 ตัวอย่าง แบ่งการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามรูปแบบการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ได้ดังนี้ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วง และหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เต็มช่วง รายละเอียดตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 3-4

Uthenthadsun SRIPATUM UNIVERSITY

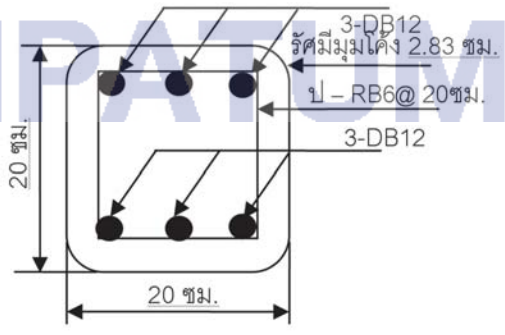
ตารางที่ 1 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตจำนวน 28 ตัวอย่าง

ลำดับ	ตัวอย่างที่	กว้าง x ยาว x สูง (เซนติเมตร)	CFRP	จำนวนตัวอย่าง
1	A0	15 x 15 x 30	0	3
	A1	15 x 15 x 30	1	2
	A2	15 x 15 x 30	2	2
2	B0	15 x 20 x 30	0	3
	B1	15 x 20 x 30	1	2
	B2	15 x 20 x 30	2	2
3	C0	15 x 30 x 30	0	3
	C1	15 x 30 x 30	1	2
	C2	15 x 30 x 30	2	2
4	D0	20 x 20 x 30	0	3
	D1	20 x 20 x 30	1	2
	D2	20 x 20 x 30	2	2

ตารางที่ 2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 18 ตัวอย่าง

ลำดับ	ตัวอย่างที่	กว้าง x ยาว x สูง (เซนติเมตร)	รูปแบบการหุ้ม CFRP	จำนวนตัวอย่าง
1	E0	20 x 20 x 90	0	3
	E1	20 x 20 x 90	เว้นช่วง	3
	E2	20 x 20 x 90	เต็มช่วง	3
2	F0	15 x 30 x 90	0	3
	F1	15 x 30 x 90	เว้นช่วง	3
	F2	15 x 30 x 90	เต็มช่วง	3

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



ภาพที่ 3 รายละเอียดเหล็กเสริมเสาคอนกรีต

ภาพที่ 4 ลักษณะการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วง

3.2 การเตรียมแบบหล่อแท่งคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

แบบหล่อแท่งคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผลิตจากไม้อัดและโครงคร่าว

3.3 การหล่อตัวอย่างแท่งคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมใช้คอนกรีตผสมเสร็จเพื่อควบคุมคุณภาพให้เหมือนกันในทุกตัวอย่าง แสดงในภาพที่ 5 หลังจากนั้นบ่มชื้นด้วยการหุ้มด้วยพลาสติก

3.4 การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แท่งคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

หลังจากถอดแบบหล่อนำตัวอย่างคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาหุ้มด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ตามรูปแบบที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 6-7

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาด 200 ตัน อุปกรณ์อ่านค่าน้ำหนักบรรทุก (Load cell) และอุปกรณ์วัดการยืดหดตัวของชิ้นส่วน (Strain gauge & Dial gauge) เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บค่าการทดสอบ (Data logger)

3.6 การทดสอบแท่งคอนกรีตและการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.6.1 ทดสอบแท่งคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมโดยติดตั้งชิ้นตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่หุ้มและไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์กับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ อุปกรณ์อ่านค่าน้ำหนักบรรทุก อุปกรณ์วัดการยืดหดตัวของชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บค่าการทดสอบ และใส่น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการวิบัติดังแสดงในภาพที่ 8-9

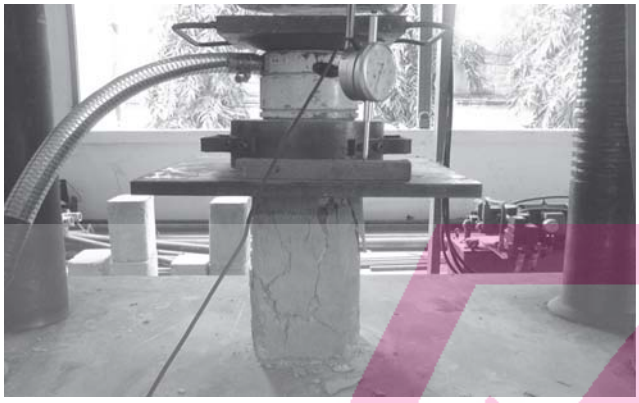
3.6.2 ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมโดยติดตั้งตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่หุ้มและไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ กับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ อุปกรณ์วัดการยืดหดตัวของชิ้นส่วน เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บค่าการทดสอบ และใส่น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ดังแสดงในภาพที่

ภาพที่ 5 การหล่อตัวอย่างแท่งคอนกรีต

ภาพที่ 6 การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แท่งคอนกรีต

ภาพที่ 7 การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



ภาพที่ 8 การทดสอบแท่งคอนกรีตไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

ภาพที่ 9 การทดสอบแท่งคอนกรีตหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

ภาพที่ 10 การทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 กำลังรับแรงในแนวแกนของแท่งคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

กำลังรับแรงในแนวแกนของแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาดหน้าตัด 15*15, 15*20, 15*30, และ 20*20 ซม. แบ่งการทดสอบแท่งคอนกรีตตามลักษณะการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3

จากผลการทดสอบพบว่าการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น และการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 2 ชั้น มีผลต่อกำลังอัดในแนวแกนของแท่งคอนกรีต โดยที่กำลังรับแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นเทียบกับการไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ จากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น มีค่า 32.40%-44.10% ขึ้นกับขนาดหน้าตัด เฉลี่ย 38.70% และกำลังรับแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 2 ชั้น มีค่า 43.40%-53.50% ขึ้นกับขนาดหน้าตัด เฉลี่ย 48.30% การเพิ่มจำนวนชั้นคาร์บอนไฟเบอร์แท่งคอนกรีตเป็น 2 ชั้น กำลังรับแรงอัดในแนวแกนมากกว่าแท่งคอนกรีตหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้นเฉลี่ย 9.60 เปอร์เซ็นต์

นอกจากผลของจำนวนชั้นของการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แล้วผลการทดสอบ พบว่าสัดส่วนหน้าตัดของแท่งคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อพิจารณากำลังที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (Aspect Ratio) ของแต่ละตัวอย่างแสดงได้ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวมีผลต่อกำลังรับแรงในแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์โดย กำลังที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว โดยมีกำลังที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่ออัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวเท่ากับ 1

4.2 กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม

กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 90 ซม. ขนาดหน้าตัด 20*20 และ 15*30 ซม. ขนาดละ 9 ตัวอย่าง แบ่งการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามรูปแบบการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงในแนวแกนของแท่งคอนกรีต

ขนาดตัดกว้าง*ยาว (cm.)	ไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์		หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น		หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 2 ชั้น	
	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)
15*15	182.23	178.89	303.05	308.01	369.15	364.55
	176.22		312.51		359.95	
	178.22					
15*20	167.20	171.26	267.72	270.91	321.24	313.73
	173.11		274.10		306.21	
	173.48					
15*30	170.46	175.91	271.17	260.29	308.77	310.96
	180.18		249.40		313.15	
	177.08					
20*20	180.10	177.03	320.90	316.68	387.72	380.80
	177.16		312.46		373.88	
	173.82					

ตารางที่ 4 อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวกับกำลังที่เพิ่มขึ้นในแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมหุ้ม CFRP

ขนาดหน้าตัดกว้าง*ยาว (cm.)	อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว (x/y)	จำนวนชั้นคาร์บอนไฟเบอร์	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกนเพิ่มขึ้น (%)
15*15	1	0	178.89	
		1	308.01	41.92
		2	364.55	50.93
20*20	1	0	177.03	
		1	316.68	44.10
		2	380.80	53.51
15*20	0.75	0	171.26	
		1	270.91	36.78
		2	313.73	45.41
15*30	0.5	0	175.91	
		1	260.29	32.42
		2	310.73	43.43

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ขนาดหน้าตัด กว้าง*ยาว (cm.)	ไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์		หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วง		หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เต็ม 1 ชั้น	
	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)
20*20	234.60	228.38	283.85	283.50	337.24	341.07
	224.44		286.42		346.11	
	226.09		280.21		339.85	
15*30	231.43	229.65	256.37	256.58	307.17	308.67
	229.32		258.66		311.47	
	228.19		254.71		307.37	

ตารางที่ 6 อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวกับกำลังที่เพิ่มขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมหุ้ม CFRP

ขนาดหน้าตัด กว้าง*ยาว (cm.)	อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว (x/y)	รูปแบบการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงในแนวแกน (ksc.)	กำลังรับแรงในแนวแกนเพิ่มขึ้น (%)
20*20	1	0	228.38	
		เว้นช่วง	283.50	19.44
		เต็มช่วง	341.07	33.04
15*30	0.5	0	229.65	
		เว้นช่วง	256.58	10.49
		เต็มช่วง	308.67	25.60

จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วงและการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเต็มช่วงของตัวอย่างเสา มีผลต่อกำลังอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่กำลังอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเว้นช่วงมีค่า 10.49%-19.45% เฉลี่ย 14.97% เทียบกับการไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ และกำลังอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบเต็มช่วง มีค่า 25.53%-33.04% เฉลี่ย 29.30% เทียบกับการไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ การเพิ่มปริมาณการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์จากบางช่วงเป็นการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เต็มช่วงกำลังรับแรงในแนวแกนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 14.33 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าสัดส่วนหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อพิจารณากำลังที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (Aspect Ratio) ของแต่ละตัวอย่างแสดงได้ดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวมีผลต่อกำลังรับแรงในแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของเสาคอนกรีต เสริมเหล็กจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์โดยกำลังที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว โดยเสาที่มีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวเท่ากับหนึ่งมีกำลังที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าเสาที่มีด้านกว้างต่อด้านยาวเท่ากับ 0.5 โดยมีค่าในช่วง 7.51%-8.96% ขึ้นกับรูปแบบการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

สรุป

จากการทดสอบการรับแรงอัดในแนวแกนของแท่งตัวอย่างคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมสูง 30 ซม.ขนาดหน้าตัด 15*15, 15*20, 15*30, 20*20 ซม. และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมสูง 90 ซม.ขนาดหน้าตัด 15*30 และ 20*20 ซม. ซึ่งหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าคอนกรีต

Uhonnadet Sripatum SRIPATUM UNIVERSITY

ภายใต้การหุ้มด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์จะมีกำลังรับแรงอัดในแนวแกนสูงขึ้นซึ่งจะขึ้นกับปัจจัยของปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้หรือจำนวนชั้นของคาร์บอนไฟเบอร์ กับขนาดหน้าตัดของแท่งตัวอย่าง โดยที่กำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น และ 2 ชั้น เฉลี่ยเท่ากับ 38.70% และ 48.30% ตามลำดับ ทั้งนี้มีปัจจัยของอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของหน้าตัดที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของแท่งคอนกรีตด้วย โดยกำลังรับแรงอัดในแนวแกนจะเพิ่มมากขึ้นมากเมื่ออัตราส่วน ด้านสั้นต่อด้านยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ก็มีลักษณะการรับแรงที่เพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ในทิศทางเดียวกับในตัวอย่างแท่งคอนกรีตแต่ขนาดของผลกระทบเปลี่ยนไปคือ กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาตัวอย่างเพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ แบบเว้นช่วง และแบบเต็มช่วง เฉลี่ยเท่ากับ 14.97% และ 29.30% ตามลำดับ ส่วนปัจจัยของอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของเสาหน้าตัดที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของจะมีความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นและสัดส่วนขนาดหน้าตัดมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถซ่อมเสริมกำลังได้ด้วยวิธีการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์โดยกำลังที่จะได้เพิ่มขึ้นจากการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ขึ้นกับอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของหน้าตัดเสา และปริมาณการหุ้มหรือจำนวนชั้นการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์สามารถหุ้มในรูปแบบของการเว้นช่วงได้ แต่จำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อการเสริมกำลังนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุม ในการสนับสนุนทุนวิจัย อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย

นิยามศัพท์

$f_c^{'}$ = กำลังอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน

$f_{cc}^{'}$ = กำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

f_t = แรงทางด้านข้าง

f_{frp} = แรงดึงโดยรอบเสา

t_f = ความหนาแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาคอนกรีต

$ø$ = ตัวคูณลดกำลังของเสาปลอกเดี่ยวหรือเสาปลอกเกลียว

ψ_f = ตัวคูณลดกำลังของเสาหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

f_l = การกระจายแรงเนื่องจากการโอบรัด

K_a = สัมประสิทธิ์ของหน้าตัดเสาคอนกรีต

ρ_g = อัตราส่วนเหล็กเสริม

n = จำนวนชั้นที่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

A_g = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

A_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม

E_f = โมดูลัสยืดหยุ่นของคาร์บอนไฟเบอร์

r = รัศมีมุมโค้ง

ρ_g = อัตราส่วนเหล็กเสริม

ε_{fu} = ความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารอ้างอิง

American Concrete Institute. 2005. "**Building Code Requirements for Structural Concrete.**" (CD-Rom). Michigan (ACI Committee 318M), United States.

American Concrete Institute. 2002. "**Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP system for Strengthening Concrete Structures.**" (CD-Rom). Michigan (ACI 440. 2R-02), United States.

Chaallal, Omar. Shahawy, Mohsen. and Hassan, Munzer. 2003. "Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Wrapping." **Journal of Composites for Constructionl.** 7, 3 (August): 200-208.

มหาวิทยาลัยศรีปทุม SRIPATUM UNIVERSITY

J.G. Teng, J.F.Chen, S.T.Smith, L.Lam. 2002. "FRP Strengthened RC Structures." Singapore.

Lam, L. and Teng J.G. 2004. "Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete." **Journal of Composites for Construction.** 8, 3 (November -December): 539-548.

Mirmiran, Amir. and Shahawy, Mohsen. 1997. "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites." **Journal of Structural Engineering.** 123, 5 (May): 583-590.

Matthys, S. and Toutanji, H. 2006. "Stress-Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites." **Journal of Structural Engineering.** 132, 1 (January):123-133.

Pessiki Stephen, Harries A .Kent, Kestner T. Justin and Sause Richard. 2001. "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets." **Journal of composites for construction.** 5, 04 (November): 237-245.

Sika. 2009. "Product Data Sheet." **sikadur-330.** V09, 03:1-2.

>> วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์

จบการศึกษาหลักสูตร Ph.D. (Civil Engineering), University of Florida, USA. หลักสูตร Master of Engineering (Civil Engineering), University of Florida, USA. และหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง ผู้ช่วยอธิการบดี ด้านวิชาการ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ผลงานทางวิชาการ เช่น กำลังอัดคอนกรีตที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพการผลิตในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และ Roof Truss Design Using Genetic Algorithm with Real Code

>> โพธิ์แก้ว พิทักษ์โชคชัย

จบการศึกษาหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมก่อสร้าง มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปัจจุบันกำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY