



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต: การทดสอบและการ
วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced
Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802028

สัญญาเลขที่ ๑๒๐/๒๕๕๙

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต: การทดสอบและการ
วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced
Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๖๑

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์กลาส: การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Laminates:
Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models

รหัสโครงการ 2559A10802028 สัญญาเลขที่ ๑๒๐/๒๕๕๙ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๓๐๕,๐๐๐ บาท (แสนสามห้าพันบาท)

ระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี (ตค.๒๕๕๙-กย.๒๕๖๐)

บทคัดย่อ

Three-dimensional finite element (FE) models are developed to simulate the behavior of full-scaled reinforced concrete beams strengthened with glass fiber reinforced polymer laminates. Nonlinear finite element analysis is performed using ANSYS, a general-purpose finite element program. SOLID65, LINK8, and SOLID46 elements represent concrete, discrete reinforcing steel bars, FRP laminates and steel plates, respectively. Analysis results are verified with data from full-scale beam tests through the linear and nonlinear ranges up to failure. It was found that the FE models could effectively simulate the behavior of full-scale beams. The load-deflection curves from the FE analysis well agree with the experimental results in the linear range, but the FE results are slightly stiffer than those from the tests. The predicted crack patterns at failure strongly resemble the failure modes observed from the full-scale beam tests.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต: การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนอิติเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2559 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	30
บทที่ 5 แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีต และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์	51
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	89
เอกสารอ้างอิง	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างภายในหลักที่ใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างในเกือบทุกประเภทในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยผู้ออกแบบส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นๆ ได้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างให้สามารถรับแรงดังกล่าวได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้าง และมาตรฐานที่มีอยู่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับแรงประเภทต่างๆ เช่น แรงดึง, แรงดัด, แรงอัด, แรงเฉือน และแรงประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปจุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไป ความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซม (Repairing) โครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้นหรือดีกว่าเดิม

การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาได้เริ่มต้นขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น จากนั้นได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในงานวิศวกรรมโยธาอย่างกว้างขวางทั่วโลก เช่น การเสริมกำลังของเสา คาน ข้อต่อ ในโครงสร้าง สะพาน อาคารสูง อาคารสำนักงานหรือ บ้านพักเพื่อเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น (Ductility) ของโครงสร้างเมื่อรับแรงด้านข้าง เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น การเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์เป็นวิธีที่มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เช่น สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด มีน้ำหนักเบาสามารถทำงานได้สะดวก รูปร่างของโครงสร้างนั้นไม่เป็นปัญหามากในการติดตั้ง และไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายโครงสร้างเพื่อทำการเสริมกำลัง อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทย การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับงานวิศวกรรมโยธายังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการรับเอาเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งาน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขาดข้อมูลพื้นฐานและการศึกษาในเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์ของการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตอย่างเพียงพอ นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ยังต้องดำเนินการด้วยผู้เชี่ยวชาญและช่างผู้ชำนาญการ จึงทำให้การนำแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังมาใช้ยังไม่แพร่หลายมากนักสำหรับงานวิศวกรรมโยธาในประเทศไทย รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ในงานเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถ และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด แรงเฉือน ความเหนียว และลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย แผ่นไฟเบอร์ลามิเนตด้วยการทดสอบตัวอย่างคานขนาดต่างๆ และด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ของโครงสร้างดังกล่าว โดยคำนึงถึงความเป็น nonhomogenous และ anisotropic ของวัสดุคอนกรีต จากนั้นทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ (Parametric Study) ที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(ค.ส.ล.) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วย แผ่นไฟเบอร์ เพื่อให้เข้าใจและใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เพื่อการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังที่เหมาะสม เกิดประโยชน์และประหยัดสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล.
- 2) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล. ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 3) เสนอพฤติกรรมและแนวทางการปรับปรุงพฤติกรรมคาน ค.ส.ล.ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ตลอดจนนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. ด้วยแผ่นไฟเบอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล. และคาน ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบโครงสร้างดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลัง, การยืดหยุ่น (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่สำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล.และคาน ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล. เทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ
- 2) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ
- 3) เสนอพฤติกรรมและแนวทางการปรับปรุงพฤติกรรมคาน ค.ส.ล. ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ตลอดจนนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. ด้วยแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 1 การใช้แผ่นไฟเบอร์ในการเสริมกำลังคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื่องจากโครงสร้างทางวิศวกรรมศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับแรงประเภทต่างๆ เช่น แรงดึง, แรงดัด, แรงอัด, แรงเฉือน และอื่นๆ โดยผู้ออกแบบส่วนของโครงสร้างนั้นๆ ได้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างให้สามารถรับแรงดังกล่าวได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้าง และมาตรฐานที่มีอยู่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป จุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไป ความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซม (Repairing) โครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้น การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาได้เริ่มต้นขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น จากนั้นได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในงานวิศวกรรมโยธาอย่างกว้างขวางทั่วโลก เช่น การเสริมกำลังของเสา คาน ข้อต่อ ในโครงสร้าง สะพาน อาคารสูง อาคารสำนักงานหรือ บ้านพักเพื่อเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น (Ductility) ของโครงสร้างเมื่อรับแรงด้านข้าง เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น สำหรับประเทศไทย การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับงานวิศวกรรมโยธายังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการรับเอาเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งาน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขาดข้อมูลพื้นฐานและการศึกษาในเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์ของการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในการเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตอย่างเพียงพอ นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ยังต้องดำเนินการด้วยผู้เชี่ยวชาญและช่างผู้ชำนาญการ จึงทำให้การนำแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังมาใช้ยังไม่แพร่หลายมากนักสำหรับงานวิศวกรรมโยธาในประเทศ

วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังประกอบด้วย ไฟเบอร์ซึ่งแทรกอยู่ในโพลิเมอร์เมทริกซ์ จะแสดงคุณสมบัติหลายอย่างซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับวัสดุโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังจะสามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางการเรียงตัวของไฟเบอร์ อย่างไรก็ตามวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังจะไม่แสดงจุดคราก แต่จะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นจนกระทั่งฉีกขาด วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม ดังนั้นเมื่อนำมาใช้กับงานก่อสร้างที่ต้องทนต่อสภาพอากาศที่รุนแรงและเปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอ จะสามารถทนทานต่อสภาวะอากาศนั้นได้ดี ซึ่งจะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีต จากการศึกษาเบื้องต้น แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์จะมีอัตราการเกิด

สนิมช้ากว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์เป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม แผ่นไฟเบอร์ไม่สามารถยับยั้งการเกิดสนิมได้ ในกรณีที่เมื่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นเกิดสนิมอยู่ก่อนแล้วค่อยมีการรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์ ถึงกระนั้นก็ตาม แผ่นไฟเบอร์ในกรณีหลังนี้สามารถช่วยให้โครงสร้างรักษาความสามารถในการรับกำลังได้ถึง 95% ของโครงสร้างเดิม

คุณสมบัติของโพลิเมอร์เมทริกซ์มีด้วยกัน 2 ประการคือ ช่วยถ่ายแรงระหว่างไฟเบอร์ และช่วยป้องกันไฟเบอร์จากการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม เมื่อแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังถูกนำมาใช้ติดบริเวณภายนอกของคอนกรีตจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตนี้ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการประสานระหว่างแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับเนื้อคอนกรีต ทั้งนี้การประสานระหว่างแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับเนื้อคอนกรีตจำเป็นต้องใช้น้ำยาเชื่อมประสานชนิดพิเศษ เมื่อคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตเพิ่มขึ้นก็จะทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังนอกจากจะช่วยในด้านการป้องกันคอนกรีตจากการกัดกร่อนของธรรมชาติแล้ว ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของคอนกรีตซึ่งทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงดึงในแนวแกนนั้นจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นกับความเครียดในแนวแกน การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงอัดในแนวแกนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรของไฟเบอร์, คุณสมบัติของไฟเบอร์หรือเรซินที่ใช้, และกำลังของพันธะภายในระหว่างไฟเบอร์ การวิบัติของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังภายใต้แรงอัดจะเกิดขึ้นเมื่อไฟเบอร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การโก่งของไฟเบอร์ การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์, แรงกระทำระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์, และกำลังของพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการต้านทานแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะมีค่าน้อย ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังนั้น ไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยส่วนมากแล้วการวิบัติด้วยแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ขนานกับไฟเบอร์

จากคุณสมบัติทางกลและเคมีของแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง และโพลิเมอร์เมทริกซ์เบื้องต้นจะเห็นว่า วัสดุชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเสริมกำลังและเพิ่มความยืดหยุ่น รวมทั้งยังสามารถใช้เพื่อทำการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น ก่อนเกิดสภาวะการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ทั้งยังสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเหล่านั้นต้องอยู่ในสภาวะทางกายภาพที่รุนแรงเช่น โครงสร้างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล หรืออยู่ใกล้ทะเล เป็นต้น

การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีได้ 2 ลักษณะ คือ คอนกรีตที่ถูกอัดแตกหรือระเบิดออกก่อน (crushing failure) ที่ด้านรับแรงอัด โดยเหล็กเสริมที่ถูกดึงยังไม่ถึงจุดครากเรียกว่า การวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) และการวิบัติของคานอีกรูปแบบหนึ่งคือ การวิบัติที่เกิดจากเหล็กเสริมถูกดึงถึงจุดคราก

ก่อน (yielding failure) ที่ด้านรับแรงดึง แล้วคอนกรีตที่ถูกอัดแตกหรือระเบิดออก เรียกว่าการวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) หากเหล็กเสริมมีปริมาณไม่มากนัก (moderate reinforcement) โดยที่ปริมาณเหล็กเสริม รับแรงดึงที่ต่ำกว่าอัตราส่วนที่ภาวะสมดุล เรียกว่า under-reinforcement concrete beam เหล็กเสริมในคาน คสล. จะถูกดึงถึงกำลังจุดครากก่อนเสมอ ($\epsilon_s = \epsilon_y$) ในขณะที่ยังมีการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเริ่มที่จะไม่เป็นเส้นตรง โมเมนต์ดัดที่ทำให้เหล็กเสริมในคานเริ่มครากเรียกว่า โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (yielding moment) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเมนต์ที่กระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมยืดตัวมากขึ้นซึ่งในขณะที่แรงดึงในเหล็กเสริมมีค่าคงที่ ($T = A_s f_y$) หมายความว่าระยะของแกนโมเมนต์บนหน้าตัดของคาน คสล. จะมีค่ามากขึ้นเพื่อสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากขึ้นไปอีก และตามหลักการสมดุลของแรง แรงอัดของคอนกรีตต้องมีค่าเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริม แต่พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตมีน้อยลง จึงทำให้หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะไม่เป็นสัดส่วนกับค่าของหน่วยการหดตัว ดังนั้นร่ายาวที่ปรากฏจะกว้างมากขึ้นจนสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า และขยับตัวสูงขึ้นทำให้ค่าสติเฟนส การดัดของคานหรือความแข็งแรงของคาน คสล. มีค่าน้อยลง คานจึงแอ่นตัวมากขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนให้ทราบว่า จะเกิดการวิบัติตามมา หากยังบรรทุกน้ำหนักหรือเพิ่มน้ำหนักต่อไปคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินจะถูกอัดและระเบิดออก (crushing) ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตก่อนเกิดการวิบัติจะเป็นรูปโค้งพาราโบลา ดังนั้น หากเอาน้ำหนักบรรทุกออกเสียบ้าง ในตอนนี้ก็จะช่วยไม่ให้คาน คสล. นั้นถึงกับพังลงมาได้ คาน คสล. ที่เสริมเหล็กมากเกินไปหรือให้เหล็กที่มีกำลังจุดครากสูงมาก เรียกว่า over-reinforcement concrete beam คานจะวิบัติโดยคอนกรีตถูกอัดแตกหรือระเบิดก่อน (yielding failure) โดยคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 มม./มม. ก่อนที่เหล็กเสริมจะเริ่มคราก ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลันทันทีทันใดโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าก่อน จัดว่าอันตรายมากต่อชีวิตและทรัพย์สิน

รูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP จะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยสามารถแบ่งการวิบัติได้เป็น 7 รูปแบบ คือ

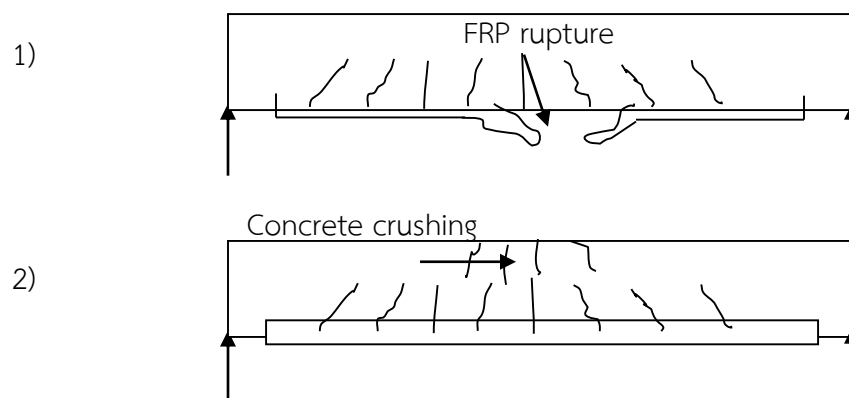
- 1) การวิบัติจากการขาดของแผ่น FRP เป็นการวิบัติที่เกิดจาก FRP ขาด เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังรับน้ำหนัก มากกว่ากำลังรับแรงดึงของ FRP จึงทำให้แผ่น FRP เกิดการขาดก่อน
- 2) การวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต เป็นการวิบัติที่เกิดจากการบดอัดของคอนกรีตด้านที่รับแรงอัด เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัดไม่มารับแรงเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับคอนกรีตได้ จึงทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ
- 3) การวิบัติจากแรงเฉือน แสดงการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือน เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กไม่มารับแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับคอนกรีตได้จึงทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ

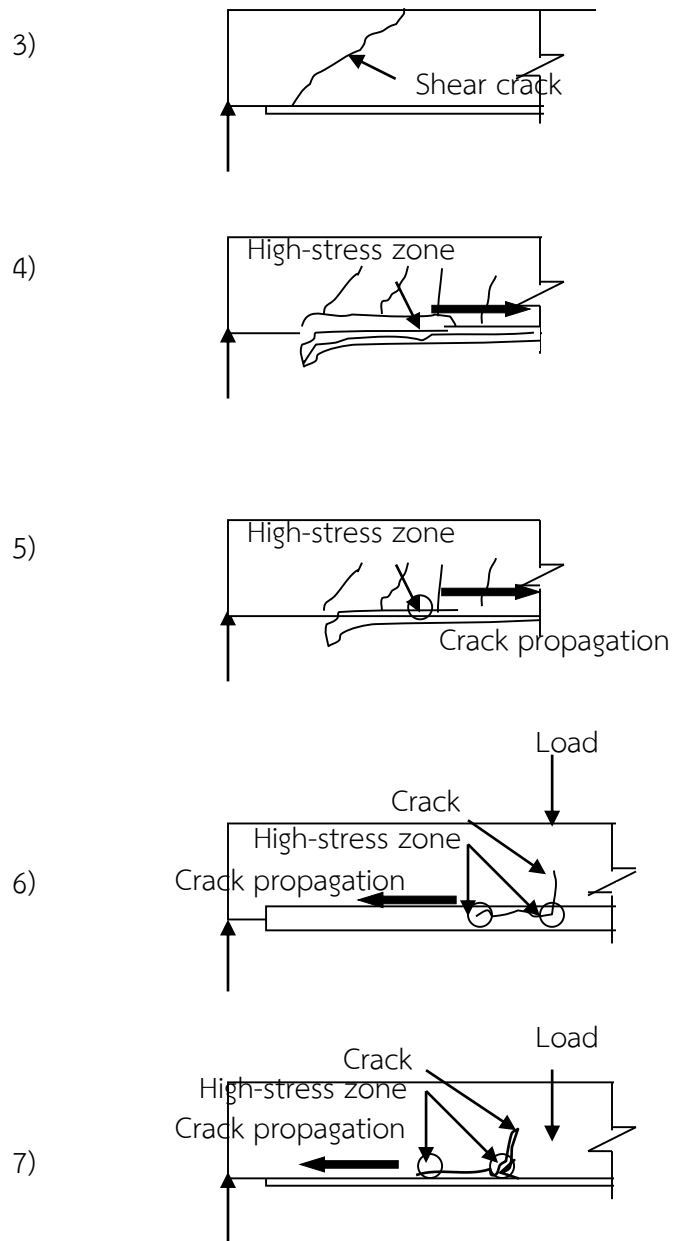
- 4) การวิบัติจากการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม เป็นการวิบัติที่เกิดจากการหลุดของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กที่ปลายแผ่นไฟเบอร์เมื่อให้น้ำน้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นคานเกิดการวิบัติที่ตำแหน่งบริเวณส่วนที่คอนกรีตห่อหุ้มเหล็ก ทำให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง
- 5) การวิบัติจากแผ่นเสริมกำลังที่ปลายคาน เป็นการวิบัติที่เกิดจากการหลุดของแผ่น FRP เมื่อให้น้ำน้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นแผ่น FRP ที่ติดอยู่กับคานเกิดการหลุดลอกออก โดยสาเหตุอาจเกิดจากสารที่ใช้ประสานระหว่างแผ่น FRP กับคอนกรีตไม่ดีพอหรืออาจเกิดจากวิธีการติดไม่ถูกต้อง เป็นการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ทั้งแผ่น
- 6) การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัด เป็นการหลุดของ FRP ที่รอยร้าวดัด เมื่อให้น้ำน้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นคอนกรีตเกิดการร้าวจึงทำให้แผ่น FRP ที่ติดอยู่เกิดการหลุดลอกออกตรงตำแหน่งที่เกิดรอยร้าว
- 7) การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัดและแรงเฉือน เป็นการหลุดของรอยร้าวทแยง ซึ่งก็เป็นสาเหตุหนึ่งอีกเช่นกันที่อาจเกิดการวิบัติได้

การที่แผ่น FRP หลุดลอกออกนั้น เป็นรูปแบบการวิบัติที่ไม่เป็นที่พึงปรารถนาเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นการวิบัติแบบเปราะ และสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้กำลังของ FRP ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน การวิบัติเนื่องจากการหลุดลอกของแผ่น FRP มี 2 ลักษณะ

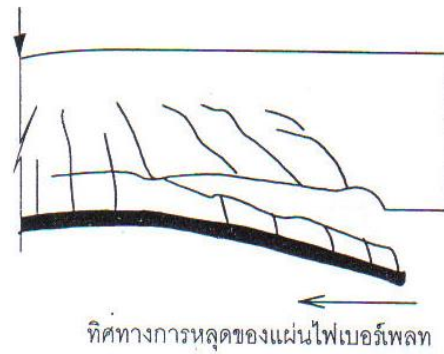
1) การหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม เกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามแนวนอน และหน่วยแรงดิ่งที่ปลายแผ่น FRP ดึงให้คอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กหลุดออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การหลุดลอกจะเริ่มเกิดขึ้นที่ปลายแผ่นก่อน แล้วค่อยลามเข้าหาตรงกลางขึ้นส่วน

2) การหลุดลอกของแผ่น FRP เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนและหรือ หน่วยแรงดิ่งในแผ่น FRP ตรงตำแหน่งรอยร้าว (รอยร้าวดัดและรอยร้าวเฉือน) การหลุดลอกเริ่มเกิดขึ้นที่ฐานรอยร้าวก่อน แล้วลามไปปลายแผ่น FRP ดังแสดงในรูปที่ 2.3

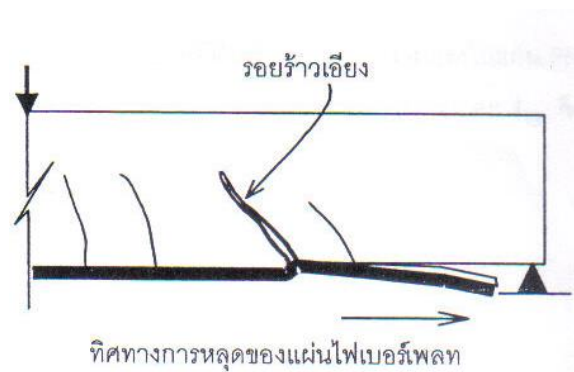




รูปที่ 2.1 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย FRP



รูปที่ 2.2 การหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม



รูปที่ 2.3 การหลุดลอกของแผ่น FRP

สำหรับประโยชน์หลักของแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง Fiber Reinforced Paper (FRP) นั้นจะแบ่งเป็นหัวข้อหลักคือ 1) ใช้ในการเสริมกำลังให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงได้มากขึ้น เช่น การเสริมแรงดัดและแรงเฉือนของคอนกรีต และ 2) ใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตที่เกิดความเสียหายจากการถูกกัดกร่อนที่ผิว หรือเกิดการกะเทาะที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม เป็นต้น

ส่วนมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ได้ถูกกำหนดขึ้นในปี ค.ศ. 2002 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทยสหรัฐอเมริกา (American Concrete Institute) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ACI ได้จัดทำ “ACI 440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.” [3] ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าครั้งสำคัญสำหรับที่จะทำให้วัสดุ FRP ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2002 ACI (American Concrete Institute) ได้จัดทำ ACI 440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures [2] ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าครั้งสำคัญสำหรับการทำให้แผ่นไฟเบอร์ FRP ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยมีเนื้อหาที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ FRP และสมการการออกแบบคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ FRP

Saadatmanesh, Hamid, Ehsani, Mohammad R. [7] การศึกษาความแข็งแรงของคานคอนกรีตเสริมกำลังโดยการติดแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว (GFRP) จากการทำการทดสอบคานรูปสี่เหลี่ยมและคานรูปตัวอักษร T ทำการทดสอบโดยให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงในแบบ 4 Point และทำการวัดค่าระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแผ่นไฟเบอร์, เหล็ก, แรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, และน้ำหนักบรรทุกที่ระยะโก่งตัว สำหรับบริเวณกึ่งกลางคาน คือ ทำการพล็อตกราฟและทำการเปรียบเทียบเพื่อที่จะทำนายค่า ผลการทดลองสามารถบ่งชี้ได้ว่า การรับแรงดัดของคอนกรีตสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการติดแผ่นไฟเบอร์ นอกจากนั้น Epoxy ที่ใช้ติดสามารถช่วยแก้ไขรอยแตกของคานโดยจะทำให้เกิดรอยร้าวช้าขึ้นและลดความกว้างของรอยร้าวเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้น

Nouna และคณะ [11] แสดงให้เห็นว่าแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการซ่อมแซม คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อคอนกรีตที่ผิวเกิดการหลุดร่อนหรือกะเทาะ โดยกำลังอัดของคานสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อคานได้รับการซ่อมแซม

บุญไชยและคณะ [12] ศึกษาการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ซ่อมแซมและเสริมกำลังของโครงสร้างที่รับแรงอัดและแรงดัด โดยศึกษาถึงความแตกต่างและความเหมาะสมของจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งพบว่าการนำไฟเบอร์มาเสริมกำลังจะทำให้คานและเสามีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งดูได้จากคานมีระยะโก่งตัวลดลงและเสามีค่าหน่วยการยืดตัวน้อยลง แต่กำลังที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คานและเสาที่ทำการเสริมกำลังได้มากกว่าคานและเสาที่ทำการซ่อมแซม

การใช้เส้นใยแก้วสังเคราะห์ในการเพิ่มกำลังของส่วนรับแรงอัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [13] งานศึกษานี้มุ่งในการทดสอบหาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของคานในส่วนอง Compression Zone เมื่อทำการเสริมกำลังด้วยด้วยแผ่นวัสดุเส้นใยแก้วสังเคราะห์ โดยทำการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีลักษณะแบบเหล็กเสริมเกินสภาวะสมดุล (over-reinforcement) ซึ่งทำการหล่อคานคอนกรีตขึ้นมาสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นคานแม่แบบซึ่งไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์และกลุ่มที่สองเป็นคานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์ และนำคานทั้งสองกลุ่มไปทำการทดสอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคาน จนคานวิบัติแล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าคานทดสอบที่เสริม

กำลังด้วยแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์จะเกิดการวิบัติสองลักษณะคือ การวิบัติเนื่องจากการหลุดของแผ่นเส้นใย และการวิบัติเนื่องจากการแตกออกของคอนกรีตใต้ท้องคานซึ่งการวิบัติทั้งสองลักษณะนั้นเป็นการวิบัติที่แผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์ยังไม่ได้รับแรงจนถึงจุดประลัย

การใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในการเพิ่มกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [14] งานศึกษานี้ทำการทดสอบหาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด และแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยทำการหล่อคานขึ้นมาสองกลุ่ม กลุ่มแรกออกแบบให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดและกลุ่มที่สองออกแบบให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน จากนั้นนำคานทั้งสองกลุ่มมาทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ทำการกุดคานดังกล่าวเพื่อศึกษาพฤติกรรมจนคานวิบัติ แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ตามทฤษฎีและตามมาตรฐาน ACI

งานเสริมกำลังพื้นสะพาน (Strengthening) โดยการใช้แผ่นเหล็ก (Steel Plates) และ Carbon Fiber [15] เอกสารนี้เสนอการเสริมกำลังของสะพานโดยมีรายละเอียดดังนี้ โดยสะพานอ่าวทองมีลักษณะโครงสร้างสะพานแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ขนาด $(9 \times 8) + (3 \times 40) + (7 \times 10)$ ยาว 262.00 ม. มีความกว้างผิวจราจร 8.00 ม. และทางเท้ากว้างข้างละ 1.50 ม. ได้เริ่มเปิดใช้งานมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2502 ในปัจจุบันปริมาณการจราจรบนสะพานแห่งนี้มีความหนาแน่นมาก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีก กรมทางหลวงจึงได้มีโครงการซ่อมบำรุงและขยายช่องจราจร เพื่อรองรับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นโดยแบ่งโครงการก่อสร้างและซ่อมบำรุงออกเป็น 2 ส่วน

- 1) ในส่วนของงานก่อสร้างสะพานใหม่ต่อเนื่องกับสะพานเดิม เพื่อขยายช่องจราจรเพิ่มจากเดิม 8.00 ม. เป็น 14.00 ม.
- 2) ในส่วนของสะพานเดิม ได้มีการตรวจสอบ/ประเมินความสามารถในการรับน้ำหนัก บรรทุกได้มากขึ้น โดยเลือกวิธีการเสริมกำลังแบบ Externally Bonded Reinforcement ด้วยการติดตั้ง Steel Plates และ Carbon Fiber ใต้แผ่นพื้น เพื่อช่วยเพิ่มหน้าตัดของเหล็กเสริมในการรับแรงดัดและแรงเฉือนในแผ่นพื้นสะพาน ทั้งยังช่วยลดการแอ่นตัวของพื้นสะพานอีกด้วยในการติดตั้งแผ่นเหล็กจะใช้ Epoxy เป็นตัวประสานกับท้องคานร่วมกับใช้ Chemical Bolt ช่วยในการยึดติดด้วย

พฤติกรรมการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ของคาน คสล. [16] งานศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อาจจะวิบัติได้จากการหลุดลอกของเนื้อคอนกรีตหุ้มลอกออกจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่กำลังของโครงสร้างจะถึงค่าประลัย ซึ่งการวิบัติในลักษณะนี้ไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ และยากที่จะทำนายกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการวิจัยนี้ได้เสนองานทดลองที่ศึกษาถึงผลของระยะยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับคาน, การยึดรั้งของแผ่นไฟเบอร์ในแนวตั้งต่อพฤติกรรมการหลุดลอกของคานที่เสริมกำลังด้วยไฟเบอร์ การทดลองจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์นั้นขึ้นอยู่กับระยะยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับคาน และสถานะการยึดรั้งที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์ซึ่งในการพยายามที่จะป้องกันการหลุดลอกที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์โดยการยึดรั้ง

ปลายของแผ่นไฟเบอร์ในแนวตั้งนั้นการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ที่ฐานร้อยราวเอียงก็อาจเกิดขึ้นแทนได้ โดยการยึดรั้งที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์นี้ทำได้โดยการพันแผ่นไฟเบอร์ซีทรอบปลายแผ่นไฟเบอร์เพลท เดิมให้เส้นใยของไฟเบอร์ตั้งฉากกับแกนของคานซึ่งการพันในลักษณะนี้จะคล้ายกับการพันเป็นตัวอักษร U จึงเรียกการยึดรั้งในลักษณะนี้ว่า U-wrap แต่จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการยึดรั้งนี้เป็นการยึดรั้งที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความกว้างของแผ่นไฟเบอร์เพลทซึ่งควรจะคำนึงถึงเมื่อต้องการออกแบบการเสริมกำลังคานที่มีความกว้างมาก

พฤติกรรมการหลุดลอกของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของโครงสร้าง คสล. [17] งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าด้านการหลุดลอกของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของโครงสร้าง คสล. โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกร้าวของวัสดุเชิงประกอบ (Interfacial fracture mechanics) ซึ่งผลทดสอบและการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาพิจารณาร่วมกัน โดยทำการทดสอบตัวอย่างคานประกอบ เหล็ก-ไฟเบอร์-คอนกรีต โดยวิธีการตัดสี่จุด เพื่อคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดและค่าการต้านทานการหลุดลอก พร้อมทั้งใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS วิเคราะห์เปรียบเทียบและหาค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบ ของความต้านทานการหลุดลอก ซึ่งดำเนินการตามวิธีการของผิวน้ำรอยแตก พบว่า ตัวอย่างทดสอบมีความต้านทานการหลุดลอกประมาณ $2.108 \text{ MPa}\sqrt{m}$ และมีความต้านทานรวมเฉลี่ย 35 องศา

สิทธิ โชติสุรรัตน์และคณะ [13] ทดลองเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างการรับแรงดัดของคาน การรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมกับที่ไม่ได้ทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซม โดยทำการทดสอบคาน 4 ตัวอย่างและเสา 3 ตัวอย่าง ก่อนทำการเสริมกำลังจะต้องขัดผิวคอนกรีตบริเวณที่จะติดคาร์บอนไฟเบอร์ให้เรียบ สำหรับการซ่อมแซมใช้น้ำยาเชื่อมประสานฉีดเข้าไปในรอยแตกแล้วจึงติดคาร์บอนไฟเบอร์ จากการทดสอบพบว่าในช่วงก่อนถึงจุดคราก คานทดสอบทุกตัวมีพฤติกรรมไม่ต่างกันมาก คานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ 2 แถบรับน้ำหนักกระทำได้มากที่สุดแต่กำลังไม่ได้เพิ่มขึ้นเต็มที่ 100% จากคานที่เสริมด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ 1 แถบ การวิบัติของคานที่เสริมกำลังจะเกิดอย่างฉับพลันเนื่องจากการหลุดลอกของผิวคอนกรีต ส่วนคานที่ทำการซ่อมแซมวิบัติโดยเกิดการอัดและแตกที่ผิวบนของคาน ส่วนคานที่ถูกซ่อมแซมนั้นพบว่า มีระยะโค้งตัวที่กึ่งกลางคานมากกว่าคานที่เสริมกำลัง แม้ว่าจะรับน้ำหนักประลัยได้น้อยกว่า จากการทดสอบเสาพบว่าเสาทุกต้นวิบัติที่หัวเสา เสาที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมโดยพันด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีกำลังรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น 25% เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้เสริมกำลังหรือซ่อมแซม และพบว่าเสาที่ถูกซ่อมแซมสามารถรับน้ำหนักและมีค่าหน่วยการยึดตัวได้กว่า เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุประสานจะช่วยให้ส่วนผสมคอนกรีตยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้นเช่นเดียวกับคาน

อานนท์ [14] ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาแรงอัดและพฤติกรรมารับแรงของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วัสดุคอนกรีต (Exp.1, Exp.2) ทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC1, RC2) หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด

20x20 ซม. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาผลของขนาดหน้าตัดเสาต่อการรับแรงอัดและความยืดหยุ่นด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (SC1-SC4) หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 15x15, 20x20, 30x30, และ 40x40 ซม. ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Exp.1 และ Exp.2 เทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างพบว่าแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีมาก โดยเฉพาะเมื่อใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตจากผลการทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RC1 และ RC2 สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสาได้ค่อนข้างดีมีค่าคาดเคลื่อนจากผลการทดสอบเท่ากับ 2.09% และ 11.15% แต่ทำนายค่าการคายการยุบตัว ณ ตำแหน่งแรงอัดสูงสุดได้น้อยกว่าผลการทดสอบพอสมควร นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าการใช้สมการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตโดย Desayi & Krishnan [3] กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถทำนายค่าแรงอัดสูงสุดได้ดีมาก แต่อาจไม่สามารถทำนายค่าการยุบตัวได้ดีเท่าที่ควร ในส่วนของแบบจำลอง SC1-SC4 นั้นสรุปว่าแบบจำลองเสาให้ค่าแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม ACI ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีต (C) เท่ากับ 1.0 และเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเหล็กยื่นของเสาที่มีหน้าตัดขนาดเล็กมีส่วนร่วมในการรับแรงอัดได้ดีกว่าเหล็กยื่นในเสาหน้าตัดขนาดใหญ่

2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แนวความคิดที่เอาไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1940 ต่อมาในปี ค.ศ.1943 ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาค่าความเค้นในปัญหามิติเดียว เช่นความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย

ปี ค.ศ. 1956 Turner, Clough, Martins และ Topp ได้วิเคราะห์ปัญหาสองมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นครั้งแรก และได้แสดงวิธีหาสทิงก์ของอีลิเมนต์ของโครงข่ายของอีลิเมนต์คาน และหาสทิงก์ของอีลิเมนต์สองมิติของอีลิเมนต์ระนาบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโดยการสมมติฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่าวิธีสทิงก์โดยตรง (direct stiffness method) และรวมสทิงก์ของอีลิเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นสทิงก์ของโครงสร้างทั้งระบบ ในช่วงปี ค.ศ. 1954 ถึงปี ค.ศ. 1960 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างจึงนิยมใช้วิธีเมทริกซ์ และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้รับความนิยมมากขึ้น

คำว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้ถูกแนะนำขึ้นเป็นครั้งแรกในผลงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นระนาบ โดยใช้อีลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมุมฉากของ Clough ในปี ค.ศ. 1960 ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 Grafton และ Strome ได้เสนอวิธีหาสทิงก์ของแผ่นโลหะโค้ง (curved-shell) ที่มีแกนสมมาตร ทฤษฎีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมมากขึ้นในปี ค.ศ.1961 Melosh แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์อี

ลิเมนต์มีพื้นฐานมาจากวิธีของเรย์ลีย์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz method) ที่ใช้หลักของสมมติ (principle of virtual work) หรือหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) และได้เริ่มในวิธีไฟไนต์ลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับเพลลา, การนำความร้อน และในช่วงปี ค.ศ.1961 ถึงปี ค.ศ. 1965 ได้มีผู้พยายามใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์แก้ปัญหาสามมิติ เช่นในปี ค.ศ. 1961 Martins ได้เสนอวิธีหาสทิกพเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์สามมิติทรงสี่หน้า (tetrahedral) ปี ค.ศ. 1965 Clough , Wilson และ Rishid วิเคราะห์ปัญหาทรงกระบอกตันแกนสมมาตรด้วยวิธีไฟไนต์ลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาที่การกระจัดมีค่ามากและวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (non-linearities)

ในปี ค.ศ. 1965 Archer ได้ใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตอบสนองของระบบโครงสร้าง โดยใช้เมทริกซ์ของมวลแบบแนบเนียน (consistent mass matrix) ของท่อนโลหะ และคานาที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างหนังสือไฟไนต์ลิเมนต์สองเล่มแรกได้จัดพิมพ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1965 และปี ค.ศ. 1966 โดย Zienkiewicz , Cheung , Wilson และโดย Nickell ตาลำดับ หนังสือดังกล่าวได้แสดงวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์กับปัญหาต่างๆ เช่น การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของดิน , การนำความร้อน , การไหลของของไหล เป็นต้น ส่วนหนังสือของ Oden ,1972 ได้เน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์กับวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (nonlinear materials)

การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์ได้ขยายตัวกว้างขึ้น ในปี ค.ศ. 1969 Szabo และ Lee แสดงให้เห็นว่าสามารถจะหาสมการไฟไนต์ลิเมนต์ของโครงสร้างได้โดยวิธีเวทเรซิดิว (weighted-resident method) เช่นวิธีการกาเลอร์คิน (Galerkin's method) จากแนวคิดดังกล่าวทำให้สามารถใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structure) ได้สะดวกขึ้น เช่นในปี ค.ศ. 1977 Lyness ,Owen และ Zienkiewicz ได้ใช้วิธีเวทเรซิดิว วิเคราะห์ปัญหาของสนามแม่เหล็ก (magnetic field) นอกจากนี้มีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์ขยายไปในสาขาอื่นๆ อีก เช่น สาขาชีววิศวกรรม ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน CAD ด้วยวิธีไฟไนต์ลิเมนต์เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในสถาบันการศึกษา และอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องมือคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์ลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้นการใช้งานจึงทำได้สะดวกรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก

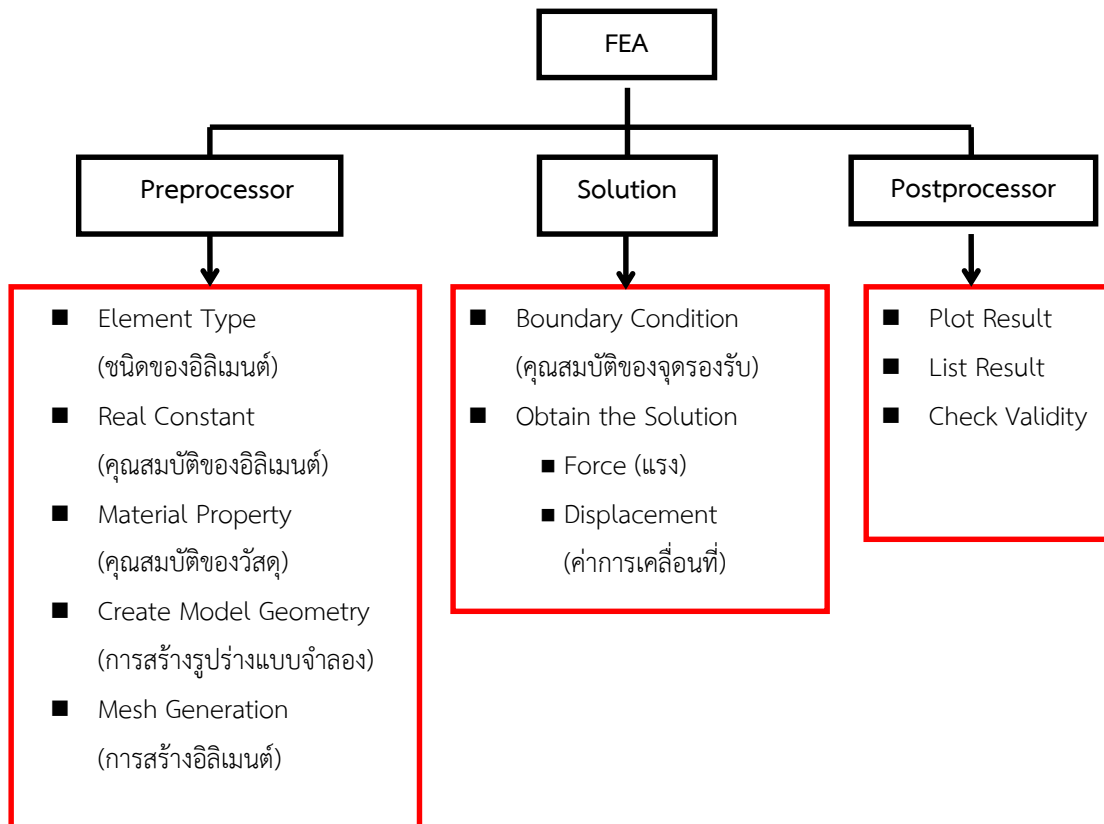
บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองไฟไนลิเมนต์

3.1 บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับในการแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่ได้รับความนิยม มีประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน โดยไม่ต้องทำการทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนลิเมนต์ต้องอาศัยองค์ความรู้เฉพาะทางซึ่งมีความซับซ้อนสำหรับการทำงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยโปรแกรมไฟไนลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ ชนิดอีลิเมนต์ที่ใช้กับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

กระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 3 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) เป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ให้มีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างโครงสร้าง และกำหนดเงื่อนไขจุดรองรับและขอบเขตต่างๆ จำเป็นต้องเหมือนหรือใกล้เคียงกับปัญหาจริงให้มากที่สุดจึงจะนำไปสู่การจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด 2) กระบวนการวิเคราะห์ (Solution) ข้อมูลต่างๆ ของในขั้นตอนแรก จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ และ 3) กระบวนการอ่านผลการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2) จะประกอบด้วยผลเป็นจำนวนมาก ผู้ใช้สามารถสั่งให้โปรแกรมแสดงผลต่างๆ เช่น แรง ความเค้น ความเครียด ระยะการเคลื่อนตัว และอื่นๆ บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง แสดงสรุปได้ตามรูปที่ 3.1

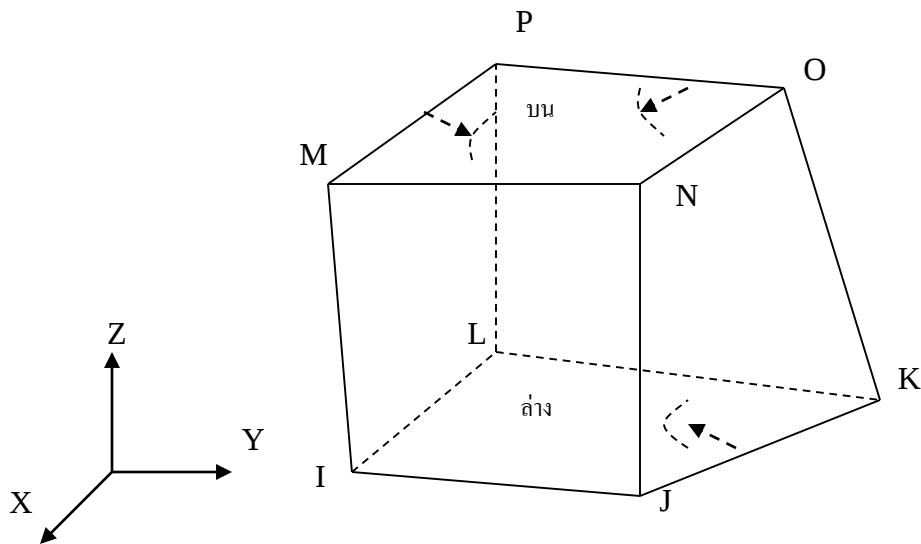


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังสรุปการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 ชนิดของชิ้นส่วนย่อยวัสดุ

3.2.1 คอนกรีต

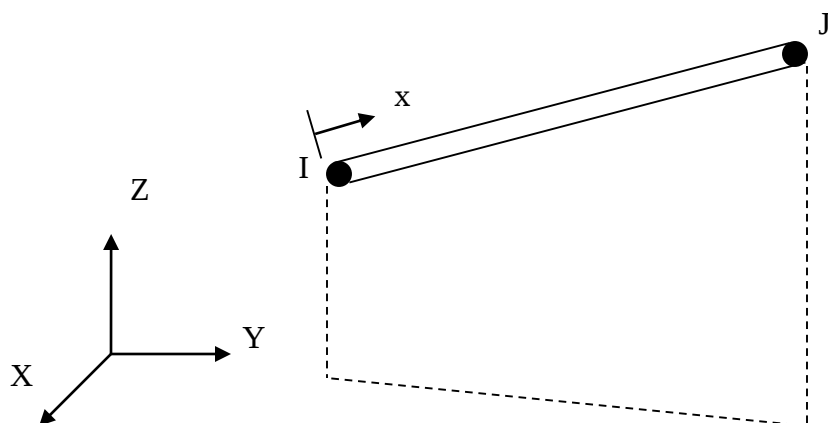
ชนิดของชิ้นส่วนย่อย (Element Type) ที่ใช้สำหรับคอนกรีตคือ ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีตจะถูกกำหนดขนาดด้วยความกว้าง ยาว และสูง ด้วยคำสั่งที่ใช้ในการสร้างจุดต่อจุด (Node) ทั้งหมด 8 จุด ที่ระบุเป็นตัวเลขทรงสี่เหลี่ยม และอ้างอิงพิกัดของจุดต่อตามแกน X Y และ Z ตามลำดับ แต่ละจุดมีดีกรีอิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 ดีกรี คือ มีการเคลื่อนที่อิสระ (Translation) ในทิศทางตามแนวแกน X Y และ Z



รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับคอนกรีต

3.2.2 เหล็กเสริมและเหล็กปลอก

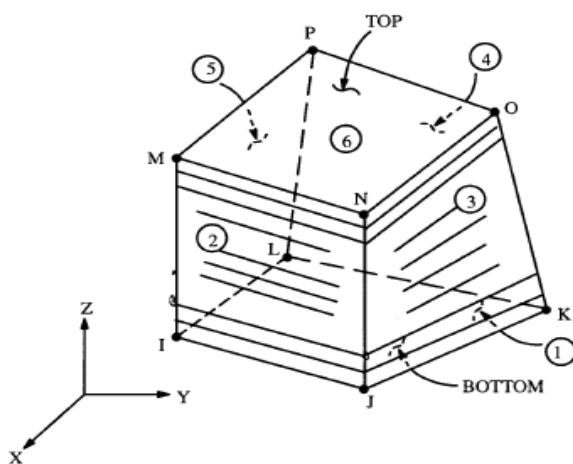
ชนิดของชิ้นส่วนย่อย (Element Type) ที่ใช้สำหรับเหล็กคือ ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของเหล็กจะใช้ จุดเชื่อมจุด (Node) อ้างอิงพิกัดของจุดต่อตามแกน X Y และ Z ในการสร้างชิ้นส่วนย่อยของเหล็กจะสร้างร่วมกับจุดที่สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต เป็นการใช้อยู่ร่วมกัน แต่ละจุดมีดีกรีความอิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 ดีกรีคือ มีการเคลื่อนที่อิสระ (Translation) ในทิศทางตามแนวแกน X Y และ Z แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับเหล็ก

3.2.3 แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

อิลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของแผ่นไฟเบอร์นั้นจะใช้ SOLID46 สำหรับการขึ้นอิลิเมนต์ชนิดนี้มีวัสดุความหนาต่างกันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความหนาของวัสดุ จุดแต่ละจุดของอิลิเมนต์ชนิดนี้สามารถเคลื่อนที่แบบอิสระได้ 3 ทิศทางในแนวแกน x, y และ z ตำแหน่งจุดและทิศทางของแผ่นไฟเบอร์แสดงในรูปที่ 3.4

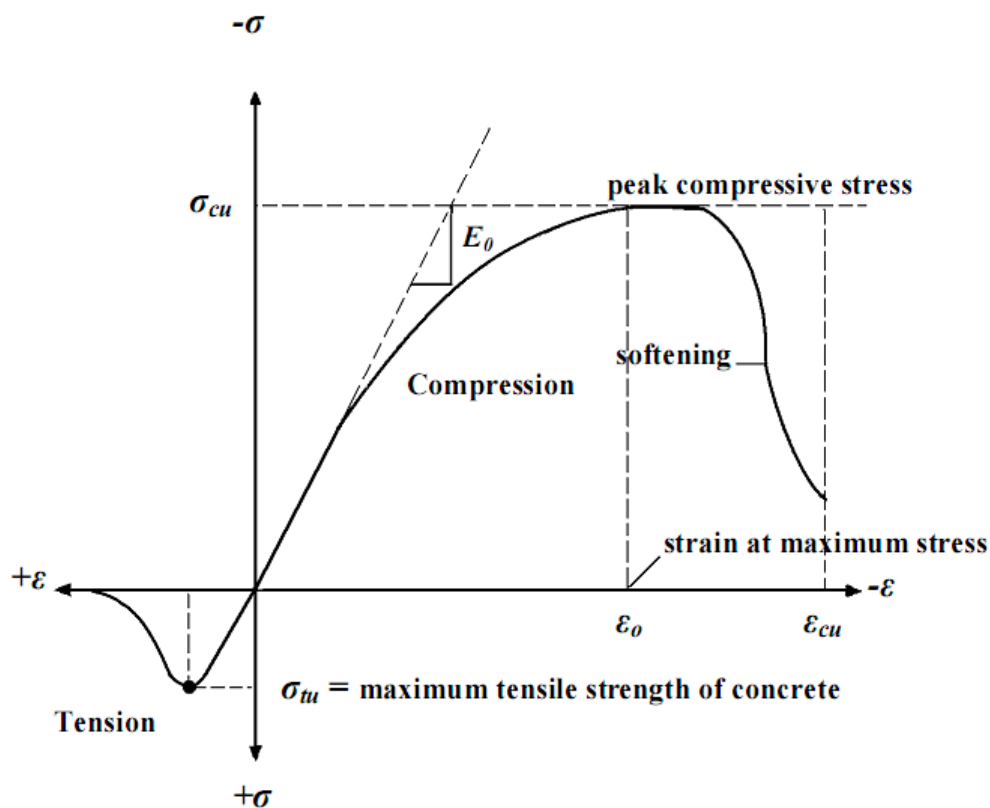


รูปที่ 3.4 อิลิเมนต์ SOLID46 -3 มิติที่ใช้สำหรับแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

3.3.1 คอนกรีต

ในการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คุณสมบัติของคอนกรีตในการรับแรงอัดเป็นเรื่องยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมาก นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติของคอนกรีตยังเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่กึ่งเปราะและมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน เมื่อรับแรงอัดและรับแรงดึง ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตปกติจะมีค่าประมาณ 8-15% ของกำลังแรงอัด (Shah, et al. 1995) ค่าหน่วยแรงอัด- ความเครียดอัด (Compressive Stress- Compressive Strain) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Bangash 1989)



รูปที่ 3.5 กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตที่น้ำหนักปกติ (Bangash 1989)

เมื่อ

E_0 = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

σ_{cu} = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

σ_{tu} = กำลังรับดึงสูงสุดของคอนกรีต

σ = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

ε_0 = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ε = ความเครียดอัดของคอนกรีต

ε_{cu} = ความเครียดอัดสูงสุดของคอนกรีต

ในช่วงการรับแรงอัดของคอนกรีต กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 30 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้นค่าความเค้นและค่าความเครียดของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง จนถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (σ_{cu}) เส้นโค้งความเค้นของคอนกรีตจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงกำลังรับอัดของคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเครียดของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ส่วนความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึง กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงความต้านทานแรงดึงสูงสุด หลังจากจุดนี้ คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวและเกิดการพังในที่สุด จนกำลังรับแรงอัดค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์ (Bangash 1989)

3.3.1.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของคอนกรีต

ค่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา มี ดังต่อไปนี้

1) หน่วยรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (Uniaxial compressive Strength, f'_c) เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถการรับแรงอัดของคอนกรีต

2) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic Modulus, E_c) เป็นค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดในช่วงยืดหยุ่น

3) ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต (Uniaxial tensile cracking stress, f_r) คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงดึงต่ำมาก เฉลี่ยประมาณ 10% ของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ACI-318 ดังนี้

$$f_r = 0.623\sqrt{f'_c} \quad \text{เมกะปาสกาล (MPa)}$$

กำหนดให้

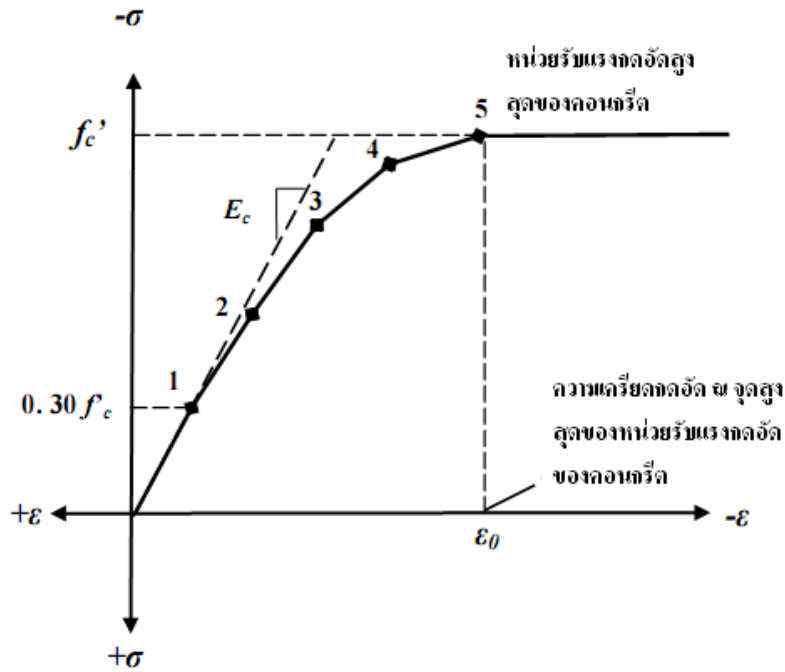
f_r = ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

f'_c = หน่วยรับแรงอัดสูงสุดคอนกรีต

4) ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต (Poisson's ratio, ν) เป็นค่าแสดงสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวราบของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกต่อด้วยความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกรับรับแรงอัด จากการทดสอบ คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 ในการศึกษา นี้ กำหนดค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ 0.2 ในการใส่ค่าคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองไฟไนติคัลเมนต์

5) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (Shear transfer coefficient, B_r) ในการใส่ค่าคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การพังด้วยแรงเฉือนของคอนกรีตจะแบ่งการใส่ค่าเป็น 2 แบบ คือ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบราบเรียบ (Shear transfer coefficients for an open crack (smooth crack)) และการใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบรุนแรง (Shear transfer coefficients for a closed crack (rough crack)) ซึ่งเป็นค่าแสดงลักษณะการพังของคอนกรีตด้วยแรงเฉือนโดยในโปรแกรม ANSYS กำหนดค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 ซึ่งมีความหมาย ดังนี้ เมื่อใส่ค่าเข้าใกล้ 0.0 จะเป็นการพังแบบราบเรียบ (smooth crack) กล่าวคือเป็นการพังของคอนกรีตที่สมบูรณ์ที่มีการถ่ายแรงเฉือนแบบสมบูรณ์ ส่วนใส่ค่าเข้าใกล้ 1.0 เป็นการพังแบบระเบิดรุนแรง (rough crack) กล่าวคือเป็นการพังของคอนกรีตที่ไม่มีการถ่ายแรงเฉือนภายในคอนกรีต

6) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดอัด ของคอนกรีต (Compressive Stress-Compressive Strain) เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต ในการใส่ค่าลงไปคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองเสา สร้างจาก 6 จุดเชื่อมต่อกัน โดยใช้สมการความสัมพันธ์ค่าความเค้นและค่าความเครียดของคอนกรีตตามการศึกษาของ Desayi และ Krishnan (1964) แสดงไว้ในสมการที่ 3.1-3.3 ค่าแรกจะเริ่มที่ศูนย์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต แล้วมายังจุดที่ 1 ที่คำนวณจาก $0.3f'_c$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีตในช่วงเชิงเส้น และจุดที่ 2 3 4 และจุดที่ 5 เป็นจุดสูงสุดของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตพอมันจุดที่ 5 ไปคอนกรีตจะเกิดการวิบัติของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต Desayi และ Krishnan (1964)

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2} \quad 3.1$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2 f_c'}{E_c} \quad 3.2$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad 3.3$$

กำหนดให้

f_c' = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

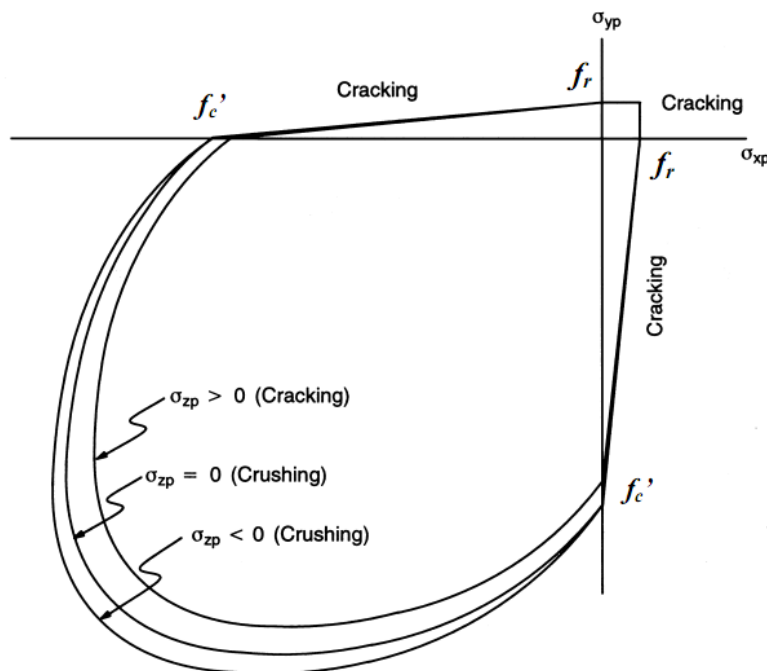
ε_0 = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

σ_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

ε_c = ความเครียดอัดของคอนกรีต

7) เกณฑ์การพังของคอนกรีต

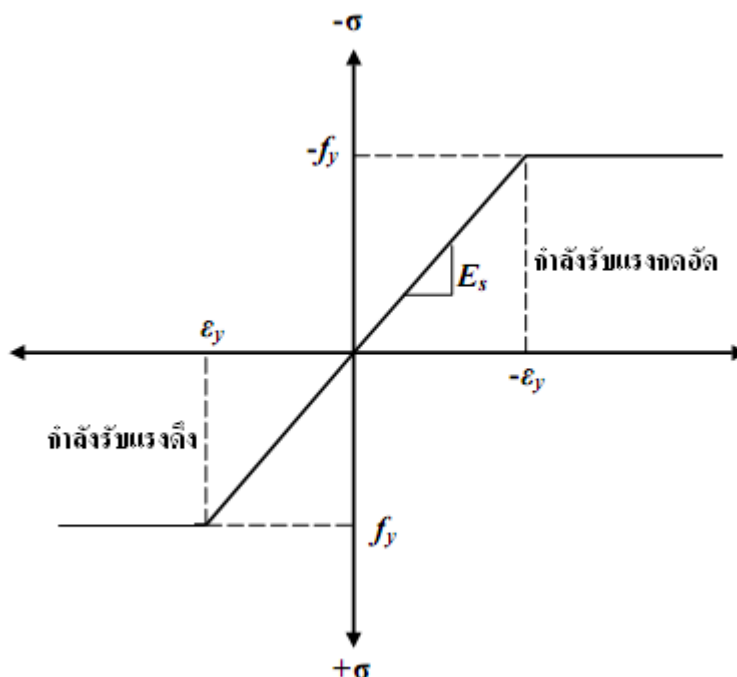
ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID 65) เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองของวัสดุคอนกรีตนั้นต้องทำการกำหนดลักษณะการพังของคอนกรีตด้วย ซึ่งลักษณะการพังของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ ฉีกขาด (cracking) หรือแตกหัก (crushing) ด้วยแรงอัดเมื่อคอนกรีตได้รับในแนวแกน เกณฑ์การพังของคอนกรีตเนื่องจากหน่วยแรงอัดของคอนกรีต สามารถคำนวณได้ (William และ Warnke 1975) ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติที่แสดงดังรูป 3.7 มีความสำคัญในการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในทิศทางแนวแกน x และ y โดยอธิบายแนวแกนด้วยสัญลักษณ์ σ_{xp} และ σ_{yp} ตามลำดับในเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายตัวของหน่วยแรงดึง ในทิศทางเดียวกันกับการพังที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคอนกรีต หลังจากที่เกิดการแตกร้าวของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีตแล้ว ความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต จะกำหนดเป็นศูนย์ในทิศทางขนานกับทิศทางของหน่วยแรงดึง การเกิดการแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงอัดกระจายตัวและจะเกิดการพังที่ผิวด้านนอกของคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ การใส่ค่าควบคุมการพังของคอนกรีตสำหรับชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต (Concrete controlled the failure of the concrete element) โดยเปิดค่า การพังแบบฉีกขาด (Cracking) และปิดค่าการพังแบบแตกหัก (Crushing)



รูปที่ 3.7 ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติ (William และ Warnke 1975)

3.3.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ชนิดของเหล็กเสริม การใส่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติกโดยสมบูรณ์ (โดยละทิ้งพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่ม) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียด ของเหล็กเสริม

กำหนดให้

σ = ความเค้นของเหล็กเสริม

ϵ = ความเครียดของเหล็กเสริม

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

f_y = ความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริม

ϵ_y = ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม

3.3.2.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ในการวิเคราะห์ไฟในอิลิเมนต์ ประกอบด้วย

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (Elastic Modulus, E_s)
- ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio, ν) ของเหล็กเสริม
- ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก (A_s)
- กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength)

- กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)
- ค่าความเค้น-ความเครียดดึง (Stress-Strain Curve) ของเหล็กเสริม

3.3.3 แผ่นไฟเบอร์

แผ่นไฟเบอร์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ซึ่งองค์ประกอบนี้ไม่ได้ผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน องค์ประกอบหนึ่งคือเส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยแก้วซึ่งแข็งแรงและแกร่งกว่าจะถูกเสริมอยู่ในองค์ประกอบที่สองคือโพลิเมอร์อย่างต่อเนื่องที่เรียกว่าเมทริกซ์

ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับแผ่นไฟเบอร์ ในรูปแบบอิลิเมนต์ มีดังนี้

- จำนวนชั้น
- ความหนาของแต่ละชั้น
- การกำหนดทิศทางของแผ่นไฟเบอร์สำหรับแต่ละชั้น
- โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นไฟเบอร์ทั้ง 3 ทิศทาง (E_x , E_y และ E_z)
- โมดูลัสเฉือน (Shear modulus) จากแผ่นไฟเบอร์สำหรับทั้ง 3 ระนาบ (G_{xy} , G_{xz} และ G_{yz})
- อัตราส่วนปัวซองส์ของทั้ง 3 ระนาบ (ν_{xy} , ν_{yz} และ ν_{xz})

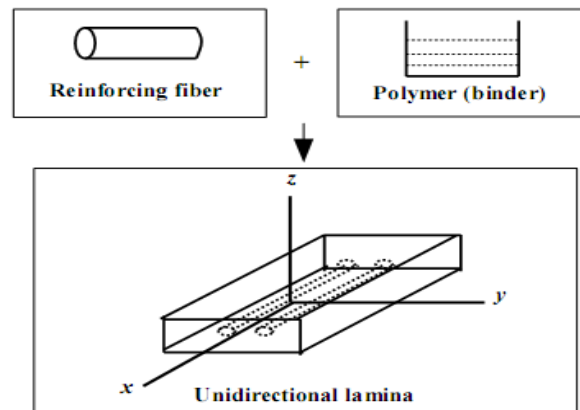
หมายเหตุ ระบบพิกัดเฉพาะสำหรับแผ่นไฟเบอร์ในแต่ละชั้น มีการกำหนดทิศทางในแนวแกน x เป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของเส้นใย ในขณะที่แนวแกน y และแนวแกน z มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน x คุณสมบัติของ Isotropic materials เช่นโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) และอัตราส่วนปัวซองส์เหมือนกันในทุกทิศทาง กรณีนี้ไม่ใช้กับ orthotropic materials พิเศษที่จำเป็นในการกำหนดคุณสมบัติในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างเช่น $E_x \neq E_y$ และ $\nu_{xy} \neq \nu_{yz}$ โดย E_x เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางเส้นใย และ E_y เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางตั้งฉากกับในแนวแกน y ใช้อัตราส่วนปัวซองส์สำหรับวัสดุ orthotropic materials เป็นสาเหตุทำให้เกิดความสับสน ดังนั้นข้อมูลของ orthotropic material data ปรากฏใน ν_{yz} หรือรูปแบบปัวซองส์จากโปรแกรม ANSYS อัตราส่วนปัวซองส์ที่สำคัญคืออัตราส่วนของความเครียดในทิศทาง y ความเครียดที่ตั้งฉากกับทิศทาง x เมื่อความเครียดถูกดึงไปใช้เป็นในทิศทาง x ปริมาณ ν_{yx} ใช้ในการแทนอัตราส่วนว่า minor Poisson's ratio และมีขนาดเล็กกว่า ν_{xy} ขณะที่มีความใหญ่กว่า E_y สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ν_{xy} และ ν_{yx}

$$\nu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \nu_{xy}$$

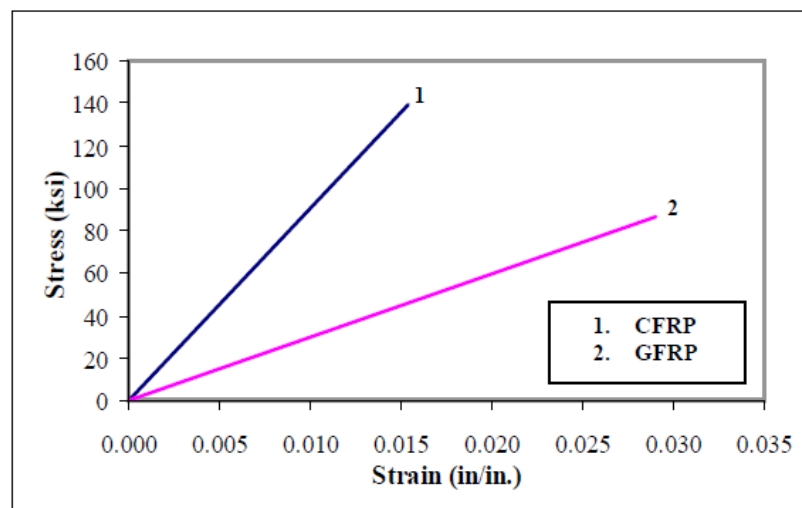
ν_{yx} = อัตราส่วนย่อยของปัวซองส์ (Minor Poisson's ratio)

E_x = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง x ทิศทางเส้นใย (Elastic modulus in the x direction, fiber direction)

E_y = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง y (Elastic modulus in the y direction)



รูปที่ 3.9 แผนภาพชิ้นส่วนแผ่นไฟเบอร์

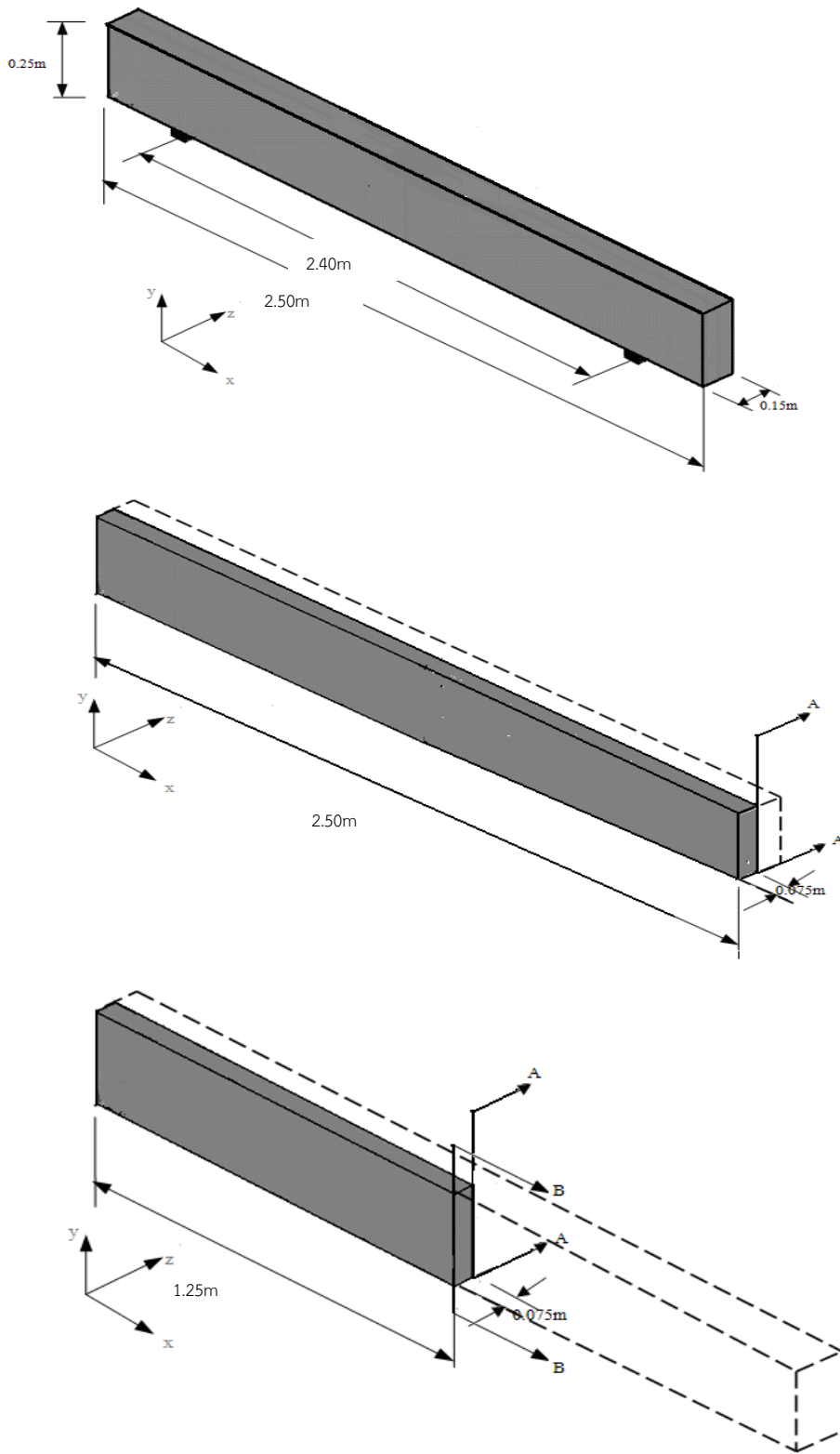


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับแผ่นไฟเบอร์ในทิศทางของเส้นใย

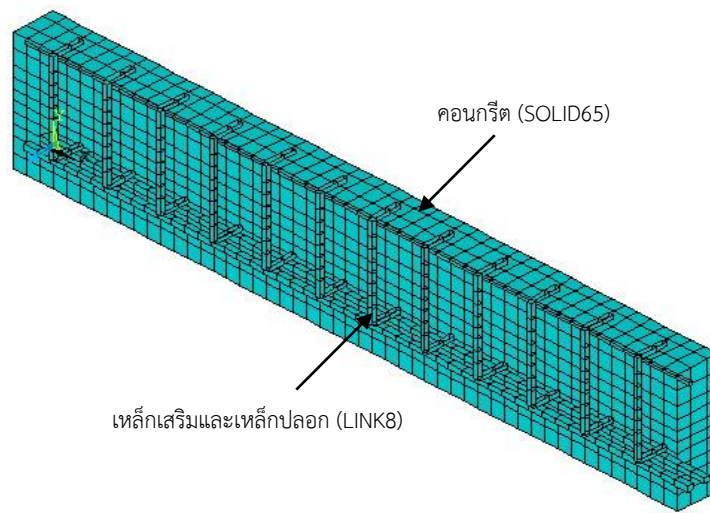
3.4 คุณสมบัติสมมาตร

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ได้นำเอาคุณสมบัติความสมมาตรมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง กล่าวคือจะสร้างแบบจำลองเพียง $\frac{1}{2}$ หรือ $\frac{1}{4}$ ของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองจริง หลักความเป็นสมมาตรของแบบจำลอง จะต้องทำการล๊อกระนาบไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยล๊อกระนาบในแกน Z ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ รูปที่ 3.11 แสดงการจำลองคุณสมบัติสมมาตร จุตรองรับ และการใส่แรง ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

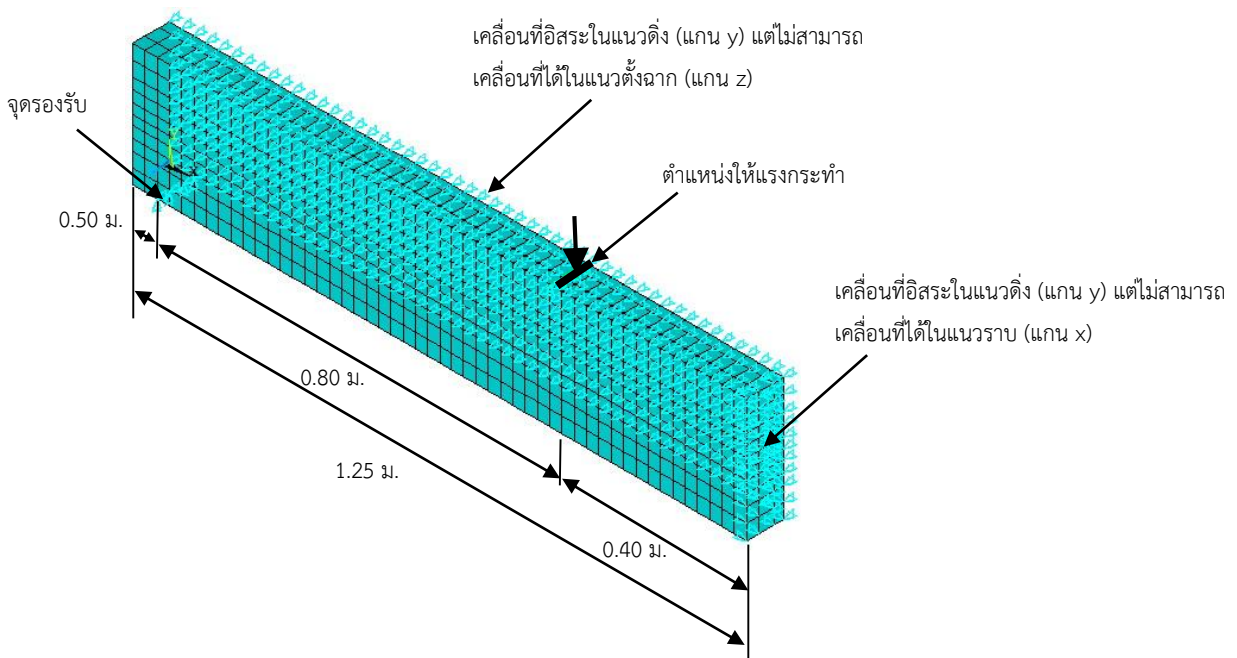
เพื่อทำการจำลองคุณสมบัติสมมาตรดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ที่กึ่งกลางความยาวคานจากปลายคาน จุด (node) ทั้งหมดบนระนาบนี้ทั้งระนาบจะเคลื่อนที่ลงได้อิสระในแนวตั้ง (แกน y) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ (แกน x) แสดงดังในรูป และที่ระนาบครึ่งหนึ่งของหน้าตัดตลอดความยาวคาน แสดงดังรูปตัด จุด (node) ที่อยู่บนระนาบนี้ทั้งหมดจะเคลื่อนที่อิสระในแนวตั้ง (แกน y) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งฉาก (แกน z) ที่ตำแหน่ง จุตรองรับคานทดสอบจุด (node) บริเวณนี้จะจำลองการเคลื่อนที่แบบลูกกลิ้ง (Roller) โดยเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวราบ (แกน x) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งฉากกับแนวราบที่เหลืออีก 2 แนว (แกน y และ z) การวิเคราะห์แบบจำลองจะใช้การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) และเพื่อให้แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ผลลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence) สิ่งที่สำคัญที่จำเป็นต้องทำการปรับค่าคือ การกำหนดค่าการต้านทานผลการลู่เข้า (Convergence Tolerance) โดยทำการเพิ่มค่าจากค่ากำหนดมาตรฐานของโปรแกรมอีก 5 เท่า เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ผลได้



รูปที่ 3.11 ขนาดและวิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหนึ่งในสี่ของคานทดสอบ



รูปที่ 3.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คานคอนกรีตเสริม (FEMB1)



รูปที่ 3.13 การจำลองคุณสมบัติสมมาตร จุดรองรับ และการใส่แรง ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คาน FEMB1

บทที่ 4

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วัสดุคอนกรีต

4.1 แบบจำลองกล่องคอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

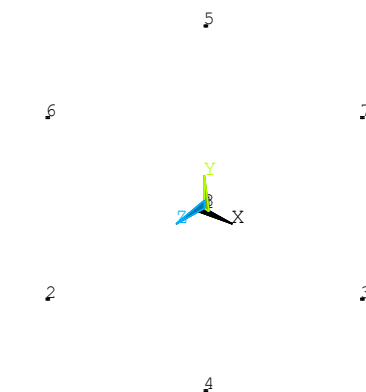
ในหัวข้อนี้จะเสนอการสร้างแบบจำลองและผลการศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองกล่องคอนกรีตสี่เหลี่ยมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำข้อมูลงานวิจัยของอภินันท์ ภูวัน และคุณสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา [24] มาสร้างแบบจำลองคอนกรีตสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 1x1x1 เซนติเมตร และใช้เอลิเมนต์ขนาด 1x1 เซนติเมตร ทั้งนี้ในการจำลองแบบกล่องคอนกรีตสี่เหลี่ยมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การสร้างแบบจำลองกล่องคอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาด 1x1x1 เซนติเมตร

การสร้างแบบจำลองกล่องคอนกรีต เป็นการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกน ความสามารถกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต และความเครียดกอดอัดภายในของคอนกรีต

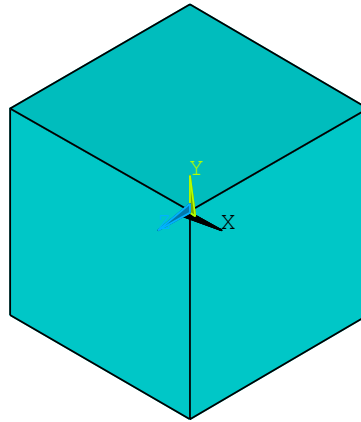
วิธีการสร้างแบบจำลองกล่องคอนกรีต (Box Model) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดคุณสมบัติของของคอนกรีต
- 2) กำหนดหน้าตัดรูปทรงของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือเรียกว่าการกำหนดระยะห่างระหว่างจุด (Node) เป็นจุดๆเชื่อมต่อกัน ซึ่งจะสร้างรูปทรงแบบเต็มของกล่องคอนกรีตสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดังรูปที่ 4.1



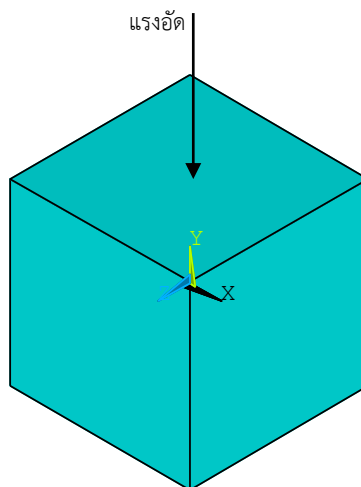
รูปที่ 4.1 การสร้างกล่องคอนกรีต

3) สร้างเนื้อคอนกรีตภายในชั้นส่วนกล่องคอนกรีตที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

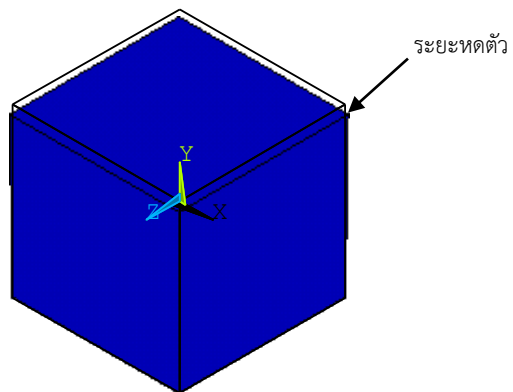


รูปที่ 4.2 การสร้างเนื้อคอนกรีต

4) ทดสอบชิ้นงานคอนกรีต (Cylinder Model) โดยล็อกแบบจำลอง ในแนวแกน X และแนวแกน Z เพื่อไม่ให้แบบจำลองเกิดการขยับตัว และใส่น้ำหนักกดตามทิศทางในแนวแกน Y จะทำให้แบบจำลองเกิดการยุบตัวลง จนกระทั่งแบบจำลองเกิดการพังก็จะไม่สามารถรับแรงกดอัดต่อไปได้อีก ซึ่งจะทำให้แบบจำลองเกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.5

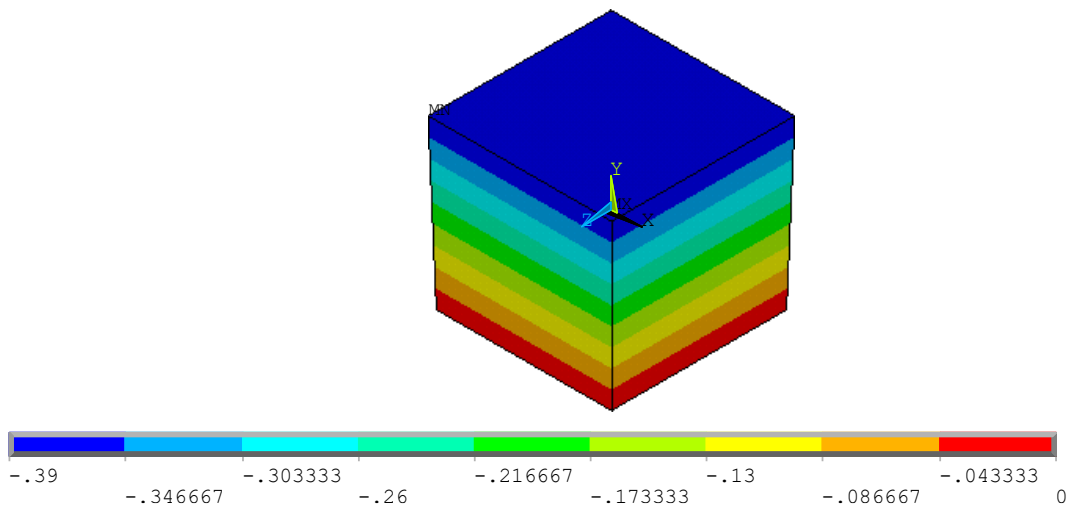


รูปที่ 4.3 ลักษณะการทดสอบชิ้นงานคอนกรีต



รูปที่ 4.4 ลักษณะการเสียรูปและระยะหดตัวของกล่องคอนกรีตหลังจากการทดสอบ

5) นำค่าแรงอัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะหดตัวของกล่องคอนกรีต



รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานคอนกรีต

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่าง แบบจำลองคอนกรีตที่เปลี่ยนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ผลการทดลองกับแบบจำลองกล่องคอนกรีตที่เปลี่ยนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สมการของ Desayi โดยแบบจำลองคอนกรีตที่เปลี่ยนขนาด 1x1x1 เซนติเมตร

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองกล่องคอนกรีตที่เปลี่ยนขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลผลการทดลอง และสมการของ Desayi มาคำนวณหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต เพื่อนำไปกำหนดใช้ในคุณสมบัติของคอนกรีตในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ส่วนผสมคอนกรีต BOX01 ของผลการทดลองมีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 402 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 189,271 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.225 และส่วนผสมคอนกรีต BOX01 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 402 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 40.10 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 302,754 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.225 ส่วนผสมคอนกรีต BOX02 ของผลการทดลอง มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 379 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 188,789 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.197 และส่วนผสมคอนกรีต BOX02 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 379 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 38.94 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 293,965.6 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.197

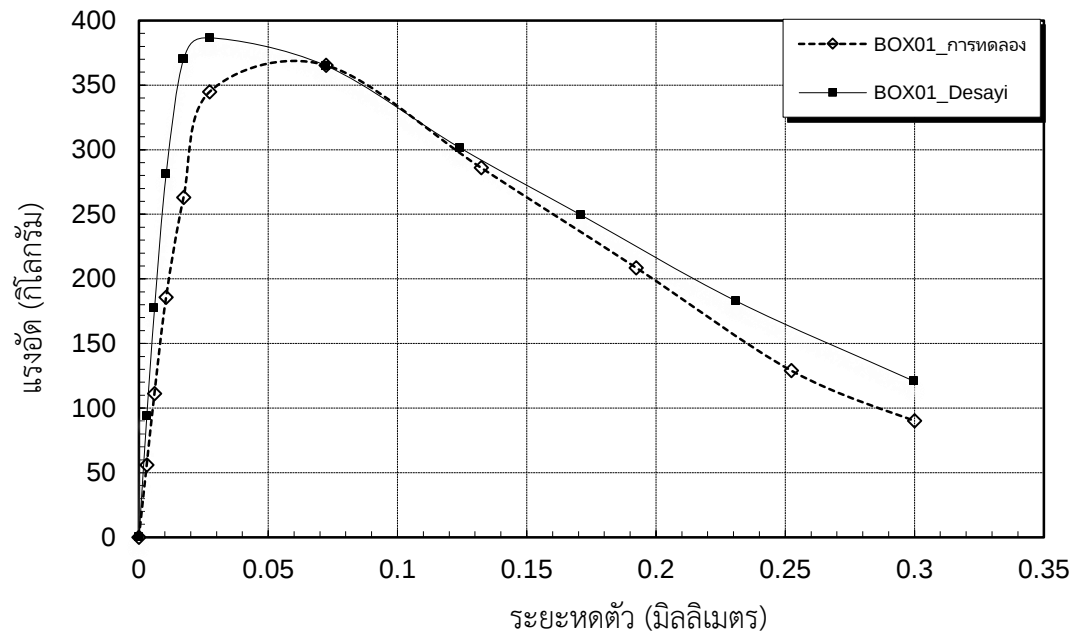
ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังแรงอัด กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตที่ส่วนผสมต่างๆของผลการทดลอง และสมการ Desayi

แบบจำลอง	กำลังรับแรงอัด (f_c')		กำลังรับแรงดึง (f_r)		ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c)		ค่าปัวซองส์ (ν)	
	กก./ชม ²		กก./ชม ²					
	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi
BOX01	402	402	28	40.10	189,271	302,754.1	0.225	0.225
BOX02	379	379	28	38.94	188,789	293,965.6	0.197	0.197

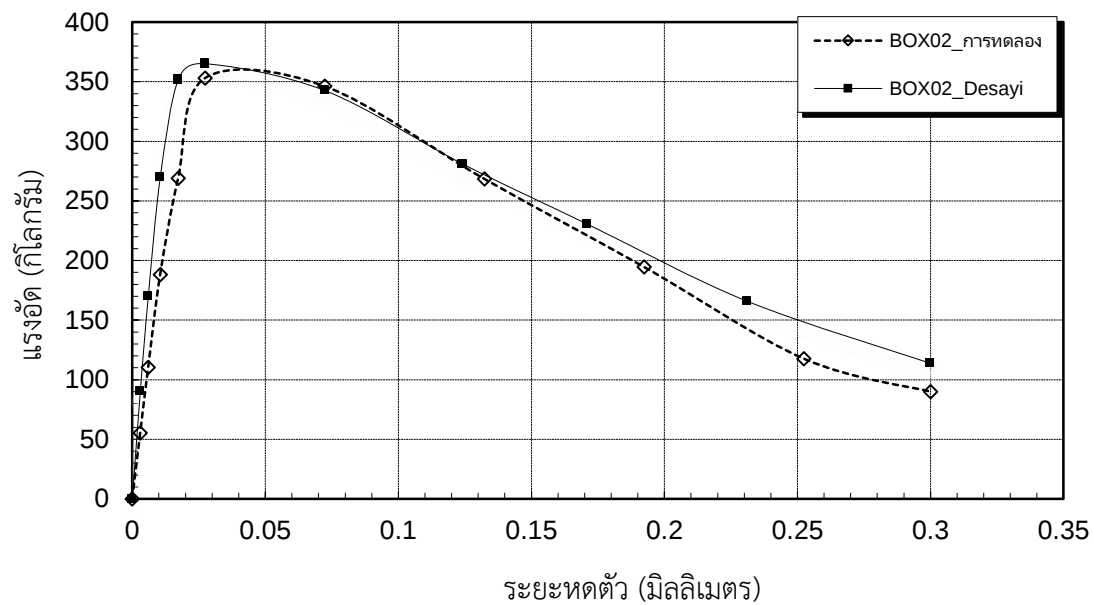
หมายเหตุ ค่าการทดสอบมาจากการทดสอบคอนกรีตห้องปฏิบัติการ

ค่ากำลังรับแรงอัด (f_c') และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ได้จากสมการ (3-1)

ค่ากำลังรับแรงดึง (f_r) ได้จากสมการ (3-2)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะหัดตัวของแบบจำลองคอนกรีตสี่เหลี่ยม BOX01 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 1x1 เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะหัดตัวของแบบจำลองคอนกรีตสี่เหลี่ยม BOX02 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 1x1 เซนติเมตร

4.2 แบบจำลองคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

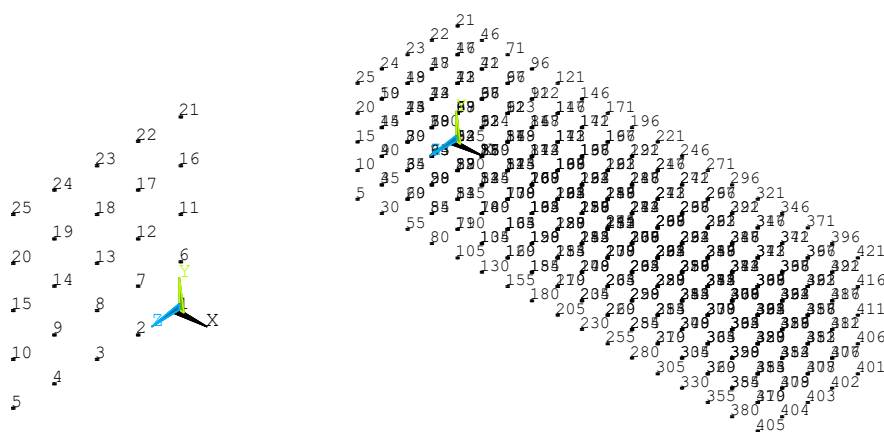
เป็นการนำเสนอการสร้างแบบจำลองและผลการศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยนำข้อมูลงานวิจัยของอกินันท์ ภูวัน และคุณสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา[24] มาสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตที่มีขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดอีลิเมนต์ขนาด 1 เซนติเมตร ทั้งนี้ในการจำลองแบบกล่องคอนกรีตที่เปลี่ยนด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นเพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร

การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีต เป็นการสร้างแท่งคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกน ความสามารถกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต และความเครียดกดอัดภายในของคอนกรีต

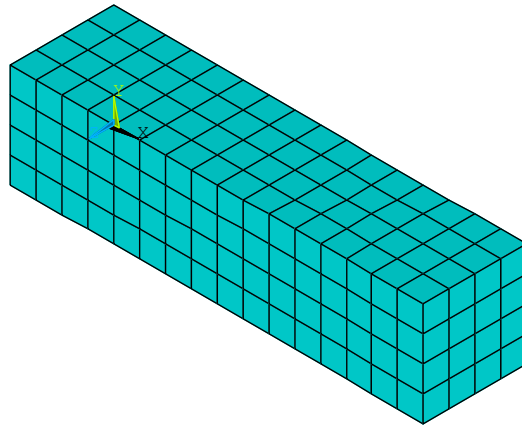
วิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีต มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดคุณสมบัติของของคอนกรีต
- 2) กำหนดหน้าตัดรูปทรงของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ หรือเรียกว่าการกำหนดระยะห่างระหว่างจุด (Node) เป็นจุดๆเชื่อมต่อกัน ซึ่งจะสร้างรูปทรงแบบเต็มของคานคอนกรีต ดังแสดงรูปที่ 4.8



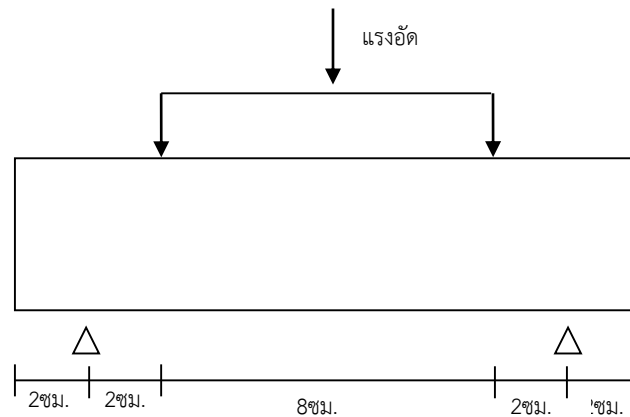
รูปที่ 4.8 แสดงการสร้างกล่องคอนกรีต

- 3) แบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนเล็กๆหลายชิ้นภายในชิ้นส่วนใหญ่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

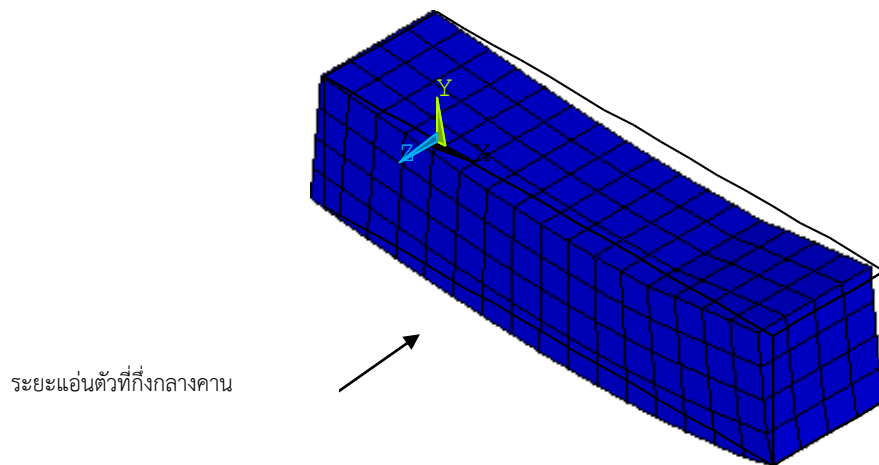


รูปที่ 4.9 การแบ่งชิ้นย่อย (Element) ของคอนกรีต

4) ทดสอบชิ้นงานคอนกรีต โดยล็อกแบบจำลอง ในแนวแกน X และแนวแกน Z เพื่อไม่ให้แบบจำลองเกิดการขยับตัว และใส่น้ำหนักกดตามทิศทางในแนวแกน Y จะทำให้แบบจำลองเกิดการยุบตัวลง จนกระทั่งแบบจำลองเกิดการพังก็จะไม่สามารถรับแรงกดอัดต่อไปได้อีก ซึ่งจะทำให้แบบจำลองเกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12

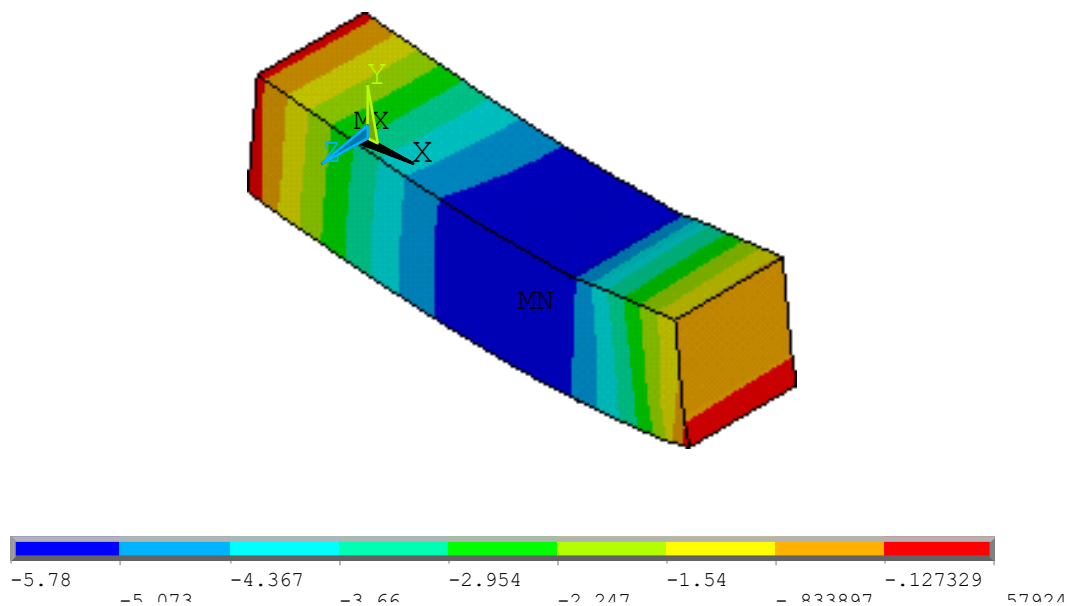


รูปที่ 4.10 ลักษณะการทดสอบของคานคอนกรีต



รูปที่ 4.11 ลักษณะการเสียรูปและระยะแฉ่งตัวของคานคอนกรีตหลังจากการทดสอบ

5) นำค่าแรงอัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแฉ่งตัวของคานคอนกรีต



รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานคอนกรีต

4.2.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่าง แบบจำลองคานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ผลการทดลองกับแบบจำลองคานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สมการของ Desayi โดยแบบจำลองคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร

ในหัวข้อนี้ได้เสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ซึ่งจะมีคานที่เป็นเนื้อคอนกรีตล้วนๆ และคานคอนกรีตที่การเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ไวด์ด้านล่าง และคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ไวด์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สมการของ Desayi มาคำนวณหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต เพื่อนำไปกำหนดใช้ในคุณสมบัติของคอนกรีตในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงคุณสมบัติแผ่นไฟเบอร์

ชนิดของแผ่นไฟเบอร์	ใยแก้ว
น้ำหนักต่อพื้นที่	439 กรัม/ตร.มม.
ความหนา	0.017 ซม.
กำลังรับแรงดึง	22,500 กก./ตร.ซม.
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	725,807 กก./ตร.ซม.

จากตารางที่ 4.2 พบว่าคุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ มีน้ำหนักต่อพื้นที่เท่ากับ 439 กรัม/ตารางมิลลิเมตร ความหนาเท่ากับ 0.017 เซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 22,500 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 752,807 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ส่วนผสมคอนกรีต CB1E มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 402 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 189,271 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.225 และส่วนผสมคอนกรีต CB1D มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 402 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 40.10 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 302,754 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.225

ส่วนผสมคอนกรีต CB2E มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 379 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 188,789 และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.197 และส่วนผสมคอนกรีต CB2D มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 379 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 38.94 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่า

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังแรงอัด กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตที่ส่วนผสมต่างๆของผลการทดลอง และสมการ Desayi

แบบจำลอง	กำลังรับแรงอัด (f_c') กก./ซม ²		กำลังรับแรงดึง (f_r) กก./ซม ²		ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c)		ค่าปัวซองส์ (ν)	
	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi	การทดสอบ	Desayi
CB1E	402	-	28	-	189,271	-	0.225	-
CB2E	379	-	28	-	188,789	-	0.197	-
CB1D	-	402	-	40.10	-	302,754.1	-	0.225
CB2D	-	379	-	38.94	-	293,965.6	-	0.197

หมายเหตุ ค่าการทดสอบมาจากการทดสอบคอนกรีตห้องปฏิบัติการ

ค่ากำลังรับแรงอัด (f_c') ได้จากสมการ (3-1)

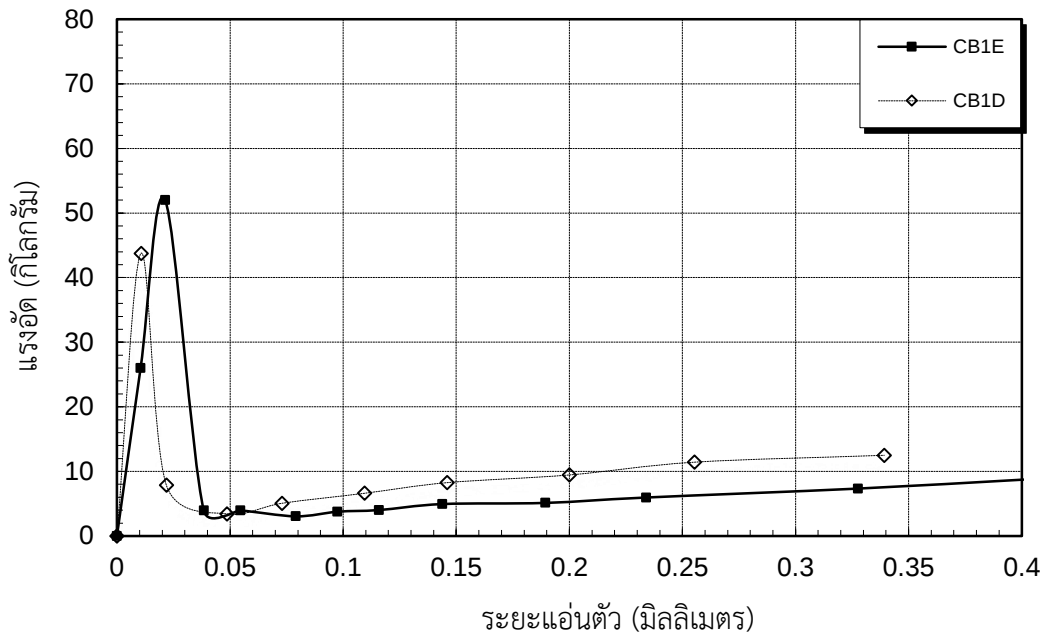
ค่ากำลังรับแรงดึง (f_r) ได้จากสมการ (3-2)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ได้จากสมการ (3-1)

4.2.2.1 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการ

ทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB1

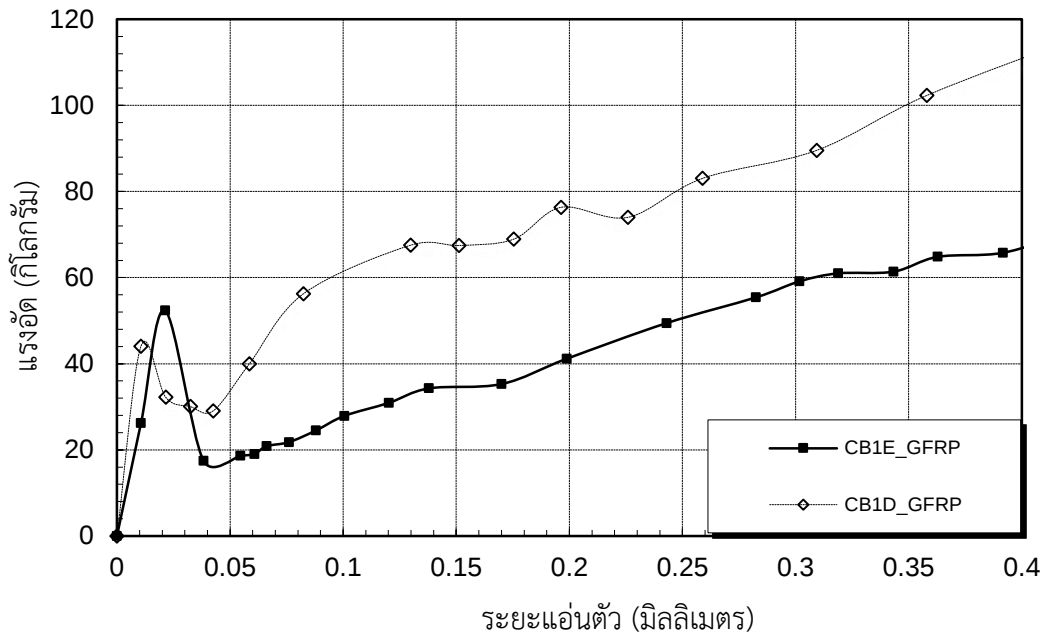
ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB1 คานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอ่นตัวของคานคอนกรีต CB1 จากรูปที่ 4.12 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.02 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.40081 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 43.75 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.33923 ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

4.2.2.2 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ผลการทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง

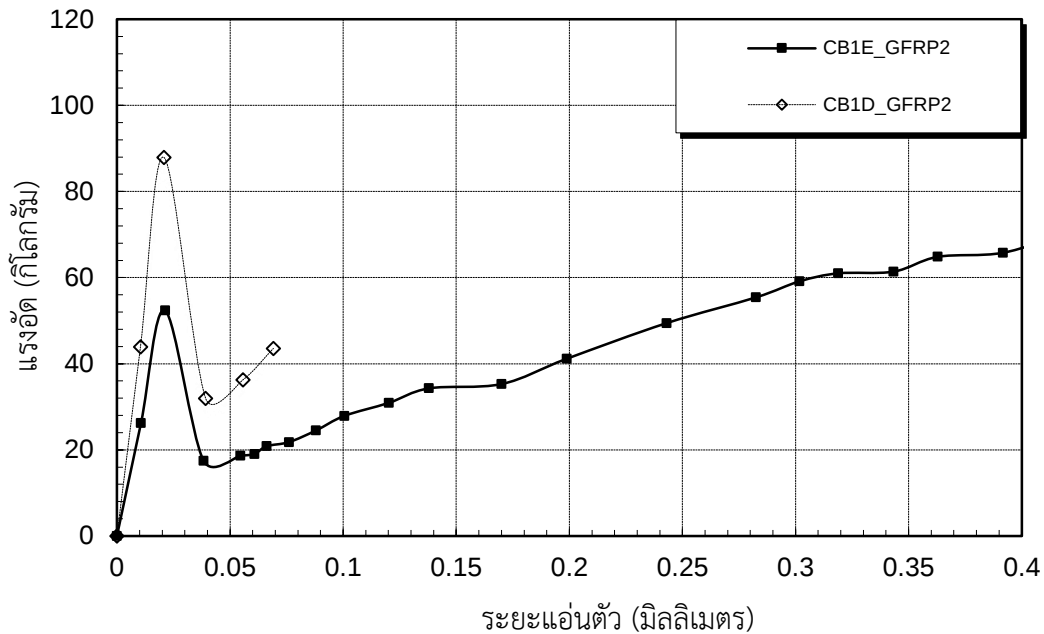
ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB1 คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB1 จากรูปที่ 4.14 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E_GFRP) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.388 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.61295 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D_GFRP) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 44.06 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.2934 ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

4.2.2.3 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ผลการทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้าง และด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB1 คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้าง และด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB1 จากรูปที่ 4.15 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E_GFRP2) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.248 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.826 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D_GFRP2) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 87.88 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.06911 ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง



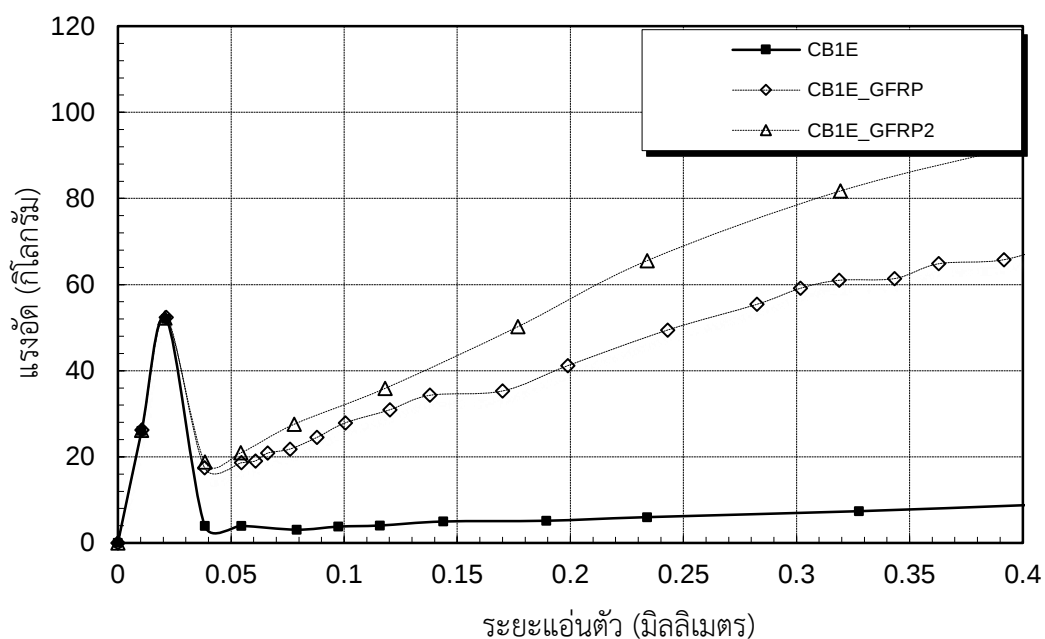
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

4.2.2.4 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ผลการทดลอง ของคานคอนกรีต CB1

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB1 คานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของผลการทดลอง นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB1 จากรูปที่ 4.16 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.02 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.40081 มิลลิเมตร

คานคอนกรีตที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E_GFRP) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.388 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.61295 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB1E_GFRP2) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.248 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.826

มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้างและด้านข้าง (CB1E_GFRP2) จะสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB1E_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB1E) ทำให้สรุปได้ว่า คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB1E_GFRP2) มีความยืดหยุ่นมากกว่าและรับแรงได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB1E_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB1E)

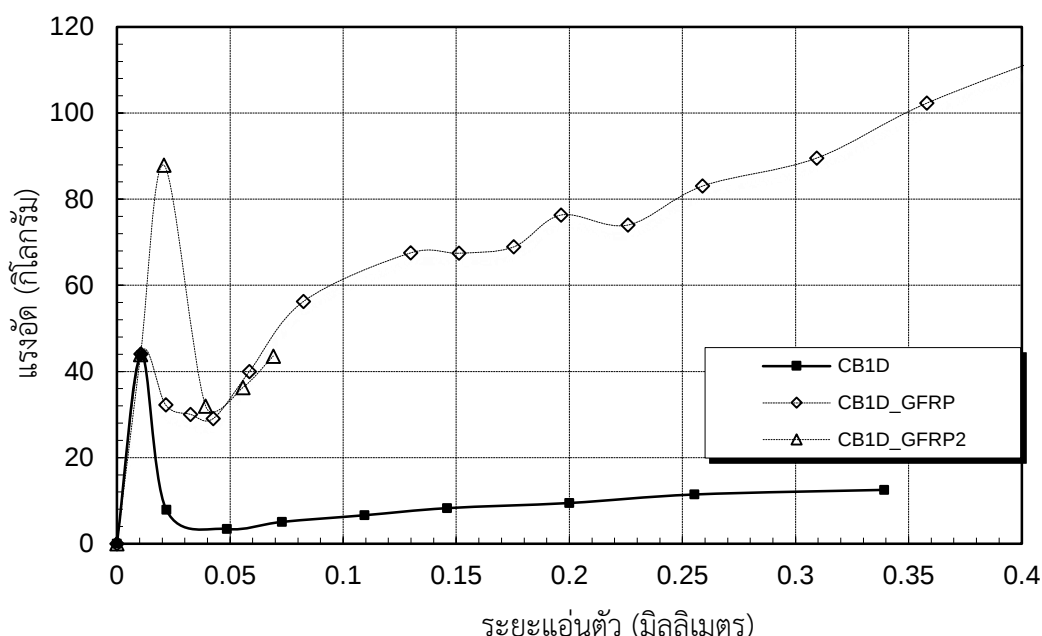


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอ่นตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่ใช้ผลการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

4.2.2.5 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สมการ

Desayi ของคานคอนกรีต CB1

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB1 คานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของสมการ Desayi นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอ่นตัวของคานคอนกรีต CB1



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอ่นตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่ใช้สมการ Desayi ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

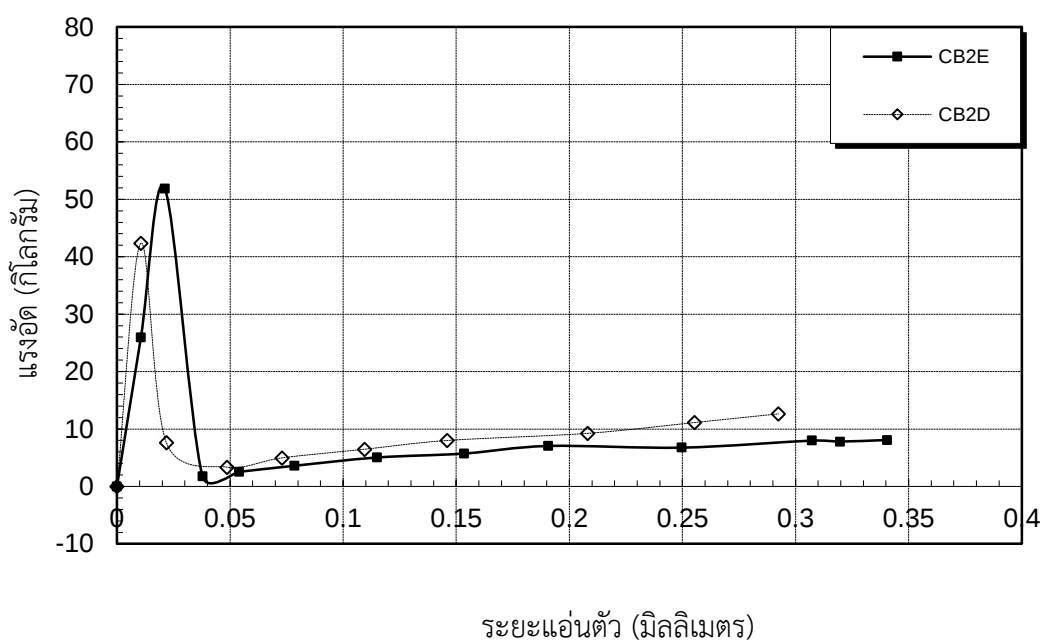
จากรูปที่ 4.17 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 43.75 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.033923 คานคอนกรีตที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D_GFRP) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 44.06 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.2934 ส่วนคานคอนกรีตที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB1D_GFRP2) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 87.88 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.06911 จะเห็นได้ว่าคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB1D_GFRP2) จะสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่าง

เดียว (CB1D_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB1D) ทำให้สรุปได้ว่า คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB1D_GFRP2) มีความยืดหยุ่นมากกว่าและรับแรงได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB1D_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB1D)

4.2.2.6 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการ

ทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB2

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB2 คานคอนกรีต ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอ่นตัวของคานคอนกรีต CB2



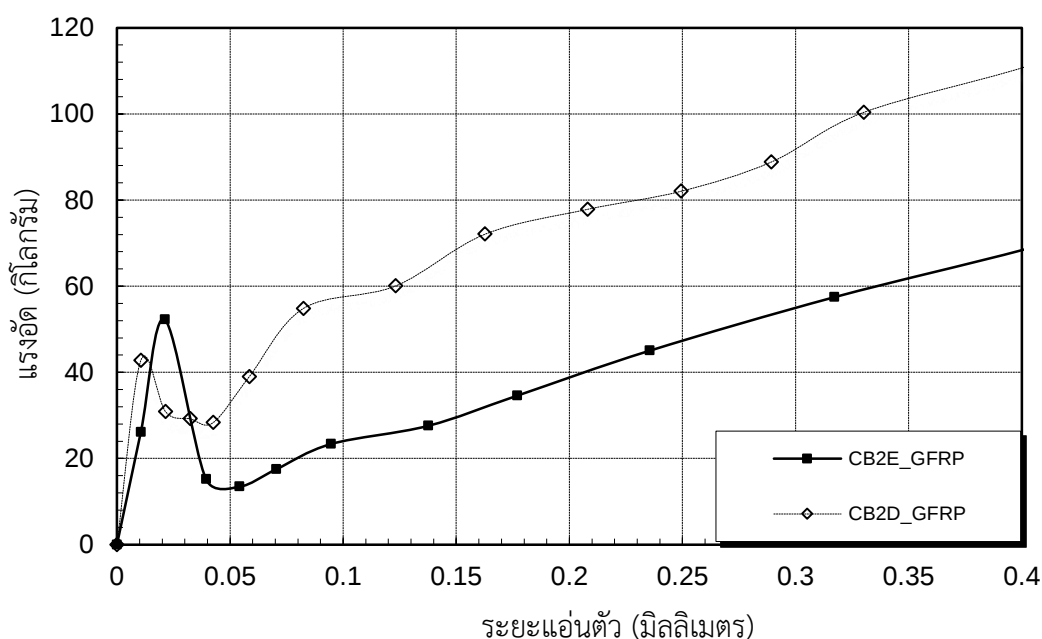
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอ่นตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.18 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB2 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB2E) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 51.89 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.46076 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB2D) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 42.374

กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.41905 ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

4.2.2.7 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ผลการทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB2 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB2 คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB2



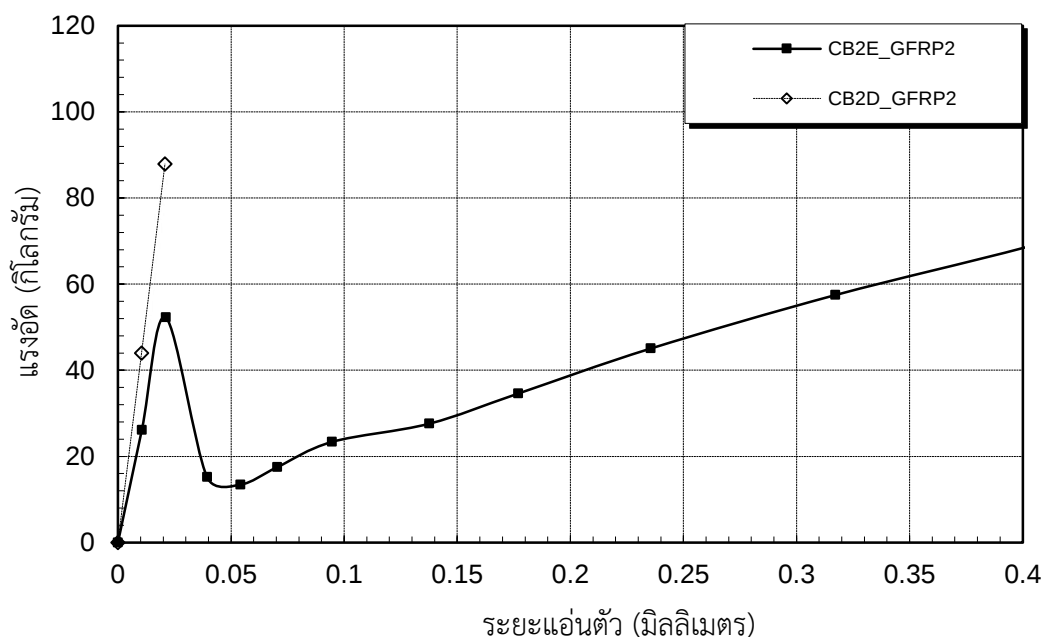
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.19 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB2 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB2E_GFRP) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.258 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.5049 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi

มีค่าแรงอัดเท่ากับ 42.76 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.94163 ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi (CB2D_GFRP) มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

4.2.2.8 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ผลการทดลองกับสมการ Desayi ของคานคอนกรีต CB2 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง และด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB2 คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง และด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB2

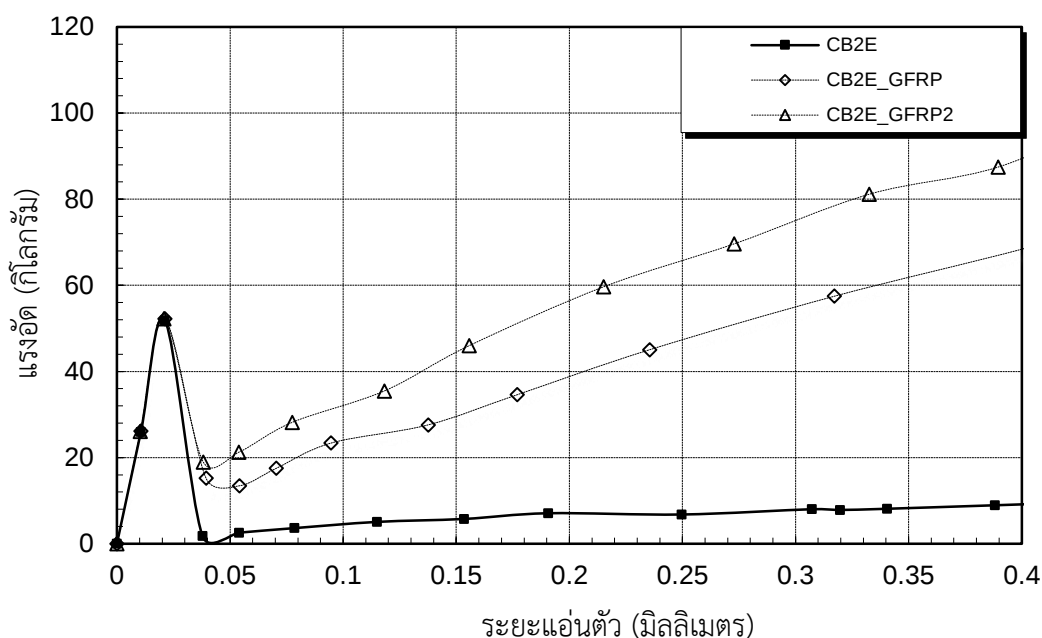


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และความยาว 16 เซนติเมตร

4.2.2.9 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการ

ทดลอง ของคานคอนกรีต CB2

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB2 คานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลการทดลอง นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอนตัวของคานคอนกรีต CB2



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอนตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB2 ที่ใช้ผลการทดลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

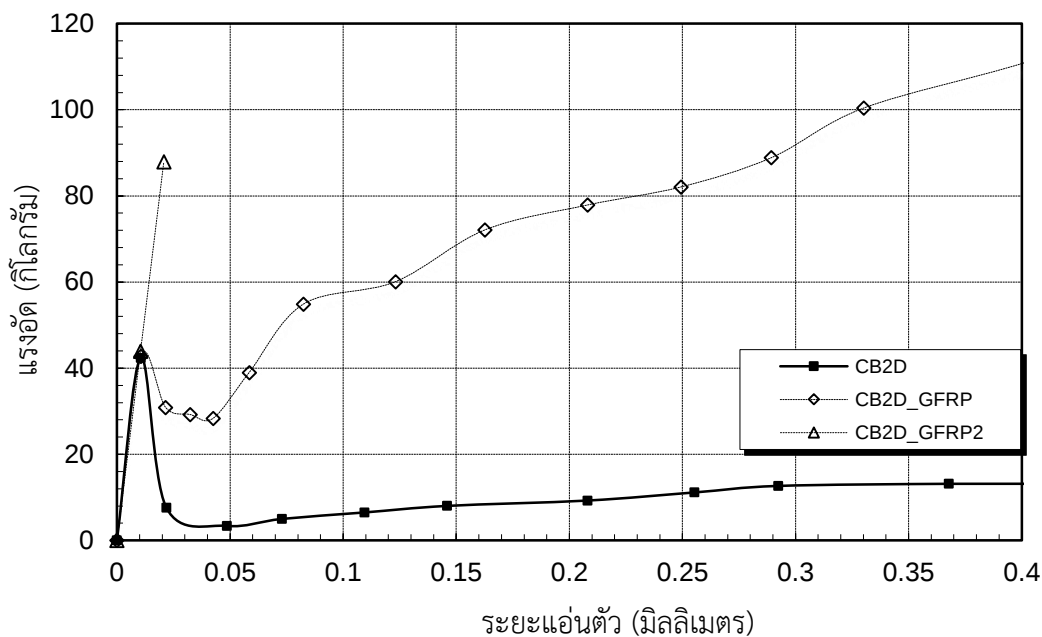
จากรูปที่ 4.21 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB2 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB2E) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 51.89 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.46076 มิลลิเมตร คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้าง คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB2E_GFRP) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.258 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.5049 มิลลิเมตร ส่วนคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านข้างและด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้ผลการทดลอง (CB2E_GFRP2) จะมีค่าแรงอัดเท่ากับ 52.208 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 1.826 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังด้วย

แผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB2E_GFRP2) จะสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB2E_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB2E) ทำให้สรุปได้ว่า คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB2E_GFRP2) มีความยืดหยุ่นมากกว่าและรับแรงได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB2E_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB2E)

4.2.2.10 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สมการ

Desayi ของคานคอนกรีต CB2

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์แบบจำลอง CB2 คานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสมการ Desayi นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและระยะแอ่นตัวของคานคอนกรีต CB2



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะแอ่นตัวของแบบจำลองคานคอนกรีต CB1 ที่ใช้สมการ Desayi ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดหน้าตัด 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.22 ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีต CB2 ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 4x4x16 เซนติเมตร คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB2D) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 42.374 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.41905 คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่าง คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB2D_GFRP) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 42.76 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.94163 ส่วนคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้างสูง 2.5 คานคอนกรีตที่ใช้สมการ Desayi (CB2D_GFRP2) มีค่าแรงอัดเท่ากับ 87.88 กิโลกรัม และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงอัดเท่ากับ 0.020732 จะเห็นได้ว่าคานคอนกรีตขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB2D_GFRP2) จะสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB2D_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB2D) ทำให้สรุปได้ว่า คานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างและด้านข้าง (CB2D_GFRP2) มีความยืดหยุ่นมากกว่าและรับแรงได้มากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้านล่างอย่างเดียว (CB2D_GFRP) และคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ (CB2D)

บทที่ 5

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คานคอนกรีต และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

บทนี้ได้กล่าวถึงผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบผลกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการในรูปแบบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำ (Compression Load) และค่าระยะหดตัว(Displacement) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองนั้นประกอบด้วยหัวข้อหลัก คือ วิเคราะห์ แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ได้นำข้อมูลคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ มาสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยจะทำการสร้างจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดคาน ความยาว ลักษณะการเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัดเหล็กเสริม และขนาดหน้าตัดเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

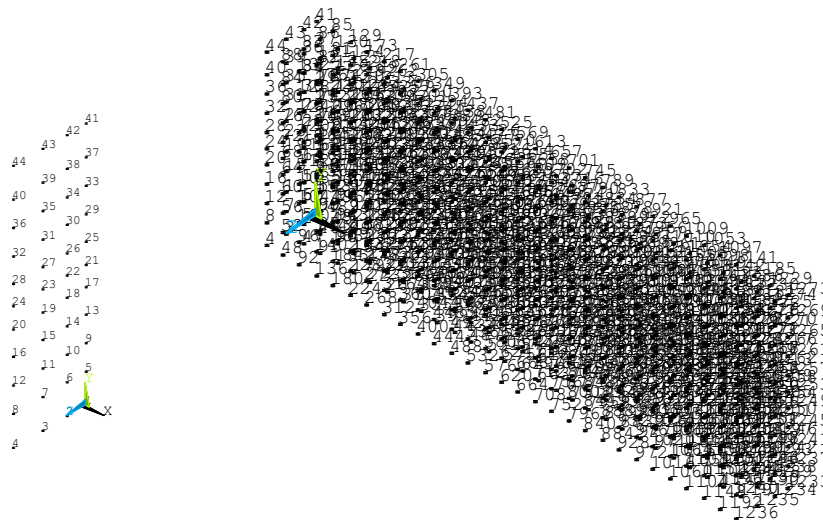
5.1.1 การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนความสามารถในการรับแรงกดอัดสูงสุดตลอดจนลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (FINITE ELEMENT ANALYSIS) และเพื่อศึกษาความเครียดกดอัดภายในของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

วิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

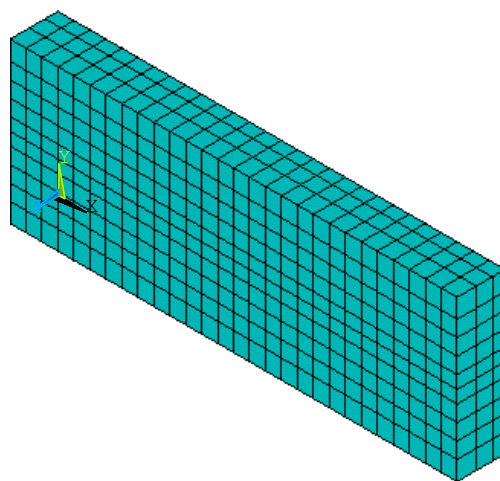
- 1) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม เหล็กปลอก ฯลฯ

2) กำหนดหน้าตัดรูปทรงของแบบจำลอง โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างจุด (Node) เป็นจุดๆเชื่อมต่อกัน เป็นรูปทรงของคานที่เราต้องการทำในการออกแบบ โดยกำหนดความกว้างความยาว และความสูงของคานตามที่ออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะสร้างรูปทรงเป็น 1 ใน 4 ส่วนของคาน ดังแสดงในรูปที่ 5.1



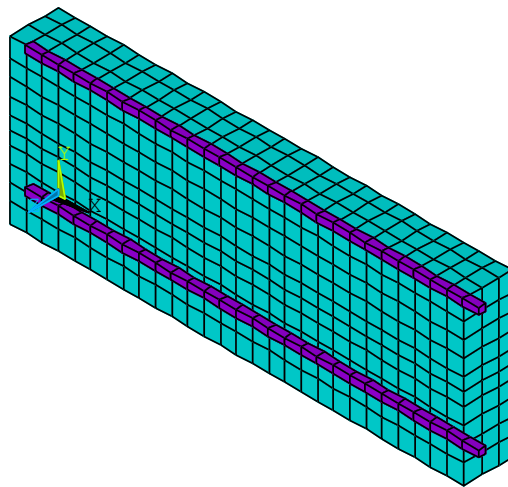
รูปที่ 5.1 การกำหนดจุด (Node) ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3) สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) คอนกรีตจะเป็นคุณสมบัติวัสดุคอนกรีตที่กำหนดไว้ การสร้างเนื้อวัสดุคอนกรีตทั้งหมดจะต้องมาจากชิ้นส่วนย่อย (Element) คอนกรีตเล็กๆ1ชิ้นที่ประกอบเป็นแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้น แสดงในรูปที่ 5.2

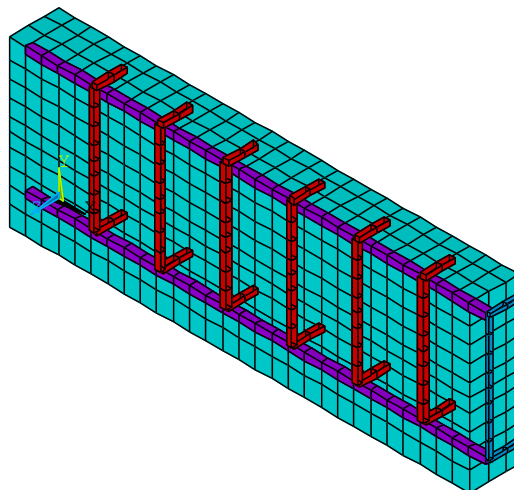


รูปที่ 5.2 สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4) สร้างเนื้อวัสดุของเหล็ก เมื่อเหล็กแบ่งเป็นเหล็กยื่นกับเหล็กปลอก และเหล็กยื่นกับเหล็กปลอกก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการสร้างเหล็กทีละชนิด เริ่มจากการสร้างเหล็กยื่นก่อน เนื้อวัสดุเหล็กยื่นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่เป็นเหล็กแท่งเล็กๆมาต่อกันเป็นเนื้อวัสดุเหล็กแท่งยาว ดังรูปที่5.3 เมื่อสร้างเนื้อวัสดุที่เป็นเหล็กยื่นเสร็จแล้วจากนั้นสร้างเนื้อวัสดุที่เป็นเหล็กปลอก เนื้อวัสดุเหล็กปลอกก็เช่นกันประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่เป็นเหล็กแท่งเล็กๆมาต่อกันเป็นเนื้อวัสดุเหล็กแท่งยาวในลักษณะเหล็กปลอกโอบรัดเหล็กยื่น ดังรูปที่5.4

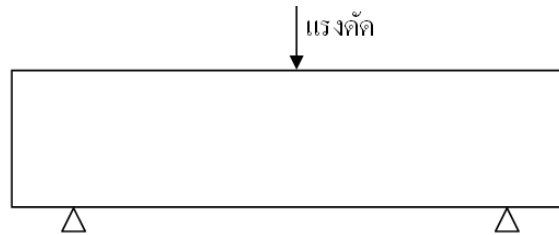


รูปที่5.3 การสร้างเนื้อวัสดุ (Element) ของเหล็กเสริม

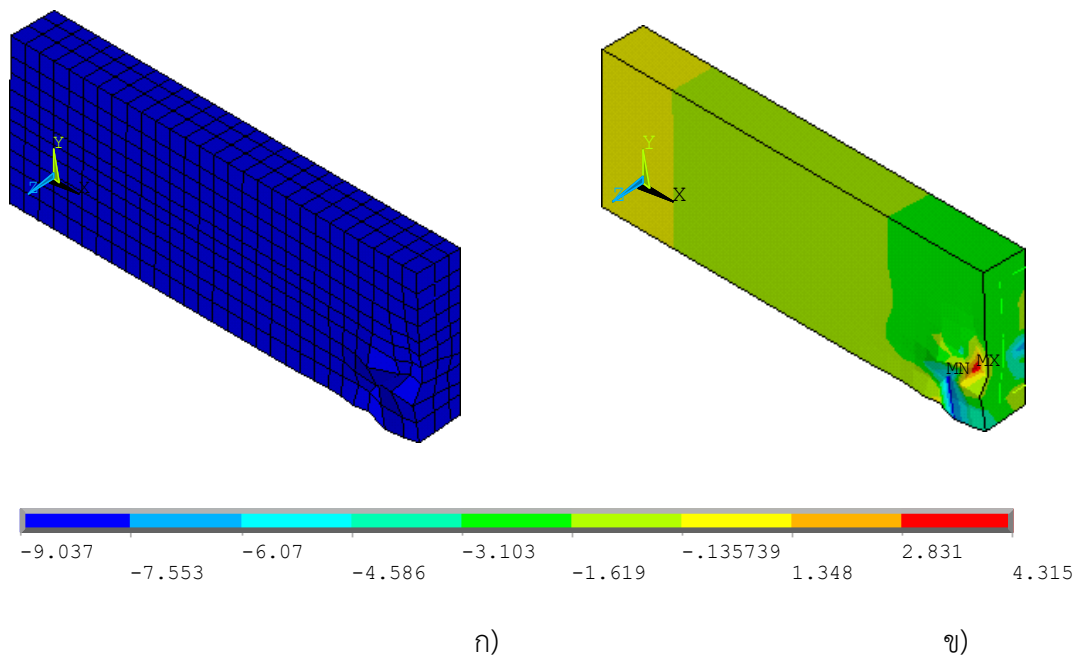


รูปที่5.4 การสร้างเนื้อวัสดุ (Element) ของเหล็กปลอก

5) ทดสอบชิ้นงาน โดยล็อกแบบจำลอง ในแนวแกน X และแนวแกน Z เพื่อไม่ให้แบบจำลองเกิดการขยับตัว และใส่น้ำหนักกดตามทิศทางในแนวแกน Y จะทำให้แบบจำลองเกิดการยุบตัวลง จนกระทั่งแบบจำลองเกิดการพังก็จะไม่สามารถรับแรงกดอัดต่อไปได้อีก ซึ่งจะทำให้แบบจำลองเกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 5.6 (ก) การเสียรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรง

(ข) ค่าการยุบตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Displacement) ในแกน Y

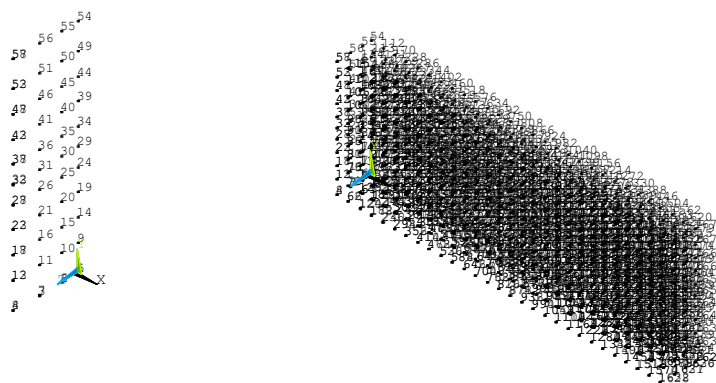
6) นำค่าแรงอัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะหดแน่นของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.1.2 การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กและเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

ในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กและมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน ความสามารถในการรับแรงกดอัดสูงสุดตลอดจนลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (FINITE ELEMENT ANALYSIS) และเพื่อศึกษาความเครียดกดอัดภายในของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

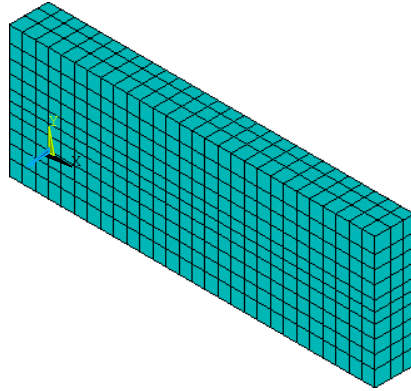
วิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น คอนกรีต แผ่นไฟเบอร์ เหล็กเสริม เหล็กปลอก ฯลฯ
- 2) กำหนดหน้าตัดรูปทรงของแบบจำลอง โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างจุด (Node) เป็นจุดๆ เชื่อมต่อกัน เป็นรูปทรงของคานที่เราต้องการทำในการออกแบบ โดยกำหนดความกว้างความยาว และความสูงของคาน ตามที่ออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะสร้างรูปทรงเป็น 1 ใน 4 ส่วนของคาน ดังแสดงในรูปที่ 5.7



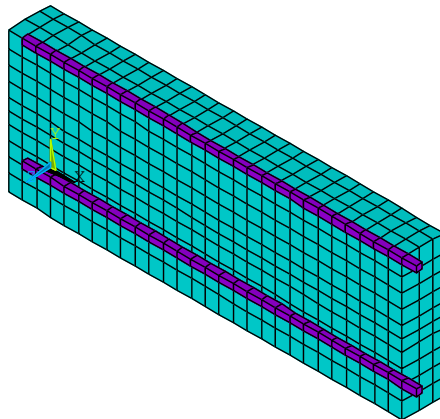
รูปที่ 5.7 การกำหนดจุด (Node) ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

- 3) สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) คอนกรีตจะเป็นคุณสมบัติวัสดุคอนกรีตที่กำหนดไว้ การสร้างเนื้อวัสดุคอนกรีตทั้งหมดจะต้องมาจากชิ้นส่วนย่อย (Element) คอนกรีตเล็กๆ 1 ชิ้นที่ประกอบเป็นแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้น แสดงในรูปที่ 5.8

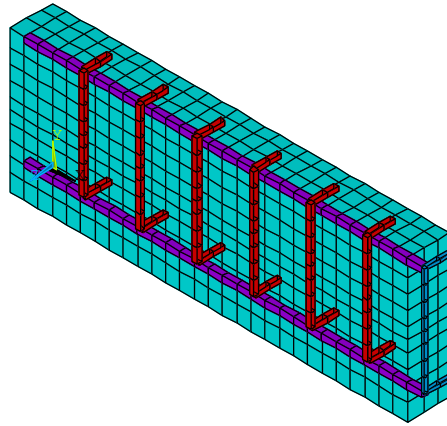


รูปที่ 5.8 การสร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต

4) สร้างเนื้อวัสดุของเหล็ก เมื่อเหล็กแบ่งเป็นเหล็กยื่นกับเหล็กปลอก และเหล็กยื่นกับเหล็กปลอกก็มีคุณสมบัติที่ต่างกัน จึงต้องทำการสร้างเหล็กทีละชนิด เริ่มจากการสร้างเหล็กยื่นก่อน เนื้อวัสดุเหล็กยื่นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่เป็นเหล็กแท่งเล็กๆมาต่อกันเป็นเนื้อวัสดุเหล็กแท่งยาว ดังรูปที่ 5.9 เมื่อสร้างเนื้อวัสดุที่เป็นเหล็กยื่นเสร็จแล้วจากนั้นสร้างเนื้อวัสดุที่เป็นเหล็กปลอก เนื้อวัสดุเหล็กปลอกก็เช่นกันประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่เป็นเหล็กแท่งเล็กๆมาต่อกันเป็นเนื้อวัสดุเหล็กแท่งยาวในลักษณะเหล็กปลอกโอบรัดเหล็กยื่น ดังรูปที่ 5.10

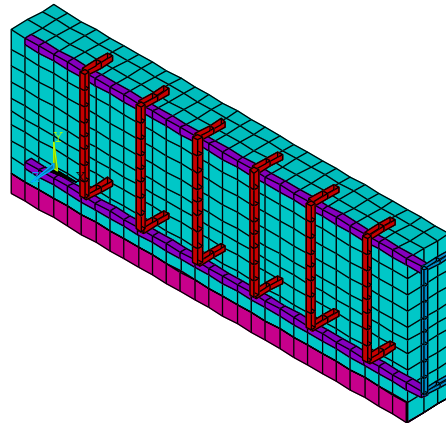


รูปที่ 5.9 การสร้างเนื้อวัสดุ (Element) ของเหล็กเสริม



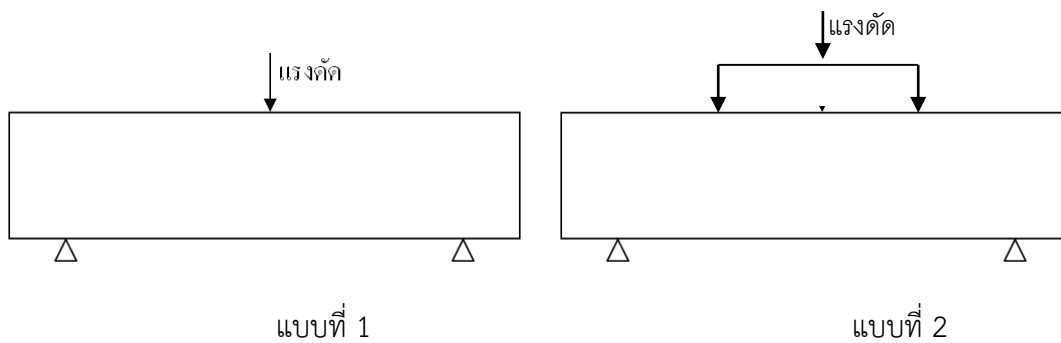
รูปที่ 5.10 การสร้างเนื้อวัสดุ (Element) ของเหล็กปลอก

5) สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของแผ่นไฟเบอร์ แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของแผ่นไฟเบอร์จะมีคุณสมบัติวัสดุแผ่นไฟเบอร์ที่กำหนดไว้ การสร้างเนื้อวัสดุแผ่นไฟเบอร์ทั้งหมดจะต้องมาจากชิ้นส่วนย่อย (Element) คอนกรีตเล็กๆ 1 ชิ้นที่ประกอบเป็นแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้น แสดงในรูปที่ 5.11

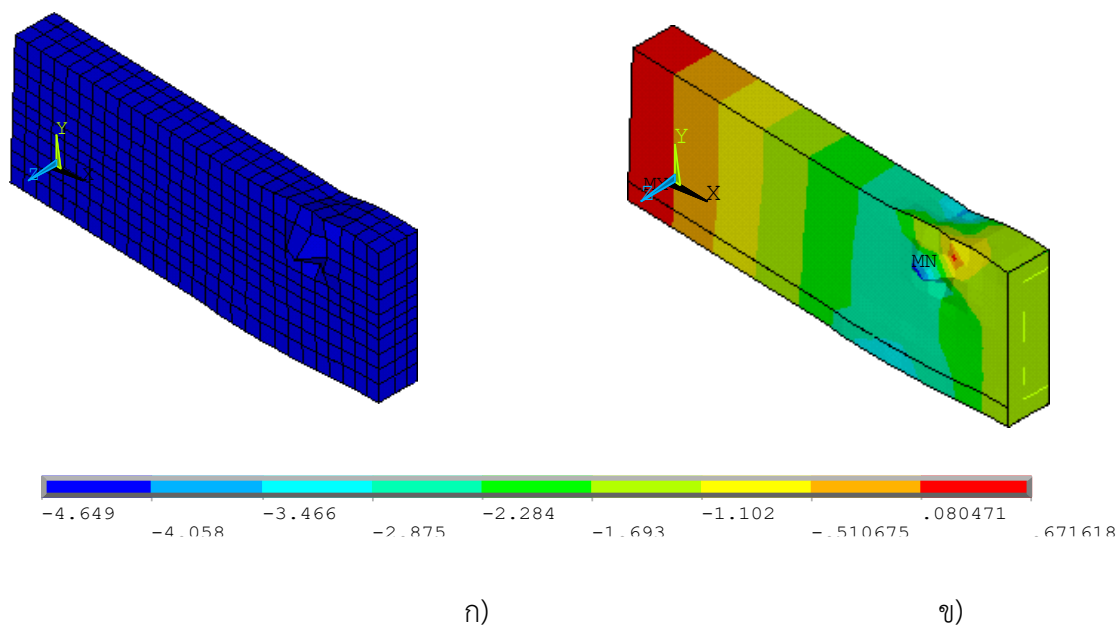


รูปที่ 5.11 การสร้างเนื้อวัสดุ (Element) ของแผ่นไฟเบอร์

6) ทดสอบชิ้นงาน โดยล็อกแบบจำลอง ในแนวแกน X และแนวแกน Z เพื่อไม่ให้แบบจำลองเกิดการขยับตัว และใส่น้ำหนักกดตามทิศทางในแนวแกน Y จะทำให้แบบจำลองเกิดการยุบตัวลง จนกระทั่งแบบจำลองเกิดการพังก็จะไม่สามารถรับแรงกดอัดต่อไปได้อีก ซึ่งจะทำให้แบบจำลองเกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 5.13 (ก) การเสียรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรง

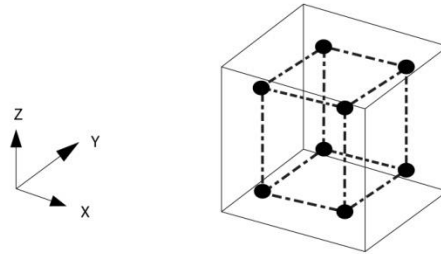
(ข) ค่าการยุบตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Displacement) ในแกน Y

7) นำค่าแรงอัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะหดแอนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

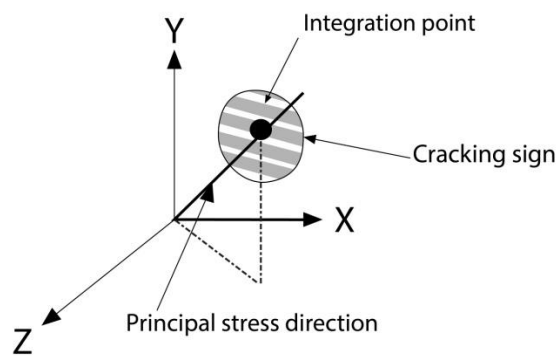
5.1.3 การประเมินการแตกของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับโปรแกรม ANSYS ค่าความเค้น ความเครียด และค่าอื่นๆจะถูกคำนวณที่จุดอินทิเกรชัน (integration) ของอีลิเมนต์คอนกรีต แสดงไว้ดังรูปที่ 5.14 รอยแตกของคอนกรีตในโปรแกรม ANSYS แสดงด้วย

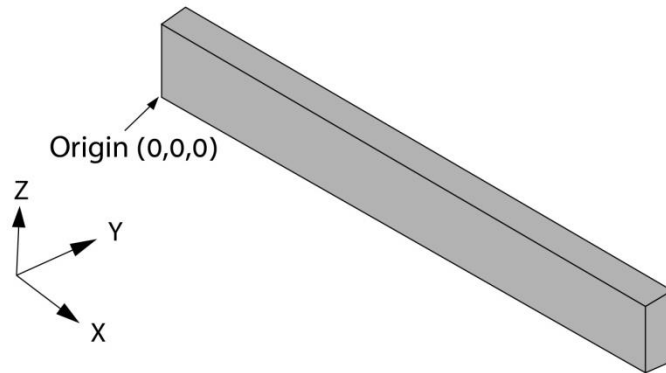
สัญลักษณ์วงกลม โดยจะตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นหลัก แสดงดังรูปที่ 5.15 เมื่อความเค้นดึงหลักสูงสุดที่จุดอินทิเกรชัน (integration) ของอีลิเมนต์ แสดงว่าอีลิเมนต์ของคอนกรีตเกิดการแตกร้าว



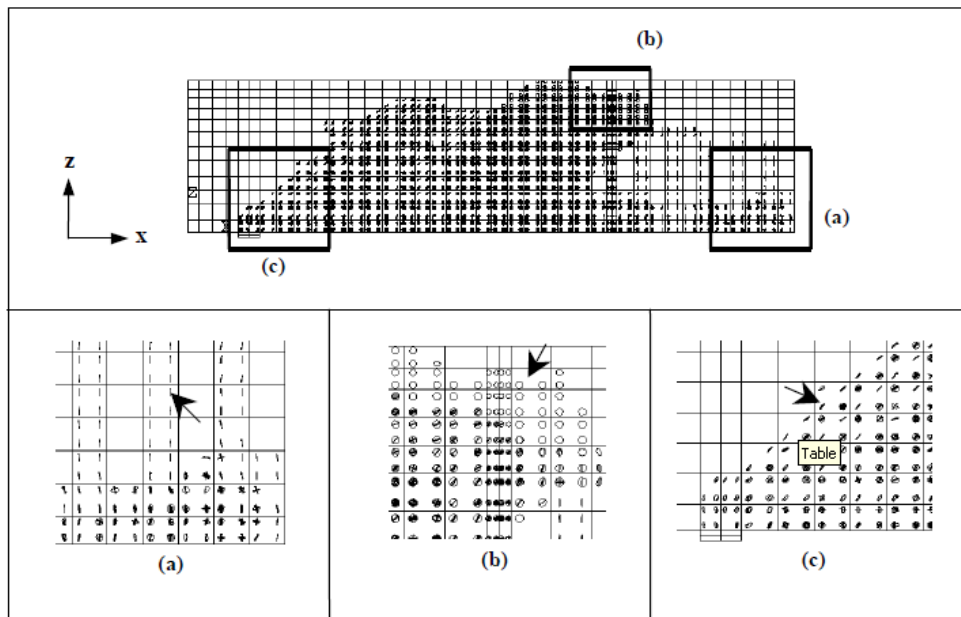
รูปที่ 5.14 ลักษณะจุดอินทิเกรชัน (integration) ของอีลิเมนต์ของคอนกรีต



รูปที่ 5.15 สัญลักษณ์การแตกร้าว



รูปที่ 5.16 ระบบพิกัดของอีลิเมนต์ของแบบจำลองคอนกรีต



รูปที่ 5.17 ลักษณะการแตกร้าวของแบบจำลอง (a) รอยแตกตัด (b) รอยแตกอัด (c) รอยแตกแรงดึงในแนวทแยง

รูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าแกนที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เมื่อ X,Y,Z มีความยาว ความกว้าง และความสูงตามลำดับ รูปที่ 5.17 แสดงการแตกร้าวที่ด้านหน้าของแบบจำลอง 1 ใน 4 รูปที่ 5.17 (a) แสดงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องคาน ความเค้นดึงหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในทิศทางในแนวแกน x เมื่อความเค้นหลักเกินกว่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีต จะแสดงเป็นวงกลมในขณะที่เกิดการแตกร้าวจะปรากฏขึ้นให้ตั้งฉากกับความเครียดในทิศทางแนวแกน X ในขณะที่เส้นตรงในแนวตั้งฉากเกิดขึ้นในจุดอินทิเกรชัน (integration) อีลิเมนต์ของคอนกรีต เหล่านี้จะเรียกว่า รอยแตกตัด

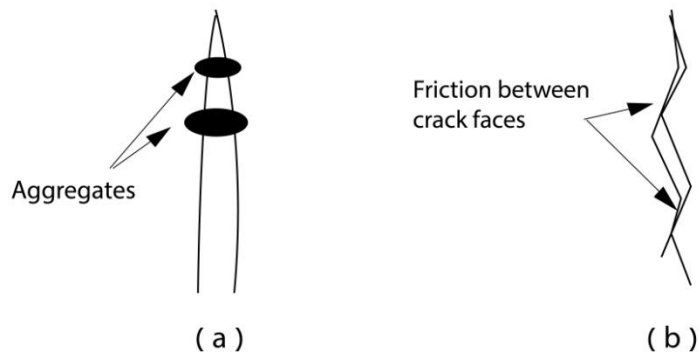
รูปที่ 5.17 (b) แสดงลักษณะการแตกของคอนกรีตภายใต้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตภายใต้การบีบอัดแกนเดียว รอยแตกจะขนานกับทิศทางของแรงอัด ตั้งแต่รอยแตกจากความเครียดดึงที่ได้รับจากผลปรากฏการณ์ค่าปัวซองส์ จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของไฟไนต์อีลิเมนต์ น้ำหนักกระทำในแนวแกน Z มีความเครียดดึงในทิศทางในแนวแกน Y ดังนั้น วงกลมที่ปรากฏจะตั้งฉากกับความเครียดดึงในทิศทาง Y และจุดอินทิเกรชัน (integration) อีลิเมนต์ของคอนกรีตใกล้กับตำแหน่งน้ำหนักกระทำ เหล่านี้จะเรียกว่า รอยแตกอัด

รูปที่ 5.17 (c) แสดงลักษณะการแตกที่แรงเฉือนกระทำบนอีลิเมนต์ของคอนกรีต โดยใช้สมการการปรับเปลี่ยนทิศทางและขนาดของความเค้นหลักที่สามารถรับได้ (Gere and Timoshenko 1997) ทิศทางและตำแหน่งแสดงในรูป 5.17 ที่ความเค้นดึงทั่วไป จะอยู่ในทิศทางในแนวแกน X และแรงเฉือนจะเกิดขึ้นในระนาบ XZ ดังนั้น ทิศทางของความเค้นดึงจะมีลักษณะโน้มเอียงจากแนวนอน เมื่อความเค้นดึงเกินกว่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตที่โน้มเอียงจะแสดงเป็นวงกลม และจะปรากฏเป็นเส้นตั้งฉากทิศทางของความเค้นหลัก ที่จุดอินทิเกรชัน (integration) อีลิเมนต์ของคอนกรีต เหล่านี้จะเรียกว่า รอยแตกแรงดึงในแนวทแยง

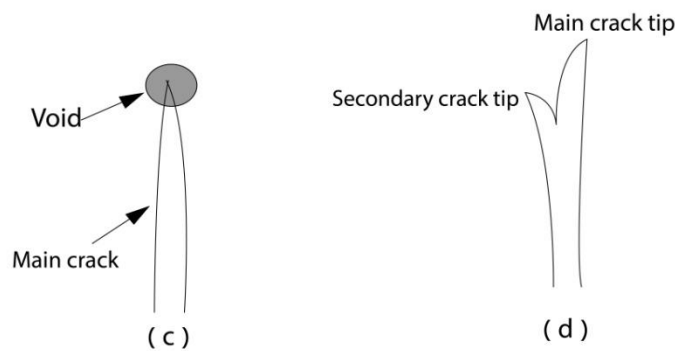
โปรแกรม ANSYS จะบันทึกรอยแตกแต่ละขั้นตอนมีน้ำหนักมากกระทำ โดยทั่วไปรอยแตกตัดจะเกิดขึ้นที่ระยะกลางของคาน เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำ รอยแตกตัดจะกระจายในแนวนอนจากระยะกึ่งกลางถึงระยะจุดที่รองรับ และรอยแตกดึงในแนวทแยงจะปรากฏ เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำก่อให้เกิดรอยแตกในแนวทแยงและรอยแตกตัดเพิ่ม และในที่สุดรอยแตกร้าวอัดจะแสดงเกือบสุดท้ายในขั้นตอนที่มีน้ำหนักมากกระทำ รอยแตกจะปรากฏอยู่ภายใต้น้ำหนักที่มากกระทำ สำหรับแรงเฉือนของแบบจำลองคานจะไม่มีรอยแตกอัดปรากฏอยู่ภายใต้น้ำหนักกระทำ แต่แรงเฉือนจะแสดงให้เห็นอยู่ส่วนบนของคาน

5.1.4 การประเมินแรงดัดที่ตำแหน่งคานวิบัติ

กลไกที่ทำให้อีลิเมนต์วิบัติแสดงในรูปที่ 5.18 กระบวนการแก๊เกรนแสดงในรูปที่ 5.18 (a) เกิดขึ้นเมื่อมีรอยแตกมาก เกรนที่ติดกันจะส่งแรงผ่านรอยแตก และจะประสานระหว่างผิวรอยแตกตามที่แสดงในรูปที่ 5.18 (b) สามารถก่อให้เกิดการกระจายพลังงาน และการถ่ายโอนน้ำหนักกระทำผ่านแรงเสียดทานระหว่างรอยแตกมายังปลายรอยที่แตกแสดงในรูปที่ 5.18 (c) ต้องใช้พลังงานมากสำหรับรอยแตกร้าวที่รุนแรงในรูปที่ 5.18 (d) แสดงให้เห็นรอยแตกย่อยของคอนกรีตที่แตกต่างกัน เนื่องจากพลังงานที่ถูกใช้ในการสร้างรอยแตก

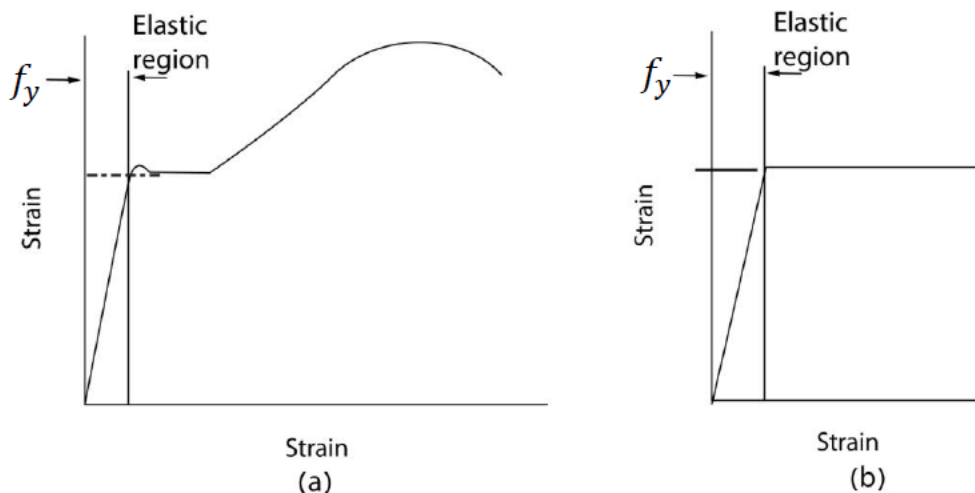


รูปที่ 5.18 กลไกที่ทำให้ไอลิเมนต์เกิดการวิบัติ (a) การเชื่อมโยง (b) ด้านหน้ารอยแตกแรงเสียดทาน



รูปที่ 5.19 กลไกที่ทำให้ไอลิเมนต์เกิดการวิบัติ (c) รอยแตกที่ปลาย (d) รอยแตกย่อย (Shah, et al, 1995.)

สันนิษฐานว่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองอาจจะไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับเหล็กเสริม ที่ใช้ในแบบจำลองคานควรจะได้รับข้อมูลโดยตรง จากผลการทดสอบวัสดุเหล็กเสริม มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับการทดสอบความดึงเครียดของเหล็กตามอุดมคติจะใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ดังนั้น นี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดจะสูงกว่าในคานที่ทำการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ความเค้น ความเครียดของคอนกรีตที่เสียรูปแบบถาวร อาจเป็นสาเหตุทำให้แบบจำลองเกิดการวิบัติลดลง

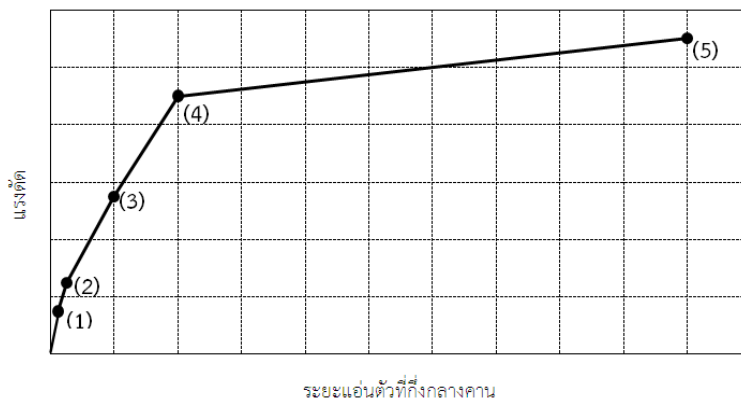


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดสำหรับเหล็กเสริม (a) การทดสอบความดึงเครียด (b) การทดสอบความดึงเครียดตามอุดมคติ (Spiegel และ Limbrunner 1998)

5.1.5 การนำเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิเคราะห์คานด้วยโปรแกรม ANSYS นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ นำเสนอโดยใช้

- 1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน
- 2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดของคานและค่าความเครียดของเหล็กเสริมบน,เหล็กเสริมล่าง และ แผ่นไฟเบอร์ ที่จุดกึ่งกลางคานต่อความเครียดที่จุดครากของของเหล็กเสริมบน,เหล็กเสริมล่าง (ϵ_s/ϵ_y) และ แผ่นไฟเบอร์ (ϵ_f/ϵ_y)
- 3) ลักษณะการเสียรูป และลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 4)ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีต โดยจะแสดงจำนวน 5 ตำแหน่ง ตามค่าแรงดัด แสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและค่าระยะแอนตัวที่กึ่งกลางของคานตำแหน่งต่างๆที่นำมาแสดง
ลักษณะรอยร้าว

โดยที่ จุดที่ (1) ตำแหน่งก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

(2) ตำแหน่งที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการแตกร้าวเกิดขึ้น

(3) ตำแหน่งที่โหลดใช้งาน

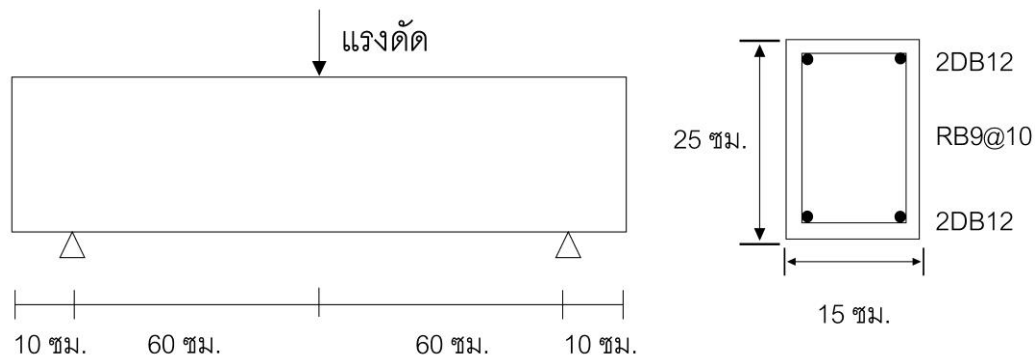
(4) ตำแหน่งจุดคราก

(5) ตำแหน่งที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติ

5) สำหรับแผ่นไฟเบอร์จะนำกราฟในข้อที่ (4) มาแสดงลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ
เช่นกัน

5.1.6 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ได้นำข้อมูลคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของชลิต ดวงน้อย และคุณทองศักดิ์ วงศ์ล้ำ [23] มาสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะทำการจำลองแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดคาน ความยาว ลักษณะการเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัดเหล็กเสริม และขนาดหน้าตัดเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในห้องปฏิบัติการ โดยมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 15x25 เซนติเมตร ยาว 140 เซนติเมตร มีรายละเอียดการเสริมเหล็กดังแสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.22 ขนาดหน้าตัดและลักษณะการเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติแผ่นไฟเบอร์(430G) ที่ใช้ในแบบจำลอง

ชนิดของแผ่นไฟเบอร์	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_f) กก./ตร.ซม.	ค่าปัวซองส์ (ν)	กำลังรับแรงดึง (f_r) กก./ตร.ซม.	ความหนาของแผ่นไฟเบอร์ (ซม.)
GFRP	2344557	0.22	35019	0.013

จากตารางที่ 5.1 พบว่าคุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,344,557 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่าปัวซองส์เท่ากับ 0.22 มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 35,019 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ความหนาเท่ากับ 0.013 เซนติเมตร

ตารางที่ 5.2 ขนาดของหน้าตัด จุดคราก และกำลังรับแรงดึงของเหล็กชนิดต่างๆ

ชนิดของเหล็ก	ขนาดของหน้าตัด ซม. ²	จุดคราก (f_y) กก./ซม. ²	กำลังรับแรงดึง (f_r) กก./ซม. ²
DB12	1.13	5,000	7,000
RB6	0.636	4,300	5,900
RB9	0.318	4,300	5,900

จากตารางที่ 5.2 พบว่าคุณสมบัติของเหล็ก DB12 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 1.13 ตารางเซนติเมตร มีจุดครากเท่ากับ 5,000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 7,000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

เหล็ก RB6 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.636 ตารางเซนติเมตร มีจุดครากเท่ากับ 4,300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 5,900 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เหล็ก RB9 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.318 ตารางเซนติเมตร มีจุดครากเท่ากับ 4,300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 5,900 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 5.3 ค่ากำลังแรงอัด กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ และกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ส่วนผสมต่างๆของผลการทดลอง และสมการ Desayi

แบบจำลอง	กำลังรับแรงอัด (f_c') กก./ซม ²	กำลังรับแรงดึง (f_r) กก./ซม ²	ค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น (E_c) กก./ซม ²	ค่าปัวซองส์ (ν)	กำลังรับแรงเฉือน (β_t)	
	การทดสอบ	Desayi	Desayi	EFM	ผิว ขรุขระ	ผิว ราบเรียบ
B01	334	36.55	275,692.6	0.2	0.3	0.9
B02	285	33.76	255,223	0.2	0.3	0.9
B03	380	38.99	294,573.6	0.2	0.3	0.9
B04	348	40	281,686.8	0.2	0.3	0.9

หมายเหตุ ค่าการทดสอบมาจากการทดสอบคอนกรีตห้องปฏิบัติการ

ค่ากำลังรับแรงอัด (f_c') ได้จากสมการ (3-1)

ค่ากำลังรับแรงดึง (f_r) ได้จากสมการ (3-2)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ได้จากสมการ (3-1)

จากตารางที่ 5.2 พบว่า ส่วนผสมคอนกรีต B01 ของผลการทดลอง มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 334 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนผสมคอนกรีต B01 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 334 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 36.55 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 275,692.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.2

ส่วนผสมคอนกรีต B02 ของผลการทดลอง มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 285 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนผสมคอนกรีต B02 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 285 กิโลกรัม/

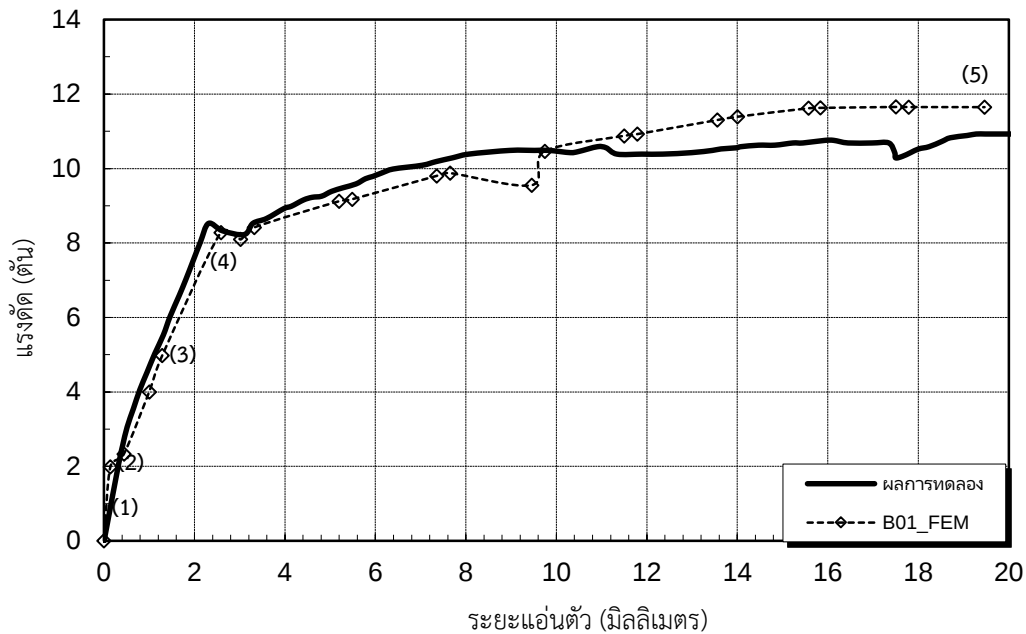
ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 33.76 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 255,223 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.2

ส่วนผสมคอนกรีต B03 ของผลการทดลอง มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 380 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนผสมคอนกรีต B03 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 380 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 38.99 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 294,573.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.2

ส่วนผสมคอนกรีต B04 ของผลการทดลอง มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 348 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนผสมคอนกรีต B04 ของสมการ Desayi มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 348 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่ากับ 40 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 281,686.8 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีค่าอัตราส่วนปัวซองส์เท่ากับ 0.2

5.1.6.1 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ของคาน B01

ในหัวข้อนี้จะเสนอการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ขนาด 15x25x140 เซนติเมตร นำเสนอโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอนตัวที่กึ่งกลางของคานคอนกรีต B01 และความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B01

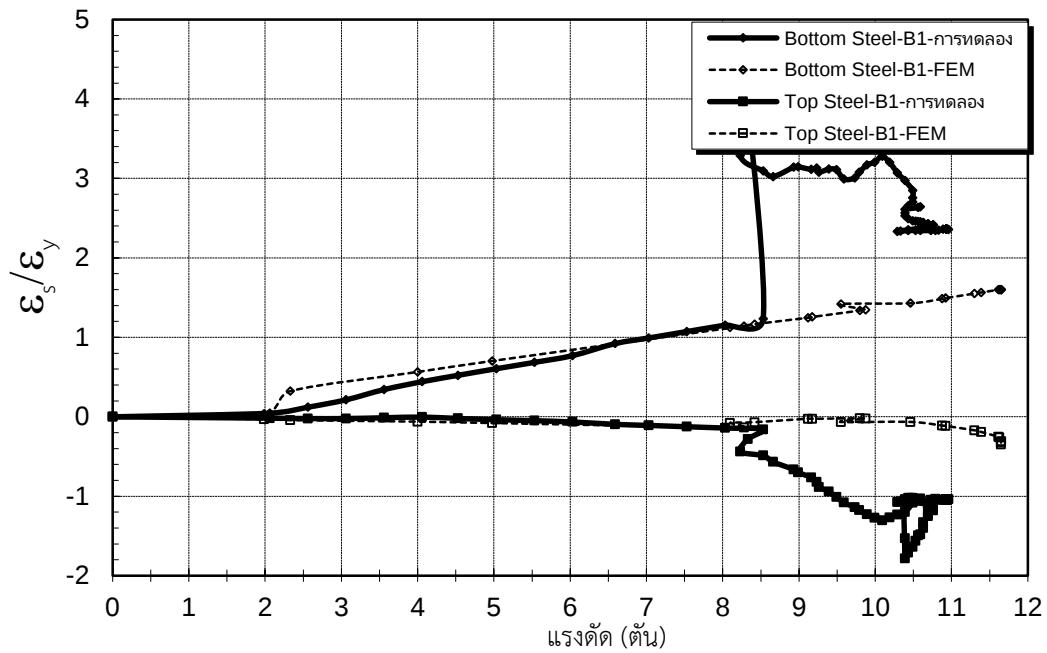


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน B01

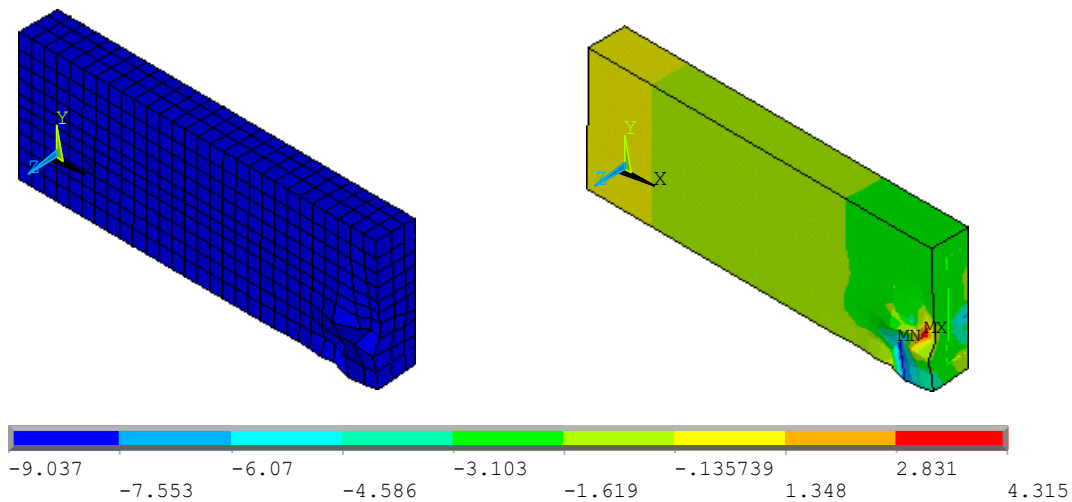
จากรูปที่ 5.23 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B01 กำลังอัดคอนกรีตของผลการทดลองอยู่ที่ 334 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการทดลองจะมีค่าแรงดัดเท่ากับ 10.96 ตัน และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 20.46 มิลลิเมตร ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 15x25x140 เซนติเมตรที่ใช้สมการ Desayi มีแรงดัดเท่ากับ 11.6512 ตัน และมีค่าระยะแอนตัวที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 19.468 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

จากรูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดที่กึ่งกลางคาน ซึ่งจุดที่คานรับโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_n) ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมล่างมีค่าเกินถึง 1.00 แสดงว่า เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดครากผิวคอนกรีตผิวล่างจึงเกิดการวิบัติ ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมบนมีค่าไม่ถึง 1.00 แสดงว่า เมื่อเหล็กเสริมบนถึงจุดครากคอนกรีตผิวบนยังไม่วิบัตินั่นเอง

ลักษณะรอยร้าวของคาน หลังจากการวิบัติของคาน B01 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะรอยร้าว กว้างและกระจายห่างๆ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีต ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกำลังของเหล็ก แต่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด จึงช่วยทำให้รอยร้าวไม่กว้างและระยะห่างระหว่างรอยร้าวแต่ละรอยไม่มาก



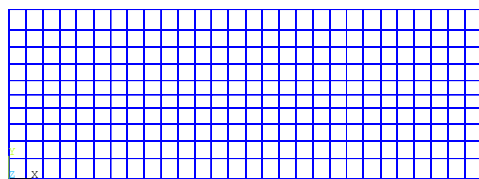
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B01



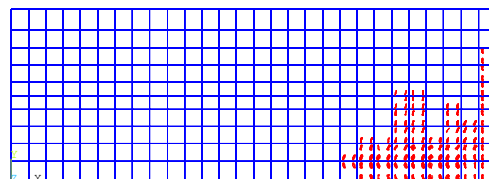
รูปที่ 5.25 ลักษณะการเสียรูป และลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B01 ของแบบจำลองสมการ Desayi

ตารางที่ 5.4 ค่าแรงดัดและระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

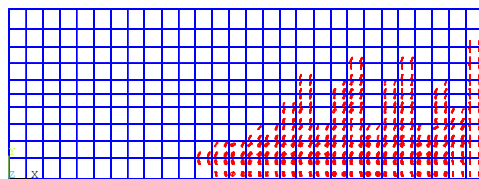
ตำแหน่งบนเส้นกราฟ	ระยะแอนตัว(มิลลิเมตร)	ค่าแรงดัด(ตัน)
1	0.07540	1.0217
2	0.14188	1.98660
3	1.2884	4.9752
4	3.0214	8.0952
5	19.468	11.6464



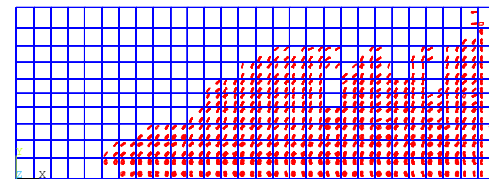
(1)



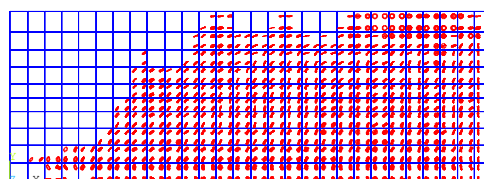
(2)



(3)



(4)



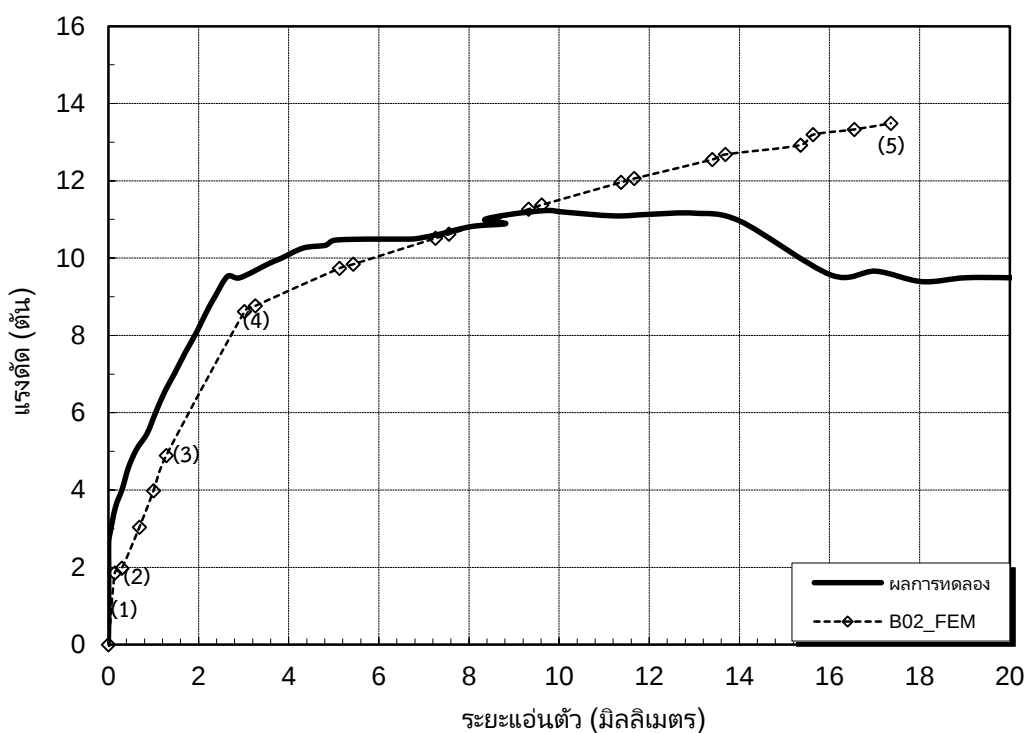
(5)



รูปที่ 5.26 ลักษณะรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B01

5.1.6.2 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ของคาน B02

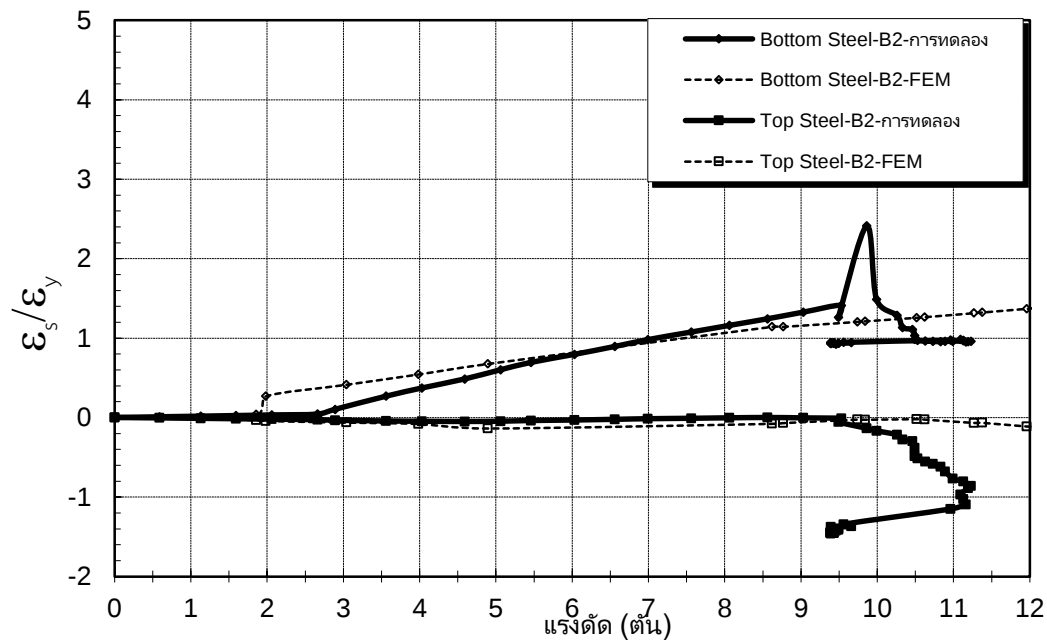
ในหัวข้อนี้จะเสนอการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้านล่าง และด้านข้างสูง 2.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ขนาด 15x25x140 เซนติเมตร นำเสนอโดยใช้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานคอนกรีต B02 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B02 และความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_f/ϵ_y ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคาน B02



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน B02

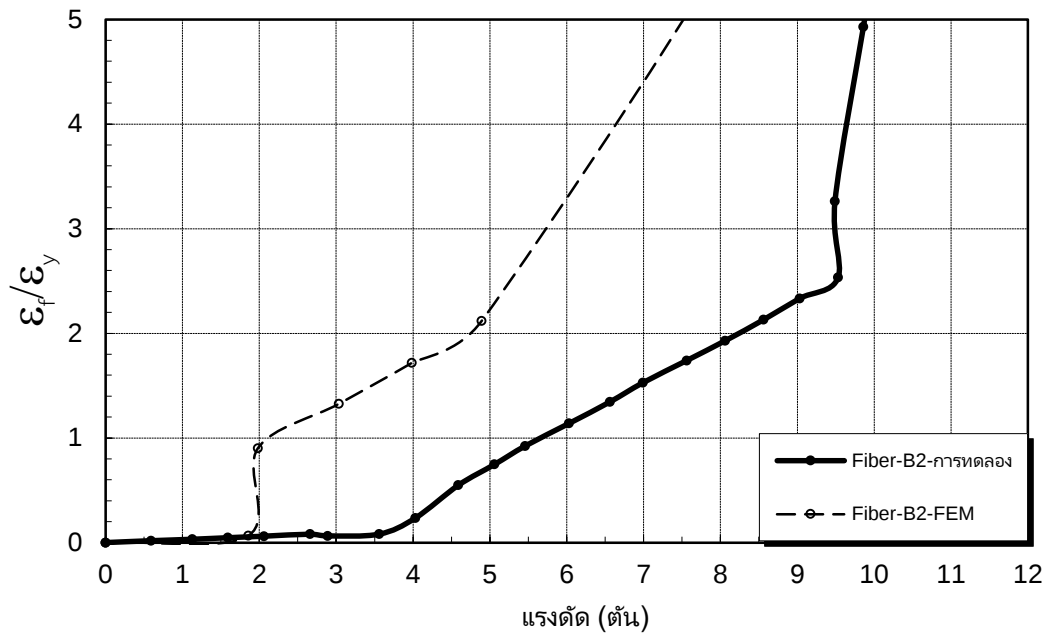
จากรูปที่ 5.27 การวัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B02 กำลังอัดคอนกรีตของผลการทดลองอยู่ที่ 285 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการทดลองจะมีค่าแรงดัดเท่ากับ 11.23 ตัน และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 22.51 มิลลิเมตร ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 15x25x140 เซนติเมตรที่ใช้สมการ Desayi มีแรงดัดเท่ากับ 13.49 ตัน และมีค่าระยะแอ่นตัวที่

ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 17.365 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

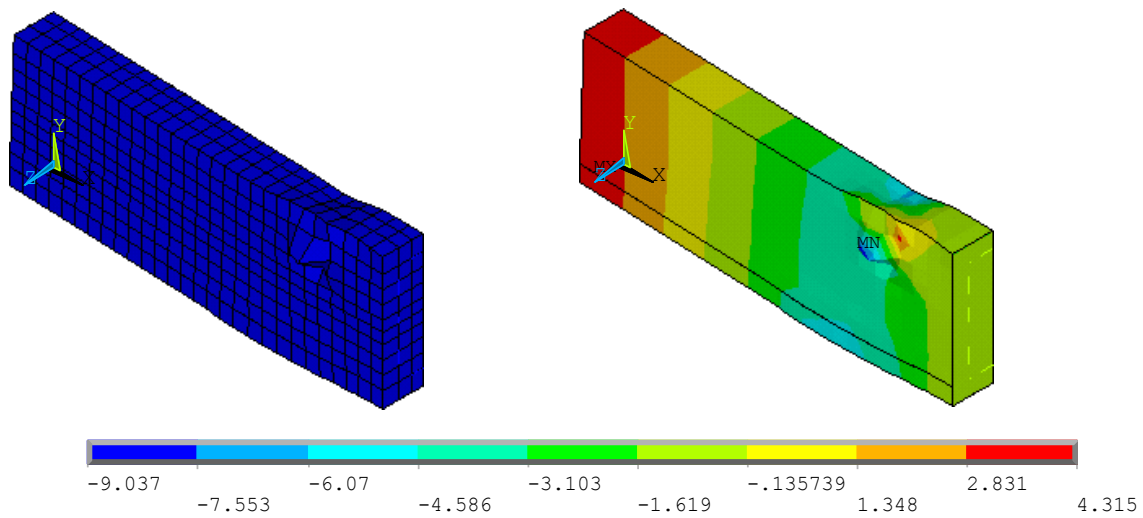


รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B02

จากรูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดที่กึ่งกลางคาน ซึ่งจุดที่คานรับโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_n) ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมบนมีค่าเกินถึง 1.00 แสดงว่า เหล็กเสริมบนมีกำลังถึงจุดครากผิวคอนกรีตผิวบนจึงเกิดการวิบัติ ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมล่างมีค่าไม่ถึง 1.00 แสดงว่า เมื่อเหล็กเสริมล่างถึงจุดครากคอนกรีตผิวล่างยังไม่วิบัตินั่นเอง



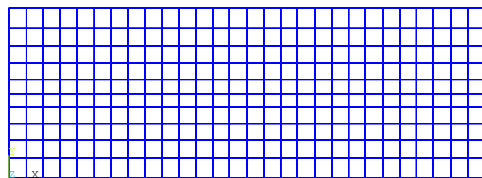
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_f/\varepsilon_y$ ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคาน B02



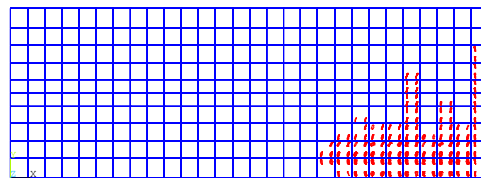
รูปที่ 5.30 ลักษณะการเสียรูป และลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B02 ของแบบจำลองสมการ Desayi

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดัดและระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

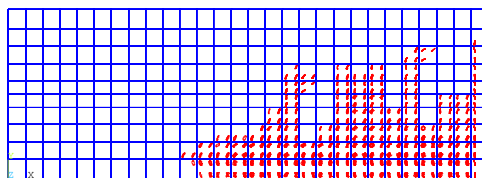
ตำแหน่งบนเส้นกราฟ	ระยะแอนตัว(มิลลิเมตร)	ค่าแรงดัด(ตัน)
1	0.072	0.93246
2	0.14188	1.85568
3	1.28370	4.8944
4	3.2571	8.7644
5	17.365	13.49



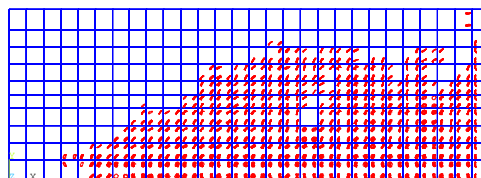
(1)



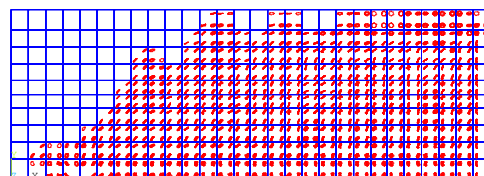
(2)



(3)



(4)

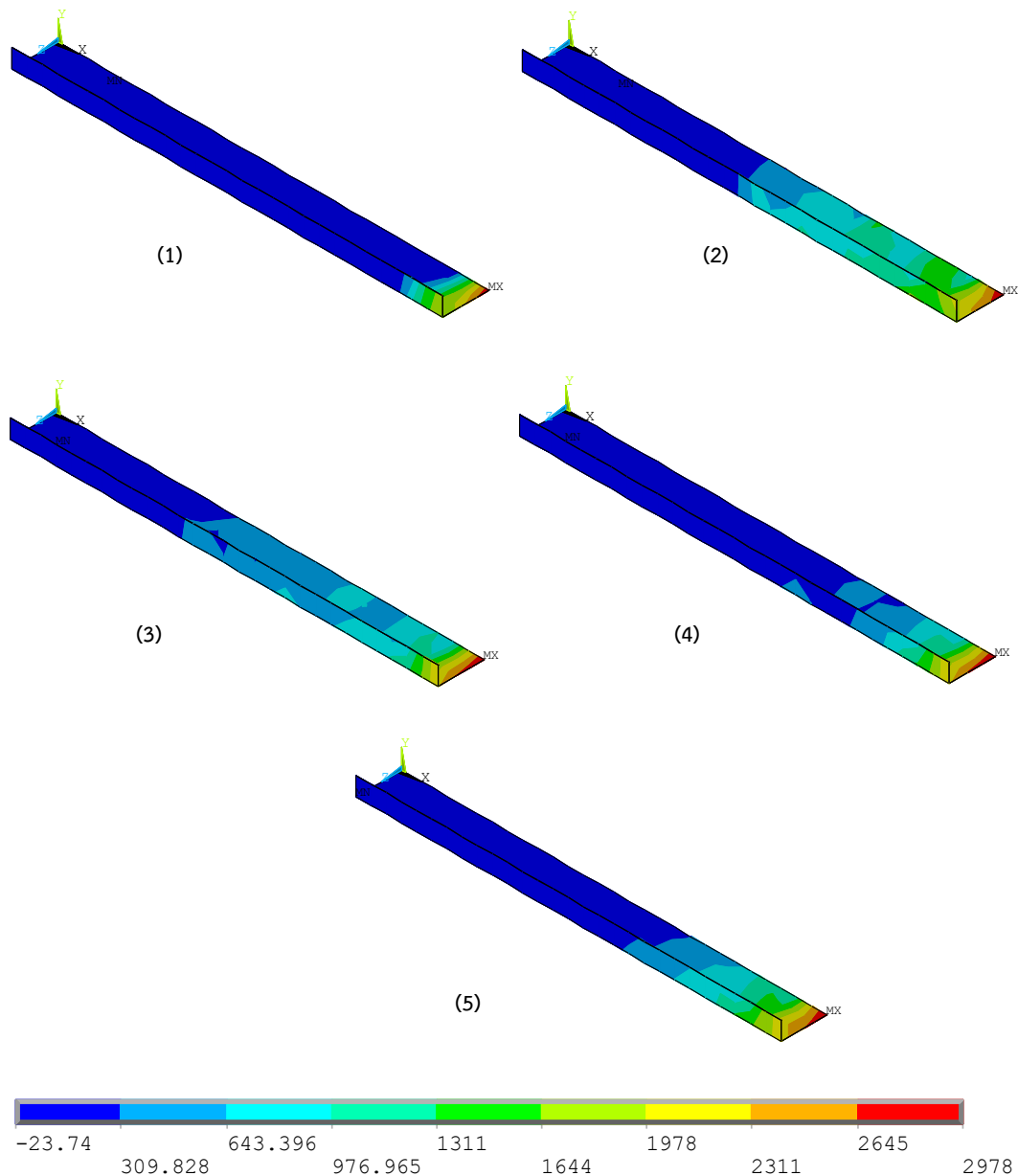


(5)



รูปที่ 5.31 ลักษณะรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B02

ลักษณะรอยร้าวของคาน หลังจากการวิบัติของคาน B02 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะรอยร้าว กว้างและกระจายห่างๆ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีต ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกำลังของเหล็ก แต่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด จึงช่วยให้รอยร้าวไม่กว้างและระยะห่างระหว่างรอยร้าวแต่ละรอยไม่มาก



รูปที่ 5.32 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B02

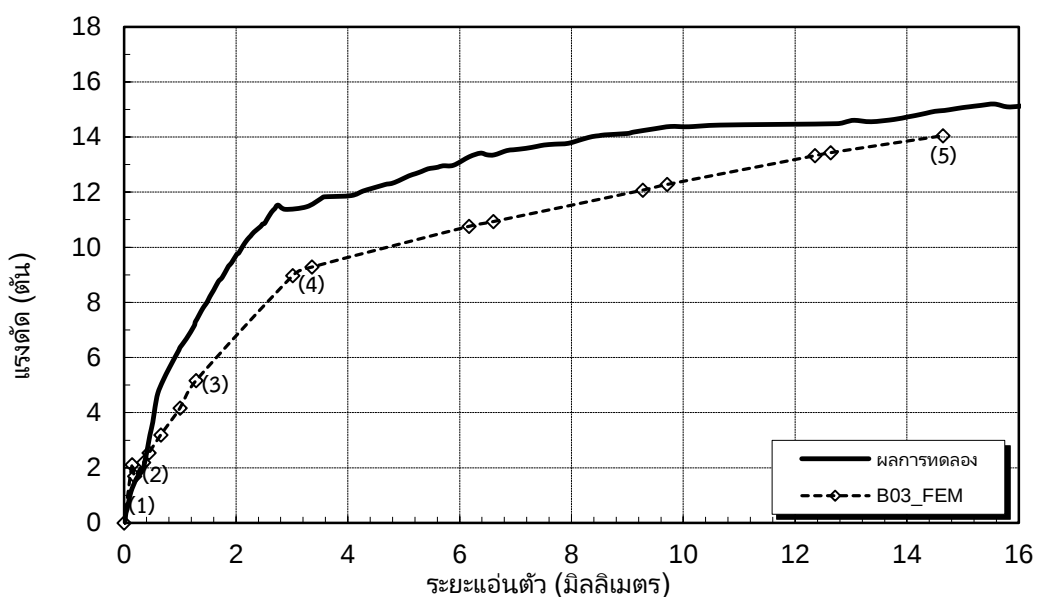
ตารางที่ 5.6 ค่าแรงดัด ค่าความเค้นสูงสุดในแผ่นไฟเบอร์ และกำลังรับความเค้นสูงสุดของแผ่นไฟเบอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

ตำแหน่งบน เส้นกราฟ	ค่าแรงดัด (ตัน)	ค่าความเค้นสูงสุดใน แผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)	ตำแหน่งที่เกิด ค่าสูงสุด	กำลังรับความเค้นสูงสุด ของแผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)
1	0.93246	467.441	กึ่งกลางคาน	35,019
2	1.85568	805.048	กึ่งกลางคาน	35,019
3	4.8944	2,978	กึ่งกลางคาน	35,019
4	8.7644	6,430	กึ่งกลางคาน	35,019
5	13.49	18,835	กึ่งกลางคาน	35,019

จากรูปที่ 5.32 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B02 แบบจำลองที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เท่ากับ 0.072 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 0.93246 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 467.441 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 0.14188 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 1.85568 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 805.048 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 1.2837 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 4.8944 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 2,978 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 3.2571 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 8.7644 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 6,430 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 17.365 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 13.49 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 18,835 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

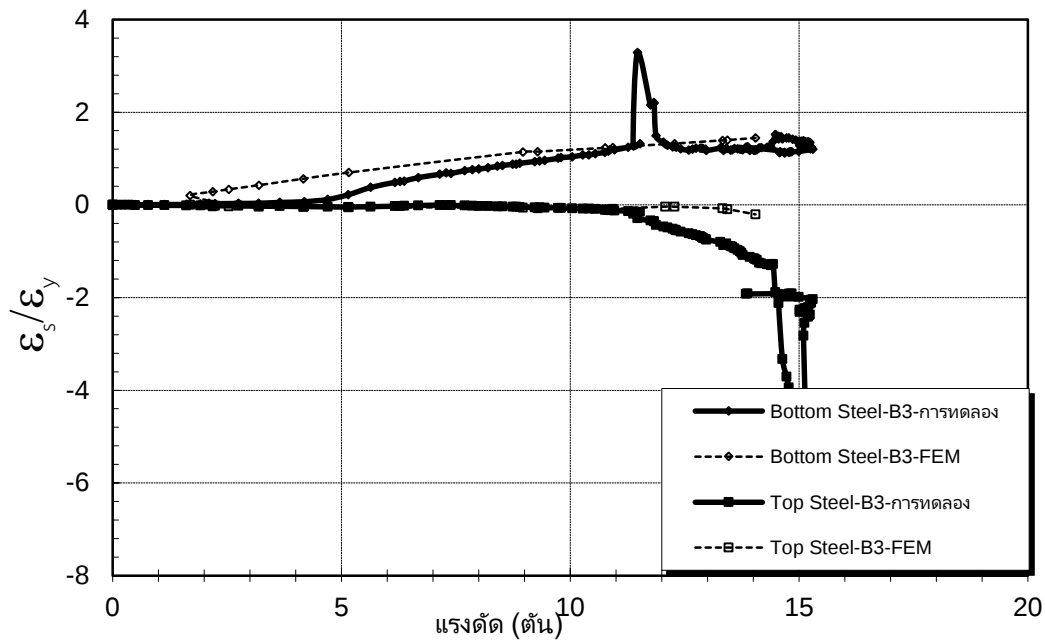
5.1.6.3 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ของคาน B03

ในหัวข้อนี้จะเสนอการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้านล่าง และด้านข้างสูง 7.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ขนาด 15x25x140 เซนติเมตร นำเสนอโดยใช้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานคอนกรีต B03 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_s/ϵ_y ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B03 และความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_f/ϵ_y ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคาน B03



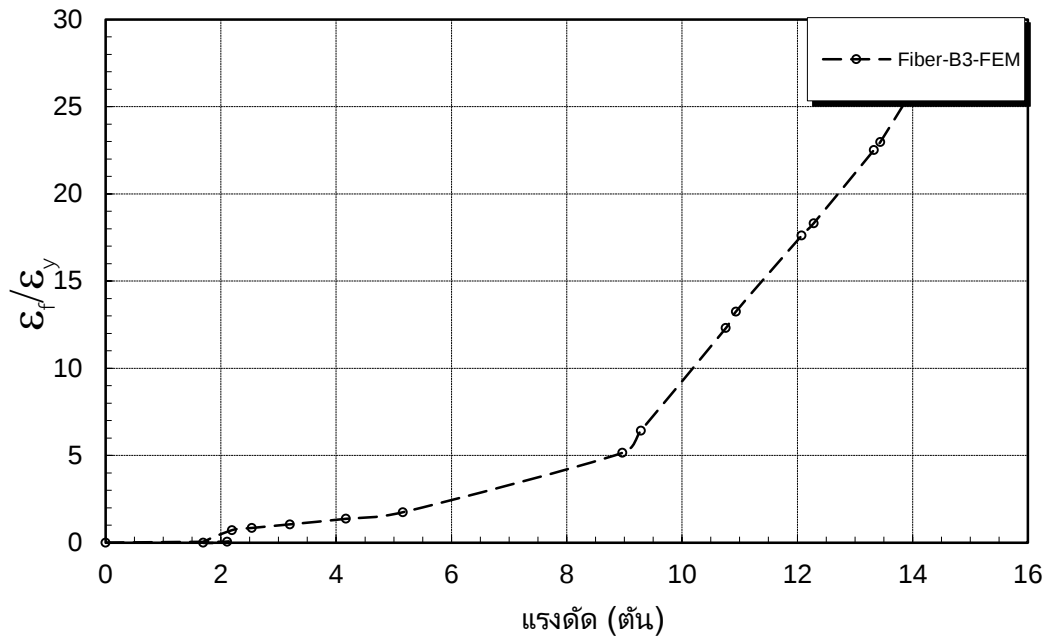
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน B03

จากรูปที่ 5.33 การวัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B03 กำลังอัดคอนกรีตของผลการทดลองอยู่ที่ 380 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการทดลองจะมีค่าแรงดัดเท่ากับ 15.300714 ตัน และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 20.4 มิลลิเมตร ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 15x25x140 เซนติเมตรที่ใช้สมการ Desayi มีค่าแรงดัดเท่ากับ 13.0508 ตัน และมีค่าระยะแอ่นตัวที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 14.644 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

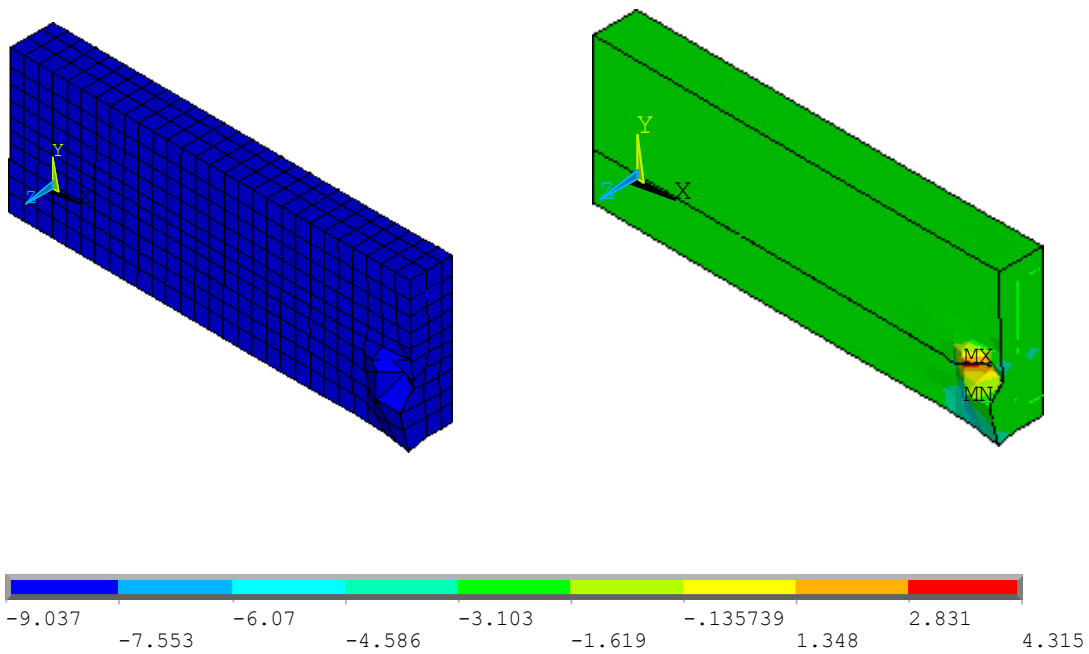


รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B03

จากรูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดที่กึ่งกลางคาน ซึ่งจุดที่คานรับโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_n) $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมล่างมีค่าเกินถึง 1.00 แสดงว่า เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดครากผิวคอนกรีตผิวล่างจึงเกิดการวิบัติ $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมบนมีค่าไม่ถึง 1.00 แสดงว่า เมื่อเหล็กเสริมบนถึงจุดครากคอนกรีตผิวบนยังไม่วิบัตินั่นเอง



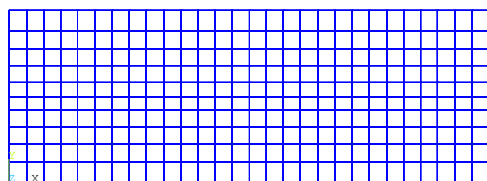
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_f/ϵ_u ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคาน B03



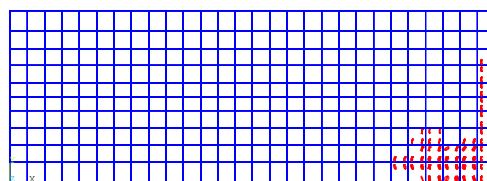
รูปที่ 5.36 ลักษณะการเสียรูป และลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B03 ของแบบจำลองสมการ Desayi

ตารางที่ 5.7 ค่าแรงดัดและระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

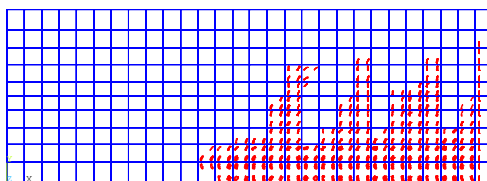
ตำแหน่งบนเส้นกราฟ	ระยะแอนตัว(มิลลิเมตร)	ค่าแรงดัด(ตัน)
1	0.0811	1.05791
2	0.14188	2.11004
3	1.28370	5.16
4	3.0137	8.9684
5	14.644	14.0508



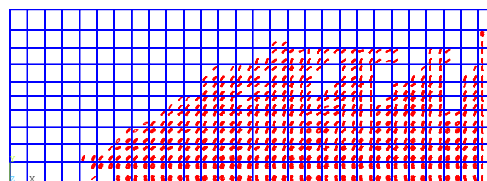
(1)



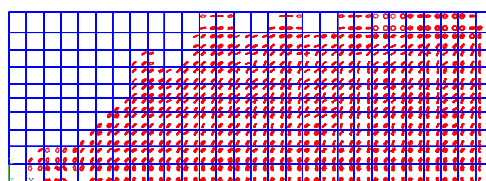
(2)



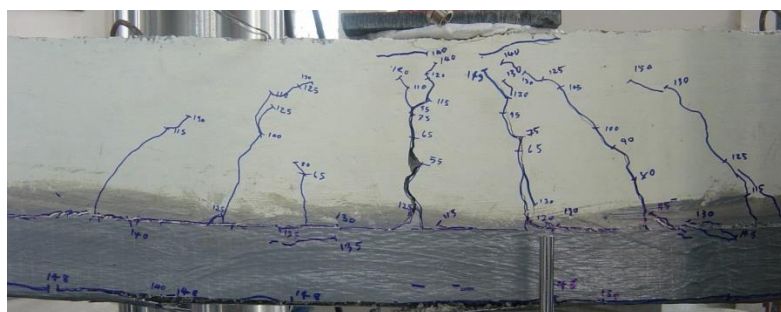
(3)



(4)

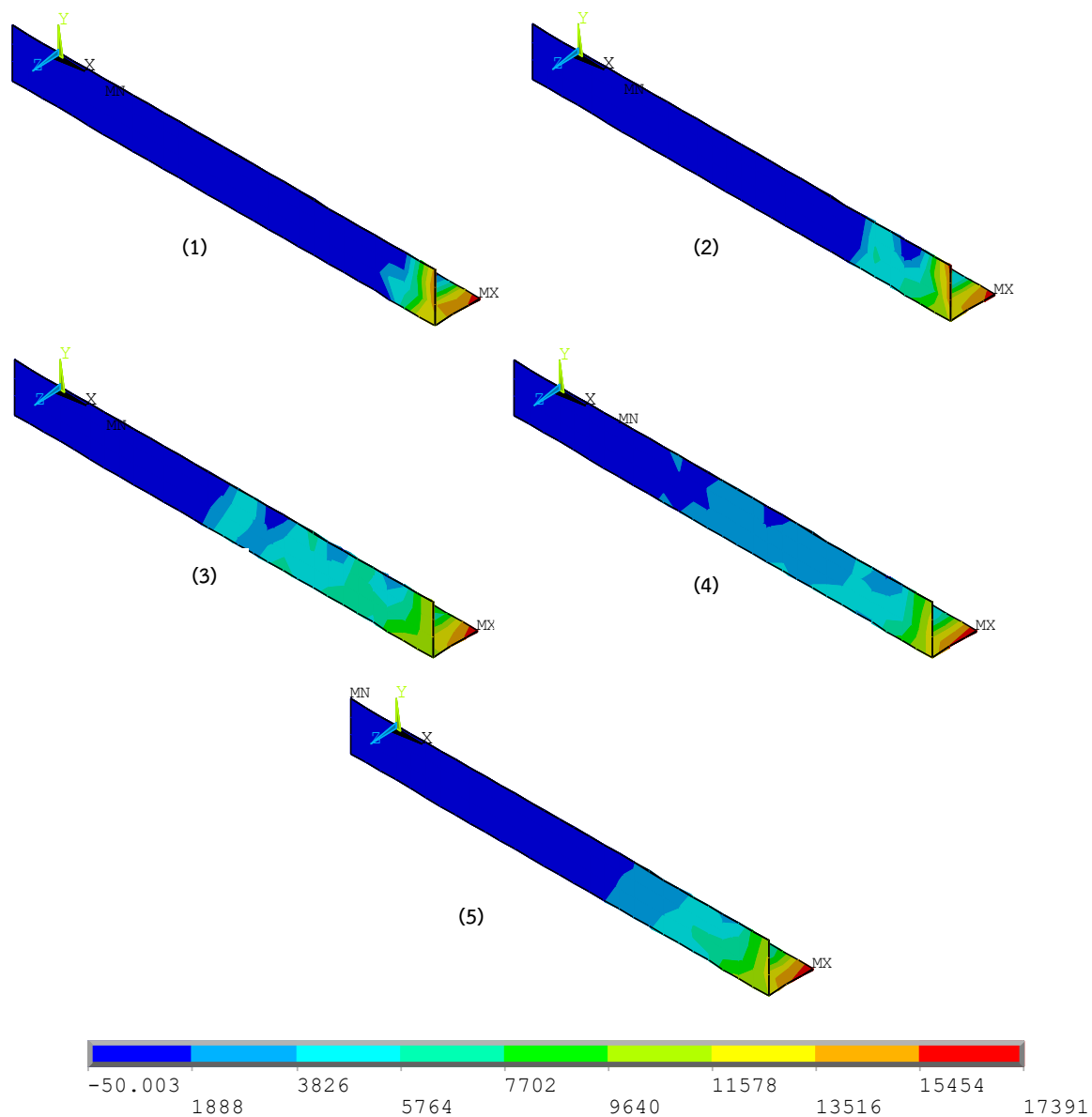


(5)



รูปที่ 5.37 ลักษณะรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B03

ลักษณะรอยร้าวของคาน หลังการวิบัติของคาน B03 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะรอยร้าว กว้างและกระจายห่างๆ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีต ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกำลังของเหล็ก แต่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด จึงช่วยทำให้รอยร้าวไม่กว้างและระยะห่างระหว่างรอยร้าวแต่ละรอยไม่มาก



รูปที่ 5.38 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B03

ตารางที่ 5.8 ค่าแรงดัด ค่าความเค้นสูงสุดในแผ่นไฟเบอร์ และกำลังรับความเค้นสูงสุดของแผ่นไฟเบอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

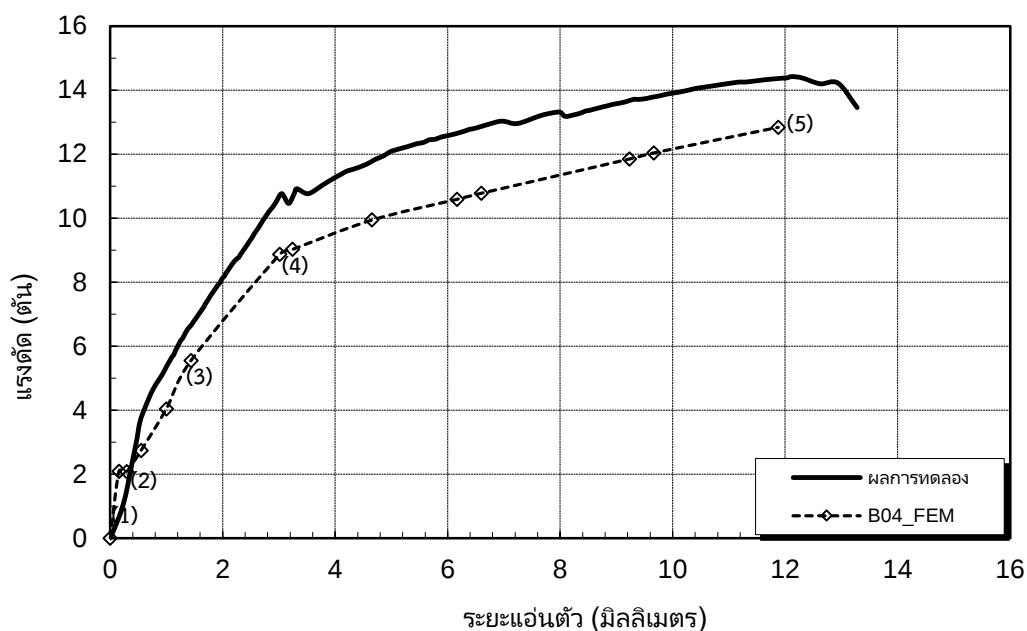
ตำแหน่งบน เส้นกราฟ	ค่าแรงดัด (ตัน)	ค่าความเค้นสูงสุดใน แผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)	ตำแหน่งที่เกิด ค่าสูงสุด	กำลังรับความเค้นสูงสุด ของแผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)
1	1.05791	467.146	กึ่งกลางคาน	35,019
2	2.11004	471.721	กึ่งกลางคาน	35,019
3	5.16	1,155	กึ่งกลางคาน	35,019
4	8.9684	3,409	กึ่งกลางคาน	35,019
5	14.0508	17,391	กึ่งกลางคาน	35,019

จากรูปที่ 5.38 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B03 แบบจำลองที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เท่ากับ 0.0811 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 1.05791 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 464.146 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 0.14188 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 2.11004 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 471.721 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.2837 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 5.16 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 1,155 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 3.0137 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 8.9684 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 3,409 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 14.644 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 14.0508 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 17,391 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.6.4 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ของคาน B04

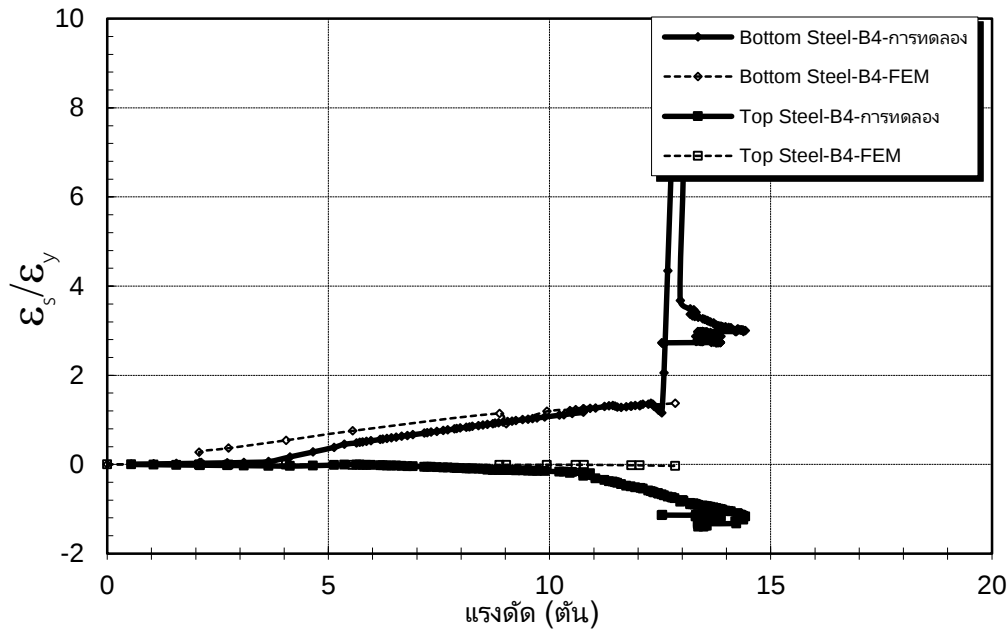
ในหัวข้อนี้จะเสนอการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้านล่าง และด้านข้างสูง 7.5 เซนติเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากห้องปฏิบัติการ ขนาด 15x25x140 เซนติเมตร นำเสนอโดยใช้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะ

แอมป์ที่กึ่งกลางของคานคอนกรีต B04 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคาน B04 และความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_f/\varepsilon_y$ ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคาน B04



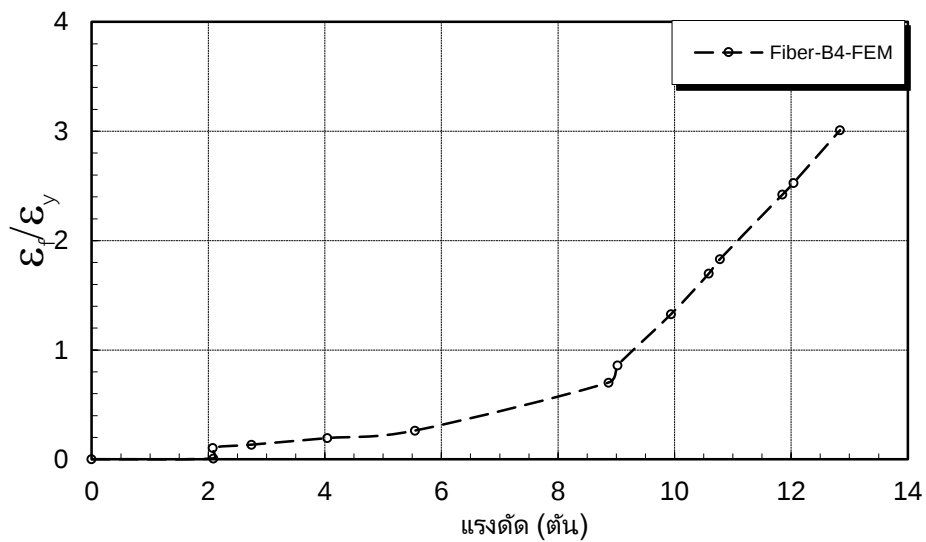
รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและค่าระยะแอมป์ที่กึ่งกลางคาน B04

จากรูปที่ 5.39 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B04 กำลังอัดคอนกรีตของผลการทดลองอยู่ที่ 348 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการทดลองจะมีค่าแรงดัดเท่ากับ 14.42406 ตัน และมีค่าระยะแอมป์ที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 13.88 มิลลิเมตร ผลจากการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขนาด 15x25x140 เซนติเมตรที่ใช้สมการ Desayi มีแรงดัดเท่ากับ 12.8404 ตัน และมีค่าระยะแอมป์ที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 11.877 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่ากราฟที่ใช้สมการของ Desayi มีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของผลการทดลอง

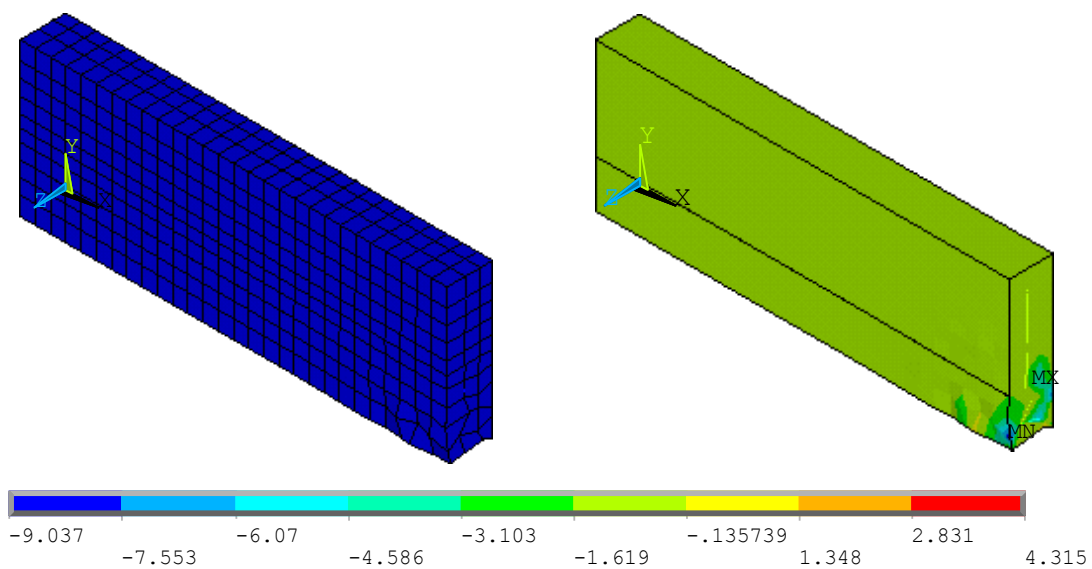


รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดของคานB04

จากรูปที่ 5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมและค่าแรงดัดที่กึ่งกลางคาน ซึ่งจุดที่คานรับโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_n) $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมบนมีค่าเกินถึง 1.00 แสดงว่า เหล็กเสริมบนมีกำลังถึงจุดครากผิวคอนกรีตผิวบนจึงเกิดการวิบัติ $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ ของเหล็กเสริมล่างมีค่าไม่ถึง 1.00 แสดงว่า เมื่อเหล็กเสริมล่างถึงจุดครากคอนกรีตผิวล่างยังไม่วิบัตินั่นเอง



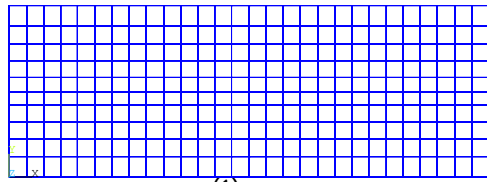
รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\varepsilon_f/\varepsilon_y$ ของแผ่นไฟเบอร์และค่าแรงดัดของคานB04



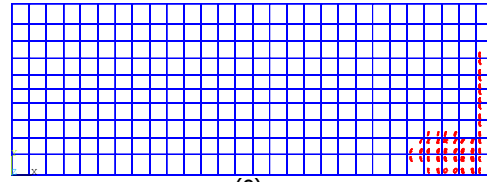
รูปที่ 5.42 ลักษณะการเสียรูป และลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงกดอัด (Compressive stress) ไปจนทั่วชิ้นงานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B04 ของแบบจำลองสมการ Desayi

ตารางที่ 5.9 ค่าแรงดัดและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

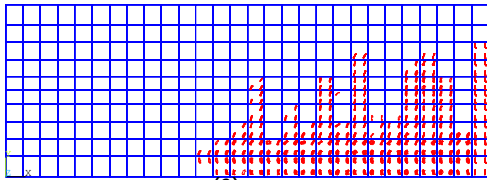
ตำแหน่งบนเส้นกราฟ	ระยะแอ่นตัว(มิลลิเมตร)	ค่าแรงดัด(ตัน)
1	0.08672	1.0892
2	0.15725	2.09156
3	1.4356	5.5468
4	3.0152	8.8688
5	11.877	12.8404



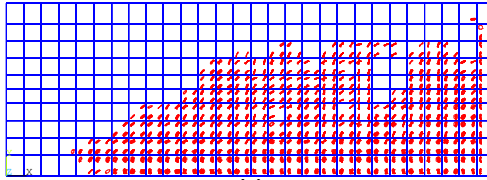
(1)



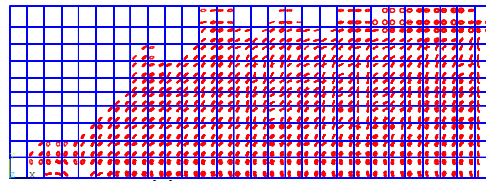
(2)



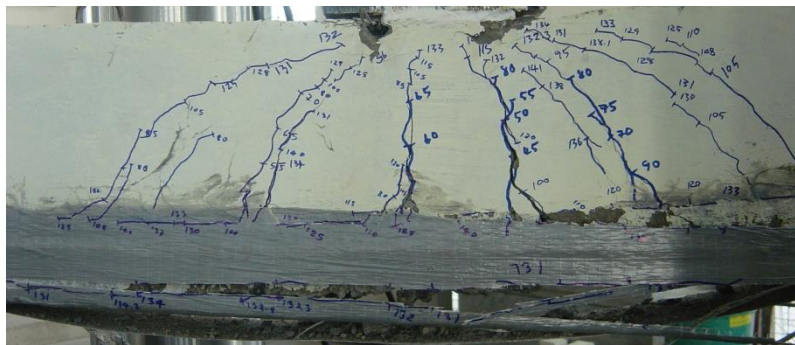
(3)



(4)

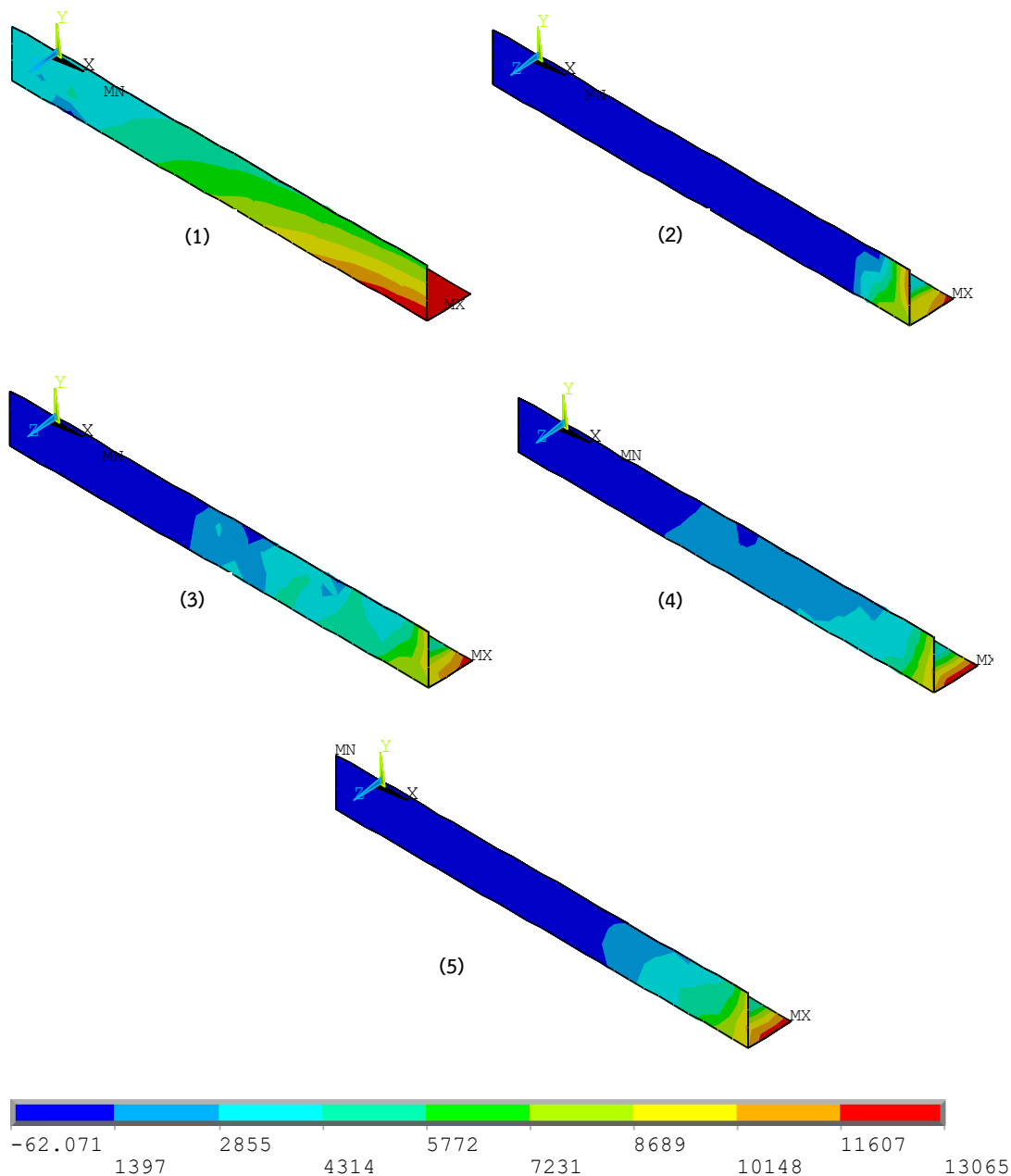


(5)



รูปที่ 5.43 ลักษณะรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B04

ลักษณะรอยร้าวของคาน หลังจากการวิบัติของคาน B04 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะรอยร้าว กว้างและกระจายห่างๆ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีต ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกำลังของเหล็ก แต่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด จึงช่วยทำให้รอยร้าวไม่กว้างและระยะห่างระหว่างรอยร้าวแต่ละรอยไม่มาก



รูปที่ 5.44 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B04

ตารางที่ 5.10 ค่าแรงดัด ค่าความเค้นสูงสุดในแผ่นไฟเบอร์ และกำลังรับความเค้นสูงสุดของแผ่นไฟเบอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นกราฟรูปที่ 5.21

ตำแหน่งบน เส้นกราฟ	ค่าแรงดัด (ตัน)	ค่าความเค้นสูงสุดใน แผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)	ตำแหน่งที่เกิด ค่าสูงสุด	กำลังรับความเค้นสูงสุด ของแผ่นไฟเบอร์ (กก./ซม ²)
1	1.0892	35.912	กึ่งกลางคาน	35,019
2	2.09156	446.366	กึ่งกลางคาน	35,019
3	5.5468	1,051	กึ่งกลางคาน	35,019
4	8.8688	3,039	กึ่งกลางคาน	35,019
5	13.8404	13,065	กึ่งกลางคาน	35,019

จากรูปที่ 5.44 ลักษณะรอยร้าวของแผ่นไฟเบอร์ B04 แบบจำลองที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เท่ากับ 0.08672 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 1.0892 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 35.912 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 0.15725 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 2.09156 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 446.366 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 1.4356 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 5.5468 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 1,051 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 3.0152 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 8.8688 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 3,039 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ตำแหน่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 11.877 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งแรงดัดเท่ากับ 12.8404 ตัน มีค่าความเค้นเท่ากับ 13,065 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

7.1 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของแบบจำลอง เริ่มจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กล่องคอนกรีตโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองและสมการ Desayi นำมาเปรียบเทียบกับ แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กในจุดต่อที่มีลักษณะต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

6.1.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กล่องคอนกรีต

1) การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กล่องคอนกรีตโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองและสมการ Desayi นำมาเปรียบเทียบกับ พบว่าผลการไฟไนต์อีลิเมนต์ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก

2) แบบจำลองกล่องคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมในการรับน้ำหนักกระทำ การหดตัว และการเสียรูปได้เหมือนกับการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

6.1.2 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1) จากการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับผลการทดลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ พบว่าผลของแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นมีค่าน้ำหนักกระทำสูงกว่า แต่มีค่าระยะหดตัวน้อยกว่าผลการทดลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มีค่าที่แข็งกว่าผลการทดลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ

2) แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีการนำเสนอในครั้งนี้ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่า พฤติกรรมการดัดที่ได้แบบจำลองและจากการทดสอบจริงมีแนวโน้มใกล้เคียงกันโดยเฉพาะช่วงแรกของการเพิ่มน้ำหนักกระทำ

3) แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์วัสดุคอนกรีตที่มีการพัฒนาขึ้น มีความถูกต้องแม่นยำสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่าง โดยเฉพาะเมื่อใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีต (Compressive Stress-Strain Diagram) จากผลการทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-99, American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [2] ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000
- [3] ANSYS, ANSYS User’s Manual Revision 9, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2009.
- [4] Balakrishnan, S., and Murray, D.W., “Concrete Constitutive Model for NLFE Analysis of Structures,” Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(7), 1449-1466, 1988.
- [5] Desayi, P. and Krishnan, S., “Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete,” Journal of the American Concrete Institute, 61, pp. 345-350, March 1964.
- [6] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., Mechanics of Materials, PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts, 1997.
- [7] Hamid, S., Mohammad, R., E., “RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study”, J. of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117(11), pp 3417-3433
- [8] Jame G. MacGregor, and James K. Wight, “Reinforced Concrete Mechanics & Design”, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2005
- [9] Kachlakev, D.I. and Miller, T., “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Final Report, SP316, Oregon Department of Transportation, Salem, Oregon, May 2001.
- [10] Nilson, A. H., “Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method,” Journal of the American Concrete Institute, 65(9), pp. 757-766, 1968.
- [11] Nouna, G., Chaudhary, Zia-UL-Hasan, “Reinforced concrete repairs in beams.”, Construction and Building Materials, 1999, V.13, pp 195-212
- [12] บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, “ พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ๒๕๔๓, หน้า ๓๑-๓๖, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์

- [13] บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, “พฤติกรรมการณ์วิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเส้นใยคาร์บอน”, เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการซ่อมแซมบูรณะโครงสร้างโดยใช้เทคโนโลยีวัสดุ FRP, 2547 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
- [14] อมร พิมานมาศ, “หลักการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย FRP”, เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการซ่อมแซมบูรณะโครงสร้างโดยใช้เทคโนโลยีวัสดุ FRP, 2547, สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [15] จิตพันธ์ ประกอบพร. งานเสริมกำลังพื้นสะพาน โดยการใช้แผ่นเหล็กและแผ่นคาร์บอน การสัมมนาวิศวกรรมทาง ครั้งที่ 2. 2546
- [16] ไพรัช บุญนาค, “พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอน”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548
- [17] ไพโรจน์ เรืองสุทธิ และ พิสนธ์ อุดมวรรณ “พฤติกรรมการหลุดลอกของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของโครงสร้าง คสล.”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, 2549
- [18] ชลวิชัย สุชาภา, กำลังรับแรงดัดและต้นทุนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ลวดเหล็กกล้า และลวดเหล็กกล้าตีเกลียวที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่างๆ, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2554
- [19] อานนท์ วงษ์แก้ว และ คณะ (2552), “การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริม”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา
- [20] กริณี กงแก้ว และ วิศิษฐ์ บุญครอบ, การศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ไยแก้วด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, โครงการงานชั้นปี 4, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2553
- [21] สิทธิา โชติสุขรัตน์และคณะ, “พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัด เมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, 2543, หน้า 31-36, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [22] อานนท์ วงษ์แก้ว, “การศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 366-373, 2556.
- [23] ชลิต ดวงน้อย และ ทนงศักดิ์ วงศ์ล้ำม, พฤติกรรมคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2548

[24] อภินันท์ ภูซัน และ สุรสิทธิ์ หมั่นวิชาการศึกษา กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมแผ่นไฟเบอร์, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2548

[25] อานนท์ วงษ์แก้ว และ คณะ (2552), “การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา