

การปรับปรุงการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงพาดเดี่ยวด้วยการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Improvement of Flexural Strengthening in Simple Single-Span Reinforced Concrete Beam by Use of Carbon Fiber Sheet

โสภณวิชญ์ มหาวนา ปกรณ์ สุทธิวารี และ ฉัตรชัย เจียรศิลป์ดำรง *

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ * Email: cjs@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการเพิ่มและซ่อมแซมกำลังรับโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงพาดเดี่ยว โดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และคาร์บอนไฟเบอร์แฟบรีค ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไฟเบอร์สามารถใช้เพิ่มกำลังของคานปกติและซ่อมแซมกำลังของคานที่สูญเสียกำลังบางส่วนได้อย่างดี ลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่เนื่องโมดูลัสแรงดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สูงมากทำให้คานแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีความเหนียว (Ductility) ต่ำ ดังนั้นรอยร้าวในคานกรีตที่ด้านรับแรงดึงอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดจึงเกิดขึ้นยากกว่ากรณีของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นสาเหตุให้คานเกิดการวิบัติแบบเปราะได้เมื่อมีการแยกตัวของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ออกจากคาน การนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดจึงจำเป็นที่จะต้องให้ความสนใจ

คำสำคัญ : คาน, โมเมนต์ดัด, ซ่อมแซม, คาร์บอนไฟเบอร์, epoxy

1. บทนำ

สิ่งปลูกสร้างที่ปรากฏส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอาคาร ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อประโยชน์ใช้สอยเฉพาะอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้สอยอาคาร เช่น มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกิจการ การตกแต่งเพิ่มเติม หรือ แม้แต่การเสื่อมสภาพขององค์อาคารเองก็ตาม โครงสร้างอาคารก็จะมีพฤติกรรมที่ต่างไปจากที่ถูกออกแบบไว้ วิธีการที่จะเสริมกำลัง หรือซ่อมแซมองค์อาคารนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การฉีดยา epoxy ในการอุดส่วนของคอนกรีตที่กะเทาะ การทำ post-tensioning รวมทั้งยังมีศึกษาถึงการเสริมความแข็งแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นตะแกรงลวด คาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธามากหลังจากที่มีการนำมาใช้ในการเสริมสร้างกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา และมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าจะมีการ

วิจัยถึงการนำ Fiber Reinforced Polymer (FRP) มาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาอย่างแพร่หลายในญี่ปุ่น ยุโรป แคนาดา และสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานวิจัยชิ้นหนึ่งได้ให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจในการใช้ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strip ในการซ่อมแซมหลังคาได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด แต่พฤติกรรมของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วย CFRP ก็ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างถ่องแท้

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงการนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ มาเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงพาดเดี่ยว รวมไปถึงการซ่อมแซมคานที่เสื่อมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เพื่อความเข้าใจถึงพฤติกรรมและข้อจำกัดของการนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาใช้งาน

2. การทดสอบ

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

2.1.1 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ คาร์บอนไฟเบอร์มีคุณสมบัติเด่นบางอย่างที่ดีกว่าเหล็กเสริม เช่น มีกำลังรับแรงดึงสูง น้ำหนักเบา ด้านทานการสึกหรอและสึกกร่อนได้ดี แต่ก็มีคุณสมบัติบางอย่างที่อาจมีผลต่อความเหนียว (Ductility) ของโครงสร้าง เช่น โมดูลัสของการดึงสูงมาก คุณสมบัติสำคัญๆ ของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีดังนี้

ชื่อการค้า Build Seal ® Strip Type S/512 ยาว 60 ซม.

Tensile Strength	2800	MPa
Tensile Modulus	165	GPa
Density	1.6	g/cm ³
Elongation at Break	1.8	%

2.1.2 วัสดุเชื่อมประสาน วัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะยึดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ให้ติดกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ epoxy ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ชื่อการค้า VIBOND PB

Shear Strength	15	N/mm ²
Peel Strength	4	N/mm ²
Tensile Strength at 35°C	30	N/mm ²
Tensile Modulus	2	GPa
Elongation at Break	4.4	%
Specific Gravity	1.4	

2.1.2 วัสดุห่อปลายคานเพื่อป้องกันการแยกตัวของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชื่อการค้า Build Seal® CFFS 200

ความยาว 80 ซม. 55 ซม. และ 15 ซม.

2.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 15x20x80 เซนติเมตร โดยถูกออกแบบให้มีการวิบัติแบบ tension controlled failure เนื่องจากการวิบัติที่พึงประสงค์ในโครงสร้างจริง โดยเมื่อเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แล้วคอนกรีตด้านรับแรงอัดจะต้องยังคงสามารถรับแรงได้เท่ากับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้คานยังคงวิบัติด้วยแรงดึงอยู่ แบ่งคานที่ใช้ทดสอบได้ 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่ม A คือคานที่ไม่สูญเสียกำลัง ประกอบไปด้วย

คาน A1 คือ คานที่มีได้เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ 3 ตัว

คาน A2 คือ คานที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์รับแรงเฉือน 3 ตัว

คาน A3 คือ คานที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัด 3 ตัว

คาน A4 คือ คานที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน 3 ตัว

คาน A5 คือ คานที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และมีการหุ้มปลาย 3 ตัว

กลุ่ม B คือคานที่สูญเสียกำลังบางส่วนก่อนการทดสอบ ประกอบไปด้วย

คาน B1 คือ คานที่มีได้เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ 3 ตัว

คาน B2 คือ คานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัด 3 ตัว

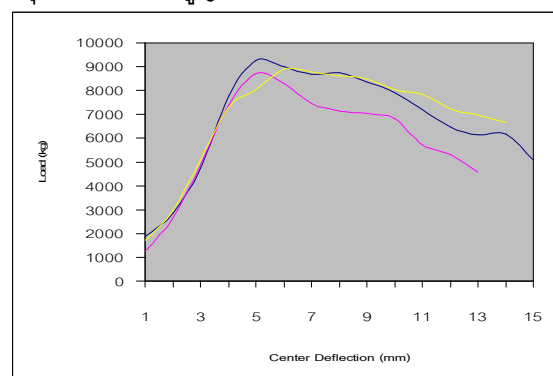
คาน B3 คือ คานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน 3 ตัว

2.3 วิธีทดสอบ

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine กดกึ่งกลางคานโดยมีระยะห่างระหว่างฐานรองรับ 58 ซม. สำหรับการเตรียมคานที่สูญเสียกำลังบางส่วนก่อนการทดสอบ เตรียมโดยการกดคานด้วยแรงกดประมาณ 40% ของน้ำหนักสูงสุดที่ออกแบบไว้ซึ่งมีค่า 4 ตัน

3. ผลการทดสอบ

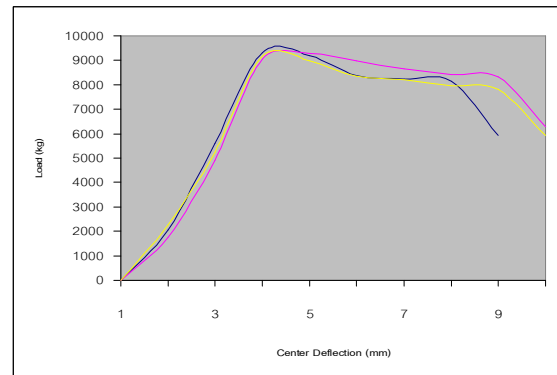
กลุ่ม A คานที่ไม่สูญเสียกำลัง



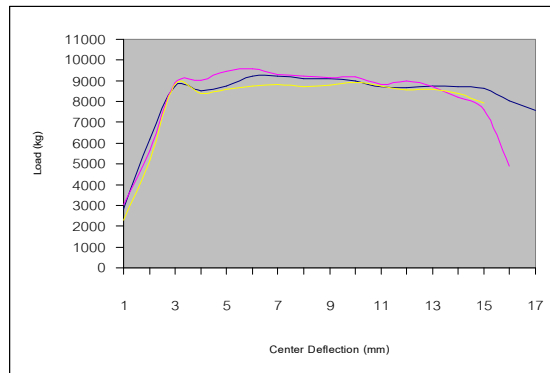
รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน A1



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน A1



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน A3



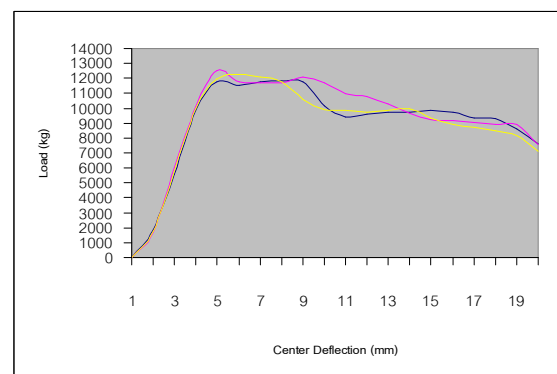
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน A2



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน A3



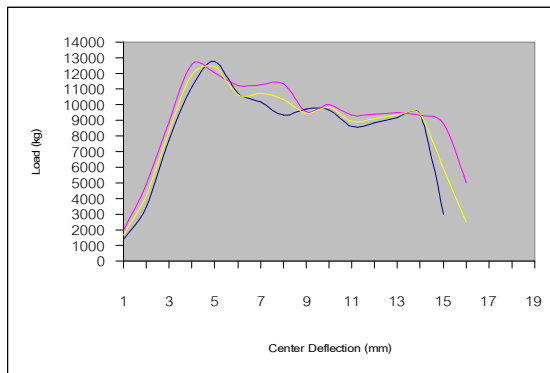
รูปที่ 4 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน A2



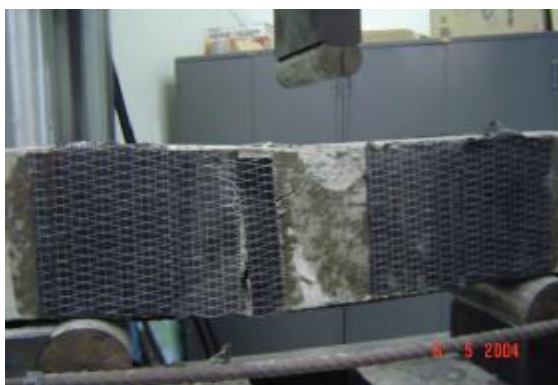
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน A4



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน A4

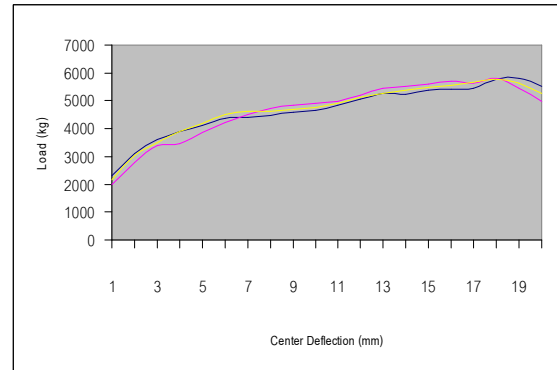


รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน A5



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน A5

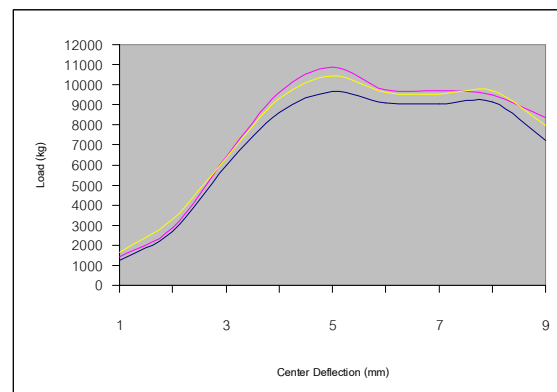
กลุ่ม B คานที่สูญเสียกำลังก่อนการทดสอบ



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน B1



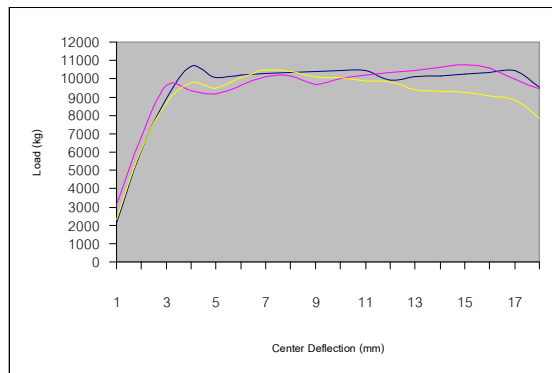
รูปที่ 12 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน B1



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน B2



รูปที่ 14 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน B2



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (kg) กับระยะเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางคาน (mm) ของคาน B3



รูปที่ 16 แสดงลักษณะการเกิดรอยร้าวของคาน B3

ชนิดของคาน	น้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยที่รับได้ (ตัน)	เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากคานที่ไม่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์
A1	8.96	-
A2	9.23	3.0
A3	9.26	3.3
A4	12.06	34.6
A5	12.58	40.4

ตารางที่ 1 แสดงค่าน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของคานในกลุ่มที่ไม่สูญเสียกำลังก่อนการทดสอบ

ชนิดของคาน	น้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยที่รับได้ (ตัน)	เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากคานที่ไม่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์
B1	5.80	-
B2	10.33	78.1
B3	10.64	83.4

ตารางที่ 2 แสดงค่าน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของคานในกลุ่มที่สูญเสียกำลังก่อนการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าคาน A1 รับแรงได้น้อยเนื่องจากไม่มีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์ และเมื่อพิจารณาการร้าวจะพบว่าคานชนิดนี้วิบัติด้วย inclined crack ซึ่งเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน เปรียบเทียบกับกรณีของคาน A3 ซึ่งมีการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ได้ห่อหุ้มคาน จะพบว่าคาน A3 ก็วิบัติด้วยแรงเฉือนเช่นกันแต่จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นเล็กน้อยเป็นค่าประมาณ 3.3% เนื่องจากเมื่อร้าวร้าวขยายตัวไปถึงท้องคานรอยร้าวจะถูกหยุดด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อใส่น้ำหนักกระทำมากขึ้นจนกระทั่งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์หลุดออกคานก็จะเกิดการวิบัติ เมื่อพิจารณาความเหนียวของคานก็จะเห็นว่าคาน A3 มีความเหนียวน้อยเนื่องจากโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นจากตัวแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั่นเอง

คาน A2 ซึ่งมีการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมเพื่อต้านทานแรงเฉือน ทำให้คานเกิดการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด สาเหตุที่คาน A3 ซึ่งมีการเสริม

คาร์บอนไฟเบอร์ต้านทานโมเมนต์ดัดแต่ไม่สามารถรับแรงได้มากกว่าคาน A2 เนื่องมาจาก principal stress ที่เกิดขึ้นทำให้คาน A3 เริ่มที่จะแตกร้าวในแนวทแยงก่อนทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานลดลงและวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในที่สุด

เมื่อเสริมทั้งคาร์บอนไฟเบอร์รับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคาน A4 และ A5 ผลที่ได้คือคานจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นคานทั้งสองมีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน

เล็กน้อย กล่าวคือในคาน A4 รอยร้าวจะเป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดเกิดขึ้นเลยเข้าไปไม่มากในช่วงที่มีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อต้านแรงเฉือนจากนั้นจะเอียงเข้าสู่กึ่งกลางคาน อีกทั้งยังมีการติดตัวของคาร์บอนไฟเบอร์ต้านทานแรงดัด ในขณะที่คาน A5 จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนโดยรอยร้าวทแยงเข้าไปในช่วงที่มีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อต้านแรงเฉือน รวมทั้งคาร์บอนไฟเบอร์ที่หุ้มปลายฉีกขาดเนื่องจากการติดตัวของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต้านทานแรงดัดด้วย สาเหตุเนื่องมาจากคาน A4 ไม่มีการหุ้มปลายทำให้ความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยกว่าคาน A5

สำหรับคานที่สูญเสียกำลังก่อนการทดสอบ B1 ยังสามารถรับน้ำหนักได้ 5.80 ตัน แต่การวิบัติเป็นผลมาจากโมเมนต์ดัดเนื่องจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นก่อนการทดสอบเป็นรอยร้าวในแนวตั้งฉากกับแนวแกนการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกเข้าไปภายหลังจะทำให้รอยร้าวนี้แยกออกมากขึ้นและวิบัติในที่สุด และเมื่อทำการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์รับโมเมนต์ดัด คาน B2 สามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นมากกว่าคาน B1 เมื่อความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากกว่าความสามารถในการต้านทาน principal stress ในแนวทแยง คานจึงมีการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนร่วมด้วยดังรูป คาน B3 ได้รับการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์ต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด แต่คานมีรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัดอยู่ก่อนแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จึงอยู่ระหว่างคาน A2, A3 และ A4

4. สรุปผลการทดสอบ

ในการทดสอบครั้งนี้มีข้อจำกัดที่ว่าคานที่ใช้มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่เพียงพอซึ่งแก้ไขโดยการใส่คาร์บอนไฟเบอร์แฟบริคติดเสริม รวมทั้งความเป็นไปได้ยากในการที่จะป้องกันการแยกตัวระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดกับตัวคาน อย่างไรก็ตามก็ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คาร์บอนไฟเบอร์สามารถใช้ในการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดและกำลังรับแรงเฉือนได้สูง
2. พฤติกรรมการวิบัติของคานที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์มีข้อพึงระวังคือความเหนียว (ductility) นั้นลดลงทำให้อาจเกิดการวิบัติแบบเปราะได้
3. ลักษณะรอยแตกร้าวเป็นไปในแนวเดียวกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
4. คานที่สูญเสียกำลังบางส่วนสามารถฟื้นฟูกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ได้เป็นอย่างดี
5. หากสามารถป้องกันการแยกตัวระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดกับตัวคานได้ คานจะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ความเหนียว (Ductility) ก็ลดลงอย่างมากเช่นเดียวกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาดรี ประจำปี 2546

ขอขอบคุณ Vispack Co.,Ltd. ที่ได้เอื้อเฟื้อคาร์บอนไฟเบอร์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

บริษัท วิสแพค จำกัด, เอกสารข้อมูล คาร์บอนไฟเบอร์ Al-Kubaisy, M.A.; and Jumaat, M.Z., "Ferrocement Laminate Strengthens RC Beams," Concrete International, V.22, No.10, October 2000, pp.37-43 MacGregor, J.G., Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice Hall, 1997 Nilson, A.H.; and Winter, G., Design of Concrete Structures, McGraw-Hill, 1991

Shehata, E.; Rizkalla, S.; and Stewart, D., "Roof Retrofit," Concrete International, V.20, No.6, June 1998, pp.44-46