การเกิดหน่วยแรงบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Active

Introduction to Stresses in Load-Transferring Areas of Reinforced Concrete Beams Model Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strips by an Active Method

สุดชาย เทียนกิ่งแก้ว ปฏิพัทธ์ แจ่มมั่งคั่ง*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทรศัพท์: 02-988-3666 ต่อ 2342

E-mail: pop-sutchais@hotmail.com and padipat.chaemmangkang@vsl.com

Manuscript received September 30, 2010
Revised November 16, 2010

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเกิดหน่วยแรงบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรง ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองซึ่งได้รับการเสริมกำลังด้วยวิธี Active โดยการทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในคอนกรีตด้วยการดึงส่วนปลายที่เป็นสมอของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) โดยการใช้แม่แรงไฮดรอลิคส์ จนได้ระยะการยืดตัวตามที่ได้คำนวณไว้ และทำการยึดรั้งส่วนปลายของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เข้ากับอุปกรณ์ถ่ายแรงรูปทรงกระบอกที่ถูกฝังไว้ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ต้องการให้เกิดการถ่ายแรงจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไปยังคอนกรีต โดยการศึกษานี้ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมการเกิดหน่วยแรงบริเวณที่เกิดการถ่ายแรงและรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยใช้อุปกรณ์ถ่ายแรงซึ่งมีอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงต่างๆ สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยต่างๆกัน

การสร้างแบบจำลองได้อาศัยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS โดยทำการจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก, อุปกรณ์ถ่ายแรงและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ด้วยเอลิเมนต์สามมิติ (Solid Element) และพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนของความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรง รวมถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตล้วนมีผลต่อขนาดของหน่วยแรงดึง (Tensile Stresses) และหน่วยแรงอัด (Compressive Stresses) ที่เกิดขึ้นบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงซึ่งสามารถประเมินได้โดยการใช้สมการความสัมพันธ์อย่างง่ายที่มีค่าอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรง รวมถึงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และค่าขนาดของหน่วยแรงดึงและแรงอัดที่เกิดขึ้นบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงเป็นตัวแปรตาม (Dependent Variables)

คำสำคัญ *: ไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS คาร์บอนไฟเบอร์*

ABSTRACT

This research studies the introduction of stresses in load-transferring areas of reinforced concrete beams strengthened with an active method, which induces compressive stresses in the concrete by tensioning a CFRP strip at its ends using a hydraulic jack until a predicted elongation of the CFRP strip is reached and ends of the strip are secured. In this study, a finite element method was used to analyze and predict the introduction of stresses and cracking of concrete in the load-transferring areas by using load-transfer devices with different height-to-diameter ratios for the concrete material of different compressive strengths.

The finite element program "ANSYS" was adopted to create models of reinforced concrete beams, the load-transfer devices and CFRP strip using three-dimensional solid elements, considering non-linear properties of the concrete material. Results of the analyses show that diameters, height-to-diameter ratios of the load-transfer devices, and compressive strengths of the concrete materials have influences on values of the tensile and compressive stresses of the concrete induced in the load-transferring areas, which may be predicted using simple equations having the height-to-diameter ratios and diameters of the load-transfer devices as well as compressive strengths of the concrete materials as independent variables, and values of the tensile or compressive stresses of the concrete in the load-transferring areas as dependent variables.

Keywords: *Finite Element, ANSYS, Carbon Fiber-Reinforced Polymers*

1. บทนำ

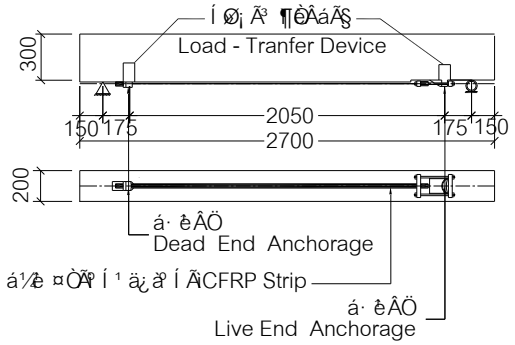
องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ อาจเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นได้ทั้งในขณะทำการก่อสร้าง หรือเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะการใช้งาน หรือหลังจากผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน โดยที่ความเสียหายดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้ทั้งจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม อุบัติเหตุ หรือจากการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งความเสียหายดังกล่าว อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพขององค์อาคารภายใต้สภาวะการใช้งาน และความแข็งแรงขององค์อาคารภายใต้สภาวะวิบัติได้

การปรับปรุงองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจหมายถึงการหยุด หรือชะลอการสูญเสียประสิทธิภาพขององค์อาคาร ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการเพิ่มประสิทธิภาพขององค์อาคารภายใต้สภาวะการใช้งาน และความแข็งแรงขององค์อาคารภายใต้สภาวะวิบัติ โดยที่การปรับปรุงสามารถกระทำได้ในหลายวิธีได้แก่ การขยายพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคาร การติดตั้งวัสดุที่ไม่ใช่คอนกรีตเข้ากับองค์อาคารเพื่อให้เกิดพฤติกรรมแบบคอมโพสิตในการรับแรง การอัดแรง การทำรอยต่อ เพื่อลดหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง และการทำ Epoxy Injection เพื่อซ่อมแซมองค์อาคารที่แตกร้าว

การปรับปรุงองค์อาคารโดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด และการติดตั้งวัสดุที่ไม่ใช่คอนกรีตซึ่งโดยทั่วไปจะได้แก่แผ่นเหล็กที่มีความหนาต่างๆ กัน เพื่อให้เกิดพฤติกรรมแบบคอมโพสิตในการรับแรง มักจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของน้ำหนักขององค์อาคารที่เพิ่มมากขึ้น และส่งผลกระทบต่อการรับน้ำหนักขององค์อาคารอื่นๆที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ เทคนิคดังกล่าวยังมีความยุ่งยากในการทำงานอันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัววัสดุเอง และขนาดของเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการติดตั้ง จากความไม่เหมาะสมหลายประการในการใช้แผ่นเหล็กสำหรับการปรับปรุงองค์อาคาร จึงได้มีความพยายามในการค้นหาวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกว่าเพื่อนำมาใช้ทดแทนแผ่นเหล็ก และ โดยที่วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงดึงตามแนวเส้นใยที่สูง มีน้ำหนักที่เบา ง่ายต่อการติดตั้ง และมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ดี วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) จึงเริ่มได้รับการพิจารณาเป็นวัสดุทางเลือกในการปรับปรุงองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในประเทศไทยตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2540 [1]

การเสริมวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย สามารถกระทำได้ในสองวิธี ได้แก่วิธี Passive และวิธี Active ในกรณีของวิธี Passive วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย จะทำงานเมื่อองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำ ที่มีขนาดสูงกว่าแรงที่กระทำอยู่แล้วในขณะที่ทำการติดตั้งวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพขององค์อาคารภายใต้สภาวะการใช้งานได้ ในขณะที่วิธี Active วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยจะทำงานเมื่อมีการอัดแรงเข้าสู่องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และจะสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพขององค์อาคารภายใต้สภาวะการใช้งานได้ในทันที

ระบบเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Active ที่ใช้ในการศึกษา[2] เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการอัดแรงให้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรง โดยการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีปลายทั้งสองข้างถูกยึดอยู่ในตัวสมอซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์เสริมเส้นใยด้วยแม่แรงไฮดรอลิคส์ ที่ติดตั้งอยู่บนแท่นยึดทางด้าน Live-End ที่ประกอบไปด้วยส่วนของอุปกรณ์ถ่ายแรง (Load-Transfer Devices) ซึ่งได้รับการติดตั้งไว้ล่วงหน้า โดยการเจาะฝังไว้ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ต้องการถ่ายแรงอัดเข้าสู่องค์อาคาร

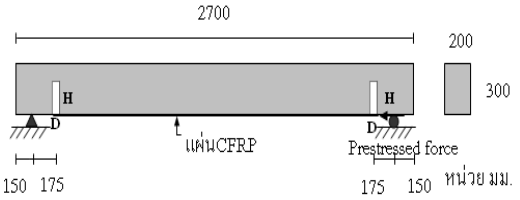


รูปที่ 1 *รูปด้านและรูปแปลนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายแรงของระบบที่ใช้ในการศึกษา*[2]

เมื่อทำการอัดแรง แรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะถูกถ่ายผ่านทางส่วนของอุปกรณ์ถ่ายแรงที่ติดตั้งไว้ในคอนกรีต ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเกิดหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึง ซึ่งหากหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นนี้มีค่าที่ไม่เหมาะสม ก็อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อองค์อาคารที่ทำการอัดแรงได้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ถูกจัดทำขึ้น เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น กับกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ในบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงด้วยวิธีการไฟไนอิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์ถ่ายแรง ที่สามารถใช้ในงานปรับปรุงองค์อาคารที่มีค่าคอนกรีตกำลังอัดประลัยที่หลากหลายได้

2. วิธีการศึกษา

คานที่ใช้ในการศึกษาเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลอง [3] หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และยาว 2,700 มิลลิเมตร ซึ่งเสริมกำลังด้วยการอัดแรงโดยการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และมีฐานรองรับ (support) ตั้งอยู่ห่างจากปลายคาน 150 มิลลิเมตร โดยฐานรองรับที่ปลายด้านซ้ายของคานจะเป็นแบบยึดรั้ง (Pinned) ส่วนที่ปลายด้านขวาจะเป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแกน X (Roller) ที่ท้องคานห่างจากฐานรองรับทั้งสองเป็นระยะ 175 มิลลิเมตร มีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายแรงรูปทรงกระบอก ไว้ในคอนกรีตและโผล่ออกจากผิวคอนกรีตเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร การอัดแรงจะกระทำโดยการดึงที่ปลายของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ถูกติดตั้งไว้ระหว่างอุปกรณ์ถ่ายแรงทั้งสองตัว ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) เท่ากับ 200,000 นิวตัน/ตร.มม. ค่าความเค้นคราก (Yield Stress, f_y) เท่ากับ 500 นิวตัน/ตร.มม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50, 75 และ 100 มม. และมีค่าอัตราส่วนระหว่างความสูง (Height, H) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, D) ต่างๆกัน ส่วนคอนกรีตที่ใช้จะมีค่ากำลังอัดประลัย (Compressive Strength, f_c') ทดสอบโดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เท่ากับ 21, 24, และ 27นิวตัน/ตร.มม. และมีค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture, f_r) เท่ากับ



รูปที่ 2 *ขนาดคานที่ใช้ในการศึกษา (หน่วยเป็นมม.)*

ตารางที่ 1 *ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และอัตราส่วนความสูง (H) / ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของอุปกรณ์ถ่ายแรง*

D (มม)	H/D			
50	2	3	4	5
75	1	2	3	
100	1	1.5	2	

ตารางที่ 2 *คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา*

พารามิเตอร์	คอนกรีต f_c' (นิวตัน/ตร.มม)			อุปกรณ์ถ่ายแรง
	21	24	27	
โมดูลัสยืดหยุ่น E (นิวตัน/ตร.มม.)	21,692	23,190	24,596	200,000
อัตราส่วนป๋วซอง ν	0.2	0.2	0.2	0.3
กำลังอัดประลัย f_c' (นิวตัน/ตร.มม.)	21	24	27	-
โมดูลัสแตกร้าว f_r (นิวตัน/ตร.มม.)	2.854	3.051	3.236	-
ความเค้นคราก f_y (นิวตัน/ตร.มม.)	-	-	-	500

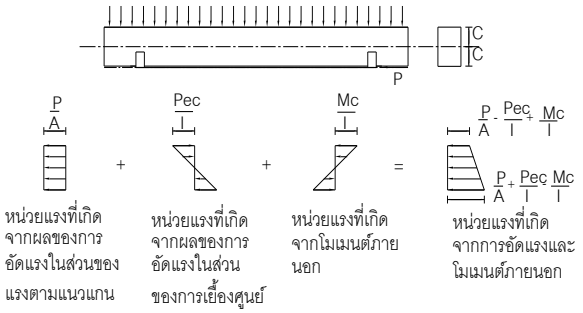
ตารางที่ 3 *คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์* [4]

โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตัน/ตร.มม.)	อัตราส่วนป๋วซองในทิศทางหลัก	โมดูลัสเฉือน (นิวตัน/ตร.มม.)	ความหนา (มม.)	ทิศทางองศา
E_1 =164,790	ν_{12} = 0.2	G_{12} = 6895	1.2	0
E_2 = 6,895	ν_{13} = 0.2	G_{13} = 6895		
E_3 = 6,895	ν_{23} = 0.247	G_{23} = 3448		

* $\nu_{23} = \nu_{12}\dfrac{(1-\nu_{21})}{(1-\nu_{12})}$ [5]

2.1 หน่วยแรง (Stress)

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลอง เนื่องจากการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ สามารถคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการอัดแรง น้ำหนักของตัวคานเองและน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้โดยใช้หลักการของคอนกรีตอัดแรงดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 *หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีการอัดแรง*[6]

2.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Models)

แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS [7] โดยมีรายละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ดังนี้

2.2.1 ชนิดของเอลิเมนต์ (Element Type)

2.2.1.1 คอนกรีต

เอลิเมนต์คอนกรีตจะถูกจำลองด้วยเอลิเมนต์ SOLID 65 ที่มีลักษณะคล้ายกล่อง โดยมีจุดต่อ (Node) จำนวน 8 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อจะสามารถเคลื่อนที่ (Translate) ได้อย่างอิสระใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z โดยแต่ละเอลิเมนต์จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (Linear Isotropic) โดยมีความสามารถในการยืดหดตัวได้ในช่วงพลาสติค และเกิดการแตกร้าวได้ในทั้ง 3 ทิศทาง รวมทั้งสามารถรองรับการวิบัติแบบ Crushing ได้

2.2.1.2 อุปกรณ์ถ่ายแรง (เหล็ก)

เอลิเมนต์อุปกรณ์ถ่ายแรง จะถูกจำลองด้วยเอลิเมนต์ SOLID 45 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกล่อง โดยมีจุดต่อ (Node) 8 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อ (Node) จะสามารถเคลื่อนที่ (Translate) ได้อย่างอิสระใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z โดยแต่ละเอลิเมนต์จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (Linear Isotropic)

2.2.1.3 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอลิเมนต์แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จะถูกจำลองด้วยเอลิเมนต์ SHELL 91 ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นหรือเลเยอร์ โดยจะประกอบด้วยเลเยอร์หลายๆเลเยอร์มารวมกันเป็นSandwich ในแต่เอลิเมนต์สามารถมีจำนวนเลเยอร์ได้ถึง 100 เลเยอร์ โดยมีทิศทางและคุณสมบัติวัสดุ Orthotropic ที่ต่างกัน เอลิเมนต์ SHELL 91 จะมีจุดต่อ (Node) 8 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อ (Node) จะสามารถเคลื่อนที่ (Translate) และหมุน(Rotate) ได้อย่างอิสระใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X, Y, Z

2.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

2.2.2.1 คอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัด และแรงดึงที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยในช่วงแรกของความสัมพันธ์ภายใต้แรงอัด หรือในช่วงที่ความเค้นอัดมีค่าจากศูนย์ถึงประมาณ 30% ของค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีตจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และหลังจากนั้นจะเป็นแบบ multilinear ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงดึงนั้น จะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยมีจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าของความเค้นดึงที่ประมาณ 8%-15% ของค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต หลังจากนั้นคอนกรีตจะแตก (crack) และความเค้นดึงจะลดลงจนเป็นศูนย์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) สามารถคำนวณได้จาก

$$E_c = 4{,}733.62\sqrt{f'_c} \quad [8] \qquad (1)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (นิวตัน/ตร.มม.)

f_c' = กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (นิวตัน/ตร.มม.)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีตแบบ non–linear สามารถหาได้จากสมการของ Desayiand Krishman[9]

$$f = \frac{E_c\varepsilon}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2} \qquad (2)$$

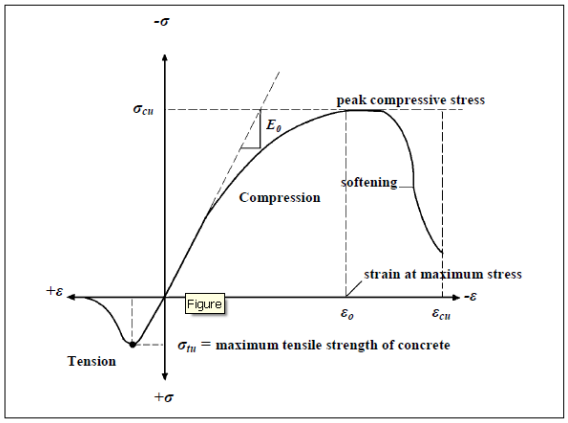
$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \qquad (3)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \qquad (4)$$

เมื่อ f = ค่าความเค้นอัดที่แต่ละความเครียดอัด (ε, นิวตัน/ตร.มม.)

ε = ค่าความเครียดอัดที่ความเค้นอัด f

ε_0 = ค่าความเครียดอัดที่ความเค้นอัดสูงสุด



รูปที่ 4 *ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ภายใต้แรงอัดและแรงดึงในแกนเดียวของคอนกรีต* [10]

ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาจะมีค่าเท่ากับ 0.2 ส่วนค่า Shear Transfer Coefficient (β_t) สำหรับใช้ในการเปิดรอยแตกที่ผิว (Crack Face) จะมีค่าเท่ากับ 0.2 [11] การเกิดรอยแตกและการวิบัติของคอนกรีตนั้นได้ใช้เกณฑ์การพิจารณาของ Willam and Warnke [12] โดยนำหน่วยแรงตามแนวแกนที่จุดกึ่งกลางของเอลิเมนต์ของคอนกรีต (SOLID 65) หรือที่จุดใดจุดหนึ่งใน Integration points มาใช้ประเมินการวิบัติในเบื้องต้นของคอนกรีตและใช้จำแนกรูปแบบของการวิบัติของคอนกรีต (Crushing) รวมถึงพื้นผิวการวิบัติ (Failure Surface) สำหรับ

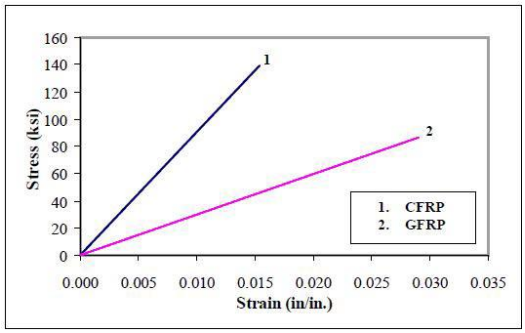
คอนกรีต

2.2.2.2 อุปกรณ์ถ่ายแรง (เหล็ก)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของอุปกรณ์ถ่ายแรง (เหล็ก) ที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3

2.2.2.3 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีคุณสมบัติแบบ Orthotropic คือ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในสามทิศทาง โดยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทที่รวมตัวเข้าด้วยกัน วัสดุแรกเป็นโพลิเมอร์เรียกว่าเมทริกซ์ ส่วนวัสดุที่สองจะเป็นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยมีทิศทางของเส้นใยที่วางตัวอยู่ในทิศทางเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการศึกษา จะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 *ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)*

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่แผ่น Sika CarboDur S512 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีความสามารถรับแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ 168,000 นิวตัน เมื่อคำนวณจากคุณสมบัติซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 *ข้อมูลเทคนิคผลิตภัณฑ์แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์*[13]

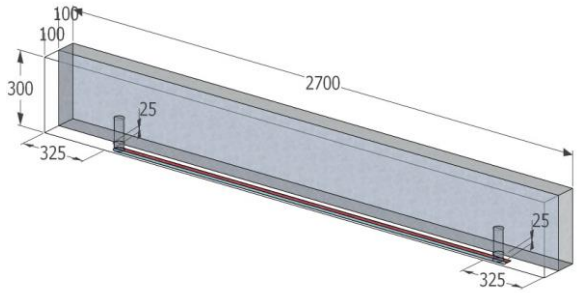
Sika Carbodur	S512
ไดเมนชั่น (กว้าง X หนา) (มม.)	50 x 1.2
โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตัน/ตร.มม.)	165,000
ค่ากำลังรับแรงดึง (นิวตัน/ตร.มม.)	2,800
ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง (นิวตัน/ตร.มม.) ขณะฉีกขาด	3,050
ค่าการยืดตัวขณะฉีกขาด (%)	1.7
พื้นที่ภาคตัดขวาง (ตร.มม.)	60

2.3 เรขาคณิตแบบจำลอง เงื่อนไขขอบและแรงที่มากระทำต่อแบบจำลอง

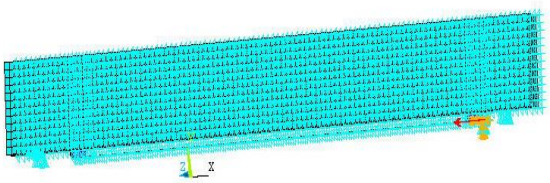
แบบจำลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา มีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และยาว 2,700 มิลลิเมตร โดยมีอุปกรณ์ถ่ายแรงจำลองขนาดครึ่งวงกลมยื่นโผล่จากคานเป็นระยะ 25 มม. และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จำลองขนาดกว้าง 25 มมโดยสร้างแบบจำลองหนึ่งในสองของคาน (ส่วนแรเงา) โดยใช้ประโยชน์จากลักษณะสมมาตรของคานที่ฐานรองรับด้านซ้ายเป็นแบบยึดรั้ง (Pinned) ที่กำหนดให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom, DOF) เป็นศูนย์ในแนวแกน X, Y และ Z (Ux=0, Uy=0, Uz=0) และที่ฐานรองรับด้านขวาเป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแกน X (Roller) โดยกำหนดให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่เป็นศูนย์ในแนวแกน Y และ Z (Uy=0, Uz=0) และด้านหลังคานมีการยึดรั้งในแนวแกน Z โดยกำหนดให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่เป็นศูนย์ในแนวแกน z สำหรับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ในช่วงที่ทำการอัดแรง กำหนดให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่เป็นศูนย์ในแนวแกน Y และ Z (Uy=0, Uz=0, $ROTx$=0, $ROTy$=0, $ROTz$=0)

แรงที่มากระทำต่อแบบจำลองเป็นแรงในแนวแกน X โดยกระทำที่จุดต่อ (Node) ของเอลิเมนต์ของ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยจะมีค่าเท่ากันที่ทุกจุดต่อ (Node)

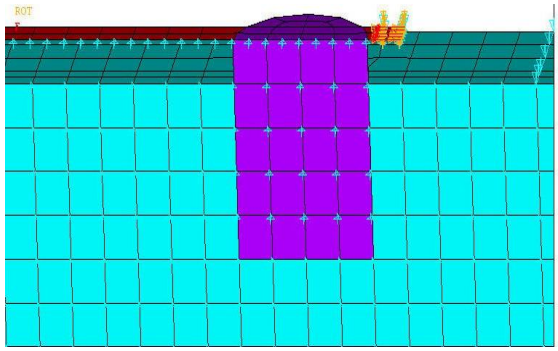
การแบ่งเอลิเมนต์ (mesh) ในเบื้องต้น จะทำการแบ่งเอลิเมนต์สามมิติให้มีขนาดไม่เกิน 25 มมและจากนั้นจะมีการแบ่งย่อยเล็กลงไปในส่วนของเอลิเมนต์อุปกรณ์ถ่ายแรง และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 6 *ขนาดของแบบจำลอง (หน่วยเป็น มม.)*



รูปที่ 7 *การแบ่งเอลิเมนต์ ฐานรองรับและการยึดรั้ง*



รูปที่ 8 *การแบ่งเอลิเมนต์และการสร้างแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และอุปกรณ์ถ่ายแรง*

2.4 การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตแบบไม่เชิงเส้นตั้งแต่เริ่มรับแรงตลอดช่วง Elastic จนเข้าสู่ช่วง Inelastic จนถึงจุดวิบัตินั้นได้ใช้ Newton-Raphson Equilibrium ในการแก้ปัญหา โดยน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำกับโครงสร้างจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และใช้วิธีการทำซ้ำ (Iteration) เพื่อหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ซึ่งจะให้คำตอบที่เป็นเชิงเส้น และทำให้เกิดการลู่เข้าในตอนท้ายของแต่ละขั้นของน้ำหนักบรรทุก (Load Step)

2.5 สมการความสัมพันธ์

การศึกษานี้ได้ใช้หลักสถิติการวิเคราะห์การถดถอยในการพยากรณ์สมการโดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS เพื่อวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ซึ่งได้แก่ ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนความสูงต่อค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรง รวมถึงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต และตัวแปรตาม (y) ซึ่งได้แก่ค่าขนาดของหน่วยแรงดึงและแรงอัดที่เกิดขึ้นบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรง โดยใช้ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) = $\dfrac{\left(\sum xy\right)^2}{\left(\sum x\right)^2\left(\sum y\right)^2}$ และ $0 \leq R^2 \leq 1$) ในการแสดงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร x และ y โดยที่ค่า R^2 ที่มีค่ามากจะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างตัวแปรทั้งสอง

3. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์

เมื่อมีการอัดแรงต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลอง โดยการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่แท่นยึดทางด้าน Live-End แรงกระทำจะเข้าสู่คานโดยผ่านทางอุปกรณ์ถ่ายแรง ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นบริเวณผิวด้านบนของคาน และทำให้คานเกิดการโก่งตัว โดยมีขนาดมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางคาน ในขณะเดียวกันก็จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงบริเวณด้านหลังของอุปกรณ์ถ่ายแรง (ด้านที่หันเข้าหาฐานรองรับ) และเกิดหน่วยแรงอัดบริเวณด้านหน้าของอุปกรณ์ถ่ายแรง เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากจนเกินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต จะเกิดรอยแตกร้าวเริ่มต้น (First Crack) ขึ้นที่บริเวณด้านหลังของอุปกรณ์ถ่ายแรง จากนั้นหากเพิ่มแรงดึงที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มากขึ้น คอนกรีตจะแตกร้าวเพิ่มขึ้นบริเวณโดยรอบและลึกเข้าไปข้างในคอนกรีตบริเวณด้านหลังของอุปกรณ์ถ่ายแรง และจะเกิดหน่วยแรงดึงมากขึ้นจนเกิดการแตกร้าว (Flexural Cracks) ที่ผิวด้านบนบริเวณกึ่งกลางคาน

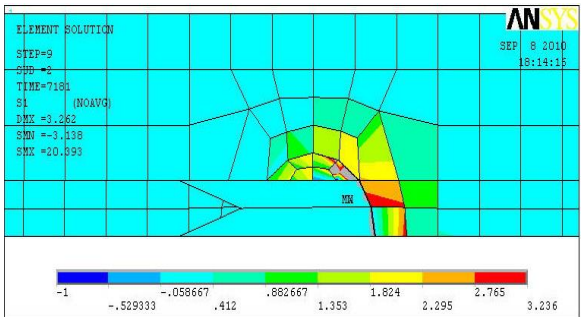
ในสมการความสัมพันธ์ ได้มีการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงที่แท่นยึดทางด้าน Live-End โดยใช้ค่าหน่วยแรง 1st Principle stress ที่มีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสแตกร้าว Modulus of Rupture ของคอนกรีตที่ทำให้เกิดการแตกร้าว และแรงที่ใช้ในการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อทำการอัดแรงคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลอง ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นน่าจะน้อยกว่าความเป็นจริงประมาณ 8-9% เนื่องจากในการศึกษาไม่ได้พิจารณาเหล็กเสริมที่มีในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจริง

จากสมการความสัมพันธ์ จะพบว่าค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าอัตราส่วนความสูงต่อค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรงรวมถึงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตล้วนมีผลต่อการเกิดหน่วยแรงบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรง โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรงจะมีผลต่อการเกิดหน่วยแรงดึงบริเวณด้านหลังของตัวอุปกรณ์ถ่ายแรงค่อนข้างมาก

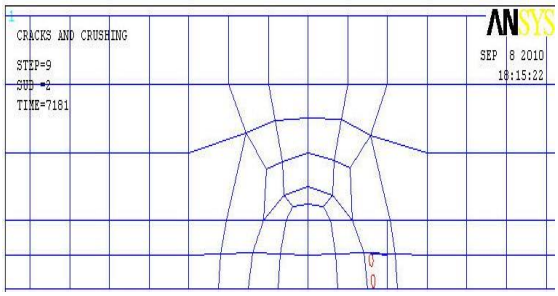
อุปกรณ์ถ่ายแรงที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าสติฟเนสมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวและการดัดของอุปกรณ์ถ่ายแรงเพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถรับแรงในแนวแกน X (แรงในทิศทางเดียวกับแนวที่ทำการอัดแรง) ได้มากขึ้น และสามารถถ่ายแรงเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดี นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนความสูงต่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ถ่ายแรงก็มีผลต่อการเกิดหน่วยแรงดึงบริเวณด้านหลังอุปกรณ์ถ่ายแรงเช่นกัน โดยอุปกรณ์ถ่ายแรงที่มีความสูงมาก จะมีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น ยกเว้นตัวอุปกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ที่ผลดังกล่าวจะเห็นได้ไม่ชัดเจน

ในส่วนของค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยสูง ก็จะทำให้มีค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูง และทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ยากขึ้น โดยรูปแบบการแตกร้าว (Crack Patterns) ของคอนกรีตจะสอดคล้องกับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นกับค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตในแต่ละค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตต่างๆ ซึ่งแสดงสัญลักษณ์การแตกร้าวเส้นวงกลม (0) ในทิศทางตั้งฉากกับ 1st Principle stress ในแนวแกน X โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มต้น (first crack) ที่จุด Integration points ซึ่งแสดงโดยเส้นรอบนอกที่เป็นสีแดง

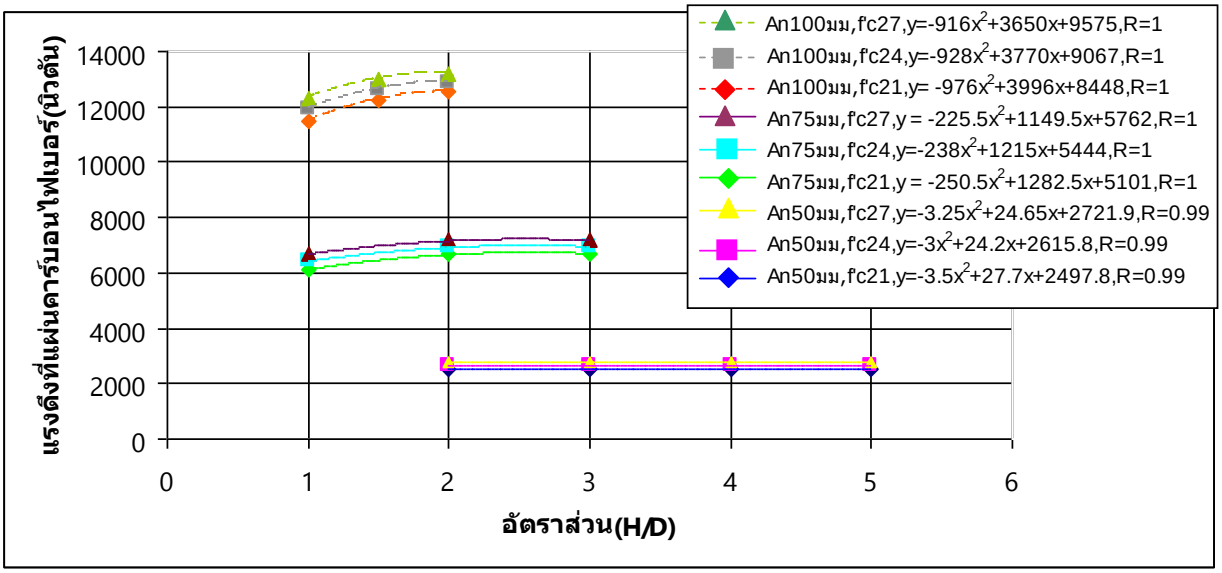
จากหลักสถิติการวิเคราะห์การถดถอยโดยการใช้ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการวิเคราะห์หาระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ถ่ายแรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50, 75 และ100 มม. ได้แก่สมการคลอดคลาติกโพลิโมเนียลกำลังสอง $y = ax^2+bx+c$ ซึ่งมีค่า R^2 ประมาณ 1.0 เมื่อ a, b และ c คือค่าคงที่ของสมการ



รูปที่ 11 *การเกิดหน่วยแรง 1st Principle stress บริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงที่แท่นยึดทางด้าน Live-End ที่แรง F=7,181 นิวตัน*



รูปที่ 12 *การเกิดรอยแตกเริ่มต้น (first crack) ที่บริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงที่แท่นยึดทางด้าน Live-End ที่แรง F=7,181 นิวตัน*



รูปที่ 13 *สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความสูง (H) ต่อค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของอุปกรณ์ถ่ายแรง ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (fc') ที่ 21, 24 และ 27 นิวตัน/ตร.มม. และแรงดึงที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์*

4. สรุป

บทความนี้ นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น กับกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตในบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรง ด้วยวิธีทางไฟไนอิลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการจำลองสถานการณ์ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์ถ่ายแรง ในงานปรับปรุงองค์อาคารที่มีค่าคอนกรีตกำลังอัดประลัยที่หลากหลายได้

การเสริมกำลังด้วยด้วยวิธี Active โดยการใช้ระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการอัดแรงให้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรง โดยการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีปลายทั้งสองข้างถูกยึดอยู่ในตัวสมอซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์เสริมเส้นใย ด้วยแม่แรงไฮดรอลิคส์ ที่ติดตั้งอยู่บนแท่นยึดทางด้าน Live-End ที่ประกอบไปด้วยส่วนของอุปกรณ์ถ่ายแรง (Load-Transfer Devices) ซึ่งได้รับการติดตั้งไว้ล่วงหน้า โดยการเจาะฝังไว้ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ต้องการถ่ายแรงอัดเข้าสู่องค์อาคารนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงเรื่องค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_c') ที่จะทำการซ่อมแซม หรือเสริมกำลังให้สอดคล้องกับขนาดมาตรฐานของอุปกรณ์ถ่ายแรง และค่าของแรงดึงที่กำหนดไว้ การประยุกต์ใช้งานในงานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจำเป็นจะต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดหน่วยแรงบริเวณอุปกรณ์ถ่ายแรงกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอุปกรณ์ เพื่อช่วยให้สามารถประเมินถึงความจำเป็นในการปรับปรุงส่วนต่างๆ ของคานที่เกี่ยวข้องในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมในเบื้องต้น เช่น การเสริมเหล็กกันแตกร้าว การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Passive เพิ่มเติมเพื่อรับแรงดึงบริเวณรอบอุปกรณ์ถ่ายแรง ก่อนทำการดึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และหากเป็นไปได้ รวมถึงการใช้ขนาดของอุปกรณ์ถ่ายแรงให้เหมาะสมกับกำลังรับแรงอัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซม

ปัจจุบันได้มีการนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาใช้ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตโดยวิธี Passive อย่างแพร่หลายในประเทศไทย แต่สำหรับการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโดยวิธี Active ยังคงไม่แพร่หลายนัก การศึกษาเกี่ยวกับระบบอุปกรณ์ถ่ายแรงของระบบดังกล่าวจะช่วยพัฒนาความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ถ่ายแรง กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอุปกรณ์ถ่ายแรงในระบบ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างสมบูรณ์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ธรรมชาติ กุลประภา, "*การซ่อมเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุ Composite Materials ในประเทศไทย*", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, หน้า 69-75, พ.ศ. 2544.

[2] สุวิมล สัจจวาณิชย์, "*การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบ Carbo Stress*",in "*Strengthening of Structures with CarboStress System*" , F. Fischli, R. Cle'nin, A. De Selva and P. Chaem-mangkang , Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, International Institute for FRP Construction, 2007.

[3] A. Dong-Suk Yang, B. Sun-Kyu Park and Kenneth W. Neale, "*Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites*", Composite Structures, 2008. (accepted for publication).

[4] Jose Alberto Anca Pereira, "*FE Modeling of FRP Strengthening Systems on the White Bayou Bridge*", M.S.Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2005.

[5] M.J. Tauris, "*Stress Analysis of a Fiber Reinforced - Polymer Matrix Orthotropic Plate with an Elliptical Hole*", M.S.Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford Connecticut, 2009.

[6] นเรศ พันธราธร,"*การออกแบบคอนกรีตอัดแรง*" ไลบราลี นาย, กรุงเทพฯ, หน้า 18, พ.ศ.2540.

[7] ANSYS, "*ANSYS User's Manual Revision 5.5*", Swanson Analysis System, Inc., Houston PA, 1998.

[8] ACI 318-99, American Concrete Institute, "*Building Code Requirements for Reinforced Concrete*", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.

[9] P. Desayi and S. Krishnan, "*Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete*", Journal of the American Concrete Inst., vol. 61, pp. 345-350, 1964.

[10] M.Y.H Bangash, "*Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications*", Elsevier Science Publishers, LTD., Essex, England, 1989.

[11] Y. Hemmaty, "*Modeling of the Shear Force Transferred Between Cracks in Reinforced and Fibre Reinforced Concrete Structures*", Proceedings of the ANSYS Conference, Vol. 1, Pittsburgh, Pennsylvania, 1998.

[12] K.J. William and E.P. Warnke, "*Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concret*", Proceedings International Association for Bridge and Structural Engineering, ISMES, Bergamo, Italy, Vol. 19, p. 174, 1975.

[13] SikaCarboDur,"*Heavy-Duty CFRP Strengthening System*" Available: http//www.sika.co.th/thsikathailand2.asp, April 15, 2010.

สุดชาย เทียนกิ่งแก้ว จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ พ.ศ.2538และปริญญาตรีวิศวกรรมโยธาในปี พ.ศ. 2542 จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันเป็นนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปฏิพัทธ์ แจ่มมั่งคั่ง จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีพ.ศ. 2527 และจบการศึกษาระดับปริญญาโท และเอก ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ University of Illinois at Urbana Champaign ในปี พ.ศ. 2538 และ 2544 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นผู้บรรยายในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และผู้จัดการทางด้านเทคนิค ที่บริษัท วี เอส แอล (ไทยแลนด์) จำกัด มีความสนใจทางด้านคอนกรีตอัดแรงในระบบ Post-tensioning และ การซ่อมแซม และเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีต