

การศึกษาการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

Study of Reinforced Concrete Column Strengthening by Carbon Fiber

หัตถชัย สวัสดิ์สุข¹⁾ อมรัตน์ เมปริญญา¹⁾ สายัณห์ บริพิศ¹⁾ วรภัทร รับไทรทอง¹⁾
และ ดร.วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์^{*2)} E-mail wirat@spu.ac.th

1) นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

2) อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม (หัวหน้าโครงการ)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการค้นหาแนวทางในการเสริมกำลังโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปัจจุบันการเสริมกำลังโครงสร้างเป็นสิ่งที่มีความต้องการสูง และวิธีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ซึ่งมีความสะดวกในการติดตั้ง ก็กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจมาก แต่ยังมีปัญหาอยู่ที่ราคาวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์และวัสดุประสานที่มีราคาสูง ผู้วิจัยและบริษัท นนทรี จำกัด จึงได้ทำการศึกษาวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะต่าง ๆ กันเพื่อให้ได้วิธีซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุด คือได้กำลังที่เพิ่มขึ้นในระดับที่ต้องการโดยไม่ต้องใช้คาร์บอนไฟเบอร์มากเกินไป การศึกษานี้ได้นำตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบต่าง ๆ กันคือ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ตลอดทั้งเสา หุ้มเป็นช่วงในแนวนอนและแนวตั้ง หุ้มเฉพาะแนวนอนเป็นช่วง ๆ และหุ้มเฉพาะแนวตั้ง หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ จากการศึกษพบว่า การหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์บางส่วนในแนวราบทำหน้าที่โอברัดคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาสูงขึ้นประมาณ 14 % และเสามีความเหนียวมากขึ้น ดังนั้นหากเหตุผลการเสริมกำลังเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับโครงสร้างไม่ใช่กำลังวิธีการหุ้มเป็นช่วง ๆ ในแนวนอนก็เป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งควรพิจารณา

คำสำคัญ: คาร์บอนไฟเบอร์, การเสริมกำลัง, เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, การซ่อมโครงสร้าง, การหุ้มบางส่วน

Abstract

This project studies an efficient method of strengthening reinforced concrete column with Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP). Nowadays, structural strengthening is highly required in the market; especially the strengthening with CFRP because of its convenience and effectiveness. However, there is a pricing problem of the CFRP and its adhesive, which are expensive materials. Therefore, researchers and Nontri Co.Ld. desire to study the method of CFRP wrapping on reinforced concrete column just adequate to the need with limited material use. Many forms of CFRP wrapping on RC column were studied such as fully wrap, partial wrap in vertical and horizontal direction, partial wrap only horizontal direction and no wrap at all. The study shows that the partially wrapping in horizontal direction on RC column increase the column strength about 14 % and increase column ductility due to the concrete confinement effect. The horizontally partial wrap can be another option for users if the strengthening requirement is mainly concentrate on the structural ductility not on the structural strength.

Keywords: Carbon Fiber, Strengthening, Reinforced Concrete Column, Structural Repair, Partial Wrap

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาประการหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ การเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป

นอกจากนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงการใช้งานขององค์อาคาร หรือการเกิดอุบัติเหตุขึ้นกับโครงสร้างซึ่งปัญหาเหล่านี้ต้องการการแก้ไขอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้โครงสร้างต่อไปได้ โดยต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของโครงสร้างเป็นอย่างดีจึงจะพิจารณาได้ว่าต้องเลือกใช้วิธีใดในการเสริมกำลังของโครงสร้างจึงจะเหมาะสมและประหยัดที่สุด

ในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีหนึ่งก็คือการเสริมกำลังจากภายนอกโดยการห่อหุ้มชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเป็นวัสดุที่นำเข้าจากต่างประเทศดังนั้นจึงมีความคิดที่จะศึกษาถึงวิธีการที่จะนำมาซึ่ง การลดปริมาณการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ด้วยวิธีการห่อหุ้มเพียงบางส่วนของโครงสร้างเท่าที่จำเป็น

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังอัดของเสาคอนกรีตโดยการโอบรัดเสาด้วยวัสดุประเภทคาร์บอนไฟเบอร์ได้มีมาตั้งแต่ช่วงต้นทศวรรษ 1980 (Fardis and Khalili, 1981) แต่ส่วนมากจะเป็นการศึกษาผลกระทบของคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีต่อชิ้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเล็ก ซึ่งผลคือการโอบรัดของคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่มค่าให้กับกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของการซ้อนทับของคาร์บอนไฟเบอร์ (ธรรมชาติ, 2544) ในระยะหลังมาจึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมไปสู่ตัวอย่างคอนกรีตที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเสาที่ใช้งานจริงมากขึ้นคือเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยม ขนาดใกล้เคียงกับที่ใช้งาน (Kataoka and al., 1997) ซึ่งผลที่ได้ออกมาแตกต่างไปจากกรณีของตัวอย่างทรงกระบอกมากพอสมควร คือผลการโอบรัดจะเกิดขึ้นมากอยู่บริเวณมุมของเสาเท่านั้น (Demers et al., 1996) แต่ทั้งนี้ปริมาณของคาร์บอนไฟเบอร์ก็ยังเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของเสาคอนกรีต อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากคือการศึกษาการเพิ่ม

กำลังโดยเสริมคาร์บอนไฟเบอร์ตลอดช่วงเสา ซึ่งจะต้องใช้ปริมาณของคาร์บอนไฟเบอร์จำนวนมากและอาจมากเกินไปจนความจำเป็น หรือความต้องการของโครงสร้างนั้น

2. วัตถุประสงค์

2.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเสา RC เมื่อเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เพียงบางส่วน

2.2) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเสาที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

3. เสาตัวอย่างและอุปกรณ์การทดสอบ

เสาตัวอย่างในการทดสอบได้ออกแบบให้มีสองกลุ่มคือกลุ่มเสาสั้น(หน้าตัดขนาดใหญ่) และกลุ่มเสายาว(หน้าตัดขนาดเล็ก) โดยพิจารณาจากสมการความชะลุดังแสดงในสมการที่ 1

$$kl_u / r = \text{อัตราส่วนความชะลุด} \quad (1)$$

เมื่อ k เป็นตัวประกอบความยาวประสิทธิผล

l_u เป็นช่วงความยาวที่ปราศจากการย้

r เป็นรัศมีจําเริญ

เสายาวมีอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 22

เสาสั้นมีอัตราส่วนความชะลุดไม่เกิน 22

เสาตัวอย่างแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยเสาที่หุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 1 โดยแต่ละแบบจะใช้ปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์และตัวประสานต่างกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์

กลุ่ม	ชุด
กลุ่มที่ 1 เสาสั้นขนาด 15x25x90 cm.	1.ไม่เสริม CFRP (0% ตัวควบคุม)
	2.เสริมCFRP50% แนวขวางเป็นช่วง
	3.เสริมCFRP75%ทั้งสองแนวเป็นช่วง
	4.เสริมCFRP100%ตลอดทั้งเสาตัวอย่าง
กลุ่มที่ 2 เสายาวขนาด 125x125x100 cm.	1.ไม่เสริม CFRP (0% ตัวควบคุม)
	2.เสริมCFRP50% แนวขวางเป็นช่วง
	3.เสริมCFRP75%ทั้งสองแนวเป็นช่วง
	4.เสริมCFRP100%ตลอดทั้งเสาตัวอย่าง

คอนกรีตที่ใช้ในการผลิตเสาตัวอย่างออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 325 ksc โดยวิธีการออกแบบอ้างอิงตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

เพื่อให้เสาตัวอย่างมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเสาที่ใช้งานจริงจึงออกแบบให้เสาตัวอย่างมีเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกตามมาตรฐาน

แท่นฐานเสาตัวอย่างของเสากลุ่มที่ 1 ออกแบบเพื่อให้มีการต้านทานการดัดที่ฐานของเสาตัวอย่าง ซึ่งทำจากเหล็กแผ่นเชื่อมต่อกัน มีขนาดกว้างและยาว 50 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร ยึดติดแน่นกับฐานของเสาตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แท่นฐานเมื่อติดตั้งกับเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1

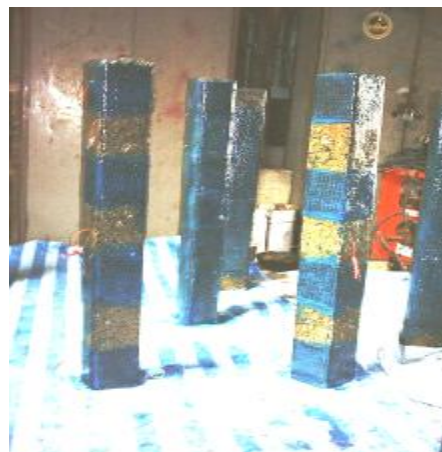
การยึดหดตัวของเสาตัวอย่างบันทึกโดยการติดตั้ง Strain Gage ที่เหล็กเสริมตามตำแหน่งที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 Strain Gage ที่ติดตั้งที่เหล็กเสริม

หลังจากหล่อคอนกรีตในแบบที่เตรียมไว้และบ่มชื้นเป็นเวลา 28 วัน ทำการเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตและ

ทำการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามที่จะระบุในตารางที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เสาตัวอย่างที่ติดตั้ง CFRP แล้ว

4. การทดสอบเสาตัวอย่าง

การทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่างทำโดยการติดตั้งตัวอย่างเสาเข้ากับโดยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) แสดงในรูปที่ 4 โดยให้น้ำหนักกดลงที่ปลายเสาในแนวตั้งสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดจนกระทั่งเสาตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยเก็บข้อมูลน้ำหนักที่กระทำจากเครื่องทดสอบเนกประสงค์ และเก็บค่าความเครียด (Strain) จาก Strain Gage ที่ติดไว้กับเสาตัวอย่างผ่านเครื่อง Data Logger ดังแสดงในรูปที่ 5



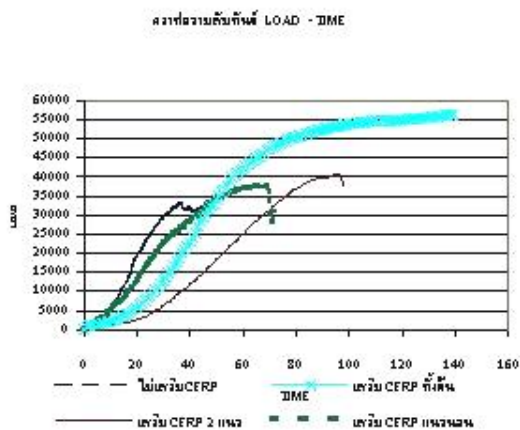
รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างเสาเข้ากับเครื่องทดสอบ



รูปที่ 5 การเก็บค่าความเครียด (Strain) จาก Strain Gage ผ่านเครื่อง Data Logger

5. ผลการทดสอบ

จากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาด้วยอัตราที่คงที่จนโครงสร้างวิบัติและเก็บค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเสา สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนแผนภาพของน้ำหนักกระทำ (Load) และเวลา ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับเวลา

จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและเวลาของเสาตัวอย่างแต่ละประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกันกล่าวคือ เสาที่ไม่ได้เสริม CFRP จะมีลักษณะการวิบัติที่รวดเร็วกว่าเสาที่มีการเสริม CFRP หรืออาจกล่าวได้ว่าเสาที่เสริม CFRP มีความเหนียว (Ductility) มากกว่า

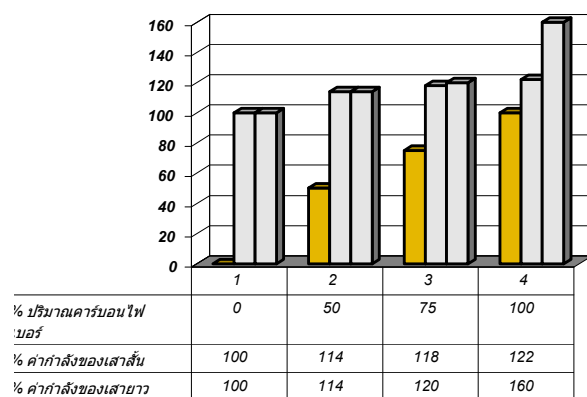
เมื่อพิจารณาจากการการรับน้ำหนักสูงสุดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมและไม่เสริมกำลังด้วย

คาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ต่างกันสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดในเสาแต่ละประเภทได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังของเสาหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์แบบต่างๆ

กลุ่ม	การเสริม CFRP	กำลังเฉลี่ย (Ton)
กลุ่ม 1 เสาสั้น	ไม่เสริม CFRP	102
	CFRP แนวนอน	116
	CFRP ทั้งสองแนว	121
	CFRP ตลอดเสา	125
กลุ่ม 2 เสายาว	ไม่เสริม CFRP	35
	CFRP แนวนอน	40
	CFRP ทั้งสองแนว	42
	CFRP ตลอดเสา	56

กำลังของเสาที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถเขียนเป็นแผนภาพของการเพิ่มกำลังของเสาในภาวะการเสริม CFRP ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับสภาพที่ไม่ได้เสริม CFRP โดยเปรียบเทียบเป็นร้อยละของปริมาณ CFRP ที่ติดตั้งบนโครงสร้างกับกำลังที่เพิ่มขึ้นเทียบกับการไม่กำลังของในแต่ละชุดดังแสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่เพิ่มขึ้นของเสา กับปริมาณของ CFRP ที่เสริมเข้าไป

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะต่างๆกันสามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังด้วยการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์นี้จะเพิ่มความเหนียวให้กับโครงสร้างเสาได้ และในส่วนของความสามารถในการรับแรงก็เพิ่มขึ้นด้วยตามปริมาณและทิศทางของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ ในกรณีของเสาที่รับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียวการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์เป็นช่วงในแนวตั้งจะไม่มีผลต่อกำลังมากเท่าการหุ้มในแนวราบเนื่องจากการหุ้มรอบในแนวราบจะโอברัดคอนกรีตและทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจากการถูกโอברัด (Confinement) ซึ่งจากการทดสอบ เสาจะมีค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นประมาณ 14 % ของกำลังเดิม ในขณะที่การหุ้มเสาทั้งต้นจะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นประมาณ 22-60 % ซึ่งขึ้นกับขนาดของหน้าตัดเสาหน้าตัดเสาที่มีขนาดใหญ่จะได้รับผลของการโอברัดน้อยกว่าหน้าตัดขนาดเล็ก เนื่องจากเสาขนาดเล็กเมื่อมีการลอบมเพื่อติดตั้งคาร์บอนไฟเบอร์แล้วจะมีลักษณะเข้าใกล้เสากลมมากกว่าเสาที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ประสิทธิภาพในการโอברัดคอนกรีตมีมากกว่า

ดังนั้นหากการเสริมกำลังของเสาไม่ได้เน้นที่การเพิ่มกำลังรับแรงแต่ต้องการเพิ่มความเหนียวและความปลอดภัยให้กับโครงสร้างเสา การหุ้ม CFRP เป็นช่วงๆในแนวราบก็อาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ควรพิจารณา

ปัจจัยของขนาดหน้าตัด จำนวนชั้นของการหุ้ม CFRP และพฤติกรรมของเสาภายใต้แรงกระทำในแนวตั้งและโมเมนต์ดัดร่วมกันยังเป็นสิ่งที่ต้องทำการศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการโครงการสำหรับนักศึกษาปริญญาตรีประจำปี 2546

เป็นอย่างสูงที่ได้มอบทุนสนับสนุนในการทำโครงการนี้ และขอขอบคุณบริษัท นนทรี จำกัด ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการติดตั้งคาร์บอนไฟเบอร์ รวมทั้งอนุเคราะห์วัสดุ CFRP ในการทดสอบ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ธรรมชาติ กุลประภา, การซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างด้วย Carbon Fiber และ Glass Fiber Composites, การสัมมนาเรื่อง การบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2544
- Demers, M., Herbert, D. Labossiere, P. and Neale, K.W., *The Strengthening of Structural Concrete with an Aramid Woven Fiber/Epoxy Resin Composite*, Proceeding of Advanced Composite Material in Bridges and Structures II, Montreal, P.435-442., 1996.
- Picher, F., Rochetter, P. and Labossiere, P., *Confinement of Concrete Cylinders with CFRP*, Proceeding of the First International Conference on Composite in Infrastructure, ICCI'96, Tucson Arizona, P.829-841, 1996.
- Hosotani, M. Kawashima, K. and Hoshikima, J., *A Study on Confinement Effect of Concrete Cylinders by Carbon Fiber Sheet*, Non metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 1, Sapporo, Japan, P.209-216, 1997
- Kataoka, T. et al., *Ductility of Retrofitted RC Columns with Continuous Fiber Sheets*, Non metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 1, Sapporo, Japan, P.547-554, 1997