

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาจุดเด่นของการซ่อมบำรุงคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต

โดย

รศ.ดร.กิตติศักดิ์ ขันติบวชช์ย และคณะ

สิงหาคม 2553



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาจุดเหมาะสมของการซ่อมบำรุงงานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต

Optimization study of composite patches repairs of reinforced concrete beam

คณะผู้วิจัย

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. รศ. ดร.กิตติศักดิ์ ขันติบวชย | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2. นาย ชาคริตพ์ ไม้พนธุ์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 3. รศ. ดร.สุชาติ ลิ่มกตัญญู | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |

สังกัด

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงบประมาณ
ประจำปีงบประมาณ 2553

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย น.อ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน

- 1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาจุดเหมาสมของ การซ่อมบำรุงคอนกรีตเสริมเหล็ก
คัวบัวส์คุณโนโลสิต**

(ภาษาอังกฤษ) Optimization study of composite patches repairs of reinforced concrete beam

- 2. ชื่อหัวหน้าโครงการและหน่วยงานที่สังกัด**

รศ.ดร. กิตติศักดิ์ ขันติบุษย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

โทรศัพท์ : 045-353 339 โทรสาร : 045-353 333

E-mail : kittisak.ubu@gmail.com

- 3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิชวกรรมโครงสร้างเน้นการบำรุงรักษาและยึดอาภัยการใช้งาน**

Keywords: การเสริมกำลัง (Strengthening), แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Fiber Reinforced Polymer (FRP), คอนกรีตเสริมเหล็ก(Reinforced Concrete Beams), โคลีซีฟอิลิเมนท์ (Cohesive Element), แผนภาพการพังทลายภายใต้แรงดึง (Flexural Failure Diagram)

- 4. งบประมาณทั้งโครงการ 63,000 บาท**

- 5. ระยะเวลาดำเนินงาน 1 ปี**

- 6. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย**

ปัจจุบันมีมาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง ได้มีการปรับปรุงเพื่อให้โครงสร้างที่จะออกแบบนั้นออกจากจะต้องสามารถรับน้ำหนักบรรทุกปกติ (แบบสติ๊กและแบบจร.) แล้ว โครงสร้างซึ่งจะต้องสามารถรับน้ำหนักกระทำจากธรรมชาติ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว ไถลวย ทำให้โครงสร้างที่ถูกสร้างขึ้นในอดีตไม่สามารถผ่านเกณฑ์การออกแบบปัจจุบันได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนลักษณะการใช้สอยอาคาร เช่น จากอาคารที่พักอาศัยธรรมชาติไปเป็นอาคารสาธารณะ เช่น ห้องสมุด หรือต้องการเพิ่มความสามารถให้รับบรรทุกที่มีน้ำหนักมากขึ้นสามารถแล่นผ่านสะพาน

ได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้โครงสร้างที่สร้างขึ้นในอคิตจะต้องมีการเสริมกำลัง เพื่อให้สามารถรับแรง และการเปลี่ยนแปลงคงคล่องไว้ได้ ซึ่งการเสริมกำลังมีความจำเป็นในแง่ของการการเพิ่มขีดความปลดปล่อยของโครงสร้างให้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบปัจจุบันรวมทั้งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายโดยไม่ต้องทำการสร้างโครงสร้างใหม่

วิธีการเสริมกำลังด้วยการใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างคอนกรีตที่เป็นอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันนี้ โดยปกติแล้ววัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่ใช้กับโครงสร้างเครื่องบิน แต่ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำมาใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต

โดยข้อดีของวัสดุคอมโพสิตคือค่าอัตราส่วนระหว่าง stiffness/weight ratios ที่สูง ความสามารถในการด้านทานต่อสารเคมีและสภาพแวดล้อม ความไม่น้ำไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้การมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล (tensile and fatigue strengths) ที่ดีกว่าเหล็ก ไม่ต้องการเครื่องจักรหนักในการยก ก็เป็นคุณสมบัติที่ได้เปรียบของวัสดุชนิดนี้ในการเสริมกำลัง แต่ข้อเสียของการเสริมกำลังโดยวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเนื่องจากราคาของวัสดุ ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังแบบนี้ก็จำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงจุดหมาย (เช่น ความหนาและชนิดของแผ่นคอมโพสิต ความหนาของกาว ชนิดของกาว เป็นต้น) ของวิธีการเสริมเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ตามต้องการและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงเกินไป

ดังนั้นการศึกษาจุดที่เหมาะสมของการเสริมกำลังโดยวัสดุคอมโพสิตจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังมีความเหมาะสมกับกำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Design of Experiment (DOE) เข้ามาย่วยในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่จะมีผลกระทบของกำลังและหาจุดเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุ เทคนิคการเสริมกำลัง และปริมาณวัสดุที่ใช้ เป็นต้น

7. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 7.1 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid
- 7.2 ศึกษาผลของการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานและขณะวิบัติของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง
- 7.3 ศึกษาผลของการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต่อพฤติกรรมการดัดภายในได้น้ำหนักบรรทุกใช้งานและขณะวิบัติ
- 7.4 ประยุกต์ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Design of Experiment (DOE) ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการรับน้ำหนักของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิต
- 7.5 ศึกษาจุดที่เหมาะสมของการเสริมกำลังแก่งานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิต ทั้งในแง่ของกำลังที่เพิ่มขึ้นและราคาวัสดุที่ใช้

8. ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 8.1 รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการเสริมกำลังของงานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่างๆ พร้อมทั้งสมการพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้อง
- 8.2 ทำการสร้างแบบจำลองงานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Method) พร้อมทั้งสอนเทียบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม
- 8.3 ทำการสร้างแบบจำลองงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิต 3 ประเภท ได้แก่ carbon, glass และ aramid โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Method) พร้อมทั้งสอนเทียบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม
- 8.4 ทำการแปรผันค่าที่จะมีผลต่อพฤติกรรมการดัดของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติในข้อที่ 7.5
- 8.5 ประยุกต์ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Design of Experiment (DOE) ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการรับน้ำหนักของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิต
- 8.6 ทำการศึกษาจุดที่เหมาะสมในการเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต ทั้งในแง่ของกำลังที่เพิ่มขึ้นและราคาวัสดุที่ใช้เพื่อเป็นแนวทางแก้วิศวกรในการพิจารณาเลือกวัสดุและวิธีการเสริมกำลังให้เกิดความคุ้มค่าที่สุด

9. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 9.1 มีความเข้าใจในพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิต
- 9.2 มีความเข้าใจถึงผลของการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid ต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานและขณะวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง รวมทั้งพฤติกรรมการดัดและลักษณะการวินติ
- 9.3 ทราบถึงวิธีการเสริมกำลังอย่างมีประสิทธิภาพของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid
- 9.4 ทราบจุดที่เหมาะสมในการเลือกวัสดุในการเสริมกำลังแก่คานคอนกรีตเสริมเหล็กให้เพื่อเกิดความคุ้มค่าแก่การลงทุนที่สุด
- 9.5 ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตในประเทศไทยได้

10. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง และหรือเก็บข้อมูล

ระยะเวลาในการวิจัย 1 ปี นับตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2553 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2554

สถานที่ในการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำนักงานวิจัย จังหวัดอุบลราชธานี

11. ผลผลิต (output) ที่ได้จากการวิจัย

เป็นที่ทราบกันในปัจจุบันว่าการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตนี้จะสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ แต่อย่างไรก็ตามราคากำลังของวัสดุคอมโพสิตทั้งชนิด carbon, glass และ aramid นั้นมีราคาที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากราคาของวัสดุดังนั้นการเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังแบบนี้ก็จำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงจุดเหตุแห่งความไม่สงบ ความหนา และชนิดของแผ่นคอมโพสิต ความหนาของกาว ชนิดของกาว เป็นต้น) ของวิธีการเสริมเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ตามต้องการและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงเกินไป จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การที่จะศึกษาหาจุดที่เป็นไปได้ยากมากเนื่องจากจะต้องทำการทดลองซึ่งตัวอย่างจำนวนมากและมีค่าใช้จ่ายสูง จุดนี้จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ในการที่จะการศึกษาจุดที่เหมาะสมของการเสริมกำลังโดยวัสดุคอมโพสิตที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังมีความเหมาะสมกับกำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ระบบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Method) ซึ่งการศึกษาโดยใช้วิธีนี้ หากได้ทำการสอนเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลองแล้วผลที่ได้จะมีความ

น่าเชื่อถือสูงมากและซึ้งเป็นวิธีการศึกษาที่มีดัชน์ทุนต่ำอีกด้วย ดังนั้นจึงศึกษาเพื่อสร้างแผนภาพ ดังกล่าวโดยอาจจำแนกผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ ดังนี้

1. การศึกษาวิจัยระยะแรกจะได้ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid รวมทั้ง การสร้างแบบจำลองและสอบถามเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลองที่ได้จากการ ทบทวนวรรณกรรม

- ให้ระบุผลผลิตที่ได้ในระยะนี้ คือ เข้าใจพฤติกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริม เหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid และได้แบบจำลองไฟไนท์ซิเมนท์ที่มีความถูกต้อง ผลสำเร็จระยะนี้คือเป็นผลสำเร็จ เมืองต้น (P)

2. การศึกษาวิจัยระยะที่ 2 จะได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการวิบัติ ของคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid

- ให้ระบุผลผลิตที่ได้ในระยะนี้ คือ ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการวิบัติและ ลักษณะการวินาศีของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด carbon, glass และ aramid ผลสำเร็จระยะนี้คือเป็นผลสำเร็จกึ่งกลาง (I)

3. การศึกษาวิจัยระยะที่ 3 จะได้จุดที่เหมาะสมของการเสริมกำลังโดยวัสดุคอมโพสิตที่จะทำ ให้ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังมีความเหมาะสมกับกำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

- ให้ระบุผลผลิตที่ได้ในระยะนี้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของวัสดุคอมโพสิต คุณสมบัติของ adhesive กำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และราคา ที่จะแสดงให้เห็นถึงจุดที่ เหมาะสมในการเลือกใช้ในการเสริมกำลังให้แก่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลสำเร็จระยะนี้คือเป็น ผลสำเร็จตามเป้าประสงค์ (G)

สารบัญ

	หน้า
หน้าสู่ปีrogram	ก
บทคัดย่อ	ฉ
Abstract	ช
สารบัญรูปภาพ	ภ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
บทที่ 2 บทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 ที่มาและความสำคัญของการเสริมกำลังของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
2.3 เส้นใยเสริมกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต	5
2.4 ข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.5 รายละเอียดการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.6 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็ก	9
2.7 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล	16
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกลุ่มสมบัติเชิงกล	19
2.9 การคำนวณหากำลังด้านทานแรงอัด	21
2.10 การสร้างแบบจำลองการทดสอบ	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการศึกษา	
3.1 บทนำ	42
3.2 วิธีการดำเนินการศึกษา	42
3.3 วิธีการไฟในห้องแม่เหล็ก	43
3.4 พื้นฐานการใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1	44
3.4 การออกแบบจำลองของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย	70

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 บทนำ	76
4.2 ข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	76
4.3 การตรวจสอบเบริญเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง	80
4.4 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง	86
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองการถดถอย	99

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

5.1 บทนำ	111
5.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็ก	111
5.3 การเบริญเทียบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด	114
5.4 การยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย	116
5.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	119

บรรณานุกรม

ภาคผนวก ก	121
ก.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักที่กระทำสูงสุดของงาน คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP กรณีของงาน Trian-3	124
ก.2 ตัวอย่างการสร้างสมการถดถอยของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ของแบบจำลอง Trian-3	126

สารบัญบทนำ

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังคอนกรีตคานและสะพาน	1
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย	5
2.2 พฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายในโครงสร้างของวัสดุเสริมกำลังค่าคงที่	6
2.3 รายละเอียดของการเสริมกำลังรับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัด สี่เหลี่ยมผืนผ้า	8
2.4 แสดงหน้าตัดและการกระจายความเครียดในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
2.5 แสดงการกระจายความเค้นในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
2.6 แสดงการกระจายความเค้นและความเครียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่น FRP	26
2.7 แสดงหน้าตัดและการกระจายความเครียด ความเค้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	28
2.8 แสดงการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริม FRP	28
3.1 แสดงรูปร่างการแทนค่าวิกฤติ (Element)	43
3.2 แสดงรูปคานคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคาน	45
3.3 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	46
3.4 แสดงตัวอย่างของการบอกตำแหน่งพิกัด (Coordinate)	47
3.5 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node	48
3.6 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เกิดจากการ Generate Node	48
3.7 ตำแหน่งและหมายเลข Element	49
3.8 รูปร่างแบบจำลองของคานที่ประกอบด้วย Element	50
3.9 แสดงทิศทางที่ใช้ในการกำหนดสถานะของ Node	51
3.10 แสดงขนาด ทิศทาง ตำแหน่งที่กระทำและสถานะของ Node	51
3.11 แสดงรูปคานคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคาน	52
3.12 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	53
3.13 ตัวอย่างของการบอกตำแหน่งพิกัด (Coordinate)	54
3.14 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node	56
3.15 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เกิดจากการ Generate Node	57
3.16 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เพิ่มขึ้น	57
3.17 แสดงลักษณะการสร้าง Element 1 Element	58

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
รูปที่	
3.18 Element 1 Element แบบ 2 มิติ	58
3.19 รูปร่างแบบจำลองของคานที่ประกอบด้วย Element	59
3.20 แสดงทิศทางที่ใช้ในการกำหนดสภาพข้อมูลของ Node	60
3.21 แสดงขนาด ทิศทาง ตำแหน่งที่กระทำและสภาพข้อมูลของ Node	61
3.22 แสดงรูปคานคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคาน	62
3.23 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	62
3.24 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node	67
3.25 แสดงผลการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS	70
3.26 แบบจำลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานวิจัย	71
3.27 คุณสมบัติของคอนกรีตภายในตัวโครงสร้าง	73
3.28 คุณสมบัติของคอนกรีตภายในตัวโครงสร้าง	74
3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม	74
4.1 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B1)	80
4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่รุนแรงตัวที่ถูกทดสอบระหว่างการทดลอง กับค่าที่ได้จากแบบจำลองคาน FK-B1 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	81
4.3 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B3)	82
4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่รุนแรงตัวที่ถูกทดสอบระหว่างการทดลอง กับค่าที่ได้จากแบบจำลองคาน FK-B3 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	83
4.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B3)	84
4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่รุนแรงตัวที่ถูกทดสอบระหว่างการทดลอง กับค่าที่ได้จากแบบจำลองคาน FK-B5 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1	85
4.7 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของแบบจำลอง	97
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง A	99
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง T	100

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP 101 ของแบบจำลอง MB	ของแบบจำลอง MB
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP 102 ของแบบจำลอง Trian	ของแบบจำลอง Trian
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP 103 ของแบบจำลอง A	ของแบบจำลอง A
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP 104 ของแบบจำลอง T	ของแบบจำลอง T
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP 105 ของแบบจำลอง MB	ของแบบจำลอง MB
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP 106 ของแบบจำลอง Trian	ของแบบจำลอง Trian
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP 107 ของแบบจำลอง A	ของแบบจำลอง A
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP 108 ของแบบจำลอง T	ของแบบจำลอง T
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP 109 ของแบบจำลอง MB	ของแบบจำลอง MB
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP 110 ของแบบจำลอง Trian	ของแบบจำลอง Trian
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก	112
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก	113
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก	114
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ FRP แต่ละชนิด กับกำลังรับน้ำหนัก	115
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP 117 ของแบบจำลอง A	ของแบบจำลอง A

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP	118
ของแบบจำลอง A	
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP	119
ของแบบจำลอง A	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุกับโพลีไธออกซ์ฟอร์มิเดท กับ โพลีอะคริลิกดีไซด์	7
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใย	9
2.3 สัดส่วนของส่วนประกอบ (ร้อยละ) ของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดตามท้องตลาด	10
2.4 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลังที่มีในท้องตลาด	13
2.5 คุณสมบัติของยาร์นอะรามิด และเส้นใยเสริมกำลัง	16
2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ	18
2.7 ข้อมูลสำหรับการทดสอบ แบบเชิงเส้นพหุคุณ	32
3.1 ตารางแสดงชนิดของ Element ที่ใช้ในแบบจำลองของคนตอนกรีตเสริมเหล็ก	72
4.1 แสดงข้อมูลแบบจำลองที่ใช้สร้างในโปรแกรม	77
4.2 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองเทียบกับการทดลองกรณีเปลี่ยนแปลงความหนาของ Adhesive Thickness	87
4.3 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองเทียบกับการทดลอง	94
4.4 สรุปสมการแบบจำลองการทดสอบ	104

บทคัดย่อ

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงพัฒนาเพื่อให้โครงสร้างที่จะออกแบบนอกจากจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกปกติแล้วโครงสร้างยังจะต้องสามารถรับน้ำหนักกระทำจากธรรมชาติได้ด้วย ทำให้โครงสร้างที่ถูกสร้างขึ้นในอดีตไม่สามารถผ่านเกณฑ์การออกแบบปัจจุบันได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนลักษณะการใช้สอยของโครงสร้าง การเพิ่มความสามารถให้กับโครงสร้างให้มีกำลังรับน้ำหนักมากขึ้น หรือให้คงสภาพการใช้งานต่อไปได้นั้น จะต้องมีการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเพื่อให้สามารถรับแรงและการเปลี่ยนแปลงค้างกล่าวได้ ซึ่งการเสริมกำลังมีความจำเป็นในเบื้องของการเพิ่มจีดของความปลดภัยของโครงสร้างให้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบปัจจุบันรวมทั้งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายโดยไม่ต้องทำการสร้างโครงสร้างใหม่

สืบเนื่องจากการขาดของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เสริมกำลังมีราคาสูง ทำให้การหาจุดเหมาะสมในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตจึงมีความจำเป็น ปริญญา妮พนธ์นับนี้ จึงได้ศึกษาหาจุดเหมาะสมของการเสริมกำลังโดยใช้เทคนิคทางสถิติที่เรียกว่า Statistical Design of Experiment (DOE) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยในการศึกษาจะใช้ระเบียบวิธีไฟฟ้าห้องอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ไม่ได้เสริมกำลัง กลุ่มที่เสริมกำลังด้วยการนําไฟเบอร์กลาสที่เสริมกำลังด้วยอะรามิด และกลุ่มที่เสริมกำลังด้วยกลาสไฟเบอร์ในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างแบบจำลองเป็นการนำวัสดุคอมโพสิต (Composite- Materials) ชนิด Carbon, Aramid และ Glass เสริมกำลังให้กับแบบจำลองโดยพิจารณาถึง ความหนา ความยาว ความกว้าง และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปริญญา妮พนธ์ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หากำลังความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามการหาจุดเหมาะสมในการเสริมกำลังจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน ดังนั้นปริญญา妮พนธ์นับนี้ จึงได้นำเทคนิค DOE ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาจุดเหมาะสมของการเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต จากการศึกษาพบว่าวัสดุเสริมกำลังชนิดคาร์บอนจะสามารถรับน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคืออะรามิด และกลาสไฟเบอร์ตามลำดับ ส่วนความหนาและความกว้างของวัสดุเสริมกำลังจะมีผลต่อพุติกรรมของคานเหมือนกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาหรือความกว้างของวัสดุเสริมกำลังที่

มากเกินไปก็ไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักของคานสูงขึ้นส่วนการเพิ่มความยาวของวัสดุเสริมกำลังจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของคานสูงขึ้นอย่างไรก็ตามถ้าหากพิจารณาจากภาพรวมของตัวแปรทั้งหมดโดยใช้เทคนิค DOE แล้วจะทำให้ได้ค่าเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังทั้งในเรื่องของกำลังและค่าใช้จ่ายด้วย

ABSTRACT

The present structural design standards have been developing to improve the structure to withstand not only the regular load but also the nature load. However, the structure built in the past could not meet current design standards because of the changing structural functions and increasing in external applied load. The structural strengthening is then required in order to maintain the safety of the structures and reduce the maintenance cost.

Owing to the highly cost of composite materials, the optimum strengthening is important. The project was then focus in studying the optimum strengthening of reinforced concrete beam using composite materials. Statistical Design of Experiment (DOE) and Finite Element (FE) technique were then employed in this study. Four groups of reinforced concrete (RC) beam, i.e. RC beam without strengthening, RC beam strengthening with aramid (AFRP), RC beam strengthening with glass fiber (GFRP) and RC beam strengthening with carbon fiber (CFRP) were modeled using ABAQUS program. Several parameters affecting the strength of RC beam, i.e. thickness, length, width and type of strengthening materials were considered. The results were compared and analyzed in term of loading capacity of the RC beam. However, the optimum strengthening depends on several strengthening parameters. DOE technique was then employed to obtain the best solution.

The results show that RC beam strengthening with CFRP increase the highest loading capacity followed by AFRP and GFRP, respectively. Thickness and width of strengthening material also affect the loading capacity of RC beam. However over strengthening is costly and also not improve RC beam capacity. Increasing the length enhances the RC beam capacity. By considering the overall strengthening parameters, DOE technique can be used in obtaining the best solution for RC beam strengthening with composite materials.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันนี้มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างได้มีการปรับปรุงเพื่อให้โครงสร้างที่จะออกแบบนอกจากจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกปกติ (แบบสติ๊กและแบบชร) แล้วโครงสร้างยังจะต้องสามารถรับน้ำหนักกระทำจากธรรมชาติ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว ได้ด้วย ทำให้โครงสร้างที่ถูกสร้างขึ้นในอดีตไม่สามารถผ่านเกณฑ์การออกแบบปัจจุบันได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนลักษณะการใช้สอยอาคาร เช่น จากอาคารที่พักอาศัยธรรมชาติไปเป็นอาคารสาธารณะ เช่น ห้องสมุด หรือต้องการเพิ่มความสามารถให้รับบรรทุกที่มีน้ำหนักมากขึ้น สามารถแล่นผ่านสะพานได้ ด้วยเหตุนี้才ทำให้โครงสร้างที่สร้างขึ้นในอดีตจะต้องมีการเสริมกำลัง เพื่อให้สามารถรับแรงและการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ ซึ่งการเสริมกำลังมีความจำเป็นในเรื่องของการเพิ่มขีดของความปลดภัยของโครงสร้าง ให้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบปัจจุบันรวมทั้งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายโดยไม่ต้องทำการสร้างโครงสร้างใหม่

วิธีการเสริมกำลังด้วยการใช้วัสดุคอมโพสิต(Composite material) ใน การเสริมกำลังให้แก่ โครงสร้างคอนกรีต เป็นอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยปกติแล้ววัสดุคอมโพสิต (Composite material) เป็นวัสดุที่ใช้กับโครงสร้างเครื่องบิน แต่ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำมาใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีต [1]

โดยข้อดีของวัสดุคอมโพสิต(Composite material)คืออัตราส่วนระหว่าง stiffness/weight ratio ที่สูง ความสามารถในการด้านทานต่อสารเคมีและสภาพแวดล้อม ความไม่น้ำไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ การมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล (Tensile and Fatigue Strengths) ที่ดีกว่าเหล็ก ไม่ต้องการ เครื่องจักรหนักในการยก ที่เป็นคุณสมบัติที่ได้เปรียบของวัสดุชนิดนี้ในการเสริมกำลัง แต่ข้อเสีย ของการเสริมกำลัง โดยวิธีนี้คือค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเนื่องจากราคาของวัสดุ ดังนั้นการเลือกวิธีเสริม กำลังแบบนี้ก็จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงจุดเหมาะสม (เช่น ความหนาและชนิดของแผ่นคอมโพสิต ความหนาของภาชนะน้ำหนัก เป็นต้น) ของวิธีการเสริมเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ตามต้องการ และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงเกินไป

1.2 วัสดุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material)
2. เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material) ชนิด carbon, glass, aramid
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต(Composite material)
4. ศึกษาจุดที่เหมาะสมของการเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. รวบรวมเกี่ยวกับวิธีการเสริมกำลังของงานคอนกรีตเสริมเหล็กพร้อมทั้งสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างแบบจำลองของงาน เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS
3. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material)
4. ทำการศึกษาจุดที่เหมาะสมในการเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material)

1.4 ระเบียบและวิธีวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องโดยอาศัยหลักการและทฤษฎีจากงานวิจัยที่มีผู้ศึกษา
มาแล้วเพื่อข้อกำหนดประดิ่นและขอบเขตในการศึกษา
2. ศึกษาผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม ABAQUS
3. วิเคราะห์พัฒนาของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต
(Composite- material)
4. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถการรับน้ำหนักของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม
กำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite material)
5. ศึกษาจุดที่เหมาะสมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะเสริมวัสดุคอมโพสิต (Composite-
material)

บทที่ 2

ทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยการทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำปริญญาในพื้นที่ ฉบับนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ที่มาและความสำคัญของการเสริมกำลังของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปแบบและวิธีการเสริมกำลังงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบเห็นในปัจจุบัน คุณสมบัติของวัสดุเสริม กำลังแบบต่างๆ การเปรียบเทียบสมการด่างๆที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองการทดสอบเชิงสถิติ ในการคำนวณหากำลังด้านทานแรงดึงหักทั้งกรณีที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต

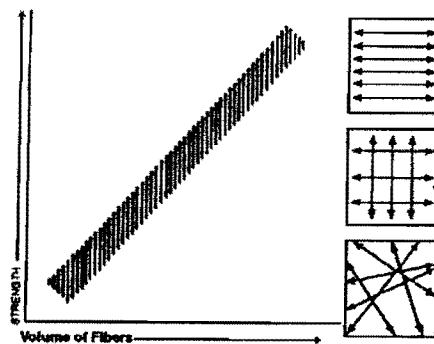
2.2 ที่มาและความสำคัญของการเสริมกำลังของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปัจจุบันพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber reinforced plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีป็อกซี่(epoxy) เสริมเส้นไนโตรบอน (carbon fiber) หรือเส้นไนโอมิด (aramid fiber) หรือเส้นไนแก้ว (glass fiber) ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริมและเคลือบใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารและโครงสร้างต่างๆ โดยตรง โดยเฉพาะในงานที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดีในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยจำนวนมากทั่วโลกและในประเทศไทยได้ทำการวิจัยในการใช้พลาสติกเสริมเส้นใยดังกล่าวในการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์หรือมีความบกพร่องทางด้านโครงสร้างซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวได้มีการนำมาใช้จริงแล้วทั่วทั้งในประเทศไทยและอเมริกาandanญี่ปุ่น และไทยอย่างไรก็ตามความสำเร็จในการใช้วัสดุดังกล่าวซึ่งจะไม่เกิดขึ้นได้โดยง่ายถ้าซึ่งไม่มีแนวทางการออกแบบและขั้นตอนดำเนินการที่ชัดเจนและถ้าการใช้พลาสติกเสริมเส้นใยไม่ได้มีความประยุกต์สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุอื่นๆ เช่นเหล็กเป็นต้นตามหลักเศรษฐศาสตร์แล้ว พลาสติกเสริมเส้นใยจะมีราคาถูกลงเมื่อมีปริมาณการใช้ที่มากขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อวิศวกรผู้ออกแบบมีแนวทางการออกแบบมีข้อมูลต่างๆ และมีขั้นตอนการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างที่ชัดเจนในการผลิตวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาหลายประการคือ ชนิดเส้นใยปริมาณเส้นใยและทิศทางการวางตัวของเส้นใยชนิดของเรซิโน่ที่ใช้และขนาดการผลิตซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะ

เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติของพลาสติกเสริมเส้นใยดังนี้ในการออกแบบพลาสติกเสริมเส้นใยในการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้วัสดุขึ้นตอนและวิธีการติดตั้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและการตรวจสอบคุณภาพและการตอบสนองของโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอดังนั้นวัสดุประสงค์ของบทความนี้คือเพื่อเสนอข้อควรพิจารณาและรายละเอียดในการเสริมกำลังและซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย [1]

2.3 เส้นใยเสริมกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต (Reinforcing Fibers for Structural-Composites)

เส้นใยหลักที่ใช้กันในห้องทดลองสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาซึ่งรวมถึงคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยแก้วเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิคฐานปูเป็นของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ใช้กันมากในงานโครงสร้างมักจะเป็นแบบแผ่นเสริมกำลังแผ่นเสริมกำลังทำขึ้นโดยการเรียงช้อนของเส้นใยและเมทริกซ์ชั้นบางๆ หลายชั้นรวมกันจนได้ความหนาที่ต้องการการควบคุมทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในแต่ละชั้นและลำดับของการเรียงช้อนซึ่งต่างๆ จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการ ความสามารถของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ การจัดเรียงเส้นใยหลักที่ใช้ในการรับแรงทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ความยาวสูงร่างและอัตราส่วนผสานของเส้นใยการจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียวจะทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีกำลังรับน้ำหนักและโมดูลัสสูงสุดในทิศทางตามแนวนอนของเส้นใยการจัดเรียงเส้นใยแบบระนาบเป็นการจัดเรียงเส้นใยสองมิติและมีกำลังรับน้ำหนักแตกต่างกันในทุกทิศทางเทียบกับทางการเรียงตัวของเส้นใยการเรียงเส้นใยแบบสามมิติจะมีกำลังรับน้ำหนักน้อยกว่าการจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียวคุณสมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่จัดเรียงตัวในทิศทางที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.1

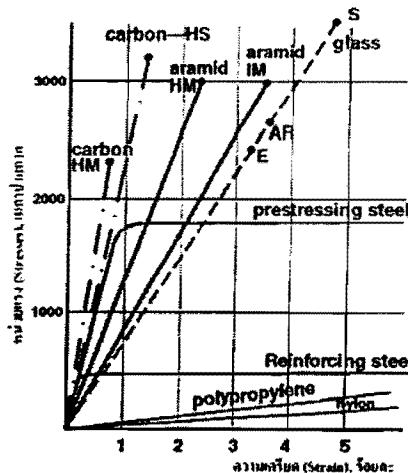


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย [6]

คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้น ไขข้อสงสัยกับทิศทางในการวัดเทียบกับทิศทางการตรวจตัวของเส้นไข่กล้องรับแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงของแผ่นเสริมกำลังชนิดเส้นไข่ทิศทางเดียวกันจะมีค่าสูงสุด เมื่อตรวจวัดในทิศทางตามยาวของเส้นไข่ในกรณีตรวจวัดในทิศทางอื่นคุณสมบัติดังกล่าวจะมีค่าลดลงและสำหรับคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ จะขึ้นอยู่กับทิศทางการตรวจวัด เช่นเดียวกับกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสข้อควรพิจารณาสำหรับการออกแบบ โดยทั่วไปมีรายละเอียดดังนี้

- วัสดุคอมโพสิตสามารถขัดความทิศทางให้ตรงตามทิศทางการรับน้ำหนักที่ต้องการได้
- การออกแบบมีอิสระค่อนข้างมากมีความหลากหลายของความหนาและรูปร่างของชิ้นส่วนประกอบซึ่งสามารถขึ้นรูปให้เป็นชิ้นส่วนตามที่ต้องการ
- เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบทั่วไปวัสดุคอมโพสิตมีกำลังรับแรงดึงสูงมากแต่มีความแข็งแกร่งค่อนข้างต่ำยกเว้นในกรณีเสริมเส้นไข่รับอนดังนั้นผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงผลของการตรวจประเภทและความประาะของระบบ
 - ออกแบบให้มีความแข็งแกร่งมากที่สุดโดยใช้ปริมาณวัสดุน้อยที่สุด
 - ต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านการคีบและความล้าของแผ่นเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ต่อเนื่อง
 - พลังงานที่สะสมไว้ที่จุดแตกหักซึ่งเป็นพื้นที่ได้รับความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรง ควรจะมีค่ามากที่สุด

ดังรายละเอียดข้างต้นได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงสำหรับเส้นไข่ต้องพิจารณาเส้นไข่แต่ละชนิดให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมโครงสร้างเพื่อให้มีระยะยืดและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงตามที่ต้องการรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ [6]

หมายเหตุ:

1. Carbon HM หมายถึงเส้นใยคาร์บอน โมดูลัสสูง
2. Carbon HS หมายถึงเส้นใยคาร์บอนกำลังสูง
3. Aramid HM หมายถึงเส้นใยอะรามิด โมดูลัสสูง
4. Aramid IM หมายถึงเส้นใยอะรามิด โมดูลัสปานกลาง
5. Glass หมายถึงเส้นใยแก้วแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ E-Glass, AR-Glass และ S-Glass
6. Prestressing Steel หมายถึงเหล็กเสริมโครงสร้าง
7. Reinforcing Steel หมายถึงเหล็กเสริมโครงสร้าง
8. Polypropylene หมายถึงพอลิเมอร์ชนิดพอลิไพรพิลีน
9. Nylon หมายถึงพอลิเมอร์ชนิดไนลอน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุกับโพลี慌ะบานชนิด [6]

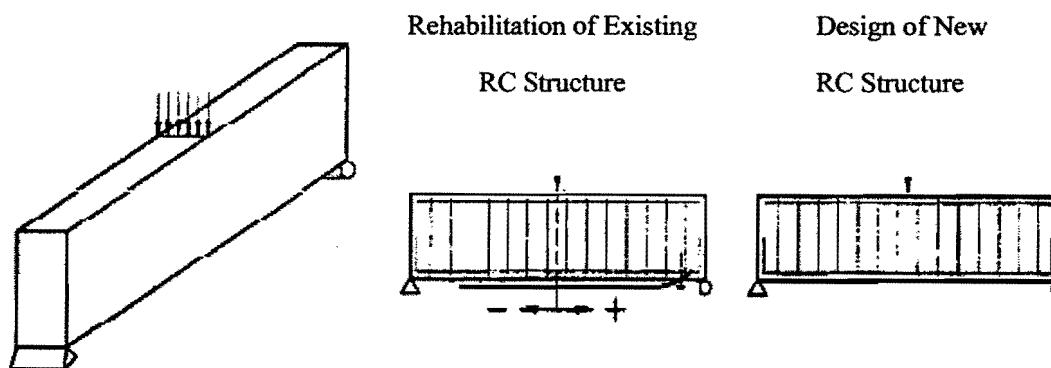
วัสดุ	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลังรับน้ำหนักที่สามารถเดี่ยว		มอดูลัสแรงดึงในทิศทาง เดียว	
		กำลังรับแรงดึง MPa(ksi)	กำลังรับแรงอัด MPa(ksi)	GPa	(*10 ³ ksi)
เสริมเส้นใยคาร์บอน AS-4	1.55	1482 (215)	1227 (178)	145	(21.0)
เสริมเส้นใยคาร์บอน HMS	1.63	1276 (185)	1020 (148)	207	(30.0)
เสริมเส้นใยแก้ว S-Glass TM	1.99	1751 (254)	496 (72)	59	(8.6)
เสริมเส้นใยแก้ว E-Glass	1.99	1103 (169)	490 (71)	52	(7.6)
เสริมเส้นใยอะรามิด (Aramid)	1.38	1310 (190)	290 (42)	83	(12.0)
อลูมิเนียม (7175-T6)	2.76	572 (83)		69	(10.0)
ไทเทเนียม (6Al-4V)	4.42	1103 (160)		114	(16.5)
เหล็ก (4130)	8.0	1241-1379 (180-220)		207	(30.0)

2.4 ข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการออกแบบการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างด้วยพลาสติกเสริมเส้นในนั้น โครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้มีขอบเขตของความปลดปล่อยที่เหมาะสมและต้องมีรูปแบบการวินิจฉัยที่ค่อยเป็นค่อยไปก่อนที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหายมากจนทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินทั้งนี้เนื่องจากว่าพลาสติกเสริมเส้นไม่โดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวินิจฉัยและการวินิจฉัยเป็นการวินิจฉัยอย่างทันทีทันใดซึ่งแตกต่างจากลักษณะการวินิจฉัยของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการวินิจฉัยแบบค่อยเป็นค่อยไปดังนี้ในการออกแบบการเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าวจากเราจะต้องพิจารณาถึงการตอบสนองทางกลของพลาสติกเสริมเส้นในช่วงเวลาสั้นและช่วงเวลายาวและพฤติกรรมการยืดหยุ่นของพลาสติกเสริมเส้นโดยและคอนกรีตแล้วเราจะต้องพิจารณาถึงการตอบสนองร่วมกันของคอนกรีตเสริมเหล็กและพลาสติกเสริมเส้นโดยวิธีซึ่งการตอบสนองร่วมกันดังกล่าวประกอบด้วยความแกร่งพฤติกรรมการรองรับน้ำหนักบรรทุกประเภทต่างๆและลักษณะการวินิจฉัยประกอบการออกแบบการเสริมกำลังและซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.5 รายละเอียดการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นสามารถใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็กได้สะดวกและรวดเร็วทั้งแบบประกอบเข้ากับองค์ประกอบที่หน้างานหรือแบบประกอบสำเร็จเป็นแผ่นพลาสติกเสริมเส้นไอล์วีบีดีเข้ากับโครงสร้างที่หลังดังนี้จึงมีแนวโน้มที่การเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าวจะถูกกระทำโดยไม่ได้คิดถึงผลที่จะเกิดขึ้นจากรูปแบบการติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นโดยเข้ากับองค์ประกอบมากนักรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของรายละเอียดการยึดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใน



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [1]

ในการเสริมกำลังรับแรงดันให้กับคานดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 โดยการติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวล่างของหน้าตัดคานถ้าแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยถูกยึดติดเข้ากับคานดังที่แสดงในรูปบริเวณปลายของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ยึดติดกับค่อนกรีดจะมีหน่วยแรงเฉือนที่มีค่าสูงมากเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่จุดดังกล่าวการติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่เหมาะสมควรมีลักษณะเช่นเดียวกับการวางเหล็กเสริมล่างในคานค่อนกรีดเสริมเหล็กคือแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยควรมีความยาวถึงจุดรองรับและปลายของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยควรถูกผิงและถูกยึดเข้ากับค่อนกรีดโดยใช้สลักเกลียวดังที่แสดงในรูปหรือใช้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นไอกันน้ำดีกว่าหัวตัดที่ปลายของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นไยก็ดังกล่าว

2.6 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังคานค่อนกรีดเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใย [6]

ชนิดของเส้นใย	ความ ถ่วงจำเพาะ	กำลังรับแรงดึง		มอดูลัสแรงดึง	
		MPa	ksi	GPa	(*10 ³ ksi)
เส้นไยแก้ว E-Glass	2.58	2689	390	72.4	10.5
เส้นไยแก้ว S-2-Glass	2.48	4280	620	86.0	13.0
เส้นไยแก้ว ECR-Glass	2.62	3625	525	72.5	10.5
เส้นไยอะรามิด K-49 Aramid	1.44	3620	525	131.0	19.0
เส้นไยคาร์บอน AS4 Carbon	1.80	3790	550	234.0	34.0

2.6.1 เส้นไยแก้ว (Glass Fibers)

เส้นไยแก้วเป็นเส้นไยที่ใช้งานกันในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเนื่องจากความเหมาะสมในด้านราคาและกำลังรับน้ำหนักที่ต้องการเส้นไยแก้วที่มีขายในท้องตลาดมีหลากหลายรูปแบบ เช่น

- รูปแบบ E-Glass (Electrical Grade) มีใช้งานกันในกรณีที่ต้องการรับแรงดึงด้วยวัสดุคอมโพสิต

- รูปแบบ High Strength S-2® Glass และ ECR-Glass ซึ่งปรับปรุงมาจากรูปแบบ E-Glass ให้ทนต่อกรด

- รูปแบบอินجاชั่น AR R และ Te

ส่วนประกอบแต่ละองค์ประกอบในตารางที่ 2.3 โดยการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีจะทำให้ได้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพตามที่ต้องการ

1. เส้นใยแก้วชนิด E-Glass เป็นกลุ่มของสารประกอบชนิดแคลเซียมอลูมินาซิลิกेट (Calcium-Alumina-Silicate Glass) ซึ่งมีส่วนประกอบดังที่ตารางที่ 3 และมักใช้สำหรับการขึ้นรูปหัวใจและงานเกี่ยวกับไฟฟ้า

2. เส้นใยแก้วชนิด S-Glass เป็นกลุ่มของสารประกอบชนิดแมกนีเซียมอลูมิโนซิลิกेट (Magnesium AluminoSilicate Formulation) ซึ่งนิ่งกำลังรับน้ำหนักสูงและมีสมรรถนะที่ดีกว่าให้ความร้อนสูงเส้นใยแก้วชนิด S-Glass หรือ S2-Glass มีส่วนประกอบเหมือนกันแต่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมกันเส้นใยแก้วชนิด S-Glass เป็นชนิดที่มีราคาสูงที่สุดในเส้นใยแก้วด้วยกัน

3. เส้นใยแก้วชนิด C-Glass ใช้สารประกอบโซดาไลม์โบโรซิลิกेट (Soda-Lime-Borosilicate) เพื่อช่วยสร้างเต็มรากเพิงเคมีต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนและมักใช้กับวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของส่วนประกอบ (ร้อยละ) ของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดตามห้องทดลอง [6]

หน่วย : ร้อยละ โดยน้ำหนัก

ส่วนประกอบ	ชนิดของเส้นใยแก้ว		
	E-Glass	S-Glass	C-Glass
ซิลิกอน ไออกไซด์ (Silicon Oxide)	52-56	65	64-68
อลูมินัม ออกไซด์ (Aluminum Oxide)	12-16	25	3-5
บอริก ออกไซด์ (Boric Oxide)	5-10	-	4-6
โซเดียม ออกไซด์ และ โพแทสเซียม ออกไซด์ (Sodium Oxide and Potassium Oxide)	0-2	-	7-10
แมกนีเซียม ออกไซด์ (Magnesium Oxide)	0-5	10	2-4
แคลเซียม ออกไซด์ (Calcium Oxide)	16-25	-	11-25
แบาริียม ออกไซด์ (Barium Oxide)	-	-	0-1
ซิงค์ ออกไซด์ (Zinc Oxide)	-	-	-
ไทเทเนียม ออกไซด์ (Titanium Oxide)	0-15	-	-
เซอร์โคเนียม ออกไซด์ (Zirconium Oxide)	-	-	-
ไอออน ออกไซด์ (Iron Oxide)	0-0.8	-	0-0.8
เหล็ก (Iron)	0-1	-	-

รูปแบบของเส้นใยแก้วสำหรับเสริมกำลัง

วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วประกอบไปด้วยเส้นใยซึ่งมีความยาวเกินกว่าขนาดหน้าตัด (อัตราส่วนลักษณะ (Aspect Ratio) มากกว่า 10:1) เส้นใยแก้วที่มีความยาวมากที่สุดที่มีในห้องตลาด เป็นชนิด T ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 22.86 ถึง 24.12 ไมครอนรูปแบบของเส้นใยแก้ว ที่มีในห้องตลาดมีดังต่อไปนี้

1.เชือกเส้นใย (Roving) เป็นเส้นใยต่อเนื่องที่ใช้กันในห้องตลาด โดยวิธีการดึงขึ้นรูป โดยตรงและขึ้นรูปครั้งเดียวตลอดความยาวเชือกเส้นใยจะมีผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ

2.ผืนเส้นใย (Woven Roving) เป็นผลิตภัณฑ์ เช่นเดียวกับเชือกเส้นใยซึ่งทอยเป็นผืนโดยมี ทิศทางของการเรียงตัวของเส้นใยต่างๆ กันตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศาขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของผู้ผลิต วัสดุเหล่านี้จะขายในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่โดยทั่วไปจะมีน้ำหนักต่อพื้นที่ประมาณ 610.3 กรัมต่อตารางเมตรและ 813.7 กรัมต่อตารางเมตร

3.แผ่นเส้นใย (Mats) เป็นการตัดเส้นใยเป็นเส้นสั้นๆ ขึ้นรูปเป็นรูปแบบโดยมีทิศทางการ วางตัวแบบสุ่ม แล้วจะถูกกล่าวถึงผ่านสายพานและผ่านบริเวณที่ผสมเข้ากับเรซินและให้ความร้อน กับเรซินเพื่อให้ขึ้นรูปเป็นเส้นใยเข้าด้วยกันหลังจากนั้นเรซินจะทำให้แผ่นเส้นใยขึ้นรูปได้ตามที่ ต้องการ

4.แบบผสม (Combined Products) อาจผลิตโดยการผสมผันเส้นใยซึ่งตัดเป็นชิ้นๆ เข้า ด้วยกัน โดยวิธีการต่างๆ เช่นการขีดหนีบวามเส้นใยเสริมกำลังสองชิ้นเข้าด้วยกันด้วยเรซิน เช่นเดียวกับ การผลิตแผ่นเส้นใย (Mats) หรือการเรียงเชือกเส้นใยซึ่งตัดเป็นชิ้นสั้นๆ ลงไปบนผืนเส้นใยและเย็บ เข้าด้วยกันเพื่อยึดให้เส้นใยให้แน่นเป็นต้นผลิตภัณฑ์แบบผสมจะมีความหลายหลายของผลิตภัณฑ์ มาก

5.ผ้าเส้นใย (Cloth) ผ้าเสริมกำลังด้วยเส้นใยผลิตขึ้นโดยมีหลายแบบซึ่งกำหนดโดยน้ำหนัก ต่อพื้นที่ผ้าเส้นใยผลิตขึ้นจากเส้นใยต่อเนื่องที่บิตรวนกันและนำไปทอเป็นผ้า เช่นเดียวกับ กระบวนการผลิตสิ่งทอทั่วไป

พฤติกรรมของเส้นใยแก้วภายใต้แรงกระทำ

เส้นใยแก้วจะมีสภาวะ Elastic จนกระทั่งถึงจุดประลัย โดยมีการคืนน้อบมากภายใต้สภาวะแห่ง โดยทั่วไปโมดูลัสของเส้นใยชนิด E-Glass มีค่าประมาณ 73 กิกะปาสกาลความเครียดสูงสุดที่จะ แตกหักอยู่ในช่วงร้อยละ 2.5 ถึง 3.5 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและ หน่วยแรงของเส้นใยอย่างครอบคลุมแล้วโดยพบว่ารูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดและหน่วยแรงของเส้นใยแก้วแสดงดังรูปที่ 2.2 ความเสียหายของเส้นใยเป็นกระบวนการ

สะสมโดยเส้นใยที่มีกำลังต่ำสุดจะเกิดความเสียหายก่อนและแรงกระทำจะถ่ายไปยังเส้นไขื่นที่บังเหดีองกระทั้งเกิดความเสียหายทั้งหมดเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงมากกว่าแก้วที่ใช้งานกันทั่วไป เช่นกระจากหน้าต่างหรือขวดแก้วเป็นต้นกำลังของเส้นใยแก้วจะลดลงได้ถ้าไม่มีการป้องกันเส้นใยจากความชื้นและการสัมผัสอากาศโดยตรงหรือการสัมผัสกับสิ่งปนเปื้อนเมื่อเส้นใยแก้วรับแรงกระทำขนาดคงที่โดยมีหน่วยแรงในหน้าตัดต่ำกว่ากำลังรับแรงแบบสติติกของเส้นไขื่นเส้นไข่ขาวเกิดความเสียหายได้หากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ของเส้นไข่ขาวมีลักษณะความเสียหายเช่นนี้เรียกว่าความเสียหายจากการถ่านออกากนีสภาวะแวดล้อมมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเส้นไข่แก้วโดยเฉพาะอย่างยิ่งไอน้ำซึ่งจะทำให้กำลังรับน้ำหนักลดลงมากที่สุดในทางทฤษฎีผู้ของแก้วจะมีโครงขนาดเล็กมากซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงเฉพาะที่ อาการที่มีความชื้นสูงจะประกอบไปด้วยครดอ่อนของการบอน โคอกาไซด์ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนต่อเส้นไข่จนกระทั้งเกิดหน่วยแรงเพิ่มขึ้นบริเวณโพรงที่ผิวเส้นไข่แก้วจนเกิดความเสียหายตามเวลาปั๊หาข้างต้น ได้มีการศึกษาเพื่อสำรวจความเสื่อมของเส้นไข่แก้วซึ่งทำให้มีการพัฒนาวิธีการป้องกันขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วการป้องกันจะดำเนินการในระหว่างการขึ้นรูปเส้นไข่ในกระบวนการผลิตและมีการพัฒนาวิธีการป้องกันผิวของเส้นไข่โดยใช้สารประกอบอินทรีย์ชนิดพิเศษซึ่งลดการสูญเสียกำลังของเส้นไข่ได้ถึงร้อยละ 5 ถึง 10 ภายหลังจากการทดสอบภายในตัวเดือนถึง 4 ชั่วโมงนอกจากนี้เส้นไข่แก้วยังมีผิวที่ไวและฉุดซึ่นน้ำและมีความเสียหายได้ง่ายขณะส่งการเคลื่อนผิวทันทีหลังจากกระบวนการเรียงตัวเส้นไข่ การปรับปรุงผิวเส้นไข่

2.6.2 เส้นไข่คาร์บอน (Carbon Fibers)

เส้นไข่คาร์บอนที่ใช้ในท้องตลาดผลิตได้จาก 3 แหล่ง ได้แก่น้ำมันดิน (Pitch) พอลิอะคริโลไนตริล (Polyacrylonitrile: PAN) และเรยอน (Rayon) คุณสมบัติของเส้นไข่คาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้างไมเลกุลและระดับของความนักพร่องการขึ้นรูปของเส้นไข่คาร์บอนต้องผลิตภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียสอุณหภูมนี้เส้นไข่สั้นจะสั้นลงกระที่โดยส่วนใหญ่จะหลวมหาดเลวและกล้ายเป็นไออย่างไรก็ตามอะคริลิกจะไม่หลอมเหลวและไม่กล้ายเป็นไอและโครงสร้างไมเลกุลจะรักษาสภาพอยู่ขณะทำปฏิริยาการบอนในเซ็นทรัลได้อุณหภูมิสูง

เส้นไข่คาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นไข่ชนิดโนมูลัสสูง (High Modulus) และเส้นไข่ชนิดกำลังสูง (High Strength) ความแตกต่างของคุณสมบัติระหว่างเส้นไข่ชนิดโนมูลัสสูงและชนิดกำลังสูงเกิดมาจากการความแตกต่างของโครงสร้างที่ต่อกันของเส้นไข่คุณสมบัตินี้เกิดมาจากการเรียงตัวของโครงข่ายเป็นชั้นแบบกราฟีนหรือรูปหกเหลี่ยมชั้นมักพบในกราไฟต์ถ้าชั้นเหล่านี้เรียงตัว

กันเป็นชั้นสามมิติจะเรียกว่ากราไฟต์แต่ถ้ามีแรงดึงเห็นได้ชัดเจนที่ระหว่างชั้นแต่ละชั้นต่ำและเกิดเป็นชั้นสองมิติจะเรียกว่า เส้นใยคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นการจัดเรียงสองมิติ

การเรียงตัวตามแนวแกนที่ต้องการของชั้นกราฟินในเส้นใยคาร์บอนจะเป็นตัวกำหนดค่าโมดูลัสของเส้นใยตามแนวแกนและเส้นใยตามแนวรัศมีและซ่องว่างจะมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเส้นใยการเรียงตัวของชั้นกราฟินที่ผิวเส้นใยจะช่วยเพิ่มกำลังและลดการตึงผิวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์การขันส่งเส้นใยคาร์บอนมักจะมีการปรับปรุงผิวเพื่อป้องกันการขัดถูการขันต้อง เพราะความเสียหายของเส้นใยจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิว รูปแบบของเส้นใยคาร์บอนในห้องคลาคาดอยู่ในรูปปั๊กของเส้นใยจำนวนเส้นใยในแต่ละปั๊กประมาณ 1,000 ถึง 200,000 เส้นใยเส้นใยคาร์บอนอาจผลิตในรูปแบบพรีเพรคหรือเป็นแผ่นเสริมกำลังทิศทางเดียว

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลังที่มีในห้องคลาคาด [6]

ชนิดเส้นใย	เด่นผ่าน ศูนย์กลาง (ไมโครน)	ความถ่วง จำเพาะ	มอดูลัส แรงดึง GPa (*10 ⁶ psi)	กำลังรับ แรงดึง GPa/กາล (*10 ⁶ psi)	ความ เครียด ที่จุด แตกหัก	สัมประสิทธิ์ การขยายตัว จากความ ร้อน 10 ⁻⁶ /°C	อัตรา ส่วน ปีว ซอง
เส้นใยแก้ว							
ชนิด E-Glass	10	2.54	72.4 (10.5)	3.45 (500.0)	4.8	5.0	0.2
ชนิด S-Glass	10	2.49	86.9 (12.6)	4.30 (625.0)	5.0	2.9	0.22
เส้นใยคาร์บอน							
PAN-Carbon T-300 ¹⁾	7	1.76	231 (33.5)	3.65 (530)	1.4	-0.1 ถึง -0.5 (ตามยาว)	-0.2
AS ²⁾	7	1.77	220 (32)	3.1(450)	1.2	-0.5 ถึง 1.2 (ตามยาว)	-
t-40 ¹⁾	6	1.81	276 (40)	5.65 (820)	2.0	-	-

ชนิดเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมครอน)	ความถ่วงจำเพาะ	มอดูลัสแรงดึง GPa (*10 ⁶ psi)	กำลังรับแรงดึง GPา/กาล (*10 ⁶ psi)	ความเครียดที่จุดแตกหัก	สัมประสิทธิ์การขยายตัวของความร้อน 10 ⁻⁶ /°C	อัตราส่วนปีวะของ
HSB ²⁾	7	1.85	344.5 (50)	2.34 (340)	0.58	-	-
Fortafil 3 TM ³⁾	7	1.80	227 (33)	3.80 (550)	1.7	-0.1	
Fortafil 5 TM ³⁾	7	1.80	345 (50)	2.76 (400)	0.8	-	-
PITCH Carbon							
P-555 ¹⁾	10	2.0	380 (55)	1.90 (275)	0.5	-0.9 (ตามยาว)	-
P-100 ¹⁾	10	2.16	758 (110)	2.41 (350)	0.32	-1.6 (ตามยาว)	-
เส้นไบอะรามิด							
Kevlar TM 49 ⁴⁾	11.9	1.45	131 (19)	3.62 (525)	2.8	-2 (ตามยาว) 59(ตามรัศมี)	0.35
Twaron TM 1055 ^{5),6)}	12.0	1.45	127 (18)	3.6 (533)	2.5	2 (ตามยาว) 59(ตามรัศมี)	0.35

หมายเหตุ: 1) Amoco

5) Akzo-Nobel Fibers

2) Hercules

6) ค่าเฉลี่ยจากชุดที่ผลิตได้ต่ำที่สุด

3) Akzo-Nobel/Fortafil Fibers

4) DuPont de Nemours and Co.

2.6.3 เส้นไบอะรามิด (Aramid Fibers)

มีเส้นใยอินทรีย์ที่ใช้ในงานโครงสร้างอยู่มาก many อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหตุผลด้านราคาและในบางกรณีเกี่ยวกับเรื่องอุณหภูมิใช้งานหรือปัจจัยด้านความคงทนทำให้ต้องจำกัดการใช้งาน

เส้นไอกันทรีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือเส้นไอะรามิดซึ่งหมายถึงโพลี-พารา-ฟินิลีนเทเรฟทาเลท (Poly-Para-Phenyleneterephthalamide: PPD-T) เส้นไอะรามิดที่ผลิตขึ้นในห้องทดลองได้แก่ DuPont (KevlarTM) และ Akzo Nobel (TwaronTM) เส้นไอะเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอร์เหลวเนื้อพลีก (Liquid Crystal Polymer) พอลิเมอร์แบบนี้จะมีความแข็งมาก มีกำลังสูงและไม่คุ้ลัตสูงจึงมีการผสมรูปแบบข้างต้นในสารละลายโดยจัดเรียงเป็นแบบขนาดสำหรับในการผลิตต้องการพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นให้ผสมสารละลายและขึ้นรูปเป็นวงแบบสุ่ม เมื่อสารละลาย PPD-T ถูกรีดผ่านเครื่องสร้างเส้นไอกลางช่วงระหว่างการผลิตโครงสร้างของเหลวแบบพลีกจะเรียงตัวกันตามทิศทางการไหลของเส้นไอะโครงสร้างเส้นไอะจะเป็นแบบแอนโอลิตรอปิกและให้ค่ากำลังสูงขึ้นและมีค่าไม่คุ้ลัตตามแนวแกนสูงกว่าแนวตามขวาง เส้นไอก็ได้จะมีลักษณะประกอบด้วยเส้นไอะลีกๆ ด้วยลักษณะตั้งกล่าวพฤติกรรมความเสียหายจากแรงดึงจะเกิดขึ้นโดยเริ่มจากปลายของเส้นไอะแล้วย้ายผ่านความเสียหายแบบแรงเฉือนระหว่างเส้นไอะลีกๆ

คุณสมบัติสำคัญของเส้นไอะรามิด

- ไม่คุ้ลัตแรงดึงขึ้นอยู่กับทิศทางการเรียงตัวของโมเลกุล
- กำลังรับแรงดึงเส้นไอะรามิดจะมีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าชนิด E-Glass ถึงร้อยละ 50
- ที่อุณหภูมิห้องความชื้นจะมีผลให้กำลังรับแรงดึงลดลงไม่เกินร้อยละ 5
- การคืนและความล้า: เส้นไอะรามิดจะมีความทนทานต่อการคืนและความล้า
- อัตราการล้า มีค่าน้อย เช่นเดียวกับเส้นไอะแก้วซึ่งไม่ໄວต่อความเสียหายเนื่องจากการล้า
- ความเหนียว: ความเหนียวของเส้นไอะรามิดเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเหนียวค้านแรงดึงหรือพื้นที่ให้การระหว่างความเครียดและหน่วยแรงโครงสร้างของอะรามิดซึ่งมีเส้นไอะลีกๆภายในและพฤติกรรมค้านแรงอัดทำให้เส้นไอะนิดนี้มีความทนทานต่อการบุบบีด
 - คุณสมบัติค้านอุณหภูมิ: โครงสร้างของอะรามิดมีเส้นใยร้าฟในทางอุณหภูมิค่อนข้างสูงเส้นไอะถูกทำลายในอุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส (800 องศาฟาร์เอนไฮด์) และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -200 ถึง 200 องศาเซลเซียสแต่ไม่ควรใช้ในระยะยาวภายใต้อุณหภูมิเกิน 150 องศาเซลเซียส (300 องศาเซลเซียส) เนื่องจากการปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เส้นไอะจะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในทิศทางตามแนวแกน
 - คุณสมบัติค้านไฟฟ้า: อารามิดเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยมีค่าคงที่ไดอิเลคทริก (Dielectric Constant) ประมาณ 4.0 โดยวัดที่ความถี่ 10^6 เฮิรตซ์

• พฤติกรรมต่อสภาพแวดล้อม: เส้นใยอะรามิดจะถูกกัดกร่อนได้โดยกรดหรือค่างอย่างแรง แต่มีความทนทานต่อตัวทำลายและสารเคมีอื่นๆ เป็นส่วนใหญ่อย่างไรก็ตามอาจมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีบูร์ (UV Degradation) ได้ในส่วนของคอมโพสิตพอลิเมตรไม่พบการสูญเสียกำลัง

ข้อควรระวังเกี่ยวกับพฤติกรรมด้านแรงอัดของเส้นใยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ได้แก่ แรงอัดอาจทำให้เกิดการยับย่นเฉพาะแห่งและการแยกตัวของเส้นใยซึ่งเป็นเหตุให้กำลังรับน้ำหนักลดต่ำลง ภายใต้แรงอัดหรือแรงดึงดันนี้เส้นใยอะรามิดจึงไม่เหมาะสมกับโครงสร้างแบบเปลือกบางซึ่งอาจต้องรับแรงอัดและแรงดึงดันข้างสูงยกเว้นจะผสานเข้ากับเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนโครงสร้างเส้นใยแบบผสานทำให้มีความหน่วงต่อการสั่นไหวสูงซึ่งหมายความว่าโครงสร้างเส้นใยเสริมกำลังที่รับน้ำหนักแบบพลวัต

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของยาร์นอะรามิดและเส้นใยเสริมกำลัง [6]

คุณสมบัติ	Kevlar 49	Twaron 1055 ¹⁾		
ยาร์น (Yarn)				
กำลังรับแรงดึง, MPa (ksi)	2896	(420.0)	2774	(398.0)
กำลังรับแรงดึงของเส้นใย (Tenacity)1, dN/tex (g/den)	20.4	(23)	19.0	(21.4)
มอดูลัส,, GPa (ksi)	117.2	(17,000)	103.4	(15,000)
ความเครียดดึงที่ขาดแตกหัก, ร้อยละ	2.5	(2.5)	2.5	(2.5)
ความหนาแน่น, g/cm ³ (psi)	1.44	(0.052)	1.45	(0.052)
เส้นใยเสริมกำลัง				
กำลังรับแรงดึง,, MPa (ksi)	3620	(525.0)	3599	(522.0)
มอดูลัส,, GPa (ksi)	124.1	(18,000)	127.0	(18,420)
ความเครียดดึงที่ขาดแตกหัก, ร้อยละ	2.9	(2.9)	2.5	(2.5)
ความหนาแน่น, g/cm ³ (psi)	1.44	(0.052)	1.45	(0.052)

หมายเหตุ: 1) ค่าเฉลี่ยจากชุดที่ผลิตได้ดีสุด

2.7 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล

ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของแท่ง FRP ได้แก่ (1) แท่ง FRP มีลักษณะเป็นแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) โดยมีแกนหลัก (Strong Axis) เป็นแกนตามยาวของแท่ง FRP และ (2) คุณสมบัติเชิงกลของ FRP ของแต่ละผู้ผลิตมีความหลากหลายและแตกต่างกันมากซึ่งแตกต่าง

จากเหล็กปั๊จจี้ที่มีผลต่อคุณสมบัติของ FRP ได้แก่ ปริมาตรของเส้นไขขันดินของเส้นใยที่ศักดาการวางตัวของเส้นไข ผลกระทบทางนิติและการควบคุมคุณภาพในการผลิตนอกจากนี้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นไขอาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ เช่น เดียวกับวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป เช่นผลจากประวัติและช่วงเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุกอุณหภูมิและความชื้น

2.7.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ค่าความถ่วงจำเพาะของแท่ง FRP และกลุ่มเส้นไข FRP อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ 4 เท่าเนื่องจากน้ำหนักเบาทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและจัดเก็บรวมถึงลดเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บการขนส้ายและการติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้างเทียบกับเหล็กเสริมทั่วไปและข้อได้เปรียบนี้ควรคำนึงถึงในการประเมินราคาเพื่อเลือกวัสดุที่ใช้

2.7.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion)

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุคอมโพสิตชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยเหล็กเสริมทำหน้าที่เสริมกำลังรับน้ำหนักและคอนกรีตทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์และพกติกรรมภายในตัวที่ให้หน่วยแรงเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตและเหล็กเสริมนี้ค่าไคลส์เคลิงกันทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแตกต่างไม่มากนัก สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 6×10^{-6} ถึง 11×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส (4×10^{-6} ถึง 6×10^{-6} ต่อองศา Fahrne ไฮต์) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมสำหรับสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ FRP มีค่าดังตารางที่ 2.6

2.7.3 กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

แท่ง FRP และกลุ่มเส้นไข FRP จะรับแรงดึงสูงโดยไม่มีพกติกรรมของชุดคราก โดยคุณสมบัติเชิงกลของ FRP ประเมินจากคุณสมบัติในที่ศักดาตามยาวกำลังรับแรงดึงของแท่ง FRP ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งแตกต่างจากกรณีเหล็กเสริมทั้งนี้เนื่องจากการกระจายของหน่วยแรงไม่เท่ากันทั้งหน้าตัดทำให้เส้นไขซึ่งอยู่บริเวณช่วงกลางหน้าตัดจะมีหน่วยแรงน้อยกว่าเส้นไขที่อยู่บริเวณขอบเป็นเหตุให้กำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพในการรับแรงดึงในแท่ง FRP ที่มีขนาดใหญ่

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ [6]

Unidirectional Advanced Composite Materials	Fiber Content (% by weight)	Density (kg/m ³)	Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Carbon Fiber/Polyester CFRP Laminate	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramid/Epoxy AFRP Laminate	60-70	1050-1200	40-125	1000-1800
Glass/Epoxy GFRP Laminate	50-80	1600-2000	20-55	400-1800

2.7.4 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

แท่ง FRP จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงทั้งนี้เนื่องจากความยุ่งยากในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยภายใต้แรงอัดตามแนวแกนให้มีความแม่นยำการจับยึดและวิธีการจัดตำแหน่งรวมถึงสัดส่วนภาพของเส้นใยอย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของวัสดุคอมโพสิต FRP ไม่ใช่คุณสมบัติหลักในการประยุกต์ใช้งานโดยส่วนใหญ่กำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับลักษณะแท่งเสริมกำลังว่าเป็นแบบเรียบหรือมีสัน (Rib) ด้วยกำลังรับแรงอัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 317 ถึง 470 เมกะปascal (46 ถึง 68 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) กำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแท่งเสริมกำลังมีกำลังรับแรงดึงสูงขึ้น

2.7.5 กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)

โดยทั่วไปกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุคอมโพสิตมีค่าต่ำมากเช่นแท่ง FRP สามารถตัดขาดด้วยเลื่อยธรรมดาโดยง่ายในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของเส้นใยข้อดีของนี้สามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนแท่ง FRP ในทิศทางที่แรงกระทำกิดตามแนวแกน

2.7.6 การคีบและความเสียหายจากการคีบ (Creep and Creep Rupture)

เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนมีความทนทานต่อการคีบสูงในขณะที่เกิดการคีบอาจมีปัญหาด้านโครงสร้างต่อไปนี้ การเรียงตัวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะต่อการคีบของแท่งเสริมกำลังน้ำรยางานการศึกษาพบว่า GFRP คุณภาพสูงพบว่าความเครียดที่เกิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคีบมีค่าประมาณร้อยละ 3 ของค่าความเครียดอิเล็กทริกิตติกเริ่มต้น

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกและสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นอันตรายแท่ง FRP ซึ่งอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่อาจเกิดความเสียหายอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งที่เรียกว่าเวลาของความคงทนปรากฏการณ์นี้เรียกว่าความเสียหายจากการคีบ(Creep Rupture) ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุทุกชนิดรวมถึงเหล็กไม้เว้นแม้แต่ลวดอัดแรงสำหรับเหล็กสามารถดูดแรงดึงที่ประมาณร้อยละ 75 ของกำลังรับแรงดึงประดับโดยไม่เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงดึงหรือเกิดความเสียหายในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงดึงที่กระทำกับกำลังรับแรงดึงในระยะสั้นของ FRP เพิ่มขึ้นเวลาของความคงทนจะลดลงมีการทดสอบการคีบของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP Composites) ขนาดหน้าตัดต่างๆ พบว่าความเสียหายจากการคีบจะไม่เกิดขึ้นถ้าหน่วยแรงกระทำมีค่าไม่เกินร้อยละ 60 ของค่ากำลังรับแรงดึงระยะสั้น

2.7.7 ความล้า (Fatigue)

แท่ง FRP มีความทนทานต่อความล้าที่คีบผลงานวิจัยส่วนมากได้ทำการทดสอบเส้นใยที่มีค่าโมดูลัสสูง (เช่น อะรามิดและการบอน) ภายใต้แรงดึงเป็นวัյจักรซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายระหว่างการทดสอบได้ให้แรงกระทำถึง 10 ล้านรอบพบว่าคอมโพสิตชนิดการบอนมีกำลังรับความล้าได้ดีกว่าเหล็กในขณะที่กำลังรับความล้าของคอมโพสิตชนิดเส้นใยแก้วจะมีค่าต่ำกว่าเหล็กในกรณีอัตราส่วนหน่วยแรงเดียวกันนอกจากนี้มีงานวิจัยศึกษาเพิ่ง GFRP ซึ่งใช้สำหรับงานอัดแรงดูดแรงภายนอกได้น้ำหนักบรรทุกเป็นวัյจักรโดยมีหน่วยแรงดึงสูงสุด 496 เมกะปานาล (72 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีช่วงค่าหน่วยแรงงานปานาล (50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าแท่ง GFRP สามารถน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า 4 ล้านรอบก่อนจะเกิดความเสียหายบริเวณตำแหน่งจับยึด

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ช่วงเวลาที่แรงกระทำและประวัติการรับน้ำหนักอุณหภูมิและความชื้นปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกันและหากที่จะประเมินผลกระทบของแต่ละปัจจัยในขณะที่รักษาปัจจัยอื่นให้คงที่

2.8.1 ความชื้น

วัสดุคอมโพสิตที่มีการคุณซึ่มความชื้นมากเกินไปจะทำให้สูญเสียกำลังรับน้ำหนักและความแข็งเกร็งอย่างมีนัยสำคัญการคุณซึ่มความชื้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเรซิน และทำให้เกิดการบวมและการบีบคงของวัสดุคอมโพสิตดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต จะต้องประเมินภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันกับที่วัสดุใช้งานอย่างไรก็ตามมีเรื่องบางประเภทซึ่งมีความต้านทานความชื้นซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่คาดว่าจะต้องสัมผัสด้วยความชื้นตลอดเวลา

2.8.2 ไฟและอุณหภูมิ

วัสดุคอมโพสิตหลากหลายชนิดมีคุณสมบัติเยี่ยมภายใต้อุณหภูมิสูงวัสดุคอมโพสิตโดยส่วนใหญ่จะไม่ถูกเผาไหม้โดยย่างอุณหภูมิสูงจนมีผลต่อเรซินมากกว่าเส้นใยเรซินซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนและไออกซเจนเป็นจำนวนมากจะสามารถติดไฟได้และมีผลงานวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาเรซินชนิดทนไฟการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าแท่งเส้นใยแก้วชนิด E-Glass มีกำลังรับน้ำหนักเหลือร้อยละ 85 ของกำลังรับน้ำหนักภายใต้อุณหภูมิห้องภายในทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (570 องศาฟาร์นไฮต์) หน่วยแรงทดสอบจะเหลือประมาณร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงดึงในขณะที่สมรรถนะดังกล่าวดีกว่าเหล็กอัคแรงแต่กำลังรับน้ำหนักจะลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงเหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ปัญหาของไฟสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมวัสดุคอมโพสิต FRP แตกต่างจากการเผาไหม้วัสดุคอมโพสิตได้รับเพลิงใหม่โดยตรงในการเผาไหม้คอนกรีตจะทำหน้าที่ป้องกัน FRP จากการสัมผัสนักดับเพลิงโดยตรงอย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิกายในชั้นส่วนสูงขึ้นคุณสมบัติเชิงกลของ FRP จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นแนะนำให้ผู้ใช้ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบ FRP และเรซินที่อุณหภูมิสูงในการเผาไหม้โอกาสเกิดเพลิงใหม่

2.8.3 รังสีอัลตราไวโอเลต

วัสดุคอมโพสิตสามารถถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเลตเมื่อรับแสงอาทิตย์โดยตรงรังสีเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเมทวิชซ์พอลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุถึงแม้ว่าปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการทดสอบสมาร์ตเพิมที่เหมาะสมเข้าไปในเรซินแต่ความเสียหายแบบนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับชั้นส่วน FRP ซึ่งใช้เสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งไม่สัมผัสนักดับเพลิงอาทิตย์โดยตรง

2.8.4 การกัดกร่อน

การกัดกร่อนเหล็กเสริมและการขยายตัวของวัสดุเป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวและคอนกรีตหลุดร่อนออกมาซึ่งจะช่วยร่งให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้นซึ่งคือหลักของวัสดุคอมโพสิตคือจะไม่เกิดการกัดกร่อนอย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิตอาจเกิดความเสียหายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรงเท่า GFPR มีความทนทานต่อการสูงแต่จะเสื่อมสภาพได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นด่างมีการวิจัยการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงโดยเสริมเส้นใยแก้วในคอนกรีตและทดสอบภายใต้การจำลองการขึ้นลงของระดับน้ำเกลือพบว่าเมื่อคอนกรีตได้รับน้ำเกลือมากขึ้นจะสูญเสียกำลังรับน้ำหนักถึงแม้ว่าการทดสอบนี้จะใช้ไม่ได้ในกรณีทั่วไปแต่มีข้อบ่งชี้ถึงความสำคัญของการเลือกระบบเส้นใยและเรซินที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถทนต่อสารเคมีได้เป็นส่วนใหญ่

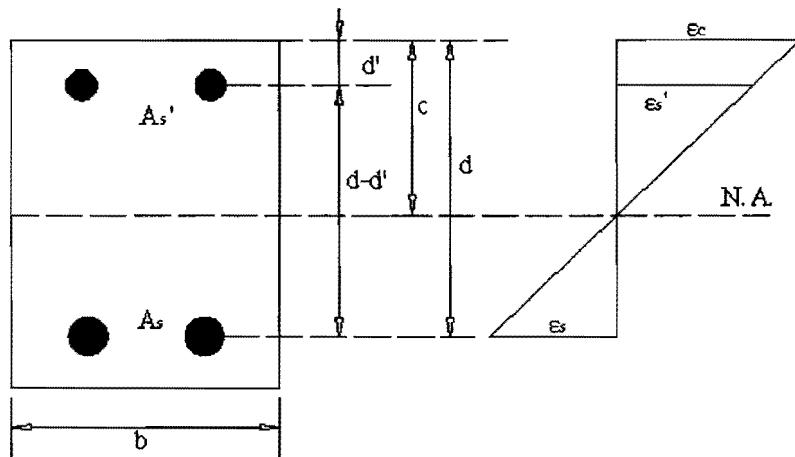
2.9 การคำนวณหากำลังต้านทานแรงอัด [5]

งานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปจะได้รับการออกแบบให้คอนกรีตเกิดการวินิจฉัยร้อนกับเหล็กรับแรงคงดูคราก โดยการวินิจฉัยในลักษณะเหล็กเสริมวินิจฉัยก่อน คอนกรีตจะเริ่มจากการแยกตัวและเกิดรอยแยกขนาดใหญ่ ซึ่งการต้านทานแรงดัดของงานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณโดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงอัดและแรงดึงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยในการคำนวณเราสามารถควบคุมไม่ให้เกิดการวินิจฉัยในลักษณะประจำได้ด้วยการควบคุมปริมาณเหล็กเสริมไม่ให้มากเกินกว่าค่าเหล็กเสริมสมดุล ในส่วนของการคำนวณกำลังรับแรงดัดของงานที่เสริมกำลังด้วย FRP สามารถควบคุมได้โดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ของหน่วงแรงหดตัว แต่ต้องมีการตรวจสอบหน่วงแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุต่าง ๆ อย่างละเอียดโดยเฉพาะ FRP เป็นแบบอิเล็กทริกทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าวัสดุ FRP นี้ไม่มีการสูญเสียแบบพลาสติกสำรองอยู่เลย หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือเมื่อแรงดัดเกิดขึ้นถึงระดับที่งานจะรับได้ แผ่น FRP จะเกิดการวินิจฉัยร้อนกับหน่วงแรงในเหล็กเสริมถึงจุดครากและทั้งสองอย่างจะเกิดขึ้นก่อนคอนกรีตจะวินิจฉัย ซึ่งลักษณะการทดสอบของการวินิจฉัยคือที่กำลังรับแรงดัดที่ต่ำลงมา โดยเมื่อพิจารณาอย่างละเอียดแล้วลักษณะการวินิจฉัยนี้อยู่กับของหน้าตัดของแผ่น FRP และกรณีที่มีการอัดแรงก็ขึ้นอยู่กับแรงที่ให้กับแผ่น FRP ด้วย

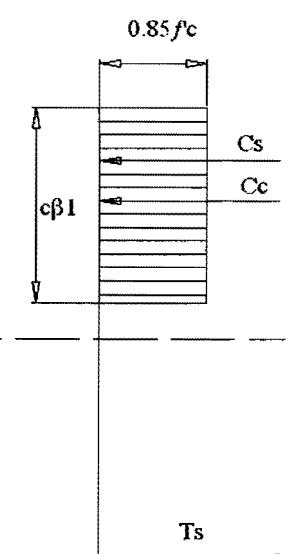
2.9.1 กำลังต้านทานแรงดัดของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การดัดเกิดจากน้ำหนัก หรือแรงที่กระทำต่อองค์อาคาร ปริมาณการดัดคือ โมเมนต์ดัด โดยการดัดทำให้เกิดผลลัพธ์อย่างในองค์อาคาร ได้แก่ เกิดความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดงาน ซึ่งนักจะเรียกว่าการกระจายความเค้นและความเครียด ความเค้น (ซึ่งคือหน่วยแรง) อาจเป็นความเค้นอัตราหรือค่าของความเครียด ซึ่งมีแนวโน้มทำให้องค์อาคารหดสั้นลงหรือยืดออก

นอกจากนั้นการคัดขังทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงซึ่งหน่วงรวมทั้งอาจทำให้เกิดการโก่งตัว โดยมีรูปการแสดงชน้ำตัดและการกระจายความเครียดและความเค้น



รูปที่ 2.4 แสดงชน้ำตัดและการกระจายความเครียดในชน้ำตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายความเค้นในชน้ำตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\text{จากการกระจายความเครียด} \quad \frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c - d'} = \frac{\varepsilon_s}{d - c} \quad (1.1)$$

หรือ $\varepsilon'_s = 0.003 \frac{c - d'}{c}$ (1.2)

$$0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a}$$
 (1.3)

และ $\varepsilon_s = 0.003 \frac{c - d}{c}$ (1.4)

$$= 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a}$$
 (1.5)

จาก การกระจายความเคี้ยว ; พิจารณาแรงสมดุล $\sum F_x = 0$

$$C = T \quad (1.6)$$

$$C_s + C_c = T_s \quad (1.7)$$

เมื่อ $T_s = A_s f_y$ (1.8)

$$C_c = 0.85 f_c a b$$

$$C_s = A'_s f_y$$

จะได้ $A_s f_y = 0.85 f_c a b + A'_s f_y$ (1.9)

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f_c b} \quad (1.10)$$

เงื่อนไขที่จะทำให้เหล็กเสริมต้านทานแรงขัดและเหล็กเสริมต้านทานแรงดึงรับแรงที่จุดครากมีดังนี้
กรณี เงื่อนไข

$$f_y = f_s \quad 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (1.11)$$

$$f_y = f_s \quad 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (1.12)$$

กรณีที่เหล็กต้านทานแรงขัดและเหล็กต้านทานแรงดึงรับแรงที่จุดคราก ($f_s = f_s' = f_y$)

จะได้ $\varepsilon'_s 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \geq \frac{f_y}{E_s}$ (1.13)

ทำให้ $a \geq \frac{0.003 E_s}{0.003 E_s - f_y} \beta_1 d'$ (1.14)

หรือ $\frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f_c b} \geq \frac{0.003 E_s}{0.003 E_s - f_y} \beta_1 d'$ (1.15)

หรือ $\rho - \rho' \geq \frac{0.85 f_c \beta_1 d'}{f_y d} \frac{0.003 E_s}{0.003 E_s - f_y}$ (1.16)

กำลังต้านทานไมเมเนต์ตัดสูงสุดของหน้าตัดคาน คำนวณได้ดังนี้

$$\text{จาก } Mn = 0.85f_c ab(d - \frac{a}{2}) + A'_s f_y(d - d') \quad (1.17)$$

$$\text{แทนค่า } a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f_c b} \quad (1.18)$$

$$\text{จะได้ } Mn = (A_s - A'_s)f_y(d - \frac{a}{2}) + A'_s f_y(d - d') \quad (1.19)$$

กรณีเหล็กเสริมต้านทานแรงอัคไม่คราก (ในขณะที่เหล็กเสริมต้านทานแรงดึงที่อุบัติรากต้องคำนวณหาความเค้น หรือหน่วยแรงอัคที่แท้จริงดังนี้)

$$f_s' = \varepsilon'_s E_s \quad (1.20)$$

$$= 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} Es \quad (1.21)$$

ดังนั้น กำลังต้านทานไมเมเนต์ตัดสูงสุดของหน้าตัด มีดังนี้

$$Mn = 0.85f_c ab(d - \frac{a}{2}) + A'_s f_y(d - d') \quad (1.22)$$

$$\text{โดยที่ } a = \frac{A_s f_s - A'_s f_s'}{0.85f_c b} \quad (1.23)$$

กรณีที่มีหัวเหล็กต้านทานแรงอัคและเหล็กต้านทานแรงดึงคราก ต่างกันไม่คราก ซึ่งจะต้องคำนวณหาค่า ตามความเป็นจริงดังนี้

$$a = \frac{A_s f_s - A'_s f_s'}{0.85f_c' b} \quad (1.24)$$

$$\text{เมื่อ } f_s' = \varepsilon'_s E_s \quad (1.25)$$

$$= 0.003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} Es \quad (1.26)$$

$$\text{และ } f_s = \varepsilon_s E_s \quad (1.27)$$

$$= 0.003 \frac{\beta_1 d - a}{a} Es \quad (1.28)$$

โดยที่ค่าสูงสุด f_s และ f_s' คือ f_y นั่นเอง ส่วนกำลังต้านทานไมเมเนต์ตัดสูงสุดของหน้าตัด คำนวณได้ดังนี้

$$Mn = 0.85f_c ab(d - \frac{a}{2}) + A'_s f_y(d - d') \quad (1.29)$$

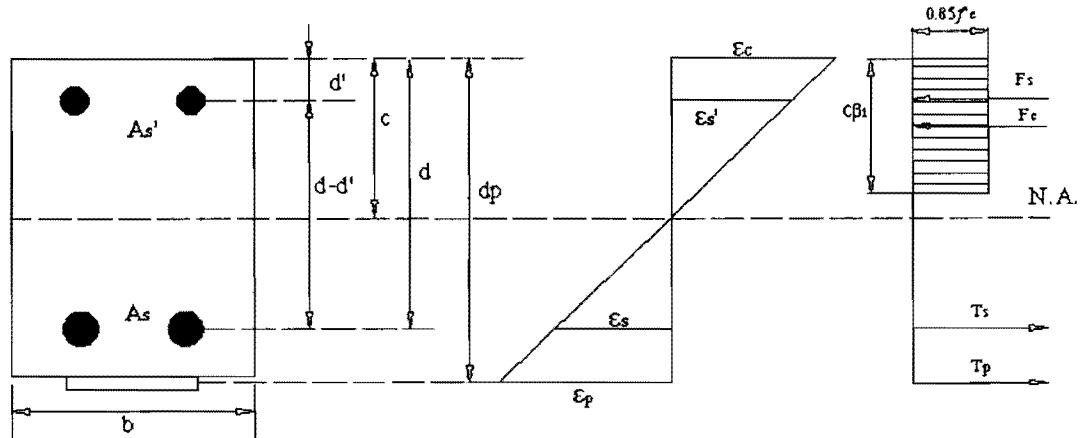
เมื่อ

- a : ความลึกของพื้นที่ที่รับแรงอัดที่ได้จากการประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า (Whitney Equivalent Rectangular Stress)
- d : ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
- d' : ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
- A_s : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
- A'_s : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
- b : ความกว้างของคาน
- c : ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน
- ε_s : ความเครียดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
- ε'_s : ความเครียดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
- E_s : โมดูลัสปั๊คหยุ่นของเหล็กเสริม
- f_c : กำลังอัดประดับของคอนกรีต
- f_y : หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
- c_s : แรงอัดลักษณะในเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
- c_c : แรงอัดลักษณะในคอนกรีต
- T_s : แรงดึงลักษณะในเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
- β_1 : ตัวคูณแปลงการกระจายหน่วยแรงของคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- ρ : ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง
- ρ' : ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด

2.9.2 กำลังด้านท่านแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

ในการวิเคราะห์กำลังด้านท่านแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP สามารถคำนวณได้ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ระนาบของหน้าตัด ซึ่งเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการตัด
- 2) คอนกรีตมีกำลังด้านท่านแรงดึงเท่ากับศูนย์
- 3) ไม่คำนึงถึงผลจากการที่ยึดระหว่างคอนกรีตกับแผ่น FRP
- 4) มีแรงขึ้นบนที่ยึดระหว่างคอนกรีตกับแผ่น FRP



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายความเคนและความเครียดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

จากสมมุติฐานที่กล่าวมาข้างต้นและอาศัยเงื่อนไขของความสมดุลของหน้าตัดในรูป ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานการรับแรงดัดประลักษณ์ของงานได้ดังนี้

จากรูปพิจารณาสมดุลแรง $\sum F_x = 0$;

$$F_s + F_c = T_s + T_p \quad (2.1)$$

เมื่อ $T_s = f_s \times A_s \quad (2.2)$

$$F_s = f_s \times A'_s \quad (2.3)$$

$$F_c = 0.85 f'_c \times b x \quad (2.4)$$

$$T_p = f_p \times A_p \quad (2.5)$$

ภายใต้เงื่อนไขและความสมดุลของหน้าตัดไม่ เมนต์ประลักษณ์ของงานที่ติดแผ่น FRP สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$(M_{ult})_{plated} = (d - x/2) - F_s(d - d') + T_p(d_p - d) \quad (2.6)$$

เมื่อ

T_s = แรงดึงลักษณ์ในเหล็กเสริมต้านทานแรงดึง

F_s = แรงอัดลักษณ์ในเหล็กเสริมต้านทานแรงอัด

F_c = แรงอัดลักษณ์ในคอนกรีต

T_p = แรงอัดลักษณ์ในแผ่น FRP

f_p	= หน่วยแรงดึงประจำของแผ่น FRP
f_s	= หน่วยแรงดึงที่อุตสาหกรรมเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
f'_s	= หน่วยแรงดึงที่อุตสาหกรรมเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
A_c	= พื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP
A_s	= พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
$A'_{s'}$	= พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
b	= ความกว้างของคาน
x	= ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน
d	= ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมด้านท่านแรงดึง
d'	= ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมด้านท่านแรงอัด
d_p	= ระยะระหว่างผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของแผ่น FRP

ถ้าหากพิจารณาแบบการวินิจฉัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ภายใต้การดันนี้ ได้เสนอรูปแบบการวินิจฉัยของคานนี้อย่างแรกคือ รูปแบบที่ 3 รูปแบบที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแรงดึงในคานที่มีค่ามากกว่ากำลังด้านท่านแรงดึง

สูงสุดของแผ่น FRP ที่ด้านท่านได้ (Rupture of FRP Strip)

รูปแบบที่ 2 คือการพังด้วยหน่วยแรงอัดหลังจากเหล็กらく (Compression Failure After Yielding of Steel)

รูปแบบที่ 3 คือการพังด้วยหน่วยแรงอัดก่อนที่เหล็กจะらく (Compression Failure Before Yielding of Steel)

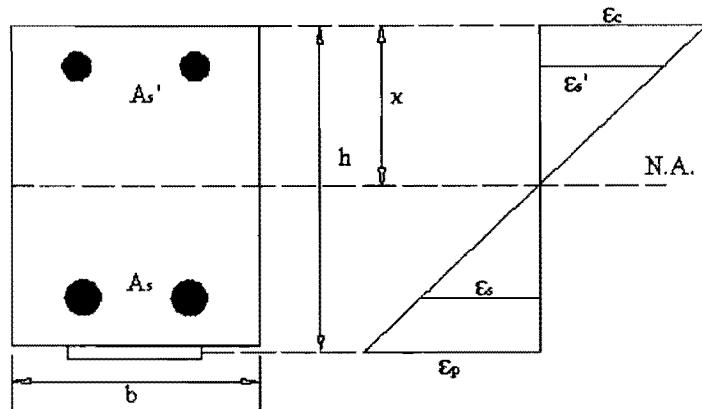
การวินิจฉัย 3 รูปแบบนี้เป็นการศึกษาโดยอาศัยพื้นฐานการคำนวณทางทฤษฎีเป็นหลัก ทั้งนี้ตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาได้แก่ พื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP ซึ่งในการคำนวณจะทำเปรียบเทียบกับค่าของ $A_{f,min}$ และ $A_{f,max}$ ผลการเปรียบเทียบสามารถออกได้ว่าจะเกิดการวินิจฉัยในรูปแบบใด ผลของการเปรียบเทียบสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 $A_f < A_{f,min}$ จะเกิดการวินิจฉัยที่แผ่น FRP เนื่องจากแรงดึงในคานมีค่ามากกว่ากำลังด้านท่านแรงดึงสูงสุดของแผ่น FRP ที่ด้านท่านได้ทำให้แผ่น FRP ขาด (Rupture of FRP Strip)

กรณี 2 $A_{f,min} < A_f < A_{f,max}$ จะทำให้ค้อนกรีตพังด้วยหน่วยแรงอัดหลังจากเหล็กらく (Compression Failure After Yielding of Steel)

กรณี 3 $A_f > A_{f,max}$ ทำให้ค้อนกรีตพังด้วยหน่วยแรงอัดก่อนที่เหล็กらく (Compression Failure After Before Yielding of Steel)

การคำนวณหาค่า $A_{f,\min}$ (ความเครียดประดลัยของแผ่น FRP)



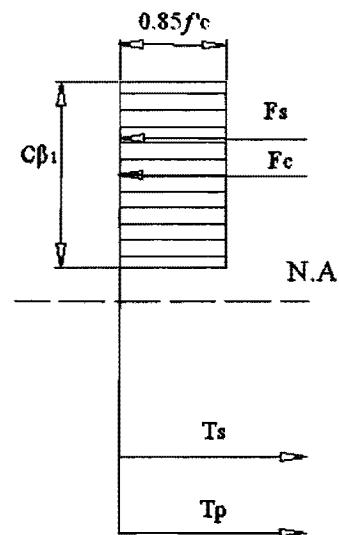
รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายความเครียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\text{กำหนดให้ } \alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.6 \text{ และ } \beta_1 = 0.97 - 0.0015 f'_c \geq 0.6$$

จากการกระจายความเครียดในรูป จะได้

$$\frac{x}{\varepsilon_c} = \frac{h}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} \quad (2.7)$$

$$x = \frac{h\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริม FRP

พิจารณาสมดุลแรง $\sum Fx = 0$;

$$Cs + Cc = Ts + Tp \quad (2.9)$$

$$E_s \varepsilon'_s A'_s + \alpha_1 f' b x \beta_1 = f_y A_s + E_p \varepsilon_p A_{f,\min} \quad (2.10)$$

กรณี $\varepsilon'_s = 0.003 \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_s \quad (2.11)$

จะได้ $A_{f,\min} = \frac{\alpha_1 f'_c b x \beta_1 + E_s \varepsilon'_s A'_s - f_y A_s}{E_p \varepsilon_p} \quad (2.12)$

กรณี $\varepsilon'_s = 0.003 \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_s \quad (2.13)$

จะได้ $A_{f,\min} = \frac{\alpha_1 f'_c b x \beta_1 + f'_y A'_s - f_y A_s}{E_p \varepsilon_p} \quad (2.14)$

การคำนวณหาค่า $A_{f,\max}$ (ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง)

จากการกระจายความเครียดในรูป 2.7 จะได้

$$\frac{x}{\varepsilon_c} = \frac{d}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad (2.15)$$

$$x = \frac{d \varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad (2.16)$$

และ $\varepsilon'_p = 0.003 \frac{d_p - x}{x} \quad (2.17)$

จากการพิจารณาสมดุลแรง $\sum Fx = 0$;

$$Cs + Cc = Ts + Tp \quad (2.18)$$

$$E_s \varepsilon'_s A'_s + \alpha_1 f' b x \beta_1 = f_y A_s + E_p \varepsilon_p A_{f,\max} \quad (2.19)$$

กรณี $\varepsilon'_s = 0.003 \frac{x - d'}{x} < \varepsilon_s \quad (2.20)$

จะได้ $A_{f,\max} = \frac{\alpha_1 f'_c b x \beta_1 + f'_y A'_s - f_y A_s}{E_p \varepsilon_p} \quad (2.21)$

กรณี $\varepsilon'_s = 0.003 \frac{x - d'}{x} \geq \varepsilon_s \quad (2.22)$

จะได้ $A_{f,\max} = \frac{\alpha_1 f'_c b x \beta_1 + f'_y A'_s - f_y A_s}{E_p \varepsilon_p} \quad (2.23)$

2.10 การสร้างแบบจำลองการ回帰 [2]

ปัญหาจำนวนมากเกี่ยวกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตึ้งแต่สองตัวแปรขึ้นไป ซึ่งเราสนใจที่จะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการทางเคมีก็อย่างผลผลิตมีความสำคัญที่ใช้งาน ในกรณีวิศวกรอาจต้องการที่จะสร้างแบบจำลองที่แสดงความสำคัญของผลผลิตกับอุณหภูมิและใช้แบบจำลองนี้ในการพยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนึงกระบวนการ หรือควบคุมกระบวนการ

ปกติแล้วสมมุติว่ามีตัวแปรตาม (Dependent Variable) อยู่เพียงตัวเดียว หรือผลตอบ (Response) y ที่ขึ้นกับค่าของตัวแปรอิสระ (Independent Variable) จำนวน k ตัว เช่น x_1, x_2, \dots, x_k ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ถูกกำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เรียกว่า แบบจำลองการ回帰 (Regression Model) ซึ่งแบบจำลองนี้จะถูกสร้างขึ้นมาให้เหมาะสมกับข้อมูลตัวอย่าง เช่นในบางครั้งผู้ทดลองทราบถึงรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันระหว่าง y และ x_1, x_2, \dots, x_k กล่าวคือ $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ อย่างไรก็ตามในกรณีส่วนมากแล้วรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นสิ่งที่เราไม่ทราบ ดังนั้นผู้ทดลองจะต้องเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการประมาณ f ซึ่งโดยมากแล้วจะใช้แบบจำลองพหุอันดับต่ำ (Low Order) ในการประมาณฟังก์ชันนี้

แบบจำลองการ回帰นำมาใช้บ่อยครั้งในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกรณีของการเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือจากสิ่งที่ได้นับที่ไม่แน่นอน เช่น การวิเคราะห์การผลด้วยชั้งมีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองที่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าในกรณีที่มีบางอย่างเกิดผิดพลาด ไปได้เช่นกัน ซึ่งเราจะกล่าวถึงหัวห้อต่างๆเหล่านี้ในบทนี้

2.10.1 แบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้น

เราจะเน้นไปที่การสร้างแบบจำลอง回帰แบบเชิงเส้น สมมุติว่าเราต้องการจะสร้างแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสาร โพลิเมอร์กับอุณหภูมิและอัตราป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา แบบจำลองซึ่งอาจใช้แสดงความสัมพันธ์นี้คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.24)$$

โดยที่ y คือความหนืด, x_1 คืออุณหภูมิ, และ x_2 คืออัตราป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา แบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้นพหุคุณนี้ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 2 ตัว เราจะเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวแปร

ที่มีตัวแปรตัวแปรอิสระ (Predictor Variable) หรือตัวแปรดูดดูด (Repressor) คือว่า เชิงเส้นทุกนามาใช้เนื่องจากว่าสมการ 2.24 เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า β_0 , β_1 และ β_2 แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงระบบงานเกินสองมิติของ x_1 และ x_2 พารามิเตอร์ β_0 จะเป็นตัวกำหนดจุดตัดของระบบ ในบางครั้งเราเรียก β_1 และ β_2 ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบบางส่วน (Partial Regression Coefficient) เนื่องจากว่า β_1 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงของ x_1 เมื่อ x_2 คงที่และ β_2 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงของ x_2 เมื่อ x_1 คงที่ปกติแล้วตัวแอลผลตอบ y อาจจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรถดถอย k ตัวซึ่งจะมีแบบจำลองเป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.25)$$

ซึ่งสมการรูปแบบนี้เรียกว่า แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคุณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว (Multiple Linear Regression Model with k Regressor Variables) พารามิเตอร์ β_j , $j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้จะแสดงระบบงานแบบรูปหลายมิติ (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย $\{x_j\}$ พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบแทน y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือทั้งหมด x_i ($i \neq j$) มีค่าคงตัว

สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากกว่าที่ปรากฏในสมการ (2.25) ก็ยังอาจวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคของการถดถอยแบบเชิงพหุคุณ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองที่มีการเติมพจน์ของอันตรกิริยาลงไว้ในแบบจำลองอันดับที่หนึ่งซึ่งมี 2 ตัวแปร กล่าวคือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (2.26)$$

ถ้าเราให้ $x_3 = x_1 x_2$ และ $\beta_3 = \beta_{12}$ ดังนั้นสมการ (2.26) สมการที่จะเขียนได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2.27)$$

ซึ่งก็คือแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นแบบเชิงเส้นพหุคุณที่มีการถดถอย 3 ตัวอิสระตัวอย่างหนึ่งที่คือแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Model) ที่มี 2 ตัวแปร

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2.28)$$

ถ้าเราให้ $x_3 = x_1^2$, $x_4 = x_2^2$, $x_5 = x_1x_2$, $\beta_3 = \beta_{11}$, $\beta_4 = \beta_{22}$ และ $\beta_5 = \beta_{12}$
ดังนั้นสมการนี้จะกลายเป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \quad (2.29)$$

ซึ่งก็คือแบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้นนั่นเอง ตามปกติแบบจำลองการ回帰แบบใดก็ตามที่มีพารามิเตอร์ (ค่าของ β) เป็นแบบเชิงเส้นจะหมายถึงแบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้น โดยไม่ต้องพิจารณาถึงรูปร่างของพื้นผิวผลตอบที่ลูกสร้างขึ้นมา

2.10.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้น

วิธีกำลังสองน้อยสุด(Least Square) เป็นวิธีการที่ใช้มากในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การ回帰แบบสำหรับแบบจำลองการ回帰แบบเชิงเส้นพหุคุณ สมมติว่า $n > k$ เป็นข้อมูลของตัวแปรผลตอบที่เก็บมาได้ ก่อรากว่าคือ y_1, y_2, \dots, y_n สำหรับค่า y_i ที่เก็บข้อมูลมาได้แต่ละตัวจะมีตัวแปรคงที่ที่เกี่ยวข้องกับมันอยู่ กำหนดให้ x_{ij} แทนระดับที่ i ของตัวแปร x_j ตารางของข้อมูลเหล่านี้แสดงถึงตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลสำหรับการ回帰แบบเชิงเส้นพหุคุณ

y	x_1	x_2	...	x_k
y_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1k}
y_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2k}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
y_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nk}

สมมุติว่าพจน์ของความผิดพลาด ε ในแบบจำลองนี้ $E(\varepsilon) = 0$ และ $V(\varepsilon) = \sigma^2$ และ $\{\varepsilon_i\}$ เป็นตัวแปรสุ่มแบบไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrected) เราสามารถเขียนสมการ (2.25) ในรูปของข้อมูลจากตารางที่ 2.7 ได้คือ

$$\begin{aligned} y &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.30)$$

วิธีกำลังสองน้อยสุดจะเลือก β ในสมการ (2.30) เพื่อทำให้ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด ε_i มีค่าน้อยสุด ฟังก์ชันกำลังสองน้อยสุดคือ

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

ฟังก์ชัน L จะถูกทำให้น้อยสุดกับค่าของ $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุด คือ $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} \Big|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij}) = 0 \quad (2.32a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j} \Big|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij}) x_{ij} = 0 \quad j=1, 2, \dots, k \quad (2.32a)$$

เมื่อทำให้สมการ (2.32) อยู่ในรูปที่ง่ายลง เราจะได้

$$\begin{aligned} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots &\quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n x_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{aligned} \quad (2.33)$$

สมการเหล่านี้เรียกว่า สมการปกติกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Normal Equation) ดังสังเกตว่าจะมีสมการปกติจำนวน $p = k+1$ สมการ หนึ่งสมการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การทดแทนที่ไม่ทราบค่าหนึ่งตัว และค่าคงต้องของสมการเหล่านี้จะเป็นตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดของสัมประสิทธิ์การทดแทน $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ จะเป็นการง่ายที่จะแก้สมการเหล่านี้ ถ้าสมการเหล่านี้ถูกเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งเราอาจจะเขียนสมการ (2.30) ได้ใหม่ในรูปเมตริกซ์คือ

$$y = x\beta + \varepsilon$$

โดยที่

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

ตามปกติแล้ว y จะเป็นเวกเตอร์ของข้อมูลที่เก็บได้ซึ่งมีขนาด ($n \times 1$), x เป็นเมตริกซ์ขนาด ($n \times p$) ของระดับของตัวแปรอิสระ β เป็นเวกเตอร์ขนาด ($p \times 1$) ของสัมประสิทธิ์การถดถอย และ ε เป็นเวกเตอร์ขนาด ($n \times 1$) ของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เราต้องการที่จะหาตัวเวกเตอร์ของตัวประมาณกำลังสองน้อยสุด $\hat{\beta}$ ที่ทำให้สมการต่อไปนี้มีค่าน้อยสุด

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - x\beta)'(y - x\beta)$$

สังเกตว่า L อาจเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} L &= y'y + \beta'x'y - y'x'\beta + \beta'x'x\beta \\ &= y'y - 2\beta'x'y + \beta'x'x\beta \end{aligned} \quad (2.34)$$

เนื่องจาก $\beta'x'y$ เป็นเมตริกซ์ขนาด (1×1) หรือเป็นเมตริกซ์สเกลาร์ และตัวแปรสับเปลี่ยน (Transpose) ของ $(\beta'x'y)' = y'x\beta$ จะเป็นสเกลาร์เช่นกัน ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดจะต้องเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}} = -2x'y + 2x'x\hat{\beta} = 0$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ คือ

$$x'x\hat{\beta} = x'y \quad (2.35)$$

สมการ (2.35) เป็นสมการในรูปเมตริกซ์ของสมการปกติกำลังสองน้อยสุด ซึ่งสมการเหล่านี้เหมือนกันกับสมการ (2.33) เพื่อที่จะแก้สมการปกติเหล่านี้ให้คุณทั้งสองข้างของสมการ (2.35) ด้วยอินเวอร์สของ $x'x$ ดังนั้น ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดของ β คือ

$$\hat{\beta} = (x'x)^{-1} x'y \quad (2.36)$$

จะเห็นได้ว่าเมทริกซ์ของสมการปกติจะมีรูปแบบเป็นสเกลาร์ เนื่องจากสมการ(2.35) ในรายละเอียดได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix}$$

ถ้าเรานำเอาเมทริกซ์เหล่านี้มาคูณกัน เราจะได้สมการปกติในรูปสเกลาร์ (สมการ 2.33) ในรูปแบบนี้เราจะพบว่า $x'x$ เป็นเมทริกซ์สมการที่มีขนาด ($p \times p$) และ $x'y$ เป็นคอลัมน์เวกเตอร์ที่มีขนาด ($p \times 1$) เมทริกซ์ $x'x$ มีโครงสร้างพิเศษบางประการ กล่าวคือ สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของ $x'x$ จะเป็นค่าผลรวมของกำลังสองของสมาชิกในคอลัมน์ x และสมาชิกที่ไม่อยู่บนเส้นทแยงมุมคือผลรวมของผลคูณไขว้ของสมาชิกในคอลัมน์ของ x ขึ้นกว่านั้นเราจึงสังเกตได้อีกว่า สมาชิกของ $x'y$ เป็นผลรวมของผลคูณไขว้ของคอลัมน์ของ x และข้อมูลที่เก็บได้ $\{y_i\}$

แบบจำลองการคาดคะยอที่ถูกสร้างขึ้นคือ

$$\hat{y} = x\hat{\beta} \quad (2.37)$$

ซึ่งเราสามารถเขียนแบบจำลองนี้ในรูปแบบสเกลาร์ได้คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่เก็บได้จริง y_i และค่าที่ mana ได้ \hat{y}_i เรียกว่า ส่วนตកค้าง หรือ $e_i = y_i - \hat{y}_i$ ดังนั้น เวกเตอร์ขนาด ($n \times 1$) ของส่วนตกค้างสามารถเขียนได้คือ

$$e = y - \hat{y} \quad (2.38)$$

มีความจำเป็นที่เราต้องประมาณค่าของ σ^2 โดยการพิจารณาผลรวมของกำลังสองของส่วนตกค้าง คือ

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$= \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ = e'e$$

แทนค่า $e = y - \hat{y} = y - x\hat{\beta}$ เราจะได้ว่า

$$SS_E = (y - x\hat{\beta})'(y - x\hat{\beta}) \\ = y'y - \hat{\beta}'x'y - y'x\hat{\beta} + \hat{\beta}'x'x\hat{\beta} \\ = y'y - 2\hat{\beta}'x'y + \hat{\beta}'x'x\hat{\beta}$$

เนื่องจาก $x'x\hat{\beta} = x'y$ สมการสุดท้ายเป็น

$$SS_E = y'y - \hat{\beta}'x'y \quad (2.39)$$

สมการ (2.39) เรียกว่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหรือส่วนตกค้างและมีระดับขั้นความเสี่ยงเท่ากับ $n - p$ เราอาจแสดงได้ว่า

$$E(SS_E) = \sigma^2(n - p)$$

ดังนั้น ตัวประมาณค่าแบบไม่เออนอิง (Unbias) ของ σ^2 สามารถเขียนได้เป็น

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - p} \quad (2.40)$$

วิธีกำลังสองน้อยสุดจะทำให้เราได้ประมาณค่าแบบไม่เออนอิงของพารามิเตอร์ β ในแบบจำลอง การทดลองแบบเชิงเส้น ซึ่งอาจจะแสดงได้โดยการหาค่าคาดหมายของ $\hat{\beta}$ ดังต่อไปนี้

$$E(\hat{\beta}) = E[(x'x)^{-1}x'y] \\ = E[(x'y)^{-1}x'(x\beta + \varepsilon)] \\ = E[(x'x)^{-1}x'x\beta + (x'x)^{-1}x'\varepsilon] \\ = \beta$$

เนื่องจาก $E(\varepsilon) = 0$ และ $(x'x)^{-1}x'x = 1$ ดังนั้น $\hat{\beta}$ คือตัวประมาณค่าแบบไม่เออนอิงของ β

คุณสมบัติของความแปรปรวนของ $\hat{\beta}$ สามารถแสดงได้ในเมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วม (Covariance) คือ

$$Cov(\hat{\beta}) = \sigma^2(x'x)^{-1} \quad (2.41)$$

2.10.3 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคุณ

สำหรับปัญหาเรื่องการถดถอยแบบพหุคุณนั้นการทดสอบสมมติฐานบางอย่างเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นประโภชน์อย่างมากในการตรวจสอบถึงการใช้งานได้อย่างเหมาะสมของแบบจำลอง เพื่อใช้งานวิธีในการทดสอบสมมติฐานเหล่านี้ เราต้องสมมติว่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ε , มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเจียนย่อได้เป็น $\varepsilon \approx NID(0, \sigma^2)$ ผลที่ตามมาคือ ข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j$ และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

2.10.4 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ y และเซตบ່ອຍของตัวแปรคงดอย x_1, x_2, \dots, x_k หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมมีคือ

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 &= \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 : \beta_1 &\neq 0 \text{ for at least one } j \end{aligned} \quad (2.42)$$

การปฏิเสธ H_0 ในสมการ (2.42) บอกให้เราทราบว่า อย่างน้อยสุดตัวแปรคงดอย x_1, x_2, \dots, x_k หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง วิธีในการทดสอบทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (SS_T) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกลงหรือความผิดพลาด กล่าวคือ

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.43)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ เป็นจริงแล้ว $\frac{SS_R}{\sigma^2}$ จะมีการกระจายแบบ χ^2_k โดยที่ระดับขั้นความเสี่ยงของ χ^2 เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลอง ในทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า $\frac{SS_E}{\sigma^2}$ มีการกระจายแบบ χ^2_{n-k-1} และ SS_E และ SS_R จะเป็นอิสระกัน วิธีการในการทดสอบ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ คือการคำนวณ

$$F_0 = \frac{SS_R / k}{SS_E / (n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.44)$$

และปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, k, n-k-1}$ ในทางกลับกันเราอาจใช้วิธีการ P-value เพื่อที่จะทดสอบสมมติฐานก็ได้ และเราจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ P – Value สำหรับค่าสถิติ F_0 น้อยกว่า α

ค่า P – value สำหรับค่าสถิติ F (สมการ 2.44) มีค่าน้อยมาก ดังนั้น เราจะสรุปได้ว่าอย่างน้อยสุด หนึ่งในสองของตัวแปรอุณหภูมิและอัตราป้อนจะมีสัมประสิทธิ์การ相關อยู่ไม่เป็นศูนย์

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.45)$$

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลodicong ในความแปรปรวน y เมื่อใช้ตัวแ砧โดย x_1, x_2, \dots, x_k ในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าการที่ R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองของการเดาด้วยที่สร้างขึ้นมาดี เนื่องจากว่าการเดินตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองทำให้ R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เดินเข้าไปนั้น มีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า R^2 มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบแทนก็ได้

เนื่องจาก R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่างๆ เข้าไปในแบบจำลอง ทำให้เราอนุทิ ใจใช้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่า ซึ่งเขียนสมการได้เป็น

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_E / (n - 1)} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (2.46)$$

ตามปกติแล้วสถิติ R^2 แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่างๆ เข้าไปในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเราเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ R_{adj}^2 จะมีค่าลดลงเสมอ

2.10.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การเดาด้วยตัวหารหรือเป็นกลุ่ม

ส่วนมากแล้วเราจะสนใจในการทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การเดาด้วยแต่ละตัว การทดสอบในกรณีนี้มีประโยชน์มากในการตรวจสอบค่าของตัวแปรเดาด้วยแต่ละตัวในแบบจำลองการเดาด้วยตัวอย่างเช่น แบบจำลองอาจมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเราเดินตัวแปรบางตัว เข้าไป หรือลบตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องบางตัวออกจากแบบจำลอง

การเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองการทดสอบจะทำให้ผลรวมของกำลังสองสำหรับการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองมีค่าลดลง เราต้องตัดสินใจว่าการเพิ่มขึ้นของผลรวมของกำลังสองของการทดสอบนั้น ประกันถึงการเพิ่มตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองหรือไม่ ยิ่งกว่านั้นการเพิ่มตัวแปรที่ไม่สำคัญเข้าไปในแบบจำลองที่ให้ค่า Mean Square Error เพิ่มขึ้นและทำให้ประโยชน์ของแบบจำลองนั้นลดลง

สมมติฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การทดสอบแต่ละข้อ

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ถ้า $H_0 : \beta_j = 0$ ไม่ถูกปฏิเสธแล้ว จะหมายความว่า x_j สามารถที่จะถูกตัดทิ้งออกจากแบบจำลองได้ ตัวทดสอบทางสถิติสำหรับสมมติฐานนี้คือ

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 c_{jj}}} \quad (2.47)$$

โดยที่ c_{jj} เป็นสมาชิกตามแนวเส้นทแยงมุมของ $(x'x) - 1$ ที่เกี่ยวกับ $\hat{\beta}_j$ สมมติฐานสูญญ์ $H_0 : \beta_j = 0$ จะถูกปฏิเสธถ้า $|t_0| > t_{\alpha/2, n-k-1}$ ถังเกตว่าการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแบบบางส่วนเท่านั้น เพราะว่าสัมประสิทธิ์การทดสอบ $\hat{\beta}_j$ ขึ้นกับตัวแปรทดสอบอื่นๆ อีก $x_i (i \neq j)$ ที่อยู่ในแบบจำลอง

ตัวหารของสมการ(2.46) จะถูกเรียกว่า ค่าผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error) ของ สัมประสิทธิ์การทดสอบ $\hat{\beta}_j$ นั้นคือ

$$se(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 c_{jj}} \quad (2.48)$$

ดังนั้น วิธีการเขียนที่สมมูลกับสมการ (2.46) คือ

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{se\hat{\beta}_j} \quad (2.49)$$

เราข้างสามารถที่จะตรวจสอบส่วนสนับสนุนของการทดสอบแบบผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากตัวแปรใดๆ x_i โดยกำหนดว่า $x_i (i \neq j)$ ถูกใส่ไว้ในแบบจำลอง วิธีการสำหรับการทดสอบนี้คือรูปแบบทั่วไปของการทดสอบความมีนัยสำคัญของการทดสอบ หรือเรียกว่า วิธีผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ วิธีการนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบส่วนสนับสนุนที่เกิดจากเซตของตัวแปรทดสอบที่อยู่ในแบบจำลองได้ พิจารณาแบบจำลองการทดสอบที่มีตัวแปรทดสอบ k ตัว

$$y = x\beta + \varepsilon$$

โดยที่ y คือ $(n \times 1)$, x คือ $(n \times p)$, β คือ $(p \times 1)$, ε คือ $(n \times 1)$ และ $p = k+1$ เราอยากรู้ว่าเรา
ต้องทดสอบค่าเบื้องต้นของ x_1, x_2, \dots, x_r ($r < k$) มีส่วนสนับสนุนอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองการ
ทดสอบหรือไม่ ให้เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การทดสอบถูกแบ่งออกเป็น

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

โดยที่ β_1 คือ $(r \times 1)$ และ $(\beta_2$ คือ $[(p - r)x_1]$) เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

แบบจำลองอาจเขียนได้เป็น

$$y = x\beta + \varepsilon = x_1 \beta_1 + x_2 \beta_2 + \varepsilon \quad (2.51)$$

โดยที่ x_1 แทนคอลัมน์ของ X ที่เกี่ยวกับ β_1 และ x_2 แทนคอลัมน์ของ x ที่เกี่ยวกับ β_2

สำหรับแบบจำลองแบบเดิมที่รวมทั้ง β_1 และ β_2 เราทราบว่า $\hat{\beta} = (x'x)^{-1}x'y$ และการ
ทดสอบแบบรวมของกำลังสองสำหรับตัวแปรทั้งหมดรวมทั้งค่าจุดตัดแกนคือ

$$SS_R(\beta) = \hat{\beta}'x'y$$

$$\text{และ } MS_E = \frac{y'y - \hat{\beta}'x'y}{n-p}$$

$SS_R(\beta)$ เรียกว่าการทดสอบแบบรวมของกำลังสองที่เกิดจาก β เพื่อที่จะหาส่วนสนับสนุนของ
พจน์ β_1 กับการทดสอบ เราจะสร้างแบบจำลองโดยสมมติให้สมมติฐานศูนย์ $H_0 : \beta_1 = 0$ เป็นจริง
แบบจำลองแบบลดลง (Reduced Model) หากได้จากการ (2.51) ซึ่งมี $\beta_1 = 0$

$$y = x_2 \beta_2 + \varepsilon \quad (2.52)$$

ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดของ β_2 คือ $\hat{\beta}_2 = (x_2'x_2)^{-1}x_2'y$ และ $SS_R(\beta_2) = \hat{\beta}_2'x_2'y$ ($p - r$ ระดับ
ขั้นความเสรี)

ค่าการทดสอบแบบพัฒนาของกำลังสองที่เกิดจาก β_1 เมื่อกำหนดให้ β_2 อยู่ในแบบจำลองแล้วคือ

$$SS_R(\beta_1|\beta_2) = SS_R(\beta_1) - SS_R(\beta_2) \quad (2.53)$$

ค่าพัฒนาของกำลังสองตัวนี้มีระดับขั้นความเสี่ยงเท่ากัน r และเป็นพัฒนาของกำลังสองแบบพิเศษที่เกิดจาก

β_1 สังเกตว่า $SS_R(\beta_1|\beta_2)$ คือการเพิ่มขึ้นในการทดสอบแบบพัฒนาของกำลังสองที่เกิดจากการรวมตัวแปร x_1, x_2, \dots, x_r เข้าไปในแบบจำลอง

ค่า $SS_R(\beta_1|\beta_2)$ เป็นอิสระจาก MS_E และสมมติฐานศูนย์ $\beta_1 = 0$ อาจถูกทดสอบได้จากสถิติ

$$F_0 = \frac{SS_R(\beta_1|\beta_2)|r}{MS_E} \quad (2.54)$$

ถ้า $F_0 > F_{\alpha, r, n-p}$ เราจะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่าอย่างน้อยสุดมีพารามิเตอร์หนึ่งตัวใน β_1 ไม่เท่ากับ 0 และสิ่งที่ตามมาเกี่ยวกับ อย่างน้อยสุดตัวแปรหนึ่งใน x_1, x_2, \dots, x_r ใน X , มีส่วนสนับสนุนอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองการทดสอบการทดสอบใน สมการ (2.54) ว่าการทดสอบ F แบบบางส่วน (Partial F Test)

การทดสอบ F แบบบางส่วนนี้มีประโยชน์อย่างมาก เราสามารถใช้ในการวัดการสนับสนุนของ x_1 รากันว่ามันเป็นตัวแปรสุดท้ายที่ถูกเดินเข้าไปในแบบจำลองโดยการคำนวณค่า

$$SS_R(\beta_1|\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{j-1}, \beta_{j+1}, \dots, \beta_k)$$

นี่คือการเพิ่มการทดสอบแบบพัฒนาของกำลังสองเนื่องจากการเดิน x_1 เข้าไปในแบบจำลองที่มี $x_1, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_k$ อยู่แล้ว สังเกตว่าการทดสอบ F แบบบางส่วนที่ทำตัวแปร x_1 เดียวๆ ตัวหนึ่ง จะสมมูลกับ t-Test ในสมการ (2.49) อย่างไรก็ตาม การทดสอบ F แบบบางส่วนจะเป็นวิธีการทั่วไปมากกว่าซึ่งทำให้เราสามารถวัดผลของเขตของตัวแปรได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1 บทนำ

การดำเนินการศึกษาเรื่องการเปรียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP โดยวิธีการไฟไนท์อิลิเมนท์ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานเหล็กภายใต้แรงดันแล้วทำการวิเคราะห์การตอบสนองแบบสติตของงานดังกล่าว พร้อมทั้งศึกษารูปแบบการวินดิคชั่นในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ใน การสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองของงานดังกล่าว ซึ่งวิธีการศึกษาจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

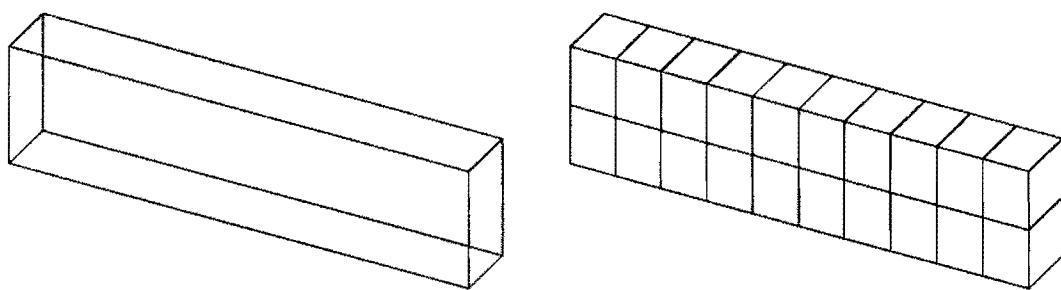
- ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1
- ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ของงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งที่เสริมกำลังด้วย FRP และที่ไม่ได้เสริมกำลัง
- ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม
- นำเสนอกระบวนการตรวจสอบความเสียหายอย่างง่ายของชิ้นงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

3.2 วิธีการดำเนินการศึกษา

ข้อมูลของงานที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปริญญาในพิเศษฉบับนี้ได้อ้างอิงข้อมูลจากบทความที่มีผลการทดสอบงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์ได้ทำการเปรียบเทียบและอ้างอิงกับบทความคือ “Strengthened of RC beams with Epoxy-Bonded Fiber Composite Materials” โดย Triantafillou และ Plevris [14]; “Behavior of Pre-cracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets” โดย Arduini และ Nanni [8]; และ “Interfacial shear stress concentration in FRP-strengthened beams” โดย Maalej และ Bian Y[12]ซึ่งบทความที่กล่าวมานี้จะมีข้อมูลและรูปแบบการวินดิคชั่นของงานที่ทดสอบขนาดของหน้าตัด จำนวนเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริม คุณสมบัติของคอนกรีต คุณสมบัติของการที่ใช้ยึดติดระหว่างแผ่น FRP กับคอนกรีต รวมทั้งความหนา ความยาว พื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP ที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันนี้จะทำให้สามารถศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ภายใต้แรงดันที่อ้างอิงครอบคลุมในทุกกรณี

3.3 วิธีการไฟไนท์อิลิเมนท์ (Finite Element Method, FEM) [3]

วิธีการไฟไนท์อิลิเมนท์หรือที่นิยมเรียกตัวย่อว่า FEM เป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ปัญหานี้จะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นตรง (Exact solution) ของปัญหา ดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่ต่างกันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานี้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ ค่า ซึ่งการที่จะทำการแก้สมการเพื่อหาค่าแม่นตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากเช่นนี้ ในทางปฏิบัติจะทำไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการของไฟไนท์อิลิเมนท์ในการที่จะแปลงค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (Finite) และแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนท์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กันดังแสดงในรูป 3.1



(ก) รูปร่างปกติที่มีค่าต่างๆ จำนวนอนันต์

(ข) รูปร่างที่แทนด้วยอิลิเมนท์

รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างการแทนด้วยอิลิเมนท์ (Element)

วิธีการดังกล่าวซึ่งเป็นข้อว่า ผลเฉลยของแต่ละอิลิเมนท์นั้นจำเป็นจะต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานี้ฯ ซึ่งหมายความว่าหลักการของไฟไนท์อิลิเมนท์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอิลิเมนท์ที่ละอิลิเมนท์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิลิเมนท์ที่ดึงบนฐานรากที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมาจะจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น หากนั้นจึงสมการของอิลิเมนท์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้ากันให้เกิดสมการชุดใหญ่ ซึ่งมีความหมายทางภาษาพก็คือถ้าหากการนำอิลิเมนท์มาประกอบกันเข้ากันกันก่อให้เกิดครูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง หากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไว้ในระบบสมการนี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

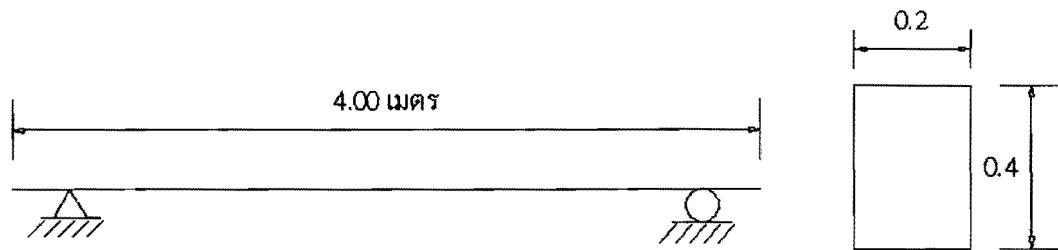
จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาน่าได้ นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของอelistenที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นนอกจากนี้ความแม่นยำของ ผลเฉลย ยังขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation function) ที่ใช้ กับแต่ละอelistenที่นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุตินามานั้นมีความใกล้เคียงกับผล เฉลยของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชัน การประมาณภายในของอelisten ที่อาจสมมุติให้อยู่ในพื้นที่ที่ไม่ได้เป็นเส้นตรง (Linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุด ต่อ (Node) ของอelisten ที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการไฟฟ้าที่อelistenที่ในการศึกษาพฤติกรรม การรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการดัดของคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่ เสริมกำลังด้วย FRP โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ในการสร้างและวิเคราะห์ แบบจำลอง เพราะในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 นั้นสามารถคำนวณผลเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่าง เหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีตได้เองและโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 มีอelistenที่มีคุณสมบัติเหมือนกาว (cohesive element) ซึ่งในการจำลองแทนกาวที่ขีดแผ่น CFRP กับคอนกรีต ซึ่งวิธีการสร้าง แบบจำลองไฟฟ้าที่อelistenที่โดยการใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 จะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.4 พื้นฐานการใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 [10]

ในการจำลองของคอนกรีตเสริมเหล็กในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 นั้นเป็นลักษณะ การเขียนโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 สร้างแบบจำลองขึ้นมาให้แล้วเจึงทำการ วิเคราะห์ผลในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งในการวิเคราะห์ครั้งนี้จะทำการสร้างคานที่ประกอบด้วยชิ้นส่วน หลายๆ ชิ้นที่มีลักษณะเหมือนกันล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งการเขียนโปรแกรมนั้นจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติ ต่างๆ ของคอนกรีตและเหล็ก ชนิดของจุดรองรับ ขนาดของแรงที่กระทำต่อคาน เป็นต้น

3.4.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองคานคอนกรีตแบบเส้นในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตแบบเส้น โดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ซึ่งหัวใจหลักคือการเขียน input file เพื่อป้อนเข้าในโปรแกรม หลังจากนั้น โปรแกรมจะทำการสร้างแบบจำลองให้ ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมทาง วิศวกรรมที่ต้องการ โดยตัวอย่างที่จะใช้ในการอธิบายคือคานคอนกรีตที่มีหน้าตัดและจุดรองรับดัง แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงรูปคานคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคาน

จากรูปที่ 3.2 สามารถสร้างแบบจำลองโดยการป้อนข้อมูล input file ในรูปที่ 3.3 ลงในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 โดยแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

```

*HEADING
CONCRETE BEAM ANALYSIS
*NODE
1,0,0,0
11,4,0,0
*NGEN,NSET=NALL
1,11,1
*ELEMENT,TYPE=B21
1,1,2
*ELGEN,ELSET = BEAM
1,10,1,1
*BEAM SECTION,ELSET=BEAM, SECTION=RECT,MATERIAL=M1
0.2,0.4
*MATERIAL,NAME = M1
*ELASTIC
20.E9,0.2
*BOUNDARY
1,1,2
11,2,2
*STEP

```

```

*STATIC
*CLOAD
6,2,-10,000
*NODE PRINT
U
*EL PRINT
S,E
*END STEP RF
*EL PRINT
S
*EL FILE
S,E
*END STEP

```

รูปที่ 3.3 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

1) เริ่มต้นโปรแกรม

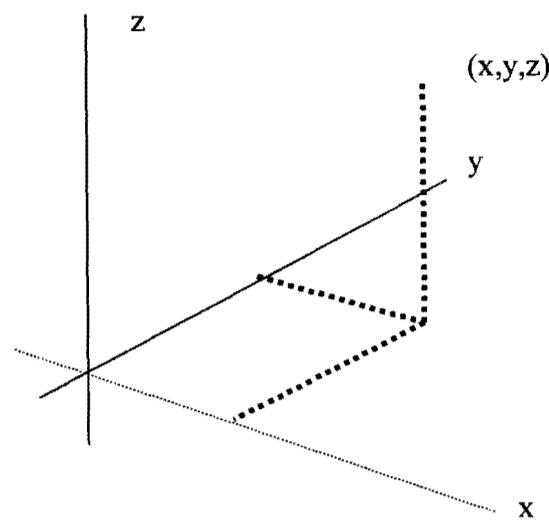
การที่จะจำลองโครงสร้างนั้นในการเขียนโปรแกรมต้องมีชื่อเรื่องหรือชื่องานที่ทำอยู่ โดยใช้คำสั่ง

```

*HEADINNG
CONCRETE BEAM ANALYSIS

```

รูปร่างของงานนั้นจะถูกกำหนด (NODE) ซึ่งจะมีจุดจำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการ ความละเอียดของแบบจำลองงาน การสร้างทุคนั้นจะถูกกำหนดโดยพิกัด (Coordinate) X, Y, Z ใช้คำสั่ง *NODE ซึ่งจำเป็นจะต้องมีข้อมูลดังแสดงในตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของการบอกร่องพิกัด (Coordinate) [10]

2) ขั้นตอนการกำหนด NODE

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการกำหนด NODE:

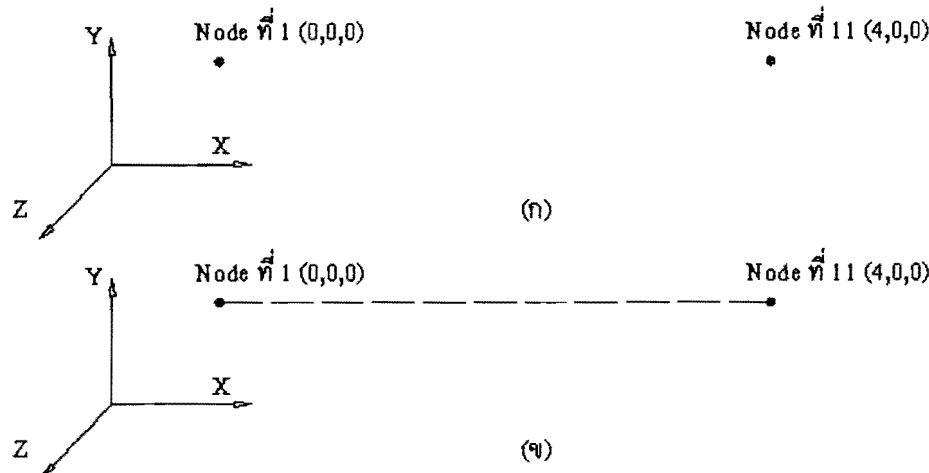
- 1) หมายเลขของ Node
- 2) พิกัดของ Node บนแกน X
- 3) พิกัดของ Node บนแกน Y
- 4) พิกัดของ Node บนแกน Z

*NODE

1,0,0,0

11,4,0,0

จาก การกำหนด Node ที่ 1 และ 11 จะได้



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node

จะเห็นได้ว่า Node ที่กำหนดนั้นเป็น Node 2 จุดของความตามความยาว 4 เมตร และหากต้องการความละเอียดมากกว่านี้ก็ต้องกำหนด Node และ Coordinate เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งหากมีจำนวน Node มากจะทำให้เสียเวลาในการกำหนด Coordinate ของ Node มากและค่อนข้างยุ่งยากเพราะจะนั้นในตัวอย่างนี้จึงใช้คำสั่ง *NSET เป็นการสร้าง Node ขึ้นมาเพื่อรห่วง Node 2 Node (Generate) โดยแบ่งระยะห่างระหว่าง Node ที่ generate ขึ้นมาให้มีระยะห่างเท่าๆ กัน

ข้อมูลที่ต้องให้การกำหนดการ Generate Node:

- 1) หมายเลข Node เริ่มต้น
- 2) หมายเลข Node สุดท้าย
- 3) หมายเลข Node ที่เพิ่มขึ้นที่เริ่มจาก Node เริ่มต้นถึง Node สุดท้ายอย่างน้อย 1

ดังที่ได้แสดงไว้ในตัวอย่างโปรแกรม

*NGEN,NSET=NALL

1,11,1

จากคำสั่ง *NGEN จะได้

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เกิดจากการ Generate Node

3) ขั้นตอนการสร้าง ELEMENT

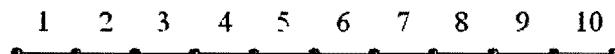
เมื่อกำหนด Node ครบแล้วขั้นตอนต่อไปคือทำการเชื่อมต่อกันระหว่าง Node ทำให้เกิดเป็นรูปร่างซึ่งก็มีมากหลายหลายรูปร่างขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่างลักษณะตามความเหมาะสมของโครงสร้าง ในตัวอย่างนี้จะทำการแบ่งงานให้ประกอบไปด้วย Element ที่มีรูปร่างเป็นเส้นโดยแต่ละ Element จะประกอบไปด้วย 2 Node ซึ่งจะใช้คำสั่ง *ELEMENT,TYPE=B21

ข้อมูลที่ใช้ในการกำหนด Element

- 1) หมายเลขของ Element
- 2) ชื่อ Node เริ่มต้นของ Element
- 3) ชื่อ Node สุดท้ายของ Element

*ELEMENT,TYPE=B21

1,1,2



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งและหมายเลข Element

ในการสร้าง Element ต้องกำหนดหมายเลข Element ด้วยแล้วตามด้วยการกำหนด Node ตามลำดับ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการสร้าง Element ให้ครบเพื่อนำตัดและตลอดความยาวงานโดยใช้ การ generate ซึ่งใช้คำสั่ง *ELGEN โปรแกรมจะทำการสร้าง Element ให้เหมือนกับ Element ที่ 1 โดยมีการกำหนดดังนี้

ข้อมูลที่ต้องกำหนดในการที่จะ Generate element:

- 1) หมายเลขของ Element ที่เป็นต้นแบบ
- 2) จำนวนทั้งหมดของ Element ในແລງແຮກโดยรวมกับ Element ที่เป็นต้นแบบด้วย
- 3) การเพิ่มขึ้นของหมายเลข Node ของแต่ละ Element ในແລງเดียวกัน
- 4) หมายเลขของ Element ที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 1

ดังแสดงในโปรแกรมตัวอย่างของคาน

*ELGEN,ELSET = BEAM

1,10,1,1

จากคำสั่ง *ELGEN จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปร่างแบบจำลองของคานที่ประกอบด้วย Element

4) ขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุในการจำลองคานคอนกรีตในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ต้องกำหนดชนิดของหน้าตัดเป็นชนิด *BEAM SECTION และตั้งชื่อชนิดของวัสดุ สำหรับคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง จะมีการกำหนดโดยคำสั่ง *ELASTIC ดังนี้

*ELASTIC

(ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น), (ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง)

ดังแสดงในโปรแกรมต่อไปนี้

*BEAM SECTION,ELSET=BEAM, SECTION=RECT,MATERIAL=M1

0.2,0.4

*MATERIAL,NAME = M1

*ELASTIC

20.E9,0.2

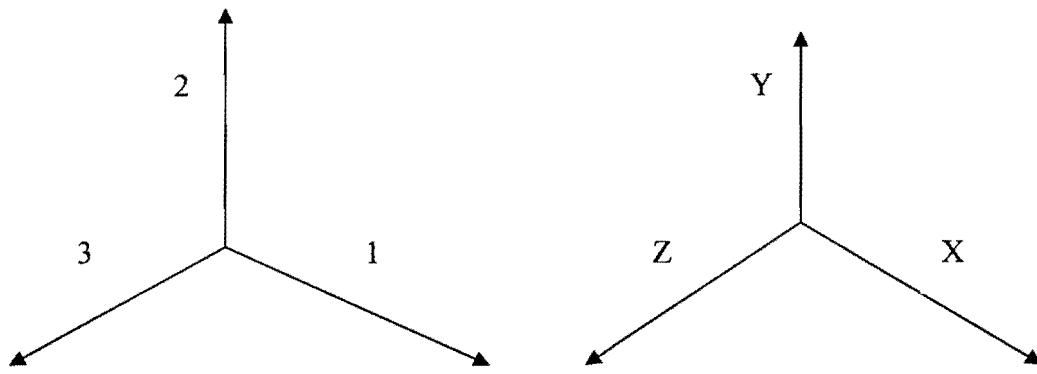
5) ขั้นตอนการกำหนดจุดรองรับ

การกำหนดจุดรองรับในโปรแกรมนี้จะเป็นการไม่ยอนให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนดตามทิศทาง 1, 2, 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีการกำหนดว่า Node ไหนที่จะเป็นจุดรองรับ และตามด้วยทิศทางที่ไม่ยอนให้มีการเคลื่อนที่ว่ามีกี่ทิศทาง โดยใช้คำสั่ง *BOUNDARY เช่นในตัวอย่างโปรแกรมคือ Node ที่ 1 และ 11 ไม่ยอนให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ 2 หรือไม่ยอนให้มีการเคลื่อนที่ในแกน Y

*BOUNDARY

1,1,2

11,2,2



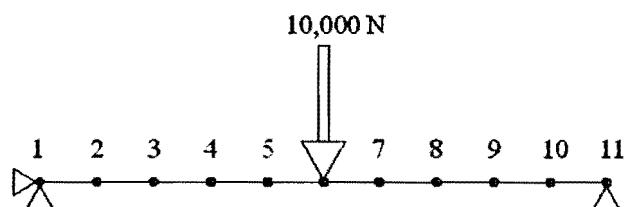
รูปที่ 3.9 แสดงทิศทางที่ใช้ในการกำหนดสภาพข้อมูลของ Node [5]

6) ขั้นตอนการกำหนดแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

การกำหนดแรงที่กระทำต่อโครงสร้างในโปรแกรมนี้จะต้องใช้คำสั่ง *CLOAD ซึ่งต้องกำหนดขนาดแรง และ ทิศทางของแรงที่กระทำ กำหนดตามทิศทางที่กระทำมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่แสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับขนาดของแรงนั้นหากทิศทางที่กระทำมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่แสดงในรูปที่ 3.10 ก็ต้องใส่เครื่องหมายลบด้วย ที่สำคัญต้องกำหนดตำแหน่งที่แรงกระทำต่อโครงสร้างว่ากระทำที่ Node ไหน เช่น ในตัวอย่างโปรแกรม คือ มีแรงขนาด 10,000 นิวตัน กระทำที่ Node ที่ 6 มีทิศทางผูกดตามแนวแกน Y

*CLOAD

6,2,-10,000



รูปที่ 3.10 แสดงขนาด ทิศทาง ตำแหน่งที่กระทำและสภาพข้อมูลของ Node

7) ขั้นตอนการเรียกคุณลักษณะวิเคราะห์

โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 มีทางเลือกให้ผู้ใช้งานได้เลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการได้ ตัวอย่างของคำสั่งคือ

*NODE PRINT

U

*EL PRINT

S,E

*END STEP RF

*EL PRINT

S

*EL FILE

S,E

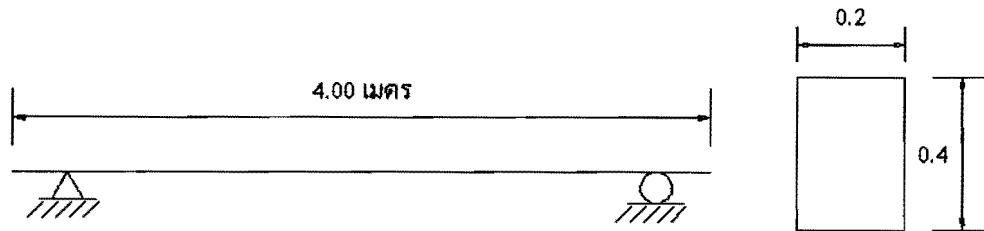
ภาษาหลังจากที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คำสั่ง *END STEP ก็จะคำสั่งที่อยู่ในบรรทัดสุดท้ายของ input files ตัวอย่างของคำสั่งคือ

*END STEP

เพียงเท่านี้ก็จะทำให้ได้แบบจำลองของงานคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.10

3.4.2 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองงานคอนกรีตในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการสร้างแบบจำลองงานคอนกรีต โดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ซึ่งหัวใจหลักคือการเขียน input file เพื่อป้อนเข้าในโปรแกรม หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการสร้างแบบจำลองให้ ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมทางวิศวกรรมที่ต้องการ โดยตัวอย่างที่จะใช้ในการอธิบายคืองานคอนกรีตที่มีหนาตื้นและจุดรองรับดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรูปปานคอนกรีตและขนาดหนาตื้นของงาน

จากรูปที่ 3.11 สามารถสร้างแบบจำลองโดยการป้อนข้อมูล input file ในรูปที่ 3.12 ลงในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 โดยแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

*HEADING
CONCRETE BEAM ANALYSIS
*NODE
**TOP EDGE
1,0,0.4,0
11,4,0.4,0
**BOTTOM EDGE
**
4001,0,0,0
4011,4,0,0
*NGEN,NSET= TOP
1,11,1
*NGEN,NSET = BOTTOM
4001,4011,1
*NFILL
TOP, BOTTOM, 4,1000
*ELEMENT,TYPE= CPE4R
1,1,1001,1002,2
*ELGEN,ELSET = BEAM
1,10,1,1,4,1000,10
*SOLID SECTION, MATERIAL = BEAM, ELSET=BEAM
0.2
*MATERIAL,NAME = BEAM
*ELASTIC
20.E9,0.2
*BOUNDARY
4001,1,2
4011,2,2
*STEP
*STATIC

```

*CLOAD
6,2,-10000
*NODE PRINT
U
*EL PRINT
S,E
*END STEP

```

รูปที่ 3.12 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

1) เริ่มต้นโปรแกรม

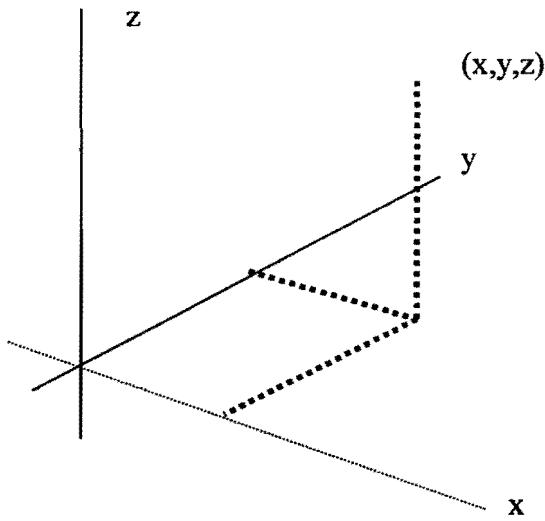
การที่จะจำลองโครงสร้างนั้นในการเขียนโปรแกรมต้องมีชื่อเรื่องหรือชื่องานที่ทำอยู่ โดยใช้คำสั่ง

```

*HEADINNG
CONCRETE BEAM ANALYSIS

```

รูปร่างของคานนั้นจะถูกกำหนด (NODE) ซึ่งจะมีจุดจำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการ ความละเอียดของแบบจำลองคาน การสร้างจุดนั้นจะถูกกำหนดโดยพิกัด (Coordinate) X, Y, Z ใช้ คำสั่ง *NODE ซึ่งจำเป็นจะต้องมีข้อมูลดังแสดงในตัวอย่างรูป 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างของการบอกตำแหน่งพิกัด (Coordinate) [5]

2) ขั้นตอนการกำหนด NODE

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการกำหนด NODE:

- 1) หมายเลขของ Node
- 2) พิกัดของ Node บนแกน X
- 3) พิกัดของ Node บนแกน Y
- 4) พิกัดของ Node บนแกน Z

*NODE

**

**TOP EDGE

**

1,0,0.4,0

11,4,0.4,0

**

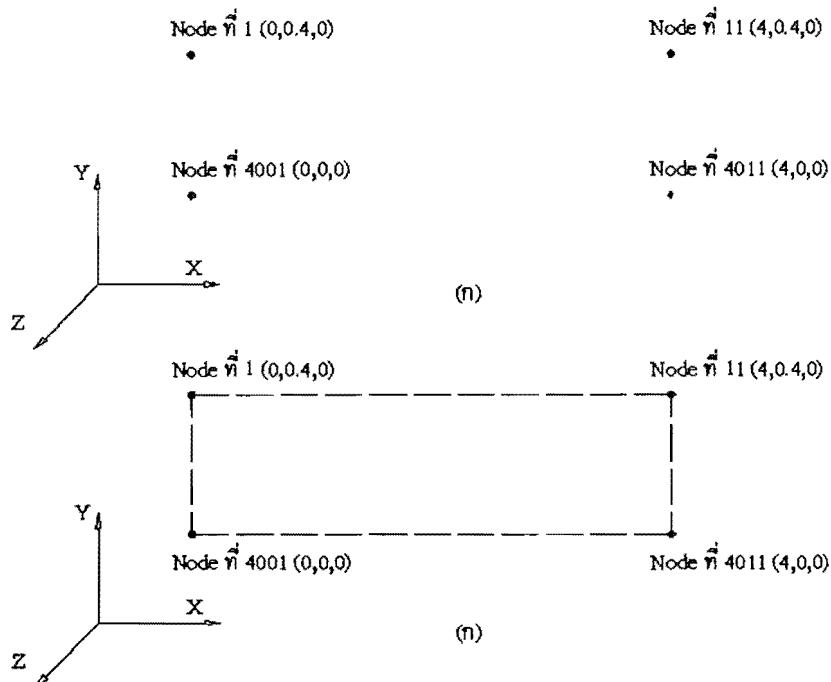
**BOTTOM EDGE

**

4001,0,0,0

4011,4,0,0

จากการกำหนด Node ที่ 1 11 4001 และ 4011 จะได้



รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node

จะเห็นได้ว่า Node ที่กำหนดนั้นเป็นจุดที่อยู่บนทั้ง 4 มุมของคานตามความยาว 4 เมตร และหากต้องการความละเอียดมากกว่านี้ก็ต้องกำหนด Node และ Coordinate เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งหากมีจำนวน Node มากจะทำให้เสียเวลาในการกำหนด Coordinate ของ Node มากและค่อนข้างยุ่งยาก เพราะฉะนั้นในตัวอย่างนี้จึงใช้คำสั่ง *NSET เป็นการสร้าง Node ขึ้นมาเพิ่มระหว่าง Node 2 Node (Generate) โดยแบ่งระยะห่างระหว่าง Node ที่ generate ขึ้นมาให้มีระยะห่างเท่าๆ กัน

ข้อมูลที่ต้องให้การกำหนดการ Generate Node:

- 1) หมายเลข Node เริ่มต้น
- 2) หมายเลข Node สุดท้าย
- 3) หมายเลข Node ที่เพิ่มขึ้นที่เริ่มจาก Node เริ่มต้นถึง Node สุดท้ายอย่างน้อย 1

ตังที่ได้แสดงไว้ในตัวอย่างโปรแกรม

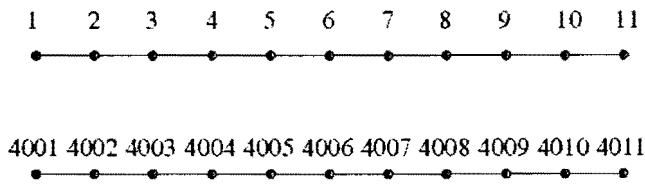
***NGEN,NSET= TOP**

1,11,1

***NGEN,NSET = BOTTOM**

4001,4011,1

จากคำสั่ง *NGEN จะได้



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เกิดจากการ Generate Node

และ Node ที่สร้างขึ้นมาทั้งหมดนี้จะใช้คำสั่ง *NSET = name (ชื่อ) จากตัวอย่างนี้แสดงว่าตั้งแต่ Node ที่ 1 ถึง Node ที่ 11 ทุก Node จะมีชื่อว่า “TOP” และ Node ที่ 4001 ถึง Node ที่ 4011 ทุก Node จะมีชื่อว่า “BOTTOM” จากนั้นในตัวอย่างนี้ขึ้นบ่งเพิ่มอีกแนวที่คือบ่งครึ่งระหว่าง TOP และ BOTTOM โดยใช้คำสั่ง *NFILL จะเป็นลักษณะการสร้าง Node ขึ้นมาระหว่าง Node 2 Node

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการกำหนดการ Generate Node โดยคำสั่ง *NFILL

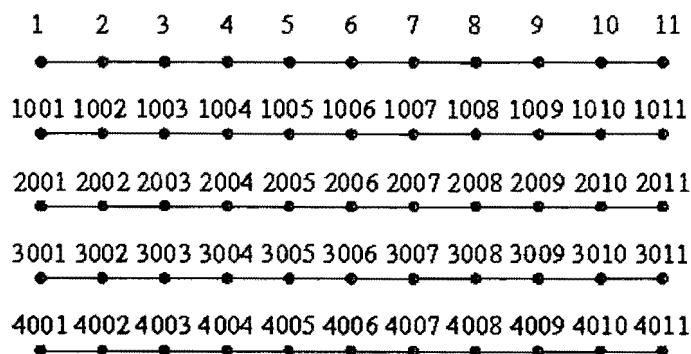
- 1) ชื่อของ Node ที่กำหนดให้เป็น Node ที่ 1
- 2) ชื่อของ Node ที่กำหนดให้เป็น Node ที่ 2
- 3) จำนวนช่วงที่ต้องการแบ่งระหว่าง Node ทั้ง 2
- 4) หมายเลข Node ที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 1

ดังที่ได้แสดงไว้ในตัวอย่างโปรแกรม

*NFILL

TOP, BOTTOM, 4,1000

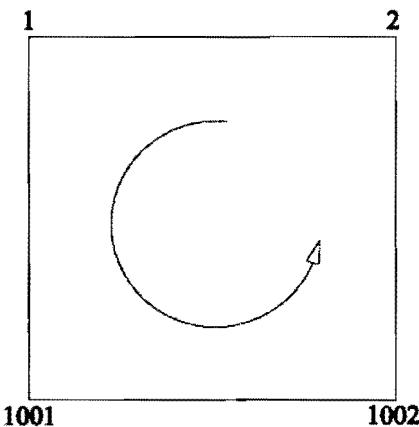
จากคำสั่ง *NFILL จะได้



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งและหมายเลขของ Node ที่เพิ่มขึ้น

3) ขั้นตอนการสร้าง ELEMENT

เมื่อกำหนด Node ครบแล้วขั้นตอนต่อไปคือทำการเชื่อมต่อกันระหว่าง Node ทำให้เกิดเป็นรูปร่างซึ่งมานี้ชี้ว่ามีมากน้อยหลายรูปร่างขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่างลักษณะตามความเหมาะสมของโครงสร้าง ในตัวอย่างนี้จะทำการแบ่งงานให้ประกอบไปด้วย Element ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม โดยแต่ละ Element จะประกอบไปด้วย 4 Node ซึ่งจะใช้คำสั่ง *ELEMENT,TYPE= CPE4R ในการสร้าง Element มีการกำหนดดังนี้

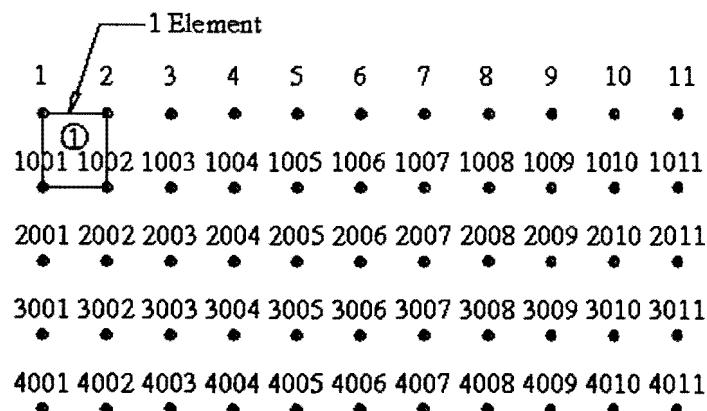


รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะการสร้าง Element 1 Element

การกำหนดต้องกำหนดหมายเลข Element แล้วตามด้วยการกำหนด Node ตามลำดับ จากรูปที่ 3.17 มี Node อยู่ 4 Node คือ 1-4 การกำหนด Node ของ Element นั้นต้องกำหนดเวียนตามทิศทางเข็มนาฬิกาโดยเริ่มจาก Node ใดก็ได้

*ELEMENT,TYPE= CPE4R

1,1,1001,1002,2



รูปที่ 3.18 Element 1 Element แบบ 2 มิติ

ในการสร้าง Element ต้องกำหนดหมายเลข Element ด้วยแล้วตามด้วยการกำหนด Node ตามลำดับ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการสร้าง Element ให้ครบเต็มหน้าตัดและตลอดความยาวคาน โดยใช้ การ generate ซึ่งใช้คำสั่ง *ELGEN โปรแกรมจะทำการสร้าง Element ให้เหมือนกับ Element ที่ 1 โดยมีการกำหนดดังนี้

ข้อมูลที่ต้องกำหนดในการที่จะ Generate element:

- 1) หมายเลขของ Element ที่เป็นต้นแบบ
- 2) จำนวนทั้งหมดของ Element ในແຄวແຮກโดยรวมกับ Element ที่เป็นต้นแบบด้วย
- 3) การเพิ่มชื่นของหมายเลข Node ของแต่ละ Element ในແຄวเดียวกัน
- 4) หมายเลขของ Element ที่เพิ่มชื่นอย่างน้อย 1
- 5) จำนวนของແຄวทั้งหมดรวมทั้งແຄว
- 6) การเพิ่มชื่นของหมายเลข Node ของแต่ละ Element ระหว่างແຄว
- 7) การเพิ่มชื่นของหมายเลข Element ของแต่ละ Element ระหว่างແຄว

ดังแสดงในโปรแกรมตัวอย่างของคาน

*ELGEN,ELSET = BEAM

1,10,1,1,4,1000,10

จากคำสั่ง *ELGEN จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.19

รูปที่ 3.19 รูปร่างแบบจำลองของคานที่ประกอบด้วย Element

4) ขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุในการจำลองคานตอนกรีตในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ต้องกำหนดชนิดของหน้าตัดเป็นชนิด *SOLID SECTION และตั้งชื่อชนิดของวัสดุ สำหรับคุณสมบัติ

ของวัสดุได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง จะมีการกำหนดโดยคำสั่ง *ELASTIC ดังนี้

*ELASTIC

(ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น), (ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง)

ดังแสดงในโปรแกรมด้วยข้าง

*SOLID SECTION, MATERIAL = BEAM, ELSET=BEAM

0.2

*MATERIAL,NAME = BEAM

*ELASTIC

20.E9,0.2

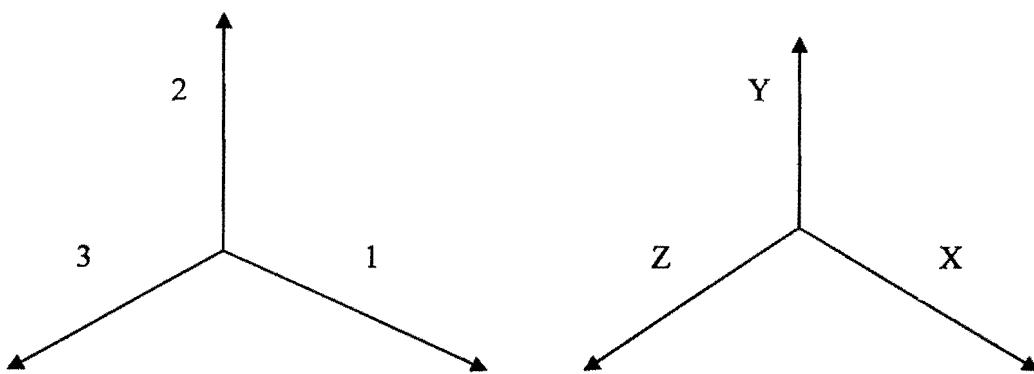
5) ขั้นตอนการกำหนดจุดรองรับ

การกำหนดจุดรองรับในโปรแกรมนั้นจะเป็นการไม่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนดตามทิศทาง 1, 2, 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งมีการกำหนดว่า Node ไหนที่จะเป็นจุดรองรับ และตามด้วยทิศทางที่ไม่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ว่ามีกี่ทิศทาง โดยใช้คำสั่ง *BOUNDARY เช่นในตัวอย่างโปรแกรมคือ Node ที่ 4001 และ 4011 ไม่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ 2 หรือไม่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแกน Y

*BOUNDARY

4001,1,2

4011,2,2



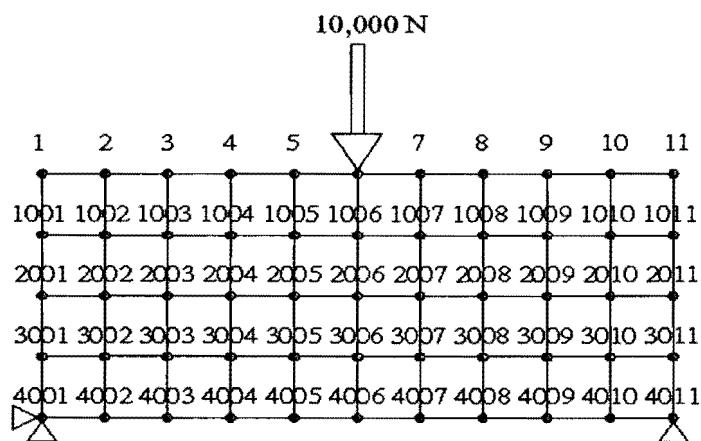
รูปที่ 3.20 แสดงทิศทางที่ใช้ในการกำหนดสภาวะของ Node [5]

6) ขั้นตอนการกำหนดแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

การกำหนดแรงที่กระทำต่อโครงสร้างในโปรแกรมนี้จะต้องใช้คำสั่ง *CLOAD ซึ่งต้องกำหนดขนาดแรง และ ทิศทางของแรงที่กระทำ กำหนดตามทิศทางที่กระทำมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่แสดงในรูปที่ 3.21 สำหรับขนาดของแรงนั้นหากทิศทางที่กระทำมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่แสดงในรูปที่ 3.21 ก็ต้องใส่เครื่องหมายลบด้วย ที่สำคัญต้องกำหนดตำแหน่งที่แรงกระทำต่อโครงสร้างว่ากระทำที่ Node ไหน เช่น ในตัวอย่างโปรแกรม คือ มีแรงขนาด 10,000 นิวตัน กระทำที่ Node ที่ มีทิศทางพุ่งลงตามแนวแกน Y

*CLOAD

6,2,-10,000



รูปที่ 3.21 แสดงขนาด ทิศทาง ตำแหน่งที่กระทำและสภาพของเขตของ Node

7) ขั้นตอนการเรียกดูผลการวิเคราะห์

โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 มีทางเลือกให้ผู้ใช้งานารถเลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการได้ ตัวอย่างของคำสั่งคือ

*NODE PRINT

U

*EL PRINT

S,E

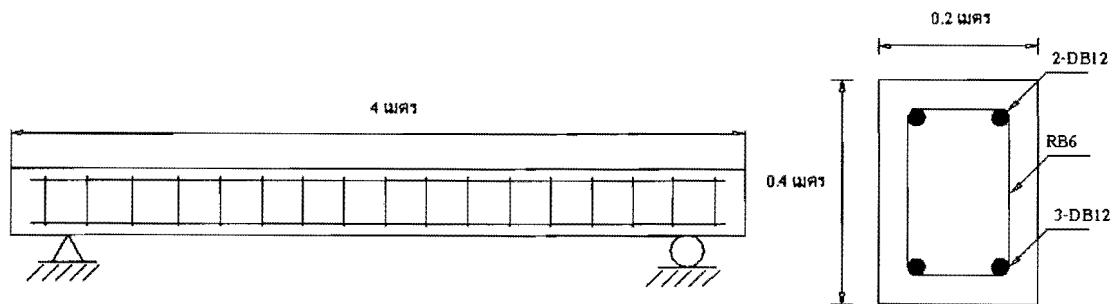
ภายหลังจากที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คำสั่ง *END STEP คือคำสั่งที่อยู่ในบรรทัดสุดท้ายของ input files ตัวอย่างของคำสั่งคือ

*END STEP

เพียงเท่านี้ก็จะทำให้ได้แบบจำลองของงานคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.21

3.4.3 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ซึ่งก็คือการเขียน input file เพื่อป้อนเข้าในโปรแกรม หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการสร้างแบบจำลองให้ ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์พุทธิกรรมทางวิศวกรรมที่ต้องการ โดยตัวอย่างที่จะใช้ในการอธิบายคือคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดและจุดรองรับดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงรูปคานคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคาน

จากรูปที่ 3.22 สามารถสร้างแบบจำลองโดยการป้อนข้อมูล input file ในรูปที่ 3.23 ลงในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 โดยแต่ละขั้นตอนนี้ดังนี้

```

*HEADING
REINFORCED CONCRETE BEAM ANALYSIS
*NODE
**
**TOP EDGE
**
1,0,0.4
101,4,0.4
**
**BOTTOM EDGE
**
4001,0,0

```

4101,4,0
**NODE FOR TOPREIN
5001,0,0.3
5101,4,0.3
**
**NODE FOR BOTREIN
6001,0,0.1
6101,4,0.1
**NODE FOR REBAR
7001,0.2,0.3
7021,4,0.3
**
8001,0.2,0.2
8021,4,0.2
**
9001,0.2,0.1
9021,4,0.1
**
*NGEN,NSET=TOPREIN
5001,5101,1
*NGEN,NSET=BOTREIN
6001,6101,1
*NGEN,NSET=REBAR
7001,7021,0.2
8001,8021,0.2
9001,9021,0.2
**TOPREIN,BOTREIN,2,500
*NGEN,NSET= TOP
1,101,1
*NGEN,NSET = BOTTOM

4001,4101,1
*NFILL
TOP, BOTTOM, 4,1000
*ELEMENT,TYPE= CPE4R
1,1,1001,1002,2
*ELGEN,ELSET = BEAM
1,100,1,1,4,1000,100
*SOLID SECTION, MATERIAL = BEAM, ELSET=BEAM
0.2
*MATERIAL,NAME = BEAM
*ELASTIC
20.E9,0.2
*ELEMENT, TYPE=T2D2
5001,5001,5002
*ELGEN,ELSET=TOPREIN
5001,100,1
*ELEMENT,TYPE=T2D2
6001,6001,6002
*ELGEN,ELSET=BOTREIN
6001,100,1
*ELEMENT, TYPE=T2D2
7001,7001,8001
*ELGEN,ELSET=REBAR
7001,2,1000,1000,20,1,1
*ELSET,ELSET=TRUSS3D
TOPREIN,BOTREIN,REBAR
*ELSET,ELSET=REIN
TOPREIN,BOTREIN
*EMBEDDED ELEMENT,HOST ELSET=BEAM
TRUSS3D

*SOLID SECTION,ELSET=TOPREIN,MATERIAL=STEEL
1.27E-04
*MATERIAL, NAME=STEEL
*ELASTIC
183.6E9,0.3
*PLASTIC
575E6,0
*DENSITY
7800
*SOLID SECTION,ELSET=BOTREIN,MATERIAL=STEEL2
2.26E-04
*MATERIAL, NAME=STEEL2
*ELASTIC
183.6E9,0.3
*PLASTIC
575E6,0
*DENSITY
7800
*SOLID SECTION,ELSET=REBAR,MATERIAL=STEEL1
5.65E-5
*MATERIAL, NAME=STEEL1
*ELASTIC
183.6E9,0.3
*PLASTIC
575E6,0
*DENSITY
7800
*BOUNDARY
4001,1,2
4101,2,2

```

*STEP
*STATIC
*CLOAD
51,2,-10000
*NODE PRINT
U
*EL PRINT
S,E
*END STEP

```

รูปที่ 3.23 ตัวอย่าง input file ของโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

1) เริ่มต้นโปรแกรม

การที่จะจำลองโครงสร้างนั้นในการเขียนโปรแกรมต้องมีข้อเรื่องหรือข้อ้งานที่ทำอยู่ โดยใช้คำสั่ง

```

*HEADINNG
REINFORCEDCONCRETE BEAM ANALYSIS

```

รูปร่างของคานนั้นจะถูกกำหนด (NODE) ซึ่งจะมีจุดจำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการ ความละเอียดของแบบจำลองคาน การสร้างจุดนั้นจะถูกกำหนดโดยพิกัด (Coordinate) X, Y, Z ใช้คำสั่ง *NODE ซึ่งจำเป็นจะต้องมีข้อมูลดังแสดงในตัวอย่างรูป 3.4

2) ขั้นตอนการกำหนด NODE เหล็กเสริม

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการกำหนด NODE:

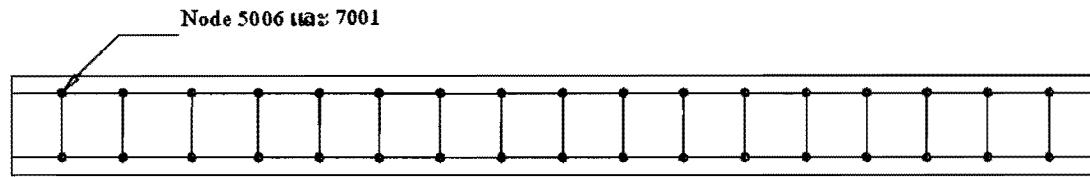
- 1) หมายเลขของ Node
- 2) พิกัดของ Node บนแกน X
- 3) พิกัดของ Node บนแกน Y
- 4) พิกัดของ Node บนแกน Z

```

*NODE
**
**NODE FOR TOPREIN
5001,0,0.3
5101,4,0.3
**
**NODE FOR BOTREIN
6001,0,0.1
6101,4,0.1
**NODE FOR REBAR
7001,0,0.3
7021,4,0.3
**
8001,0,0.2
8021,4,0.2
**
9001,0,0.1
9021,4,0.1
**

```

จากการกำหนด Node ของเหล็กเสริมจะได้



รูปที่ 3.24 แสดงตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของ Node

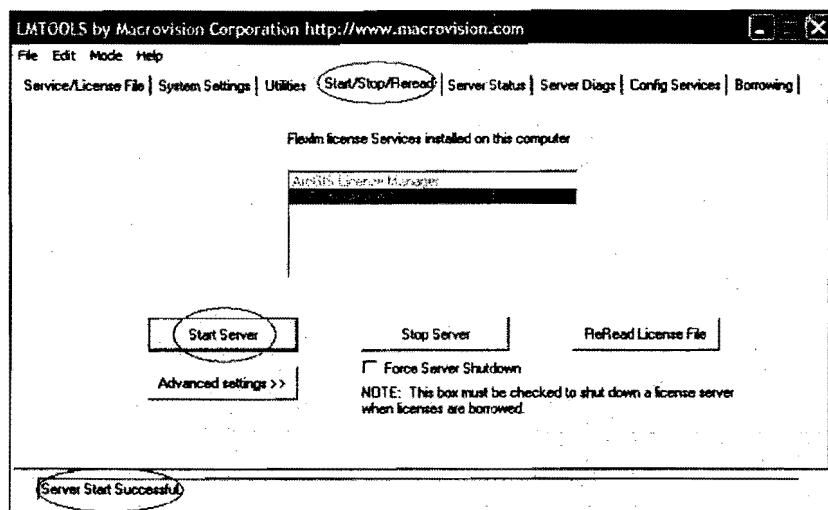
จะเห็นได้ว่า Node ที่กำหนดนี้เป็นจุดที่ Node มีการซ้อนทับกันอยู่ จากรูปที่ 3.24 จะเห็นว่า Node ที่ 5006 ของเหล็กเสริมบนกับ Node ที่ 7001 ของเหล็กปลอกเป็นจุดเดียวกัน การกำหนด Node ของเหล็กเสริมนี้จะต้องกำหนดรือ Node ไม่ให้มีรือซ้ำกัน

ในขั้นตอนการสร้าง Element การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและการกำหนดจุดรองรับสามารถทำได้เช่นเดียวกันกับคำนวณกริด

3.4.4 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมABAQUS 6.5-1

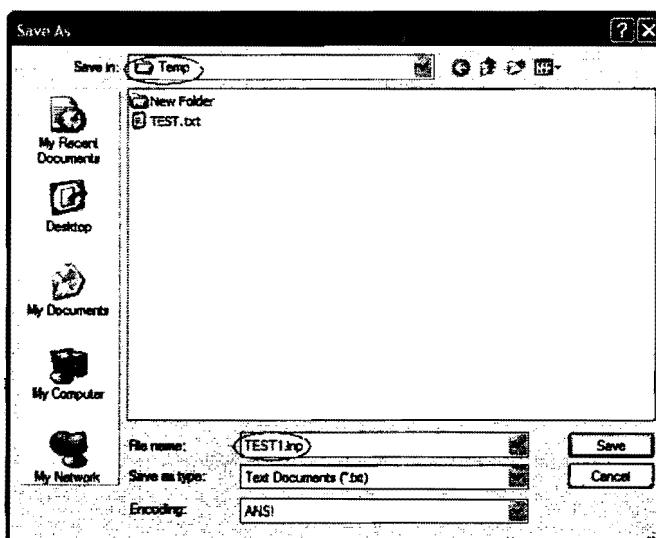
- เปิด Licensing utilitiesคลิกที่ Start/Stop/Reread แล้วคลิกที่ Start Server ให้ขึ้นคำว่า Server

Start Successful

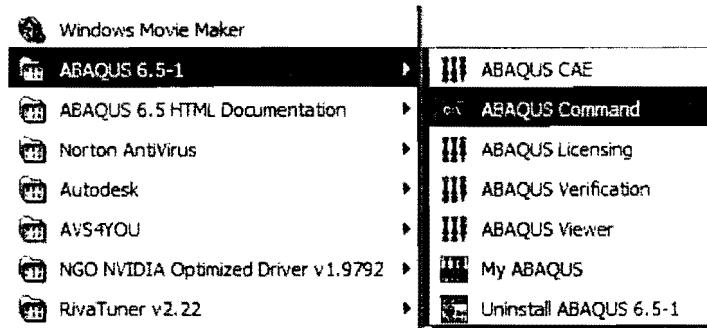


- เปิดโปรแกรม Notepad เขียน Input file ตั้งชื่อไฟล์แล้วทำการ Save เป็นชื่อไฟล์“.inp” ใน Folder

Temp



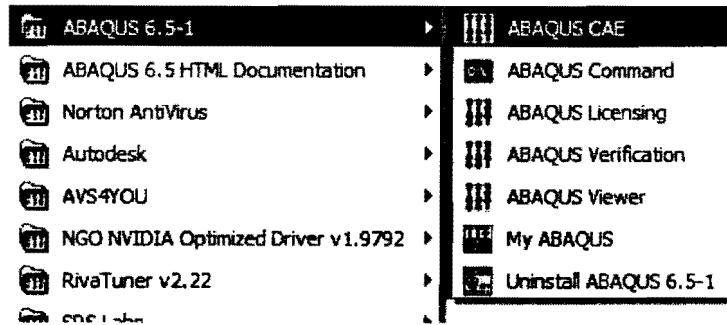
3) เปิดโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 แล้วเลือกที่ ABAQUS Command



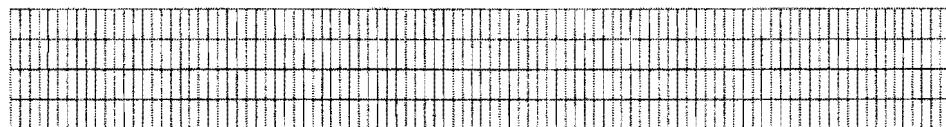
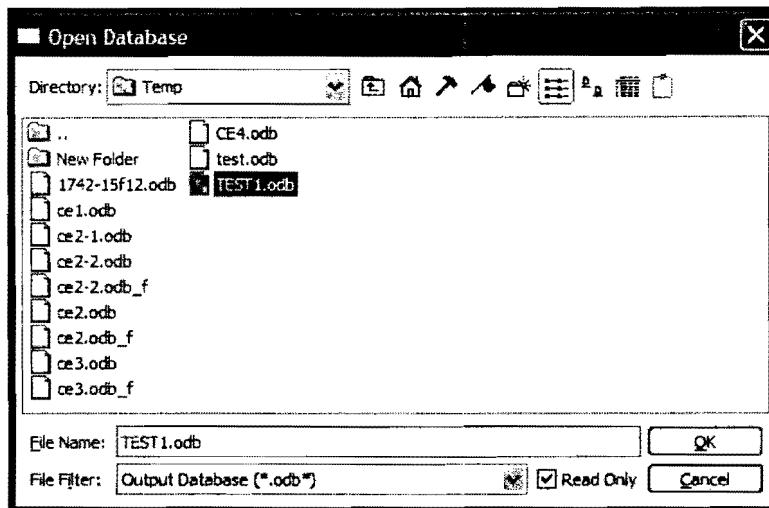
4) การ Run ชุดคำสั่ง Input file พิมพ์ "abaqus int j= ชื่อไฟล์"

```
C:\Temp>abaqus int j=TEST1
Old job files exist. Overwrite? (y/n): y
ABAQUS JOB TEST1
ABAQUS Version 6.5-1
Begin Analysis Input File Processor
3/12/2010 2:04:53 AM
Run pre.exe
ABAQUS License Manager checked out the following licenses:
ABAQUS/Standard checked out 5 tokens.
3/12/2010 2:04:55 AM
End Analysis Input File Processor
Begin ABAQUS/Standard Analysis
3/12/2010 2:04:55 AM
Run standard.exe
ABAQUS License Manager checked out the following licenses:
ABAQUS/Standard checked out 5 tokens.
3/12/2010 2:04:57 AM
End ABAQUS/Standard Analysis
ABAQUS JOB TEST1 COMPLETED
C:\Temp>
```

5) การแสดงผลไปที่โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 แล้วเลือกที่ ABAQUS CAE



- 6) จะเห็นโปรแกรม ABAQUS 6.5-1แสดงขึ้นมา ให้เลือกที่ Open ไปที่ File Filter แล้วคลิกเลือก Output Database (*.odb*) จากนั้นเลือกไฟล์ที่ต้องการแสดงผล และคลิก Ok.



รูปที่ 3.25 แสดงผลการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS

3.5 การออกแบบแบบจำลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

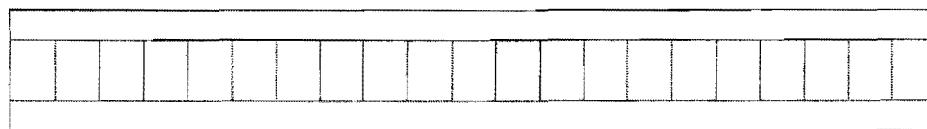
ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 ว่าข้อมูลของคานที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงจากบทความที่มีผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นFRP ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบและอ้างอิงกับบทความ คือ “Strengthened of RC beams with Epoxy-Bonded Fiber Composite Materials” โดย Triantafillou และ Plevris [14]; “Behavior of Pre-cracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets” โดย Arduini และ Nanni [8]; และ “Interfacial shear stress concentration in FRP-strengthened beams” โดย Maalej และ Bian Y[12] ซึ่งข้อมูลที่น่าสนใจในการสร้างแบบจำลองยังได้แก่ ขนาดของหน้าตัด จำนวนเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริม คุณสมบัติของวัสดุ รวมทั้งความหนา ความยาว ที่หน้าตัดของแผ่น FRP ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการจำลองคุณสมบัติของคานคอนกรีตในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 และที่สำคัญอย่างยิ่งจะอธิบายเทคนิคในการ

จำลองปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของการยึดติดกันระหว่างแผ่น FRP และผิวคอนกรีต โดยใช้ Element ชนิดพิเศษที่เรียกว่า Cohesive Element ซึ่งถ้าหากการจำลองการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้วจะทำให้สามารถทำนายน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวินาศัยของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับการกำหนดจุดรองรับ (Boundary condition) ในแบบจำลองนี้เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของงานวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองเพียงครั้งเดียวของความขาว催化ทั้งหมดทำให้ต้องกำหนด Boundary condition ที่คำแนะนำในตาราง催化ทั้งคอนกรีต เหล็กเสริม และแผ่น FRP โดยยอนให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะแนวตั้ง (แกน Y) ส่วนที่คำแนะนำจุดรองรับ (Support) กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (แกน Y และ แกน X)

ถ้าหากพิจารณาลักษณะของการเสริมเหล็กและการให้น้ำหนักพบว่าสามารถใช้คุณสมบัติของความสมมาตรในการสร้างแบบจำลองของ催化เพียงครั้งเดียวเพื่อช่วยประยุกต์เวลาในการคำนวณ อนึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีคุณสมบัติแบบไรีเชิงเส้น (non – linear) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นแบบจำลองในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแบบ 2 มิติ

การวิเคราะห์ผลจะใช้เวฟเลทในการวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องของกราฟการแปรผันด้วยของแบบจำลองไฟไนท์อิเดียนท์ เพื่อจะระบุตำแหน่งที่เกิดการเสียหายซึ่งการแปลงเวฟเลทเป็นฟังก์ชันหนึ่งของ Matlab



(ก) แสดงเฉพาะเหล็กเสริม



(ข) แสดงแบบจำลองแบบสมบูรณ์

รูปที่ 3.26 แบบจำลองของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 3.25 แสดงแบบจำลองของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม ABAQUS
6.5-1 โดยที่ Element ที่ใช้ในแบบจำลอง

3.5.1 คุณสมบัติของ Element ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงชนิดของ Element ที่ใช้ในแบบจำลองของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Material	Description	Code	Additional information
Concrete	Four-noded plain strain	CPE4R	Reduced integration
Steel	Two-noded truss	T2D2	Embedded
Adhesion	Four-noded cohesive element	COH2D4	-
FRP	Two-noded beam	B21	-

● คุณสมบัติของ Element

Element ชนิด CPE4R ใช้ในการจำลองงานคอนกรีตเนื่องจาก element นี้เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะจำลองงานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ 2 มิติ และ element ชนิดนี้เป็น plane strain element โดยคำนึงถึงค่าอัตราส่วนปัวส์ของและค่าความเครียดที่ทำให้ทราบถึงการวินิจฉัยของงานคอนกรีต

Element ชนิด T2D2 ใช้ในการจำลองเหล็กเสริมเนื่องจาก element นี้ มีพฤติกรรมเหมือนเหล็กเสริมสามารถรับแรงดึงหรือแรงตามแกนคล้ายกับโครงถัก (Truss)

Element ชนิด COH2D4 ใช้ในการจำลองการที่ยึดระหว่างแผ่น FRP ซึ่ง COH2D4 เป็น element ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด คือชั้นบาง ๆ คล้าย กาว หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความหนาน้อบมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นงาน ซึ่งเมื่อ element ชนิดนี้ ได้รับแรงกระแทกจะสามารถคำนวณหาจุดเริ่มต้นของความเสียหายใน element การขยายตัวของ ความเสียหาย (propagation of damage) จะกระทำการทั่วไป

Element ชนิด B21 ใช้จำลองแผ่น FRP ที่มีพฤติกรรมคล้าย element ชนิด T2D2 ซึ่งรับแรงดึง แต่ element ชนิด B21 จะคำนึงถึงพฤติกรรมของแผ่น FRP กับภาวะภายใต้แรงดึงที่เกิดขึ้นกับงาน คอนกรีตเสริมเหล็ก

ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ เทคนิคการจำลองปฏิสัมพันธ์ของการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว ของแผ่น FRP กับพื้นผิวของคอนกรีต โดยใช้ cohesive element การใส่น้ำหนัก และขั้นตอนการ วิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังนี้

3.5.2 พฤติกรรมของวัสดุ (Material constitutive behavior)

- แบบจำลองคานคอนกรีต (Concrete model)

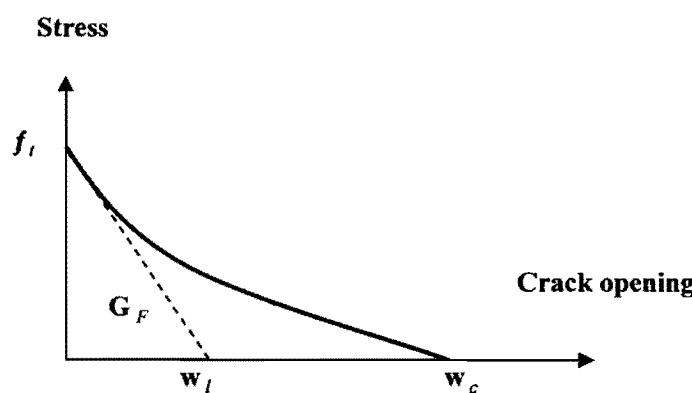
การจำลองพฤติกรรมการแตกคร้ำของคานคอนกรีตในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Plastic-damage model ที่มีอยู่ในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีต โดย Plastic-damage model นี้ จะสมมติให้ค่าแรงอัดที่ทำให้คอนกรีตแตก (compressive crushing) และค่าแรงดึงที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าว (tensile crushing) เป็น 2 กลไกหลักของการทำให้คานคอนกรีต วินาศิโดยการเกิดกลไกทั้ง 2 เป็นผลมาจากการแตกขนาดเล็ก (micro cracking) สำหรับรายละเอียดของตัวแปรที่จำเป็นสำหรับ Plastic-damage model สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เส้น softening curve สำหรับคานคอนกรีตภายใต้แรงดึง (รูปที่ 3.26)

โดยที่ค่า f_c , คือค่าหน่วยแรงที่ควบคุมการเกิดรอยแตกขนาดเล็กในคอนกรีต

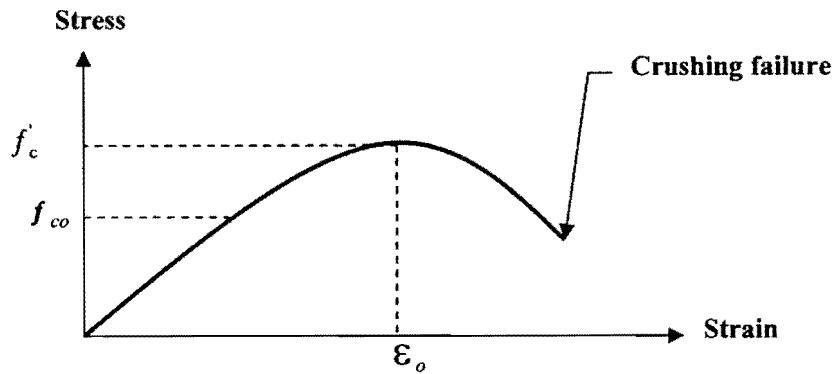
G_F คือค่าพลังงานจากภายนอกที่จะทำให้เกิดรอยแตกและการขยายตัวของรอยแตก

w คือขนาดของรอยแตก



รูปที่ 3.27 คุณสมบัติของคานคอนกรีตภายใต้แรงดึง

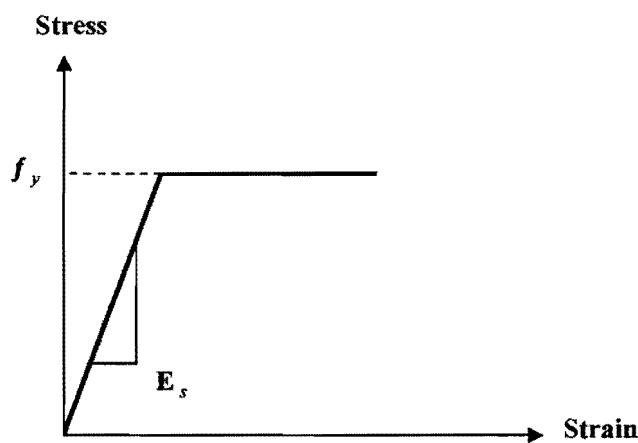
2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคานคอนกรีตภายใต้แรงอัด (รูปที่ 3.27) เมื่อ E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $f_{c\infty}$ คือค่าหน่วยแรงอัดวินิพติ ($f_{c\infty} \sim 0.6 - 0.8 f'_c$) f'_c คือค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.28 คุณสมบัติของคอนกรีตภายใต้แรงอัด

- แบบจำลองเหล็กเสริม (Steel model)

การจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมจะสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นแบบ elastic perfectly plastic (ดูรูปที่ 3.28) โดยเหล็กเมื่อได้รับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแบบ elastic จนกระทั่งถึงจุด yield หลังจากนั้นเหล็กจะเกิดการคราภายใต้แรงกระทำที่คงที่ ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองเหล็กเสริมคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_s), อัตราส่วนปัวส์ซอง (V), และหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (f_y)



รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความเครียดของเหล็กเสริม

3.5.3 ขั้นตอนการใส่น้ำหนักและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

สำหรับการใส่น้ำหนักที่กระทำในแบบจำลองนั้นได้กระทำโดยมีระบบการแอนตัว เป็นตัวควบคุมน้ำหนักที่กระทำสูงสุด (Displacement control) เช่นเดียวกับที่กระทำจริงในการทดลอง โดยในการเพิ่มระบบการแอนตัวจะเพิ่มแบบคงที่จนกระทั่งระบบการแอนตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระบบการแอนตัว และรูปแบบการวินวัดของคานทดสอบแต่ละกรณี

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP สำหรับข้อมูลของคานที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปริญญาในพันธุ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงจากบทความที่มีผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ซึ่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP ที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างคานที่ได้ทำการสร้างจำลองขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบการศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากบทความที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกประลักษณ์ (ultimate load) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแย่นด้วยที่กึ่งกลางคาน (load-mid-span deflection relationship) และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของคานแต่ละชนิดซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้ทำการขยายผลการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาในการที่จะศึกษาและวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP ทั้งนี้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 ข้อมูลบางส่วนได้จากการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้หลักการในการจำลองแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ซึ่งในตารางที่ 4.1 เพื่อจะได้ใช้เป็นข้อมูลในการหาความสัมพันธ์ในกรณีต่างๆ เพื่อที่จะใช้สอบเทียบกระบวนการที่นำเสนอว่ามีความสมบูรณ์และถูกต้อง

4.2 ข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมนี้จะมีรายละเอียดต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งตารางข้อมูลนี้จะบอกถึงคุณสมบัติต่างๆ ของแบบคานจำลองและแผ่น FRP ที่ใช้ในการทดสอบ โดยแบบคานจำลองนั้นมีอยู่ 4 รูปแบบใหญ่ๆ ซึ่งแต่ละรูปแบบของคานจำลองจะมีขนาดความยาว ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม ขนาดของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความหนา ความกว้าง ความยาวของแผ่น FRP และค่าหน่วยวัดแรงอัด หน่วยแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งข้อมูลของแบบคานจำลองทั้ง 37 ตัวอย่างในตารางที่ 4.1 นี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมABAQUS6.5-1 และตรวจขึ้นความถูกต้องกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎี ซึ่งได้สรุปผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลแบบจำลองที่ใช้สร้างในโปรแกรม

Beam width (mm)	Beam depth (mm)	Beam length (mm)	FRP Width (mm)	FRP Thickness (mm)	Diameter(mm) ของหลักเกรริม รูปแบนต์	Diameter(mm) ของหลักเกรริม รูปวงอัลติ	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	E_f (GPa)
A1 200	200	2000	1700	150	0.15	2-14	33	2.6	25	200	167
A2 200	200	2000	1700	150	0.30	2-14	33	2.6	25	200	167
A3 200	200	2000	1700	150	1.3	2-14	33	2.6	25	200	167
A5 200	200	2000	1700	150	2.6	2-14	33	2.6	25	200	167
A6 200	200	2000	1700	150	0.5	2-14	33	2.6	25	200	167
A7 200	200	2000	1200	150	0.15	2-14	33	2.6	25	200	167
A8 200	200	2000	1200	150	0.3	2-14	33	2.6	25	200	167
A9 200	200	2000	1200	150	1.3	2-14	33	2.6	25	200	167
A10 200	200	2000	1200	150	2.6	2-14	33	2.6	25	200	167
A11 200	200	2000	1200	150	0.5	2-14	33	2.6	25	200	167
A12 200	200	2000	1400	150	0.15	2-14	33	2.6	25	200	167
A13 200	200	2000	1400	150	0.5	2-14	33	2.6	25	200	167
A14 200	200	2000	1400	150	0.3	2-14	33	2.6	25	200	167

ตารางที่ 4.1 เศรษฐกิจของประเทศไทยสำหรับปี 2550

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลแบบจำลองที่ใช้สร้างในโปรแกรม

Beam	Beam width (mm)	Beam depth (mm)	Beam length (mm)	FRP Width (mm)	FRP Length (mm)	FRP Thickness (mm)	Diameter(mm) ของเหล็กเสริม รูปวงกลม	Diameter(mm) ของเหล็กเสริม รูปแบนชั้ด	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	E_f (GPa)
Trian-4	76	127	1350	1070	63.2	0.65	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-8	76	127	1350	1070	63.9	1.9	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-9	76	127	1350	1070	60.5	0.2	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-10	76	127	1350	1070	60.5	0.65	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-11	76	127	1350	1070	60.5	0.9	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-12	76	127	1350	1070	60.5	1.9	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-13	76	127	1350	1070	60.5	0.2	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-15	76	127	1350	1070	60.5	0.9	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186
Trian-16	76	127	1350	1070	60.5	1.9	2-4.6	-	44.7	3.5	31.6	200	186

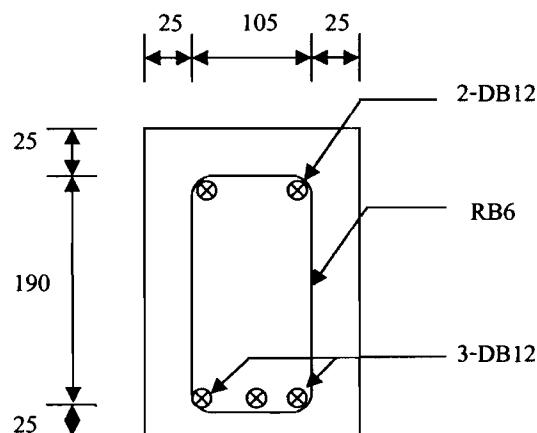
4.3 การตรวจสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.3.1 กรณีศึกษาคานตัวอย่างของ Fanning และ Kelly

จากข้อมูลกรณีศึกษาตัวอย่างของ Fanning และ Kelly [9] คานที่ใช้ในการทดสอบมีความยาวเท่ากับ 3.00 เมตร และมีขนาดหน้าตัด $0.155 \text{ เมตร} \times 0.240 \text{ เมตร}$ โดยความแตกต่างของแบบคานจำลองนั้นคือความหนา ความกว้างและความยาวของแผ่น FRP ดังตัวอย่างต่อไปนี้

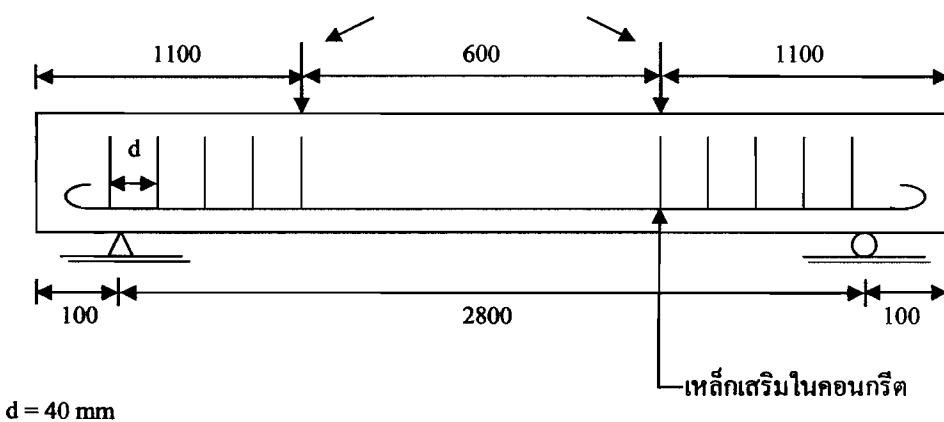
- คาน KF-B1

คาน KF-B1 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ขนาดหน้าตัดลักษณะเหล็กเสริมและการให้น้ำหนักจะมีลักษณะเป็นแบบ two-point load ดังแสดงในรูปที่ 4.1



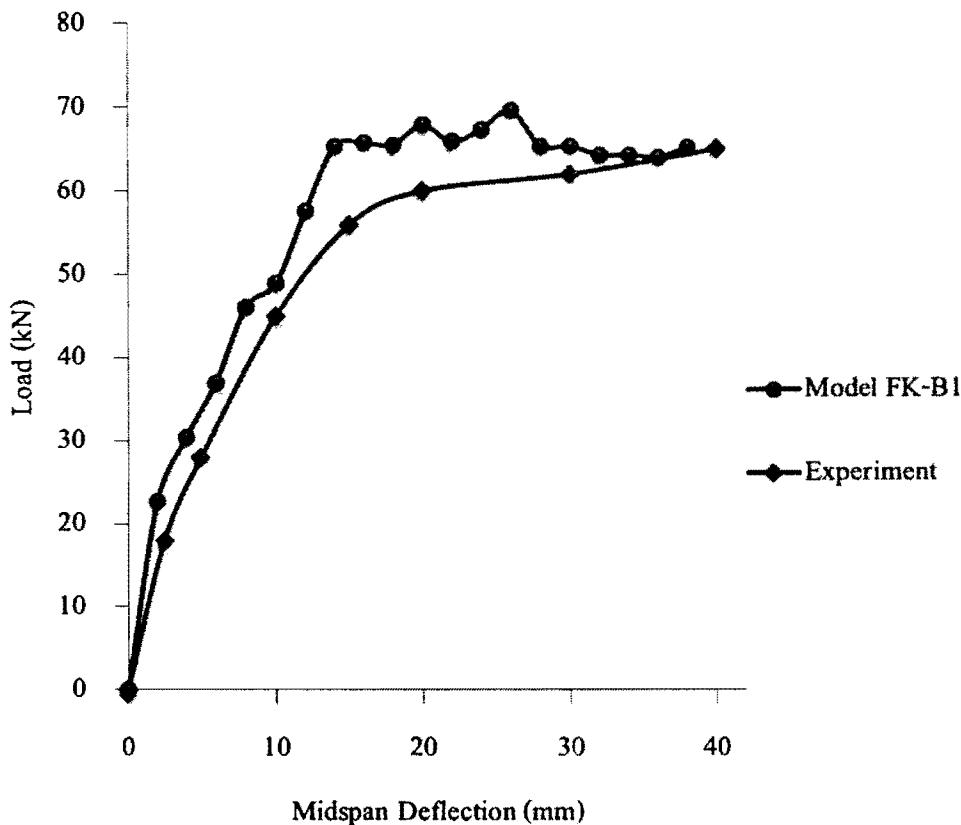
รายละเอียดทั้งหมดอยู่ในหน่วยของมิลลิเมตร

ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ



รูปที่ 4.1 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B1) [4]

เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 เพื่อหาน้ำหนักสูงสุดและการแอ่นตัวสูงสุดของคานแล้วได้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2

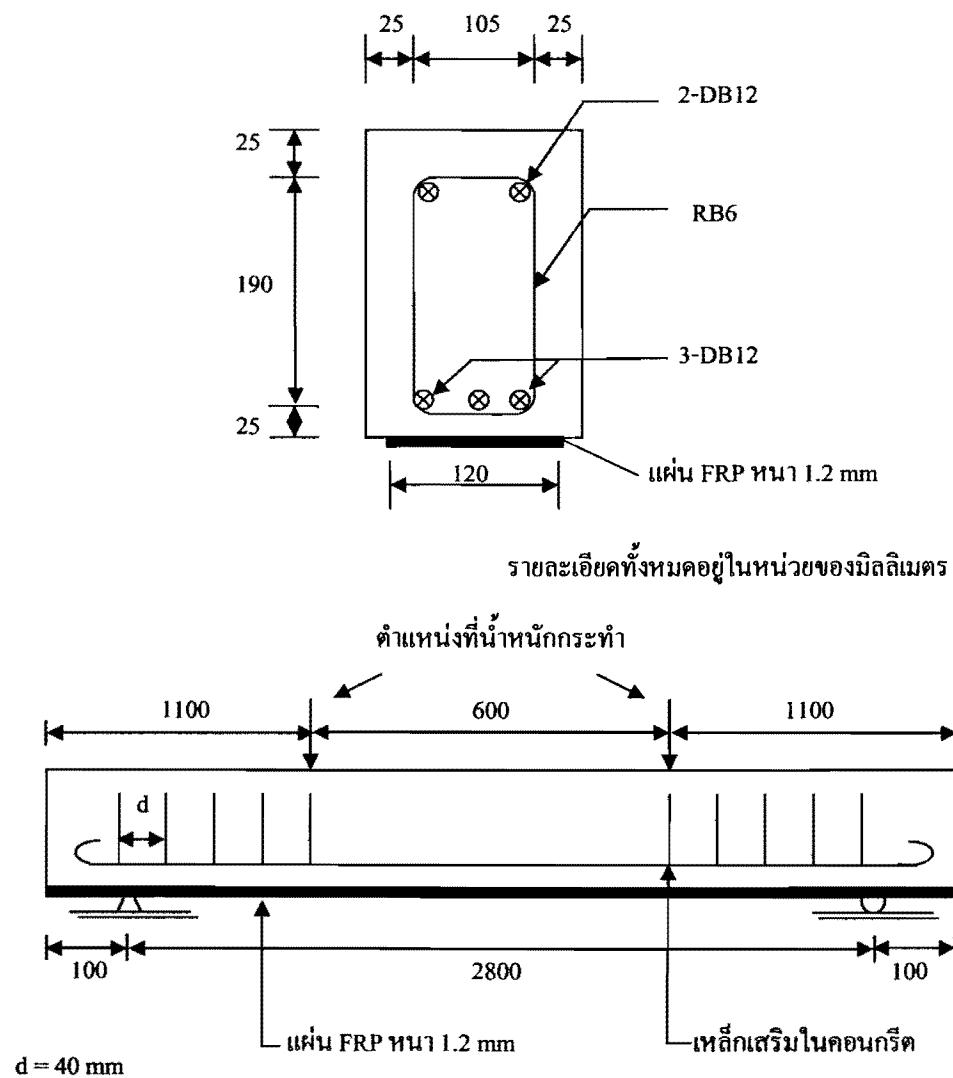


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแอ่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคาน FK-B1 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

พิจารณากราฟที่ 4.2 พบว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแอ่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคาน FK-B1 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 สองค่าลักษณะเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกัน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแบบจำลองคาน FK-B1 มีค่าเท่ากับ 70 kN เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 66 kN จะมีความแตกต่างกันประมาณ 6% และคงว่าแบบจำลองมีความถูกต้องในการทำนายน้ำหนักบรรทุกประกอบด้วย FRP ดังนั้นการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง

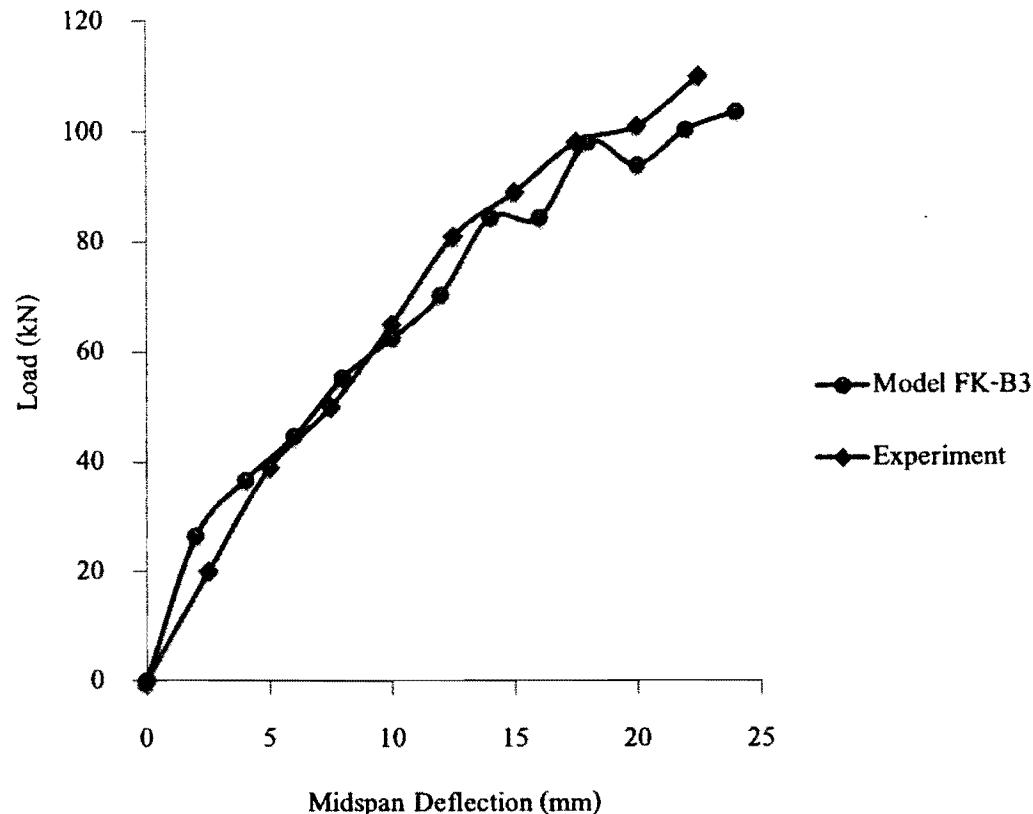
- คาน FK-B3

คาน FK-B3 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ที่มีขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตรและความยาวต่อกันของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดลักษณะเหล็กเสริมและการให้น้ำหนักจะมีลักษณะเป็นแบบ two-point load ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B3) [4]

เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 เพื่อหาน้ำหนักสูงสุดและการแยกตัวสูงสุดของคานแล้วได้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.4

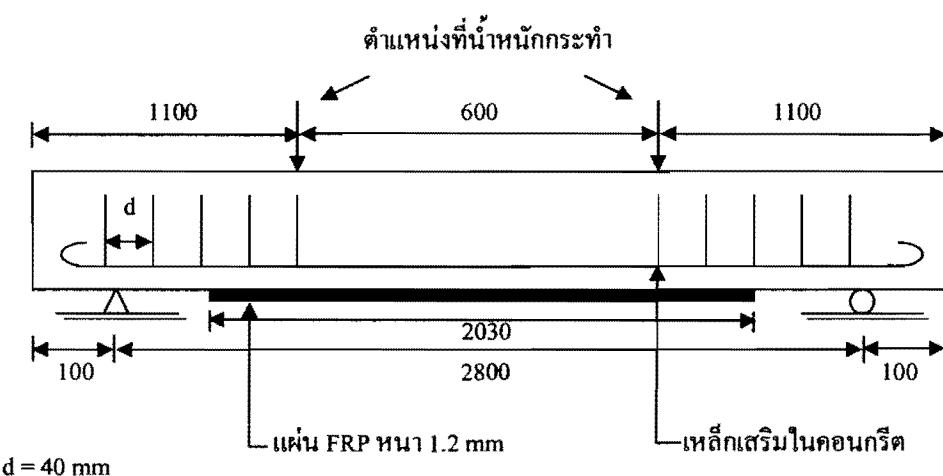
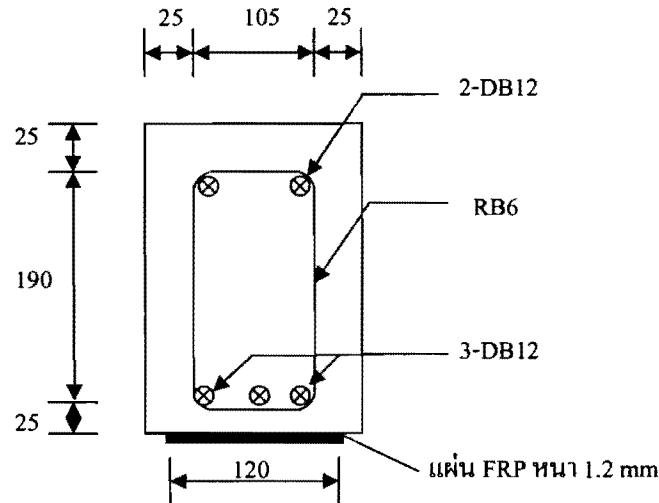


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคานFK-B3 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

พิจารณากราฟที่ 4.4 พบร่วมกับความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคานFK-B3 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 สอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกัน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแบบจำลองคานFK-B3 มีค่าเท่ากับ 113 kN เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 110 kN ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณ 2.7% และคงว่าแบบจำลองมีความถูกต้องในการทำนายน้ำหนักบรรทุกประดับของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ดังนั้นการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง

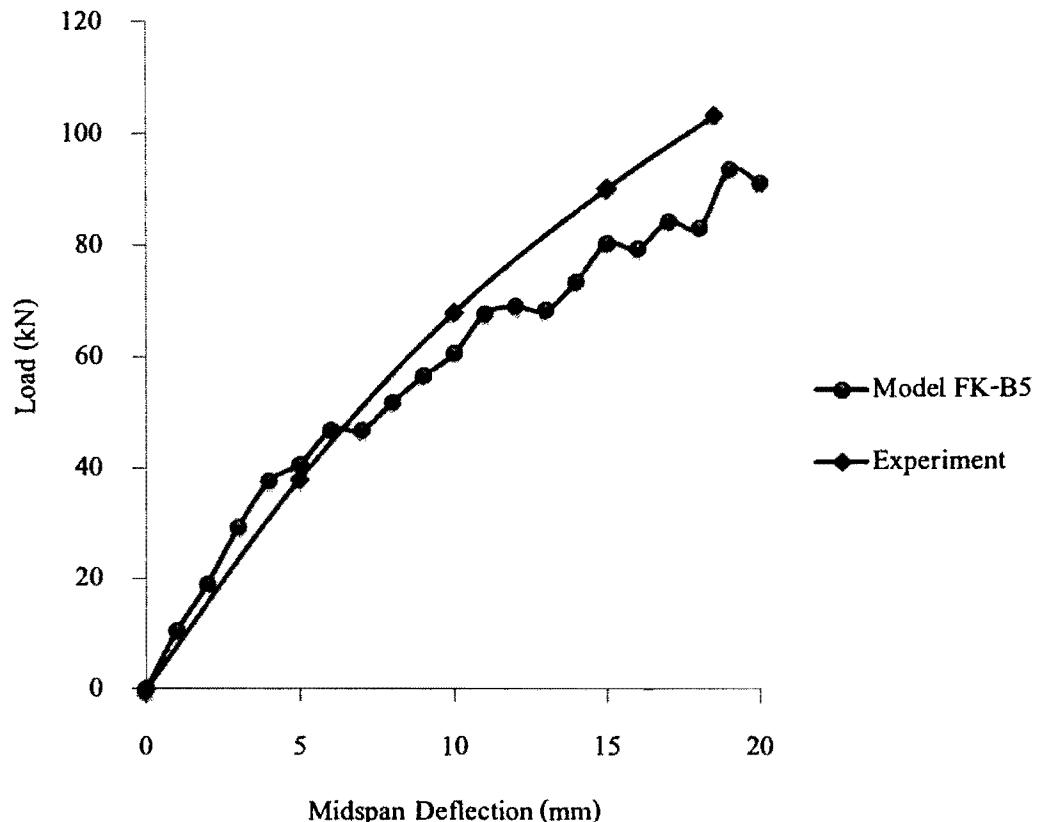
- คาน FK-B5

คาน FK-B5 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ที่มีขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตรและความยาว 2030 มิลลิเมตรขนาดหน้าตัดลักษณะเหล็กเสริมและการให้น้ำหนักจะมีลักษณะเป็นแบบ two-point load ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FK-B5) [4]

เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS 6.5-1 เพื่อหาหน้าแนกสูงสุดและการแยกตัวสูงสุดของคานแล้วได้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคานFK-B5 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1

พิจารณากราฟที่ 4.6 พบว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการแย่นตัวที่กลางคานระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคานFK-B5 โดยโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 สอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกัน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแบบจำลองคานFK-B5 มีค่าเท่ากับ 94 kN เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 102 kN จะมีความแตกต่างกันประมาณ 7.8% และแสดงว่าแบบจำลองมีความถูกต้องในการทำนายน้ำหนักบรรทุกประลักษณ์ของคานค่อนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ดังนั้นการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง

4.4 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง

จากการศึกษาแบบจำลองทั้ง 3 แบบ จะเห็นได้ว่าการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง เพราะในการศึกษาแบบจำลองได้นำผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการซึ่งผลการทดลองได้มีการติดตั้งในบทความที่ได้ทำการศึกษา เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้วผลที่ได้จากโปรแกรมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันพอสมควรกับผลของการทดลองจริง ไม่ว่าจะเป็นการเอ่นตัวและน้ำหนักกระทำสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP คุณสมบัติของแผ่น FRP ไม่ว่าจะเป็นความหนา ความกว้างและความยาวของแผ่น FRP ก็มีผลต่อการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP จะรับน้ำหนักได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP ดังนั้นจึงศึกษาแบบจำลองที่มีคุณสมบัติของแผ่น FRP และลักษณะแตกต่างกันออกไป เพื่อจะนำไปเป็นข้อมูลทางสถิติในการศึกษาจุดที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการศึกษาได้ทำการสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งตารางนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมในแต่ละแบบด้วยย่าง 39 แบบ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ศึกษาจากบทความว่ามีความแตกต่างกันเท่าใด ผลที่ได้จากโปรแกรมมีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้หรือไม่

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองพื้นที่ยกเว้นการทดสอบกรณีเปลี่ยนแปลงความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	ฉัตราน้ำหนัก FRP/Beam	ฉัตราน้ำหนัก FRP/Beam	P^{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error P^{cal} กับ P^{exp}	% เหลือกต่ำสุด
A1	0.15	0.30	0.75	0.85	-	108.88	102.86	5.53	1.40%
	0.20						102.86	5.53	
A2	0.30	0.30	0.75	0.85	-	110.35	110.29	0.05	1.40%
	0.20						108.79	1.41	
A3	1.30	0.30	0.75	0.85	106	113.66	99.89	12.12	1.40%
	0.20						94.78	16.61	
A5	2.60	0.30	0.75	0.85	84	96.65	99.4	2.85	1.40%
	0.20						98.1	1.5	
A6	0.50	0.30	0.75	0.85	-	112.77	112.79	0.02	1.40%
	0.20						113.71	0.83	
A7	0.15	0.30	0.75	0.6	-	108.88	98.19	9.82	1.40%
	0.20						100.60	7.6	

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์แบบจำลองพื้นที่ยกกำกับการทดสอบ กรณีเปลี่ยนแปลงความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	P^{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error $P^{\text{cal}}/P^{\text{exp}}$	% เหลือ剩ริม
A8	0.30	0.30	0.75	0.6	-	103.18	98.33	4.7	1.40%
A9	1.30	0.30	0.75	0.6	-	106.56	97.77	5.24	
A10	2.60	0.30	0.75	0.6	-	106.31	92.19	13.49	1.40%
A11	0.50	0.30	0.75	0.6	-	105.25	89.94	15.60	
A12	0.15	0.30	0.75	0.7	-	101.63	91.87	13.58	1.40%
A13	0.50	0.30	0.75	0.7	-	105.25	100.22	4.78	1.40%
							101.11	3.93	

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ขึ้นกับการทดสอบ การเพิ่มปริมาณเปลี่ยนแปลงความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วน ตัวนำไฟฟ้า FRP/Beam	อัตราส่วน ตัวนำไฟฟ้า FRP/Beam	P_{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error P^{cal} ถูก P^{exp}	% เหลือเชื่อม
A14	0.30	0.30	0.75	0.7	-	103.18	103.28	0.10	1.40%
	0.20	0.20	0.75	0.7	-	100.29	104.26	1.05	
A15	1.30	0.30	0.75	0.7	-	96.48	98.49	3.8	1.40%
	0.20	0.20	0.75	0.7	-	99.42	91.93	1.79	
A16	2.60	0.30	0.75	0.7	-	112.57	111.68	18.34	1.40%
	0.20	0.20	0.75	0.7	-	99.42	91.93	11.68	
T1	0.11	0.30	0.50	0.6	73.2	89.69	77.32	13.79	2.80%
	0.10	0.10	0.50	0.6	80.7	90.68	79.90	10.92	
T2	0.22	0.30	0.50	0.6	86.4	92.66	82.57	8.94	2.80%
	0.10	0.10	0.50	0.6	83.82	83.82	83.82	7.57	
T4	0.44	0.30	0.50	0.6	81.28	82.83	82.83	10.61	2.80%
	0.30	0.30	0.50	0.6	86.4	92.66	86.4	12.28	

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองพิเศษกับการทดสอบ การณ์กีร์ชตามหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วนความกว้าง FRP/ตัววัด	P^{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error $P^{\text{cal}} \text{ กับ } P^{\text{exp}}$	% เหลือเฟอร์ม	
T6	0.66	0.10	0.30	0.50	0.6	86.3	94.65	89.83	5.09	2.80%
T7	1.50	0.10	0.30	0.50	0.6	-	92.15	81.74	13.64	2.80%
T8	2.00	0.10	0.30	0.50	0.6	-	80.26	80.49	12.38	2.80%
MB2	0.11	0.10	0.30	1.00	0.8	72	76.70	76.71	4.42	2.80%
MB3	0.22	0.10	0.30	1.00	0.8	86	88.13	80.44	8.73	2.10%
MB4	0.33	0.10	0.30	1.00	0.8	82	89.39	84.01	6.02	2.10%

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองที่บันทึกนับการทดสอบ กรณีเปลี่ยนแปลงความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	ชั้นร้าส่วน ความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วน ความกว้าง FRP/Beam	P^{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error P^{cal} กับ P^{exp}	% เหลือเฟอร์ริม
MB5	0.44	0.30	1.00	0.8	79	82.58	78.01	5.53	2.10%
MB6	1.50	0.30	1.00	0.8	-	83.45	80.96	2.98	4.12
MB7	2.00	0.30	1.00	0.8	-	88.97	82.64	7.11	2.10%
Trian-3	0.20	0.30	0.80	0.79	17.27	19.37	19.49	8.72	1.24%
Trian-4	0.65	0.30	0.83	0.79	25.59	22.56	18.45	18.22	1.24%
Trian-8	1.90	0.30	0.84	0.79	-	22.7	18.2	19.82	1.24%
		0.10					20.27	10.7	

ตารางที่ 4.2 สรุปผลวิเคราะห์ทางเบนช์มาดของพื้นที่ยกน้ำหนักของหัวตอกของโครงสร้าง การณ์เปรียบเทียบความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	P_{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error P^{cal} กับ P^{exp}	% เหลือเฟอร์ม
Trian-9	0.20	0.30	0.80	0.7	-	15.50	17.45	12.58	1.24%
Trian-10	0.65	0.30	0.83	0.7	-	18.05	20.05	11.08	1.24%
Trian-11	0.90	0.30	0.83	0.7	-	21.94	17.74	19.14	1.24%
Trian-12	1.90	0.30	0.84	0.7	-	24.97	20.13	19.38	1.24%
Trian-13	0.20	0.30	1.00	0.79	-	15.77	19.57	24.1	1.24%
Trian-15	0.90	0.30	1.00	0.79	-	20.41	21.23	4.02	1.24%

ตารางที่ 4.2 ศักยภาพวิเคราะห์จากแบบจำลองพิเศษกับการทดสอบ กรณีถี่บ่นแบ่งความหนา Adhesive Thickness

Beam	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วนความยาว FRP/Beam	P^{exp} (kN)	P^{cal} (kN)	P^{model} (kN)	% Error P^{cal} กับ P^{exp}	% เหลือเชื่อม
Tian-16	1.90	0.30	1.00	0.79	-	26.84	21.73	19.04	1.24%
		0.10				16.74	37.63		

ตารางที่ 4.3 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองเบรียบแกนที่บันทึกการทดสอบ

Model	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	ผู้ติดต่อส่วน FRP/Beam	ความกว้าง FRP/Beam	ผู้ติดต่อส่วน FRP	P_{cal} (kN)	P^{exp} (kN)	P^{ctrp} (kN)	P^{exp} (kN)
A1	0.15	0.30	0.75	0.85	-	108.88	102.86	95.23	88.25
A2	0.30	0.30	0.75	0.85	-	110.35	110.29	101.22	90.25
A3	1.30	0.30	0.75	0.85	106	113.66	99.89	109.71	109.89
A5	2.60	0.30	0.75	0.85	84	96.65	99.4	96.21	119.47
A6	0.50	0.30	0.75	0.85	-	112.77	112.79	108.18	97.27
A7	0.15	0.30	0.75	0.6	-	108.88	98.19	92.95	86.79
A8	0.30	0.30	0.75	0.6	-	103.18	98.33	100.26	94.18
A9	1.30	0.30	0.75	0.6	-	106.56	92.19	96.05	95.55
A10	2.60	0.30	0.75	0.6	-	106.31	91.87	91.83	91.85
A11	0.50	0.30	0.75	0.6	-	105.25	95.45	99.40	93.81
A12	0.15	0.30	0.75	0.7	-	101.63	100.02	94.35	88.36
A13	0.50	0.30	0.75	0.7	-	105.25	100.22	102.37	99.65
A14	0.30	0.30	0.75	0.7	-	103.18	103.28	103.62	92.27
A15	1.30	0.30	0.75	0.7	-	100.29	96.48	89.15	102.94

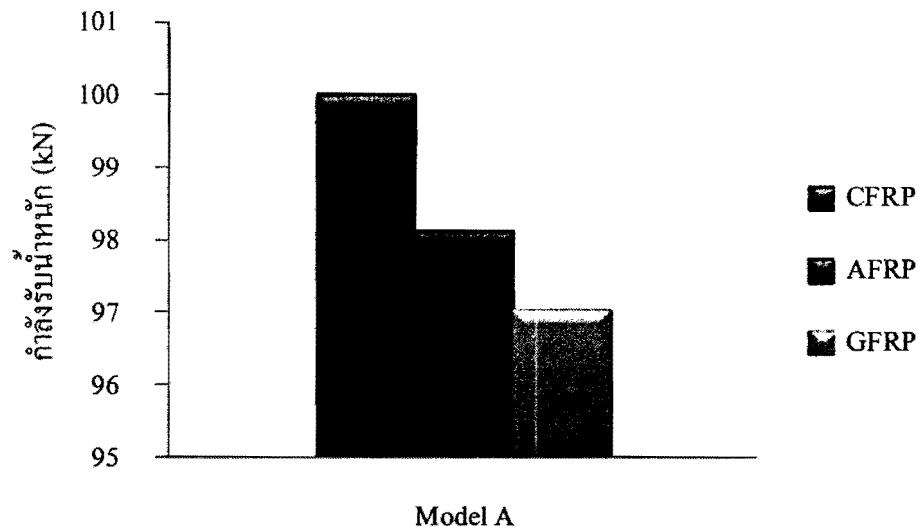
ตารางที่ 4.3 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองเรซิบงที่ขบกับผลการทดลอง

Model	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	ผัตราส่วน ความกว้าง FRP/Beam	ผัตราส่วน ความกว้าง FRP/Beam	P_{exp} (kN)	P_{cal} (kN)	P_{exp} (kN)	P_{cal} (kN)	P_{exp} (kN)
A16	2.60	0.30	0.75	0.7	-	112.57	99.42	91.79	105.39
T1	0.11	0.30	0.50	0.6	73.2	89.69	77.32	82.96	82.10
T2	0.22	0.30	0.50	0.6	80.7	90.68	82.57	79.88	75.86
T4	0.44	0.30	0.50	0.6	86.4	92.66	82.83	83.51	82.20
T6	0.66	0.30	0.50	0.6	86.3	94.65	89.83	79.52	79.35
T7	1.5	0.30	0.50	0.6	-	92.15	80.74	81.54	81.87
T8	2.00	0.30	0.50	0.6	-	80.26	76.71	81.48	78.79
MB2	0.11	0.30	1	0.8	72	76.70	78.00	58.87	56.19
MB3	0.22	0.30	1	0.8	86	88.13	87.28	87.16	89.45
MB4	0.33	0.30	1	0.8	82	89.39	84.01	77.04	85.00
MB5	0.44	0.30	1	0.8	79	82.58	78.01	78.87	73.36
MB6	1.50	0.30	1	0.8	-	83.45	80.96	88.17	87.69
MB7	2.00	0.30	1	0.8	-	88.97	82.64	80.85	73.19
Trian-3	0.20	0.30	0.80	0.79	17.27	19.37	21.06	19.50	19.13

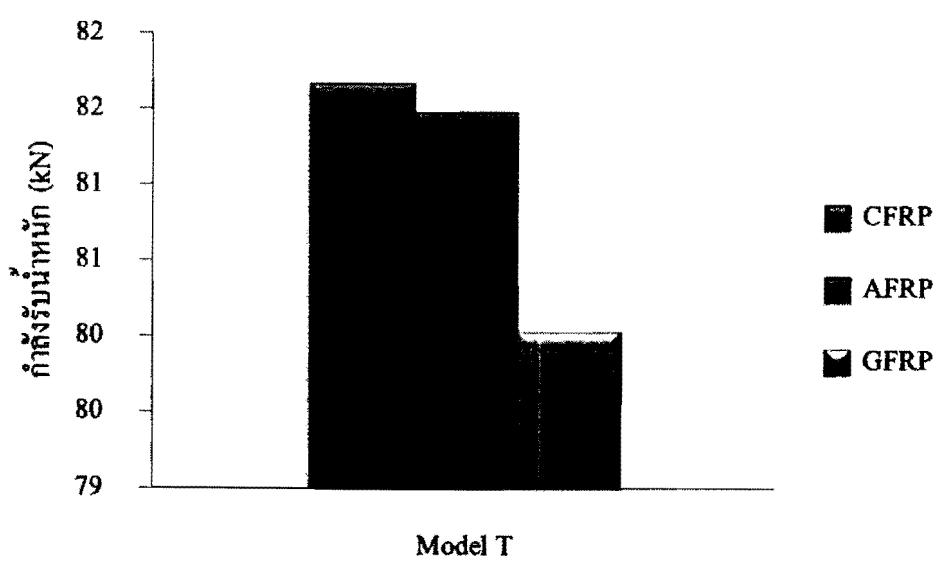
ตารางที่ 4.3 สรุปผลวิเคราะห์จากแบบจำลองปรีเซนเต้บีบผิดการทดสอบ

Model	FRP Thickness (mm)	Adhesive Thickness (mm)	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	อัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam	P_{exp} (kN)	P_{cal} (kN)	P_{frp} (kN)	P_{frp} (kN)
Trian-4	0.65	0.30	0.83	0.79	25.59	22.56	18.45	21.11
Trian-6	0.9	0.30	0.83	0.79	30.50	30.23	26.53	18.91
Trian-8	1.9	0.30	0.84	0.79	-	22.7	18.2	19.03
Trian-9	0.20	0.30	0.80	0.7	-	15.50	17.45	20.39
Trian-10	0.65	0.30	0.83	0.7	-	18.05	20.05	18.78
Trian-11	0.9	0.30	0.83	0.7	-	21.94	17.74	18.35
Trian-12	1.9	0.30	0.84	0.7	-	24.97	20.13	16.22
Trian-13	0.2	0.30	1	0.79	-	15.77	19.57	15.56
Trian-14	0.65	0.30	1	0.79	-	28.23	23.16	19.15
Trian-15	0.9	0.30	1	0.79	-	20.41	21.23	16.33
Trian-16	1.9	0.30	1	0.79	-	26.84	21.73	18.69

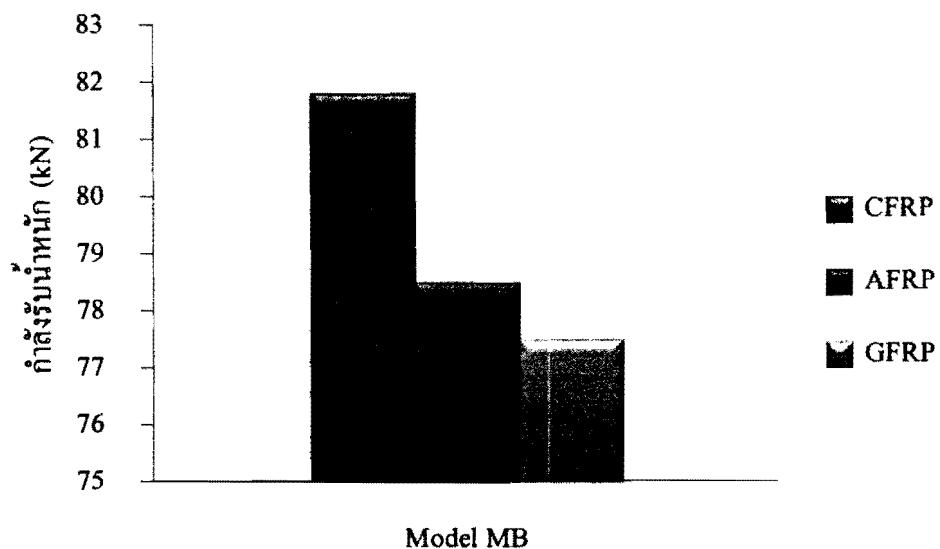
จากการศึกษาแบบจำลองทั้งหมด กำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยสตูคอมโพสิตแต่ละชนิด (CFRP, AFRP และ GFRP) สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



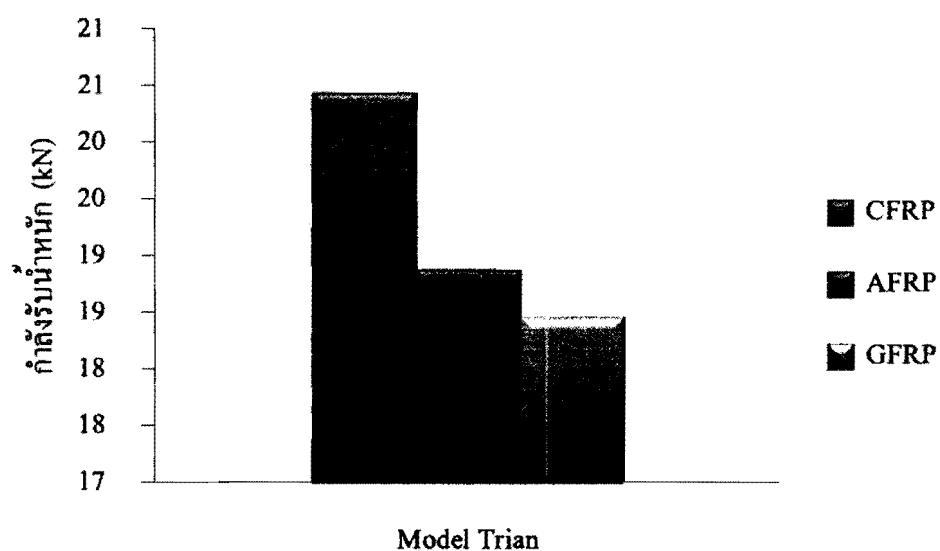
รูปที่ 4.7 ก



รูปที่ 4.7 ข



รูปที่ 4.7 ค



รูปที่ 4.7 ง

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของแบบจำลอง

จากรูปจะเห็นว่ากำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยสตุคตอนโพสิตชันนิค CFRP จะมีกำลังรับน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือ แบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยสตุคตอนโพสิตชันนิค AFRP และ GFRP ตามลำดับ

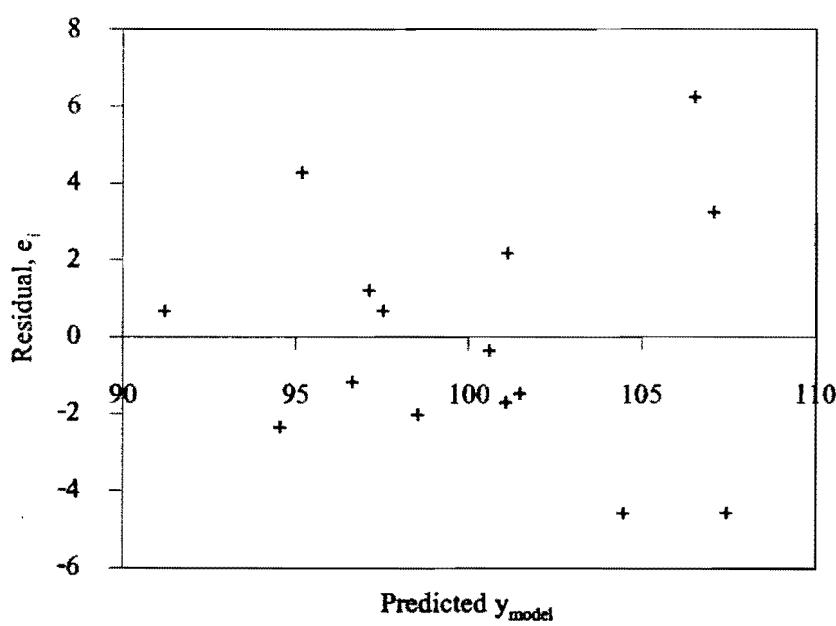
4.5. สรุปผลการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองการถดถอย

จากการศึกษาแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP, AFRP และ GFRP จะเห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกแตกต่างกันการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมเพื่อทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการนั้นมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถบอกถึงความเหมาะสมในการสร้างแบบจำลองได้ กล่าวคือไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าตัวแปรใดบ้างที่มีผลต่อการการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก การสร้างแบบจำลองการถดถอยมาวิเคราะห์แบบจำลองมีประโยชน์อย่างยิ่งในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยที่ y คือค่าการรับน้ำหนักบรรทุก, x_1 คือ FRP Thickness, x_2 คืออัตราส่วนความกว้าง FRP/Beam, x_3 คืออัตราส่วนความยาว FRP/Beam สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.5.1. การสร้างแบบจำลองการถดถอยที่เสริมกำลังด้วย "CFRP"

- คาน "A"

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้น สมการการถดถอย คือ $y = 74.14 - 2.59x_1 + 39.65x_3$

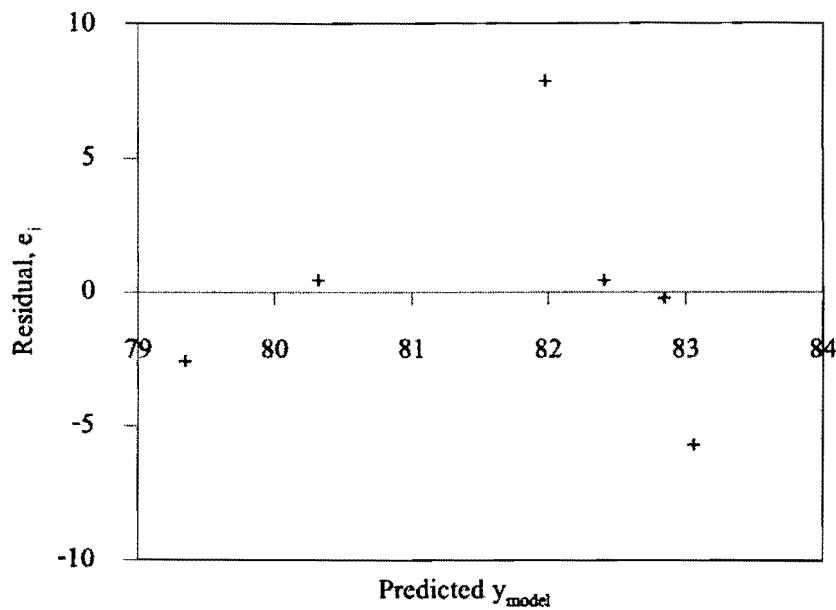


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลง (e) กับ การทำงานกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง A

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลง (e) กับ ค่าการท่านายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1, x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก(y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความบาง FRP/Beam (x_1) และทำการลดค่า FRP Thickness (x_3)

- คาน “T”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นสมการการลดด้อย คือ $y = 81.63 - 1.97x_1$

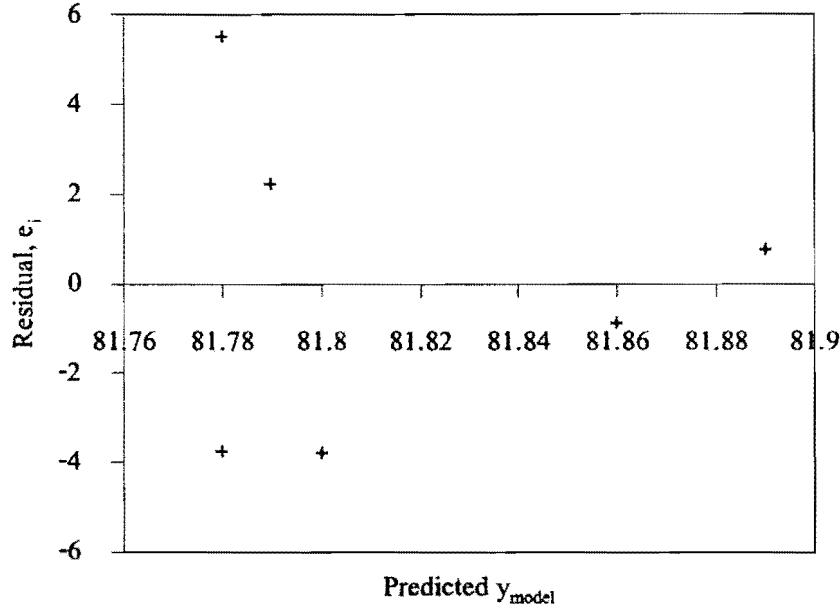


รูปที่ 4.9ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงกับ การท่านายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยCFRP ของแบบจำลอง T

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลง (e) กับ ค่าการท่านายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง T ที่คำนวณจากสมการ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก(y) จะมีมากขึ้นเมื่อทำการลดค่า FRP Thickness (x_1)

- คาน “MB”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่จำเป็นพิจารณาคั้งนั้นสมการการลดด้อย คือ $y = 81.77 + 0.062x_1$

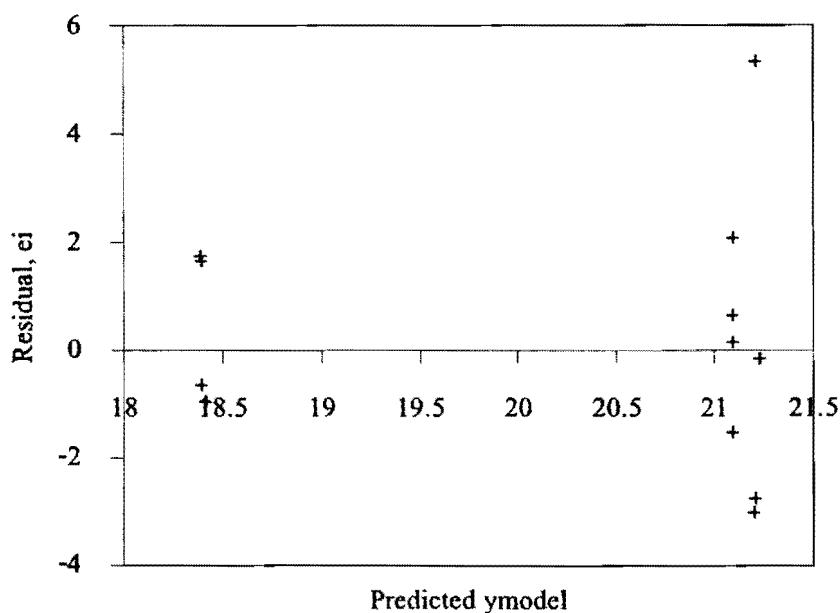


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ กับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP
ของแบบจำลอง MB

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง MB ที่คำนวณจากสมการ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่า FRP Thickness (x_1)

- คาน “Train”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_1 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่จำเป็นพิจารณาคั้งนั้นสมการการลดด้อย คือ $y = -2.96 - 0.67x_2 + 31.3x_3$



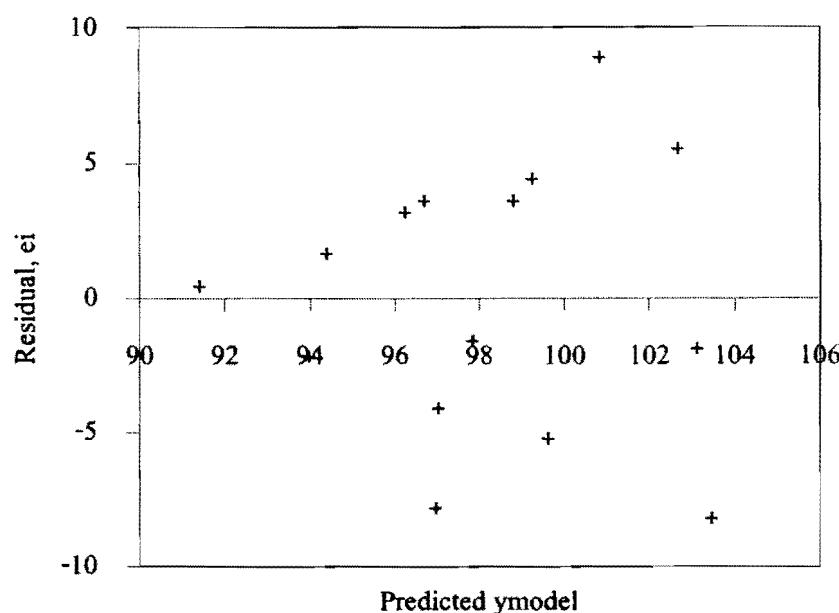
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง Trian

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักก (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริม กำลังด้วย CFRP ของแบบจำลอง Trian ที่คำนวณจากสมการ พบร่วมกับการกระจายตัวอย่างไม่เป็น รูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_2, x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วน ความขาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่าอัตราส่วนความกว้างFRP/Beam (x_2)

4.5.2. การสร้างแบบจำลองการลดด้อยที่เสริมกำลังด้วย”AFRP”

- คาน “A”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณา ตั้งแต่ สมการการลดด้อย ที่ $y = 81.98 - 2.3x_1 + 25.69x_3$

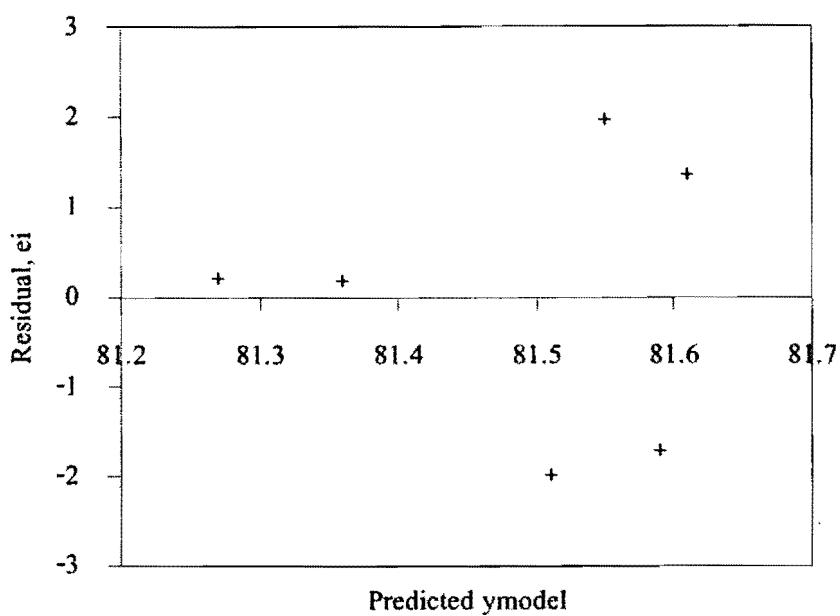


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลัก ค้าน กับ ค่าการท่านายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP ของแบบจำลอง A

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลัก (e) กับ ค่าการท่านายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยAFRP ของแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ พนวณว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1, x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่าFRP Thickness (x_1)

- คาน “T”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นสมการการถดถอย คือ $y = 81.63 - 0.18x_1$

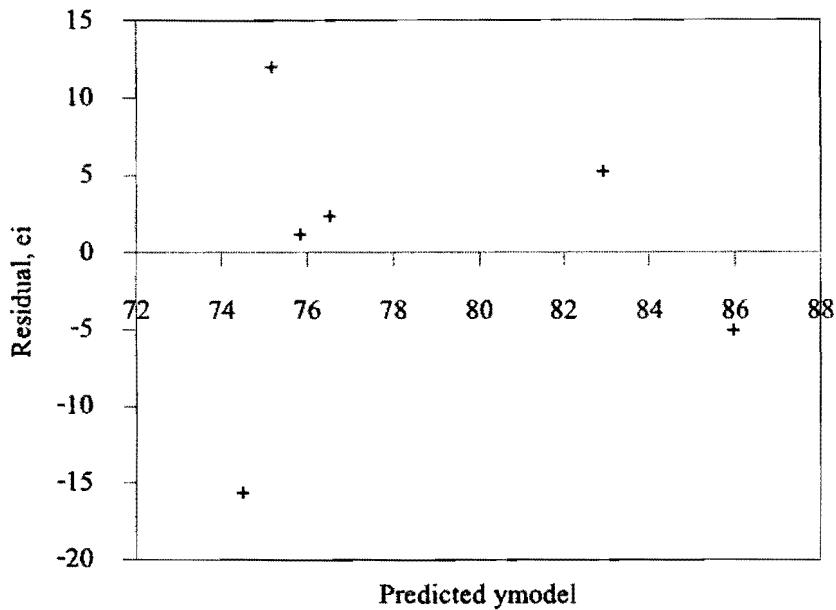


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP ของแบบจำลอง T

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลัก (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยAFRP ของแบบจำลอง T ที่คำนวณจากสมการ พบร่วมกับการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถอ่านได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อทำการลดค่า FRP Thickness (x_1)

- ค่าน “MB”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้น สมการการถดถอย คือ $y = 73.84 + 6.06x_1$

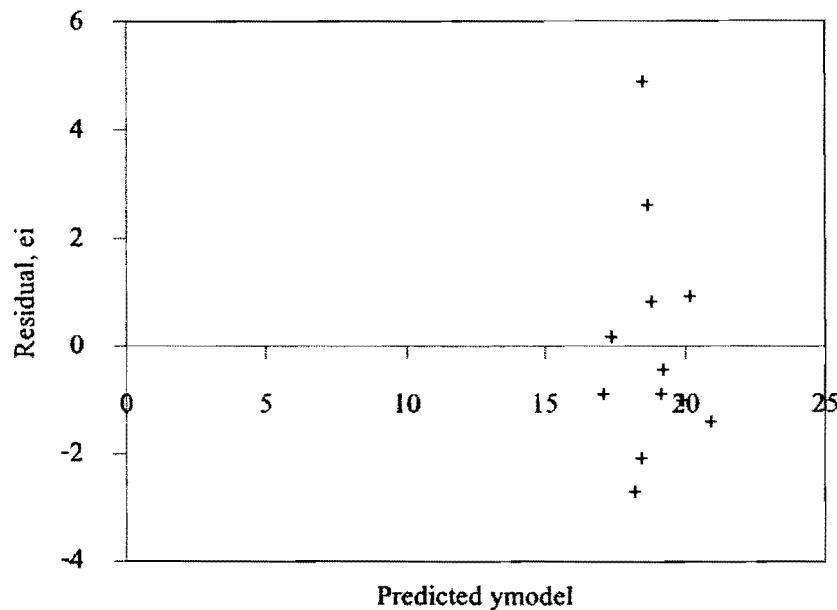


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงค้าง กับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP ของแบบจำลอง MB

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงค้าง (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยAFRP ของแบบจำลอง MB ที่คำนวณจากสมการ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักของ FRP Thickness (x_1)

- ค่าน “Train”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_1, x_2 และ x_3 มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน ดังนั้น สมการการตัดตอนคือ $y = 13.28 - 1.03x_1 - 8.84x_2 + 18.88x_3$



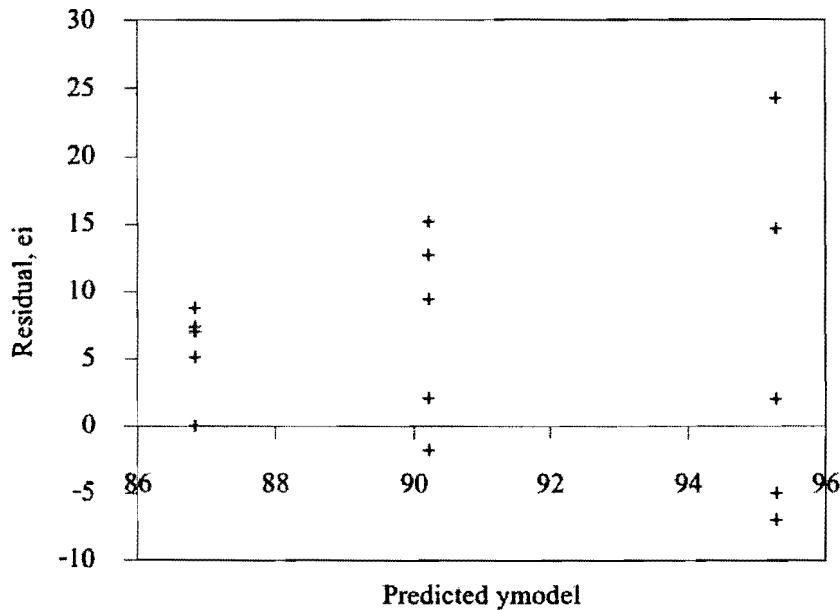
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ กับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP ของแบบจำลอง Train

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ (e_i) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยAFRP ของแบบจำลอง Train ที่คำนวณจากสมการ พ布ว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1, x_2, x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่าอัตราส่วนความกว้างFRP/Beam (x_2) กับค่า FRP Thickness (x_1)

4.5.3. การสร้างแบบจำลองการถดถอยที่เสริมกำลังด้วย"GFRP"

- งาน “A”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_1 และ x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของงาน จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นสมการการถดถอย คือ $y = 66.52 + 33.85x_3$

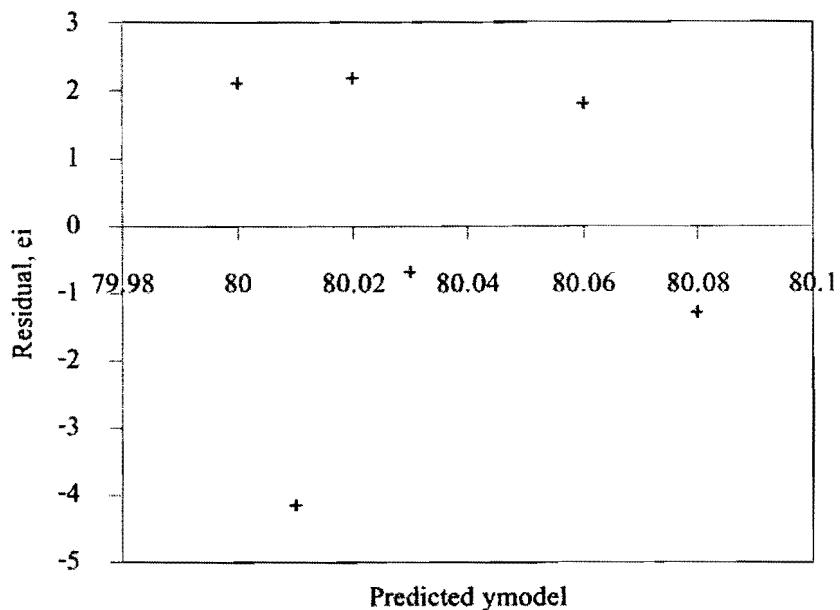


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP ของแบบจำลอง A

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลัก (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยGFRP ของแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ พนวณว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถอ่านได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาว FRP/Beam (x_3)

- ค่าน “T”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นสมการการคัดถอย คือ $y = 80 - 0.04x_1$

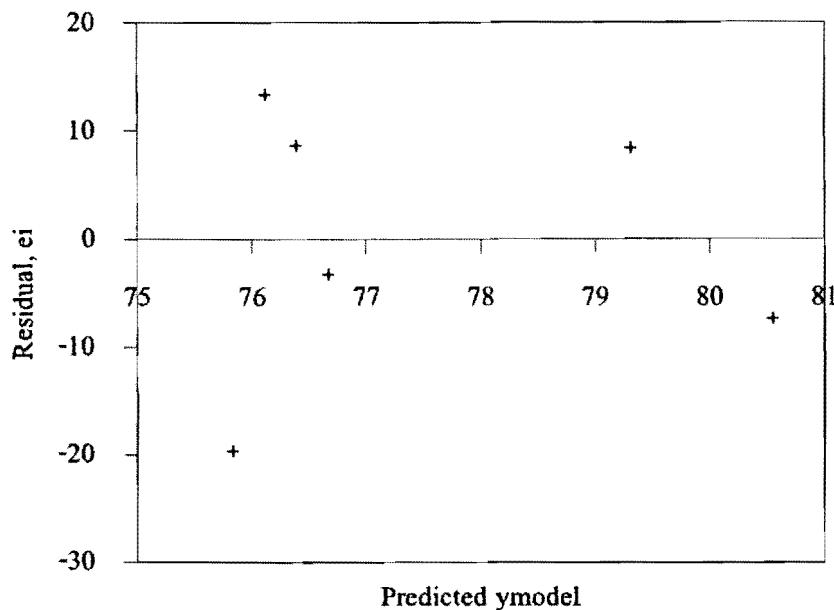


รูปที่ 4.17ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้างกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP
ของแบบจำลอง T

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกล้าง (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยGFRP ของแบบจำลอง T ที่คำนวณจากสมการ พบร่วมกับการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากการที่ได้สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อทำการลดค่า FRP Thickness (x_1)

- ค่าน “MB”

จากการทดสอบสมมติฐาน x_2 และ x_3 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นสมการการถดถอย ก็อ $y = 75.56 + 2.5x_1$

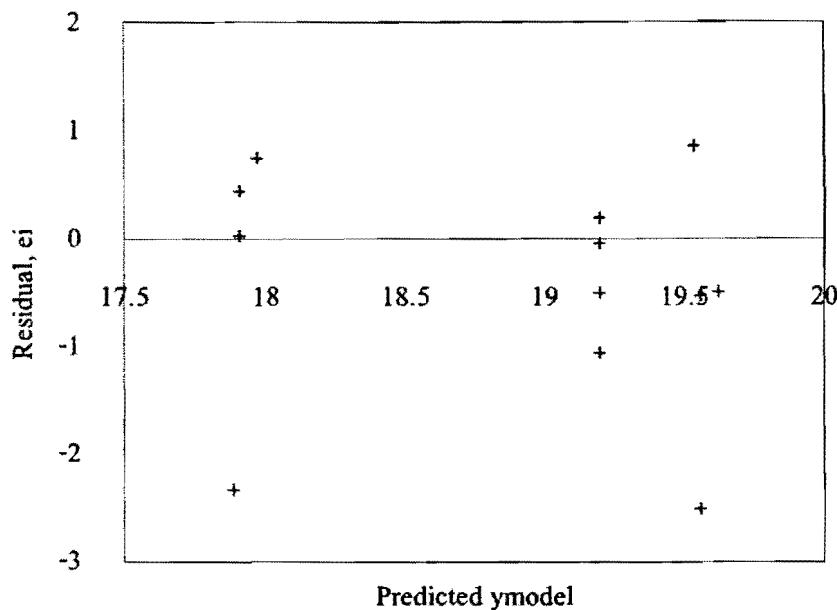


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ กับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP ของแบบจำลอง MB

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลักษณะ (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP ของแบบจำลอง MB ที่คำนวณจากสมการ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถออกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่า FRP Thickness (x_1)

- ค่าน “Train”

จากการทดสอบสมนตฐาน x_1 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคาน จึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นสมการการทดแทน คือ $\hat{y} = 6.83 - 2.13x_2 + 18.35x_3$, $y = 6.38 - 2.13x_2 + 18.35x_3$



รูปที่ 4.19ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลังกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP

ของแบบจำลอง Trian

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลังก (e) กับ ค่าการทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริม กำลังด้วย GFRP ของแบบจำลอง Trian ที่คำนวณจากสมการ พบร่วมนิการกระจายตัวอย่างไม่เป็น รูปทรงใดๆ แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_2, x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วน ความยาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่าอัตราส่วนความกว้างFRP/Beam (x_2)

ตารางที่ 4.4 สรุปสมการแบบจำลองการทดลอง

Model	สมการทดลอง		
	CFRP	AFRP	GFRP
A	$y = 74.14 - 2.59x_1 + 39.65x_3$	$y = 81.98 - 2.3x_1 + 25.69x_3$	$y = 66.52 + 33.85x_3$
T	$y = 81.63 - 1.97x_1$	$y = 81.63 - 0.18x_1$	$y = 80 - 0.04x_1$
MB	$y = 81.77 + 0.062x_3$	$y = 73.84 + 6.06x_1$	$y = 75.56 + 2.5x_1$
Train	$y = -2.96 - 0.67x_2 + 31.3x_3$	$y = 13.28 - 1.03x_1 - 8.8x_2 + 18.8x_3$	$y = 6.38 - 2.13x_2 + 18.35x_3$

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

5.1 บทนำ

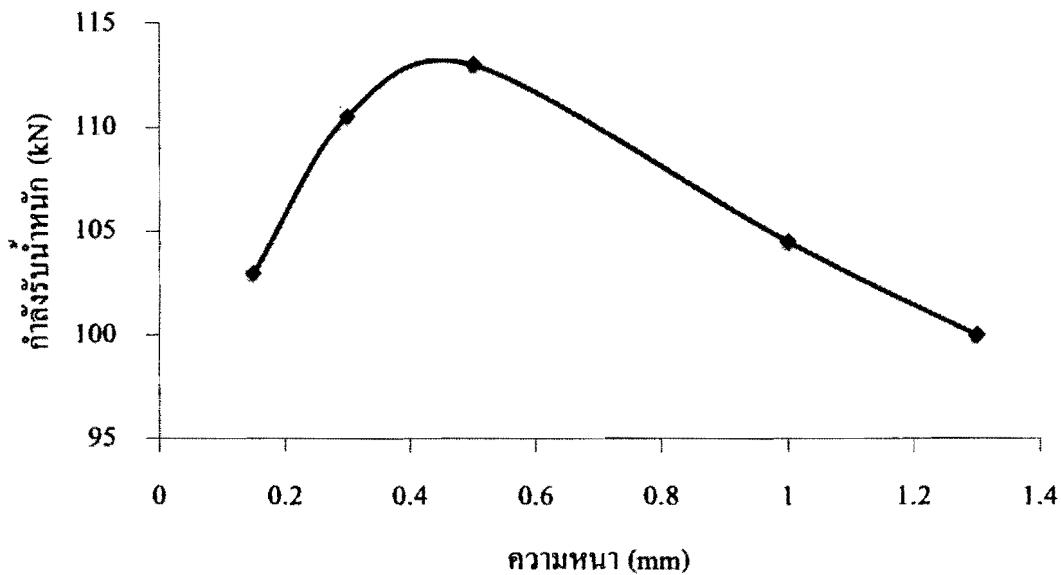
ปริญญาในพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตชนิด Carbon, Aramid, Glass และไม่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบลักษณะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS สร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิดเพื่อเปรียบเทียบ กำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด สำหรับข้อมูลด้วยย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำมาใช้เปรียบเทียบในแบบจำลองในปริญญาในพนธ์เล่มนี้ ได้อ้างอิงจากบทความที่มีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 4 จากผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม ABAQUS มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งแต่อาจไม่เพียงพอจึงได้มีการนำทฤษฎีทางสถิติโดยการสร้างแบบจำลองการทดสอบเข้ามาช่วยวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเพิ่มเติม ซึ่งช่วยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ทำให้แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยหาจุดเด่นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีราคาแพง การเสริมกำลังจึงต้องพิจารณาหาจุดเด่นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความหนา ความกว้าง และความยาว ซึ่งการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตที่มีความเหมาะสมจะทำให้ได้กำลังรับน้ำหนักตามต้องการแล้ว ยังช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

5.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีราคาแพง การเสริมกำลังจึงต้องมีการศึกษาหาจุดเด่นของคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต เพราะถ้าเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตมากเกินไปแต่กำลังรับน้ำหนักไม่เพิ่ม ก็จะเป็นการลื้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยเปล่าประโยชน์ แต่ถ้าเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตน้อยเกินไปความสามารถในการรับน้ำหนักก็จะน้อย ดังนั้นในการเสริมกำลังจะต้องทำการศึกษาหาจุดเด่นของการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.2.1 การศึกษาความหนาทางจุดเหมาะสมของวัสดุคอมโพสิต

การยกตัวอย่างค่านคณคณกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเส้นไขคาร์บอน เป็นคานชนิด “A” ศึกษาทางจุดเหมาะสมของความหนาของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เสริมกำลังคานคณคณกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.1

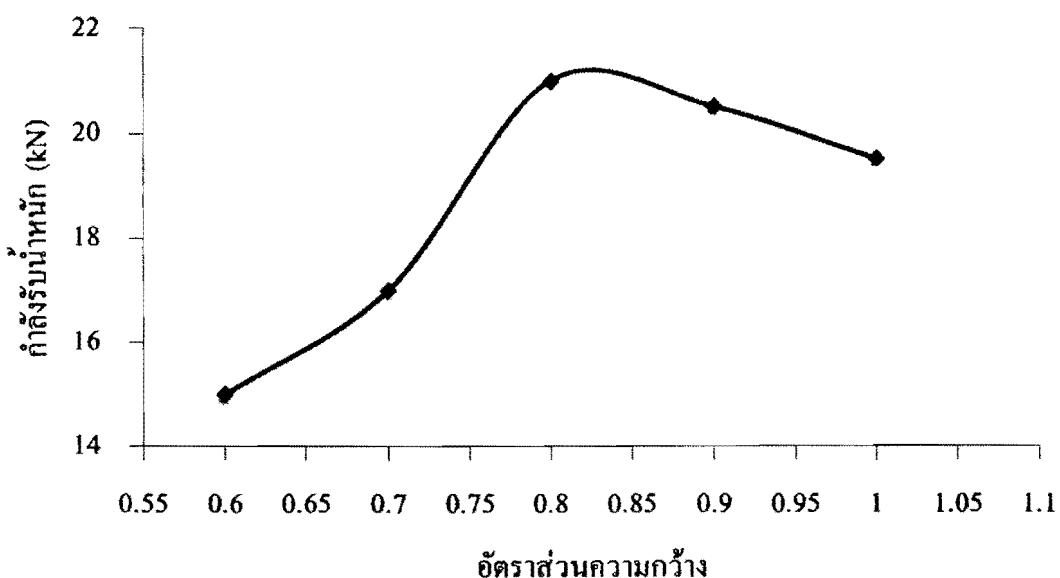


รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก

จากราฟจะเห็นได้ว่า ที่ความหนาของ FRP ประมาณ 0.5 mm. จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด ถ้าเพิ่มน้ำหนาของความหนา FRP มากกว่านี้ไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นแต่จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง

5.2.2 การศึกษาความกว้างทางจุดเหมาะสมของวัสดุคอมโพสิต

การยกตัวอย่างคานคณคณกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเส้นไขคาร์บอน เป็นคานชนิด “Train” ศึกษาทางจุดเหมาะสมของอัตราส่วนความกว้างของวัสดุคอมโพสิตกับคานคณคณกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.2

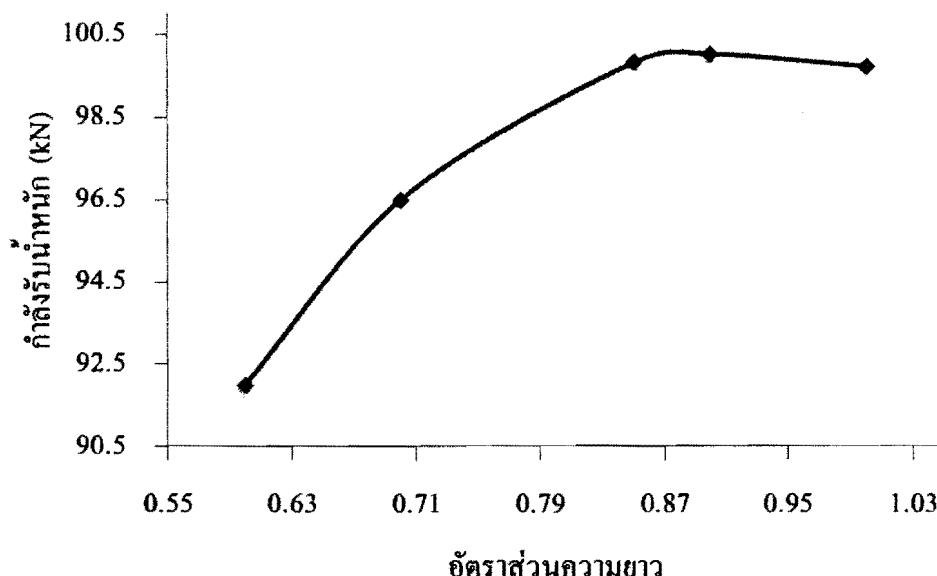


รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก

จากราฟจะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนความกว้างของ FRP ประมาณ 0.8 จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด ถ้าเพิ่มขนาดของความกว้าง FRP มากกว่านี้ไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นแต่จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง

5.2.3 การศึกษาความยาวหาดใหญ่และสมของวัสดุคอมโพสิต

การยกตัวอย่างงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน เป็นงานชนิด “A” ศึกษาหาดใหญ่และสมของอัตราส่วนความยาวของวัสดุคอมโพสิตกับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.3

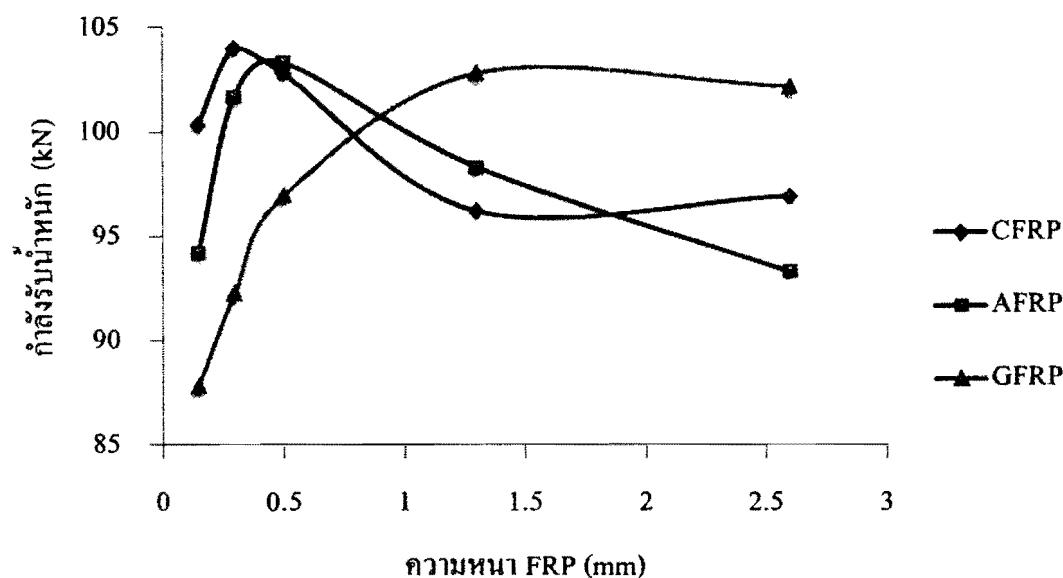


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความขาวของ FRP กับกำลังรับน้ำหนัก

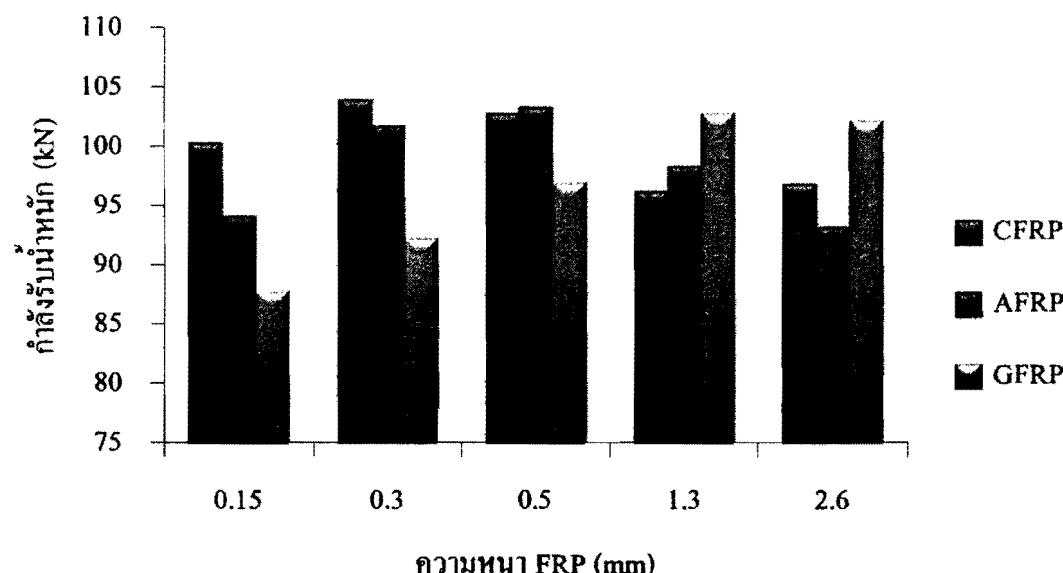
จากราฟจะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนความขาวของ FRP ประมาณ 0.85 จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด ถ้าเพิ่มขนาดของความขาวของ FRP มากกว่านี้ไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นแต่จะเป็นการตื้นเปลี่ยงค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังไปโดยเปล่าประโยชน์

5.3 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด

การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิตชนิด CFRP, AFRP และ GFRP เพื่อความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด และกำลังของวัสดุที่ต้องการสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ก



รูปที่ 5.4 ข

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ FRP แต่ละชนิด กับกำลังรับน้ำหนัก

จากกราฟจะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตชนิด CFRP จะมีกำลังรับน้ำหนักสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตชนิดอื่น ที่ความหนาน้อยๆ ถ้าเพิ่มความหนามากขึ้นไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้ไม่เป็นการสื้นเปลืองวัสดุ แต่กลับกันวัสดุคอมโพ

สิ tíchนิด GFRP มีกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของความหนาเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาเรื่องของค่าใช้จ่ายของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย เพื่อความประหยัด คุ้มค่ากับกำลังรับน้ำหนักที่เราต้องการ

5.4 ยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

จากการศึกษาแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP, AFRP และ GFRP จะเห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกแตกต่างกัน การสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมเพื่อทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการนั้นมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถบอกถึงความเหมาะสมในการสร้างแบบจำลองได้ กล่าวคือไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าตัวแปรใดบ้างที่มีผลต่อการการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก การสร้างแบบจำลองการถดถอยนาวิเคราะห์แบบจำลองนี้ประโยชน์อย่างยิ่งใน การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่ y คือ ค่าการรับน้ำหนักบรรทุก

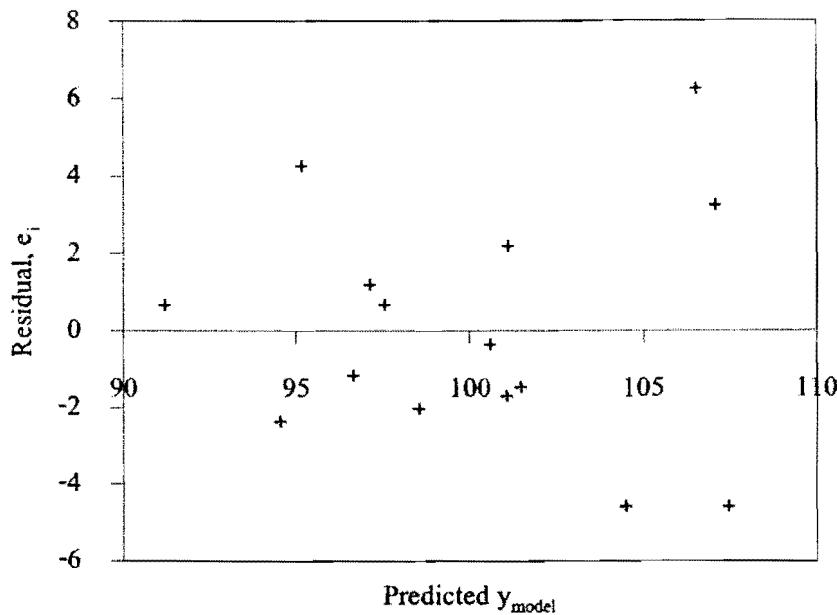
x_1 คือ FRP Thickness

x_2 คือ อัตราส่วนความกว้างFRP/Beam

x_3 คือ อัตราส่วนความยาวFRP/Beam

5.4.1 การสร้างแบบจำลองการถดถอยที่เสริมกำลังด้วย"CFRP"

ยกตัวอย่างคาน "A" เมื่อทำการทดสอบการลดรูปของสมการการถดถอย โดยทำการพิสูจน์ตัวแปร (x_1, x_2 , และ x_3) ตามลำดับ พบว่า x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานซึ่งไม่นำมาพิจารณา ส่วน x_1 และ x_3 มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานดังนั้นสมการการถดถอย คือ $y = 74.14 - 2.59x_1 + 39.65x_3$

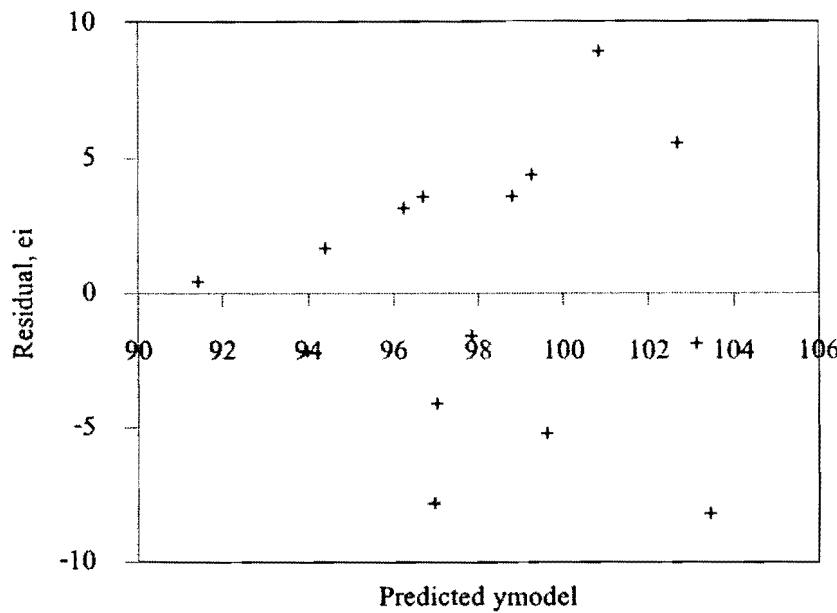


รูปที่ 5.5ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลังกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วยCFRP ของแบบจำลอง A

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ $y = 74.14 - 2.59x_1 + 39.65x_3$ ซึ่งจะพบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใด ๆ เลย แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 , x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่า FRP Thickness (x_1) จากสมการยังบอกได้อีกว่า ลำดับผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีผลต่อค่าการรับน้ำหนักของคานดังนี้ $x_3 > x_1$ ซึ่งจะเห็นว่าสอดคล้องกับลำดับสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร ส่วนเครื่องหมายที่อยู่หน้าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร หมายถึงผลกระทบด้านบวกที่มีต่อค่าการรับแรง (รับน้ำหนักได้มากขึ้น) เมื่อเครื่องหมายเป็น (+) หรือ ผลกระทบด้านลบที่มีต่อค่าการรับแรง(รับน้ำหนักได้น้อยลง) เมื่อเครื่องหมายเป็น (-)

5.4.2 การสร้างแบบจำลองการลดด้อยที่เสริมกำลังด้วย "AFRP"

ยกตัวอย่างคาน “A” เมื่อทำการทดสอบการลดครุภาระของสมการการลดด้อยโดยทำการพิสูจน์ตัวแปร (x_1 , x_2 , และ x_3) ตามลำดับ พบร่วมกับ x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานซึ่งไม่นำมาพิจารณา ส่วน x_1 และ x_3 มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานดังนั้นสมการการลดด้อย คือ $y = 81.98 - 2.3x_1 + 25.69x_3$

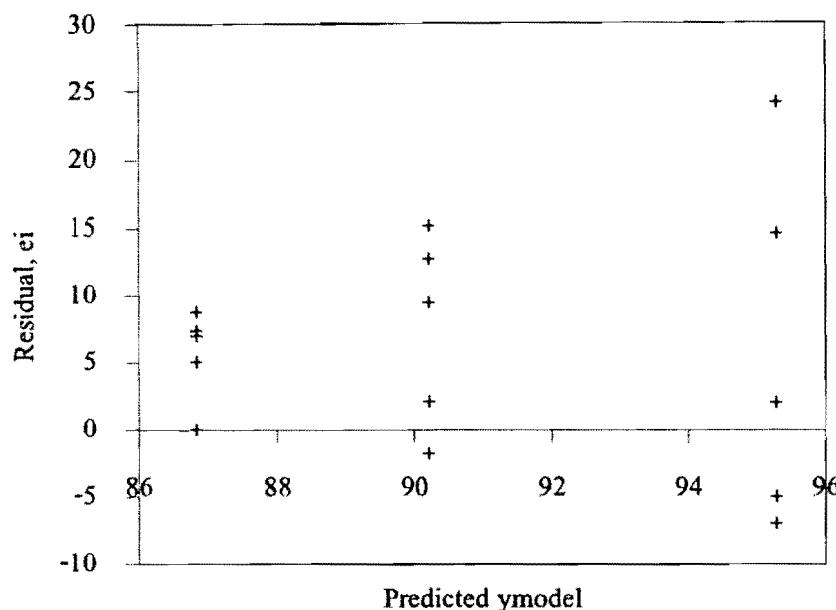


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงกับ การทำนายกำลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย AFRP ของแบบจำลอง A

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ $y = 81.98 - 2.3x_1 + 25.69x_3$ ชี้ให้เห็นว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใด ๆ เลย แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 , x_3 และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวFRP/Beam (x_3) และทำการลดค่า FRP Thickness (x_1) จากสมการยังบอกได้อีกว่า ลำดับผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีผลต่อค่าการรับน้ำหนักของคาน ดังนี้ $x_3 > x_1$ ซึ่งจะเห็นว่าสอดคล้องกับลำดับสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร ส่วน เครื่องหมายที่อยู่หน้าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร หมายถึงผลกระทบด้านบวกที่มีต่อค่าการรับแรง (รับน้ำหนักได้มากขึ้น) เมื่อเครื่องหมายเป็น (+) หรือ ผลกระทบด้านลบที่มีต่อค่าการรับแรง (รับน้ำหนักได้น้อยลง) เมื่อเครื่องหมายเป็น (-)

5.4.3 การสร้างแบบจำลองการลดด้อยที่เสริมกำลังด้วย "GFRP"

ยกตัวอย่างคาน “A” เมื่อทำการทดสอบการลดค่า FRP ของสมการการลดด้อยโดยทำการพิสูจน์ตัวแปร (x_1 , x_2 , และ x_3) ตามลำดับ พบว่า x_1 และ x_2 ไม่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานจึงไม่นำมาพิจารณา ส่วน x_3 มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคานดังนั้นสมการการลดด้อย คือ $y = 66.52 + 33.85x_3$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกลงกับ การทำนายค่าลังรับน้ำหนักที่เสริมกำลังด้วย GFRP ของแบบจำลอง A

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าแบบจำลอง A ที่คำนวณจากสมการ $y = 66.52 + 33.85x$, พบว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปทรงใด ๆ เลย แสดงว่าสมการนี้เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x และค่า y ได้อย่างดี จากสมการที่ได้ สามารถบอกได้ว่า การรับน้ำหนักบรรทุก (y) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาว FRP/Beam (x_j) ส่วนเครื่องหมายที่อยู่หน้าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร หมายถึงผลผลกระทบต้านบวกที่มีต่อค่าการรับแรง (รับน้ำหนักได้มากขึ้น) เมื่อเครื่องหมายเป็น (+)

5.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์พุทธิกรรมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ไม่ได้เสริมกำลังกลุ่มที่เสริมกำลังด้วยการนบอนไฟเบอร์ กลุ่มที่เสริมกำลังด้วยอะรามิดและกลุ่มที่เสริมกำลังด้วยกลาสไฟเบอร์ทั้งนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะถูกสอนเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมก่อน หลังจากนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่อาจมีผลต่อพุทธิกรรมของงาน ได้แก่ ความหนา ความกว้าง และชนิดของวัสดุเสริมกำลัง จากการศึกษาพบว่าวัสดุเสริมกำลังชนิดการนบอน จะสามารถรับน้ำหนักมากที่สุดรองลงมาคืออะรามิด และกลาสไฟเบอร์ตามลำดับส่วนความหนาและ

ความก้าวหน้าของวัสดุเสริมกำลังจะมีผลต่อพัฒนาระบบของงานเหมือนกัน คือการเพิ่มความหนาหรือความก้าวหน้าของวัสดุเสริมกำลังที่มากเกินไปก็ไม่ได้ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักของงานสูงขึ้นส่วนการเพิ่มความยาวของวัสดุเสริมกำลังจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของงานสูงขึ้นอย่างไรก็ตามถ้าหากพิจารณาจากภาพรวมของตัวแปรทั้งหมด โดยใช้เทคนิคการตอบสนองเชิงพื้นผิวแล้วจะทำให้ได้จุดเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังทั้งในเบื้องต้นและค่าใช้จ่ายด้วย

บรรณานุกรม

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย. จำนวน 200 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1, 2551.
- [2] ปารเมศร์ ดิมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [3] ปราโมทย์ เศษ方案. ไฟแน็คอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
- [4] ธีระวุฒิ กุลพินเมือง และ ยงยุทธ ป่าทันนท์. การสร้างแผนภาพการทำนายลักษณะการวินติของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์. ปริญญาโทนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตภาควิชาชีววิศวกรรม โภชนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551
- [5] สถาพร โภค. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (กำลัง). พิมพ์ครั้งที่ 2. รุ่งแสงการพิมพ์, 2546
- [6] ACI 440R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Chapter 2& 3
- [7] AC178: Interim Criteria for Inspection and Verification of Concrete and Reinforced and Unreinforced Masonry Strengthening using Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composite Systems, ICC Evaluation Service, Inc., California, 2003.
- [8] Arduini M. and NanniA..Behavior of Pre-cracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets., ASCE Journal of Composites for Construction, 1: 2, pp. 127-142, 1997
- [9] Fanning P. and Kelly O..Smeared crack models of RC beams with externally bonded CFRP plates., Journal of Computation Mechanics, 26, pp. 325-332, 2000
- [10] Hibbit, Karlson & Sorensen. ABQUS/Explicit User's Manual, Version 6.5., Pawtucket, Inc., USA, 2007
- [11] [Http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.7/](http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.7/) เส้นคืนเมื่อ 19 มิถุนายน 2553
- [12] Maalej M. Bian Y. Interfacial shear stress concentration in FRP-strengthened beams. Compos Struct, 54, pp. 417-426, 2001.

- [13] NCHRP Report 514: Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004.
- [14] Triantafillou T.C. and Plevris N.. Strengthened of RC beams with Epoxy-Bonded Fiber Composite Materials. Materials and Structural, 25, pp. 201-211, 1992