



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์  
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557

พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้  
เหล็กข้ออ้อย ลวดเหล็กกล้า และลวดเหล็กกล้าตีเกลียว  
โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with  
Conventional Reinforcing Steel, Prestressing Wire, and Prestressing Strand  
using Detailed Finite Element Analysis.

โดย

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## Abstract

In order to study the behavior of reinforced concrete (RC) structures in terms of strength, ductility, even their failure mechanism, the common tool for most researchers is a laboratory test. This method is expensive and quite difficult to implement, therefore, nowadays the researchers turn to Finite Element (FE) Method. Even though this method would obviously be virtual, based on a computer model, it is considered as somewhat reliable and suitable tool for getting the primary data before setting up the full experiments. This becomes a main objective of the study. This study is conducted by taking advantage of FE method to analyze the RC structures named as RC beam, RC beam reinforced with glass fiber sheet (GFRP), and RC beam-column connection. Using commercial FE analysis software, ANSYS, the trial RC beam model was developed, and compared its results with experimental data tested at Burapha University laboratory. The success FE model is comprised of elements SOLID65 as concrete, LINK8 as steel reinforcement and stirrup, SOLID46 as GFRP and steel plate. Based on its geometrical and loading symmetry properties, the quarter FE model of beam was effectively employed. The comparison shows an excellent result for elastic range and acceptable for inelastic range with an error under 20%.

The FE model of RC beam from the first part was extended to analyze the RC beams with conventional reinforcing bar, prestressing wire, prestressing stand. Total of 14 FE models of RC beam were simulated with different types and details of steel reinforcement, but keeping the dimension, length, and all material properties the same, except compressive strength. The FE analysis show the incomparable results to experiments considering from flexural loads and displacements at the middle span of the beams.

In conclusion, the FE models developed in this study yield in acceptably well results of high loads and deflections. Moreover, the models demonstrate the trends and overall behaviors of RC concrete beams with conventional reinforcing bar, prestressing wire, prestressing stand quite reasonably, especially in the elastic behavior. However,

unconfined behavior of concrete after elastic range of concrete needs to be further investigated.

Keywords : Reinforced concrete structures, Analysis by finite elements

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กข้ออ้อย ลวดเหล็กกล้า และลวดเหล็กกล้าตีเกลียวโดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ประจำปีงบประมาณ 2557 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 บทนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
<b>บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก</b>	
3.1 บทนำ	8
3.2 ชนิดของชิ้นส่วนย่อยวัสดุ	9
3.3 คุณสมบัติของวัสดุ	12
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์คานคอนกรีต</b>	

4.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนติเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMB1)	19
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนติเมนต์ FEMB1	23
<b>บทที่ 5 การศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อย และคานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย ด้วยแบบจำลองไฟไนติเมนต์</b>	<b>28</b>
<b>บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา</b>	<b>51</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>52</b>

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structures) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างอาคารมาเป็นระยะเวลาช้านานแล้ว ซึ่งองค์ประกอบหลักของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้แก่ พื้น คาน เสา ตอม่อ และฐานรากนั้น มีพฤติกรรมต่างๆ กันเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกการที่สามารถทราบถึงพฤติกรรมขององค์อาคารเหล่านี้ เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์และออกแบบขององค์อาคารในภาพรวมเป็นอย่างมาก เนื่องจากลวดเหล็กกล้าตีเกลียว (PC Strand) และลวดเหล็กกล้า (PC Wire) มีค่ากำลังดึง (Tensile strength) สูงกว่าเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ถึง 3-4 เท่าตัว แต่ราคาของลวดเหล็กดังกล่าว (ณ ปี พ.ศ. 2555) เมื่อเทียบกับเหล็กข้ออ้อยกลับมีราคาสูงกว่าเพียงประมาณ 50-60% เท่านั้น ซึ่งถือว่ามีราคาต่ำมากเมื่อเทียบกับในสัดส่วนกำลังที่เท่ากัน ทำให้เกิดแนวคิดในการนำไปใช้เสริมคอนกรีตแทนการใช้เหล็กข้ออ้อย โดยหากสามารถนำลวดเหล็กกล้าตีเกลียวและลวดเหล็กกล้าไปใช้แทน เหล็กเส้นข้ออ้อยได้จะเป็นประโยชน์ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเมื่อเทียบกับการก่อสร้างด้วยวิธีคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดาทั่วไป ซึ่งไม่มีการดึงเหล็ก (Prestressing) ก่อน ตัวอย่างเช่น ขณะเริ่มทำงานวิจัยนี้ราคาเหล็กข้ออ้อยกิโลกรัมละ 25 บาท ลวดเหล็กกล้ากิโลกรัมละ 31 บาท ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวกิโลกรัมละ 32 บาท ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงคราก (Nominal yield strength) ของเหล็กข้ออ้อย (SD 40) เท่ากับ  $4,000 \text{ kg/cm}^2$  ค่า กำลังรับแรงดึงคราก ของเหล็กเส้นกลม SR 24 เท่ากับ  $2,400 \text{ kg/cm}^2$  ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Nominal ultimate strength) ของลวดเหล็กกล้า ขนาด 7 mm เท่ากับ  $16,000 \text{ kg/cm}^2$  และของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวเกรด 1860 เท่ากับ  $18,600 \text{ kg/cm}^2$  จะเห็นว่าในเบื้องต้น ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวมีราคาถูกกว่าเหล็กข้ออ้อยเมื่อเทียบต่อกำลังเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดในการนำลวดเหล็กกล้าตีเกลียวและลวดเหล็กกล้าซึ่งปกติใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงมาใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่ต้องอัดแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสามารถประยุกต์ใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวซึ่งมีราคาถูกกว่าเหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กเสริมหลักในคาน จะทำให้ราคาก่อสร้างลดลง

โดยปกติแล้วการจะทราบถึงพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะกระทำโดยการทดสอบตัวอย่างคานจริงที่หล่อในห้องปฏิบัติการ แบบเท่าของจริงหรือลดขนาดลงตามความเหมาะสมของเครื่องทดสอบและวัตถุประสงค์ของการทดสอบและทำการทดสอบการโก่งตัว (bending) ของ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำการบันทึกค่าการโก่งตัว ค่าน้ำหนักทดสอบ รอยร้าวที่เกิดขึ้น และพฤติกรรมการพังของคานเหล่านั้น อย่างไรก็ตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นทำได้ค่อนข้างยาก สิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณในการทดสอบมาก การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจส่วนใหญ่นิยม และเป็นที่ยอมรับ ทั้งนี้เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มากกว่าการทดสอบตัวอย่างคานจริงเป็นอย่างมาก

การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ให้ได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบตัวอย่างคานในห้องปฏิบัติการจริง เป็นปัญหาที่ยากมาก เนื่องจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น มีพฤติกรรมเป็นแบบ nonhomogenous และ anisotropic ซึ่งพฤติกรรมทั้งสองนี้จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ (Finite Element Model) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถเทียบเคียงผลการวิเคราะห์ได้กับผลการทดสอบจริง ในส่วนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์นั้นเมื่อต้องการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ก็จะเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้นกว่าเดิมนอกจากนี้การจะศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ เช่น กำลังอัดคอนกรีต รายละเอียดเหล็กเสริม จำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ติดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์นั้น จำเป็นต้องใช้แบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด โดยใช้ Solid Element และ 3D-Element ชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถศึกษารายละเอียดต่างๆรวมถึงลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินความสามารถและศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด แรงเฉือน ความเหนียว และลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อใช้เหล็กข้ออ้อยและใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อยด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ของโครงสร้างดังกล่าว โดยคำนึงถึงความเป็น nonhomogenous และ anisotropic ของวัสดุคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อีเลเมนต์สำเร็จรูป ANSYS จากนั้นจะทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ (Parametric Study) ที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(ค.ส.ล.) คานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อยและคานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย เพื่อให้เข้าใจและใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุง



พฤติกรรมคานคองกริตเหล่านั้ เพื่อให้เกิดการใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย ในการก่อสร้างคานคองกริตต่อไป

## 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 และลักษณะการพังของคานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อย
- 3) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย
- 4) ศึกษาเชิงตัวแปร (Parametric Study) เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล. คานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าและคานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก การแ่นตัว และลักษณะการพังของคานคองกริตเสริมเหล็ก คานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อย และคานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบโครงสร้างดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลังรับแรงดัด, ความเหนียว (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่สำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคานคองกริตเสริมเหล็ก คานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อย และคานคองกริตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย เช่น กำลังอัดคองกริต รายละเอียดเหล็กเสริม วิธีการออกแบบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็ก คานคองกรีตเสริมลวด เหล็กกล้าแทนเหล็กข้ออ้อย และคานคองกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าตีเกลียวแทนเหล็กข้ออ้อย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างประเภทนี้เมื่อน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะเป็นองค์ความรู้ใหม่ และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคองกรีตชนิดอื่นๆ
- 2) ข้อมูลจากการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric Study) ด้วยเทคนิค Finite Element Analysis จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างประเภทนี้มากขึ้น และจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้างเหล่านี้ ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการออกแบบกำลังประลัย (Ultimate strength design, USD) กำลังประลัยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กมีค่ามากกว่าขีดอีลาสติก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวจะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งแตกต่างไปจากวิธีการออกแบบหน่วยแรงใช้งาน (Working stress design, WSD) ที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กยังอยู่ในช่วงอีลาสติก ทั้งนี้การวิเคราะห์และออกแบบโดยวิธีการออกแบบกำลังประลัยมีสมมติฐานคือ 1) ระบายของหน้าตัดก่อนการตัดยังคงเป็นระนาบหลังการตัดโดยมีการยืดหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน (Neutral axis) 2) คอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมากจึงไม่คิดกำลังรับแรงดึงคานคอนกรีต 3) คอนกรีตและเหล็กเสริมยึดเกาะกันดีมาก ดังนั้นการยืดหดตัวของเหล็กและคอนกรีตจะเท่ากันที่จุดเดียวกัน 4) คอนกรีตเสริมเหล็กจะวิบัติเมื่อคอนกรีตมีหน่วยการหดตัว ( $\epsilon_{cu}$ ) เท่ากับ 0.003 5) การกระจายตัวหน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่สภาวะประลัยที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ทำการกระจายหน่วยแรงเทียบเท่าในการคำนวณ และ 6) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ( $\sigma_s$ ) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) ของเหล็กเสริม แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความสัมพันธ์ก่อนเกิดการครากและช่วงหลังจากเกิดการคราก อย่างไรก็ตามในการใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวโดยไม่ใส่แรงดึงลวดทั้งสองประเภท แทนเหล็กข้ออ้อยในคานคอนกรีตเสริมนั้น ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานประเภทนี้จะเป็นไปตามสมมติฐานข้างต้นหรือไม่ และการออกแบบคานประเภทนี้ควรใช้วิธีใดในการออกแบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแนวทางหนึ่งที่น่านำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดในเบื้องต้น รวมถึงการศึกษาเชิงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคาน

กระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการขั้นต้น (pre-processor) เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น แรง หน่วยแรง ความเค้น ความเครียด ระยะแอนตัว เป็นต้น 2) กระบวนการ

วิเคราะห์ (analysis) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นขั้นตอนการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ปัญหา 3) กระบวนการแสดงผลการวิเคราะห์ (post-processor) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้วจะประกอบด้วยผลลัพธ์ทางตัวเลขเป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องมีการเลือกให้โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ตามที่ต้องการ

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

TUGBA ARSAVA (2011) ได้ศึกษาความเป็นไปได้การใช้ลวด PC strand เสริมคานคอนกรีตโดยไม่มีการอัดแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงดัดโดยได้ทำการหล่อคานทดลอง 13 คาน ความยาว 3.50 เมตร ที่ขนาดหน้าตัดต่าง ๆ กัน กำลังอัดคอนกรีตตั้งแต่ 20, 30, 40, และ 50 MPa แบ่งเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่ใช้ในการก่อสร้าง 7 คาน และเป็นคานคอนกรีตเสริมลวด PC strand 6 คาน ทดสอบคานทั้งหมดด้วยวิธี Four-point bending test จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมลวด PC strand สามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้ดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

Z.H. Yao, Q.L. Yao, S.M. Huang and B. Song (2008) ได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดของคานโดยการใช้ SMPM (high-strength steel wire mesh and polymer mortar) ทำการทดลองโดยการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง 5 คาน ซึ่งประกอบด้วยคานที่เสริมกำลังแบบต่าง ๆ จำนวน 4 คาน และคานที่ไม่เสริมกำลัง 1 คานเพื่อเปรียบเทียบ ได้บันทึกวิเคราะห์การวิบัติของคาน พฤติกรรมการแตกร้าว ความเค้นที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมและลวดเหล็กเสริม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกระทำของคานกับการแอ่นตัว วิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงดัดประลัยที่เพิ่มขึ้นของคานคอนกรีตที่ใช้ SMPM ผลการทดลองคานที่เสริมกำลังด้วย SMPM มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำได้ดีมาก

ชลวิชัย สุชาภา และคณะ (2553) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา โดยออกแบบคานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวด้วยวิธีกำลังประลัย ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตและเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กข้ออ้อย จากผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวมีแนวโน้มตามที่ออกแบบไว้ แต่มีการแอ่นตัวของคานมาก หากเปรียบเทียบราคาวัสดุเสริมแรงต่อกำลังโมเมนต์ดัดสูงสุดพบว่า การใช้ลวดเหล็กกล้าและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวถูกกว่าเหล็กข้ออ้อย

อานนท์ วงษ์แก้ว และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS สร้างแบบจำลองไฟไนต์

อิเล็กเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อใน ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และทำการวิเคราะห์แบบจำลอง เทียบผลการ รับน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัว และลักษณะการพังของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จาก การศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พัฒนาขึ้นมีความ ถูกต้องในระดับที่ดีมาก สามารถทำนายค่าโมเมนต์แตกร้าว ค่าโมเมนต์ที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มคราก และ ค่าโมเมนต์ที่จุดสูงสุดได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ แบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ยังแสดงลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แม่นยำใกล้เคียงกับผล การทดสอบอีกด้วย สามารถนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนอื่นๆได้ต่อไป

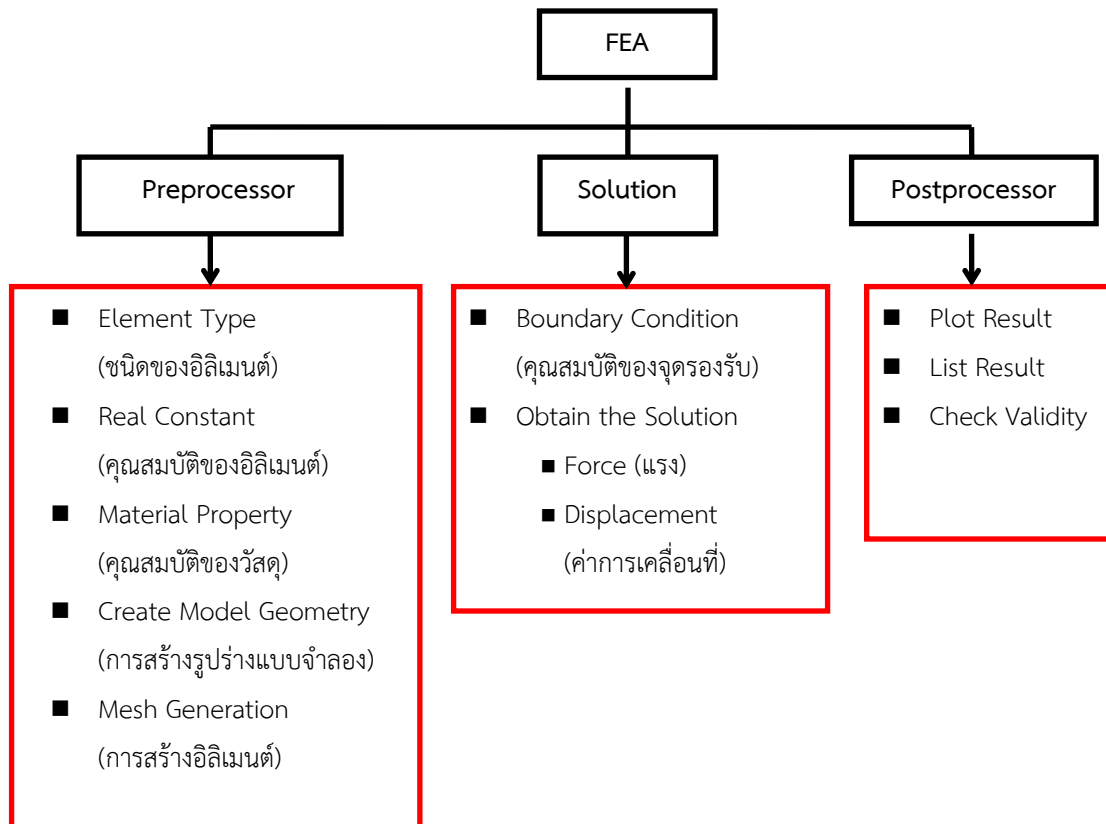
## บทที่ 3

### การพัฒนาแบบจำลองไฟไนลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 3.1 บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่ได้รับความนิยม มีประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน โดยไม่ต้องทำการทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนลิเมนต์ต้องอาศัยองค์ความรู้เฉพาะทางซึ่งมีความซับซ้อน สำหรับการทำงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากฎการวิเคราะห์โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยโปรแกรมไฟไนลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ชนิดอีลิเมนต์ที่ใช้กับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

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

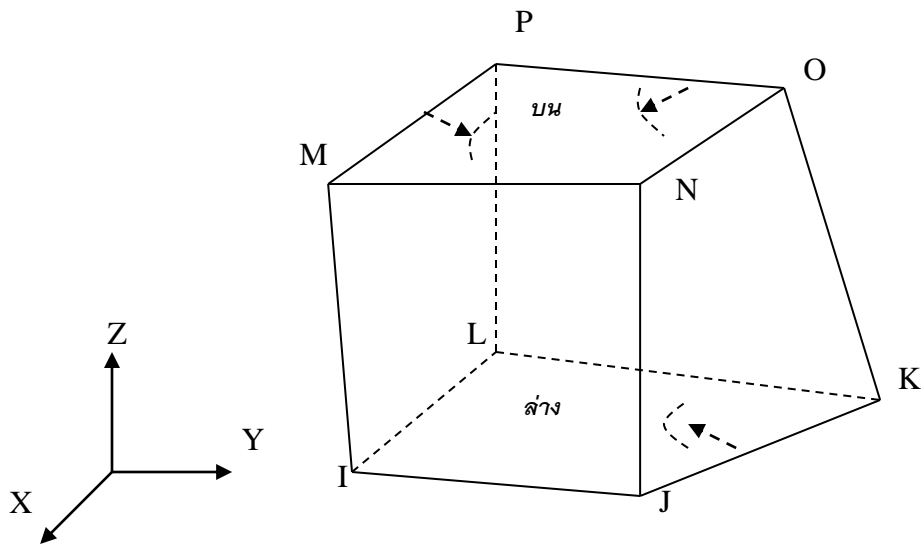


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังสรุปการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

### 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

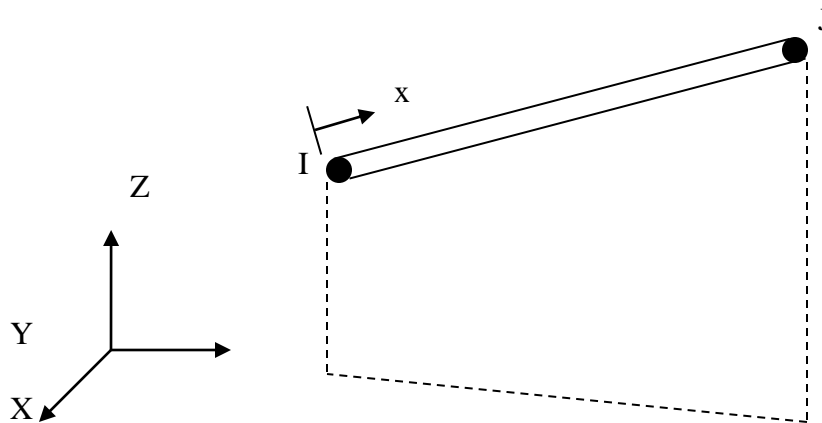


รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับคอนกรีต

### 3.2.2 เหล็กเสริมและเหล็กปลอก

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

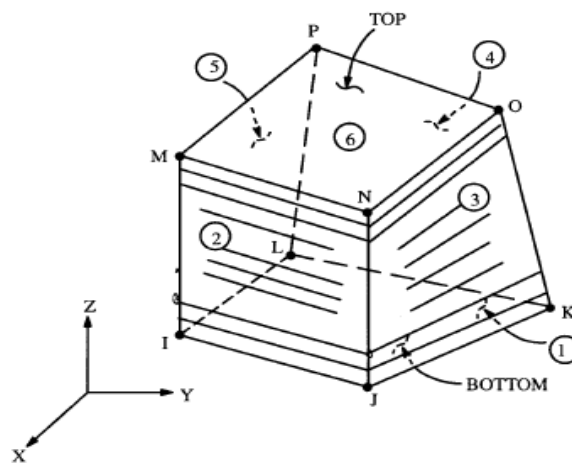




รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับเหล็ก

### 3.2.3 แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

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

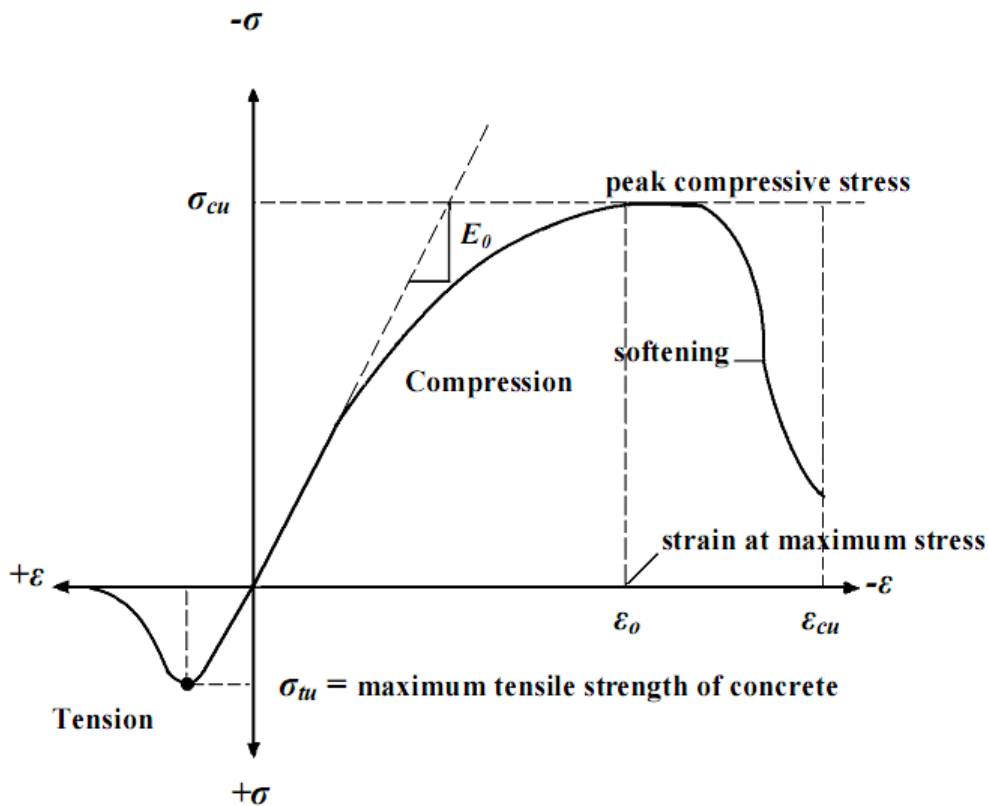


รูปที่ 3.4 อิลิเมนต์ SOLID46 -3 มิติที่ใช้สำหรับแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

### 3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

#### 3.3.1 คอนกรีต

ในการพัฒนาแบบจำลองไฟโนอิเลเมนต์ คุณสมบัติของคอนกรีตในการรับแรงอัดเป็นเรื่องยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมาก นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติของคอนกรีตยังเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมรับแรงของแบบจำลองไฟโนอิเลเมนต์ คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่กึ่งเปราะและมีพฤติกรรมที่ต่างกักัน 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

$\sigma_{cu}$  = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$\sigma_{tu}$  = กำลังรับดึงสูงสุดของคอนกรีต

$\sigma$  = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$\epsilon$  = ความเครียดอัดของคอนกรีต

$\epsilon_{cu}$  = ความเครียดอัดสูงสุดของคอนกรีต

ในช่วงการรับแรงอัดของคอนกรีต กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 30 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้นค่าความเค้นและค่าความเครียดของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง จนถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $\sigma_{cu}$ ) 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

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

กำหนดให้

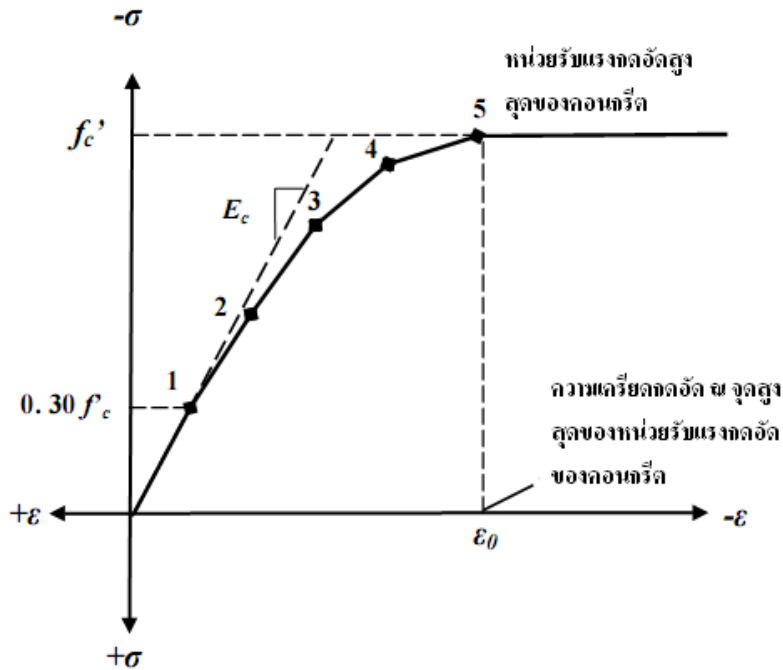
$f_r$  = ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

$f'_c$  = หน่วยรับแรงอัดสูงสุดคอนกรีต

4) ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต (Poisson's ratio,  $\nu$ ) เป็นค่าแสดงสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวราบของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกต่อด้วยความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกรับรับแรงอัด จากการทดสอบ คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 ในการศึกษาี้ กำหนดค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ 0.2 ในการใส่ค่าคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองไฟไนอิเลเมนต์

5) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (Shear transfer coefficient,  $B_f$ ) ในการใส่ค่าคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การพังด้วยแรงเฉือนของคอนกรีตจะแบ่งการใส่ค่าเป็น 2 แบบ คือ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบราบเรียบ (Shear transfer coefficients for an open crack (smooth crack)) และ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบรูนแรง (Shear transfer coefficients for a closed crack (rough crack)) ซึ่งเป็นค่าแสดงลักษณะการพังของคอนกรีตด้วยแรงเฉือนโดยโปรแกรม ANSYS กำหนดค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 ซึ่งมีความหมาย ดังนี้ เมื่อใส่ค่าเข้าใกล้ 0.0 จะเป็นการพังแบบราบเรียบ (smooth crack) กล่าวคือเป็นการพังของคอนกรีตที่สมบูรณ์ที่มีการถ่ายแรงเฉือนแบบสมบูรณ์ ส่วนใส่ค่าเข้าใกล้ 1.0 เป็นการพังแบบระเบิดรูนแรง (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 เป็นจุดสูงสุดของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตพอด้านจุดที่ 5 ไปคอนกรีตจะเกิดการวิบัติของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต Desayi และ Krishnan (1964)

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

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

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

กำหนดให้

$f'_c$  = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$E_c$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

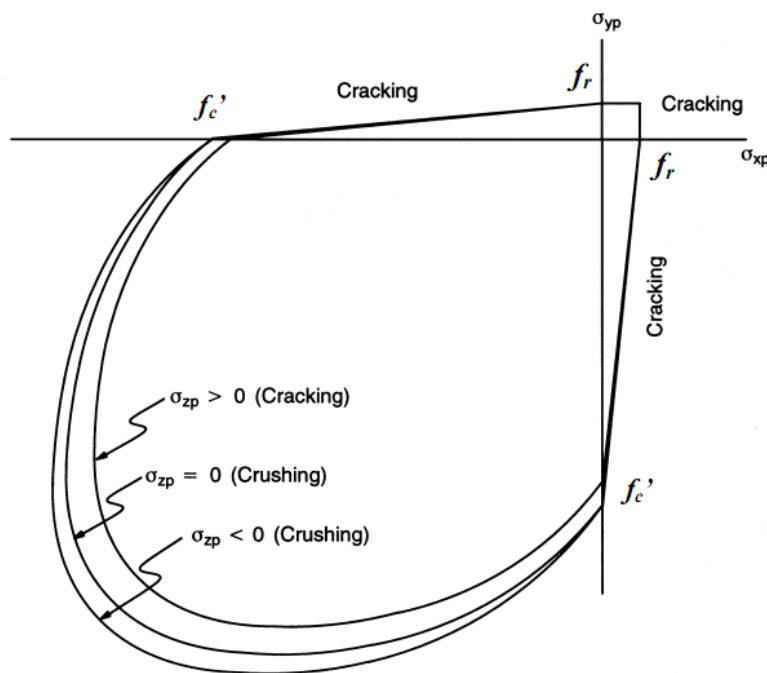
$\varepsilon_0$  = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$\sigma_c$  = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

$\varepsilon_c$  = ความเครียดอัดของคอนกรีต

### 7) เกณฑ์การพังของคอนกรีต

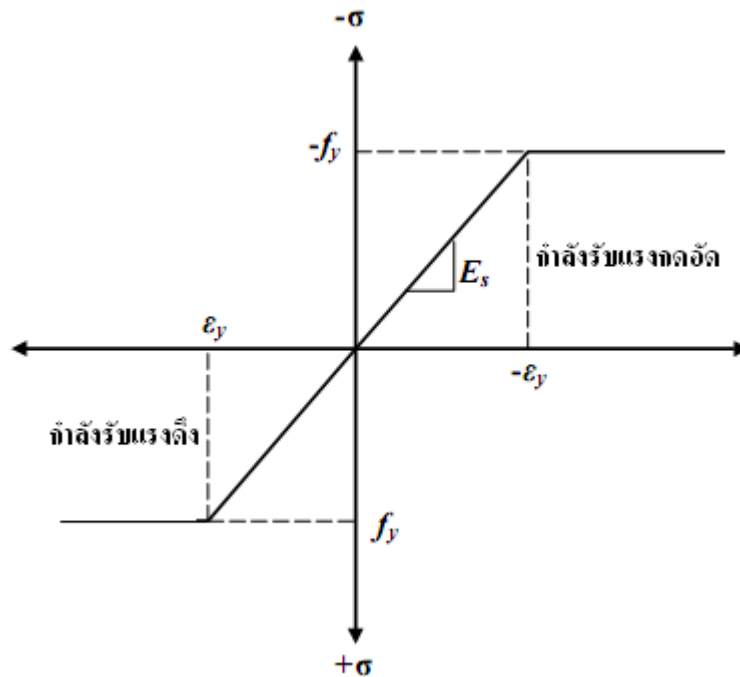
ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID 65) เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองของวัสดุคอนกรีตนั้นต้องทำการกำหนดลักษณะการพังของคอนกรีตด้วย ซึ่งลักษณะการพังของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ ฉีกขาด (cracking) หรือแตกหัก (crushing) ด้วยแรงอัดเมื่อคอนกรีตได้รับในแนวแกน เกณฑ์การพังของคอนกรีตเนื่องจากหน่วยแรงอัดของคอนกรีต สามารถคำนวณได้ (William และ Warnke 1975) ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติที่แสดงดังรูป 3.7 มีความสำคัญในการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในทิศทางแนวแกน x และ y โดยอธิบายแนวแกนด้วยสัญลักษณ์  $\sigma_{xp}$  และ  $\sigma_{yp}$  ตามลำดับในเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายตัวของหน่วยแรงดึงในทิศทางเดียวกันกับการพังที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคอนกรีต หลังจากที่เกิดการแตกร้าวของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีตแล้ว ความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต จะกำหนดเป็นศูนย์กลางในทิศทางขนานกับทิศทางของหน่วยแรงดึง 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

เหล็กเสริมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของเหล็กเสริม การใส่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติกโดยสมบูรณ์ (โดยละทิ้งพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่ม) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียด ของเหล็กเสริม

กำหนดให้

$\sigma$  = ความเค้นของเหล็กเสริม

$\epsilon$  = ความเครียดของเหล็กเสริม

$E_s$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

$f_y$  = ความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริม

$\epsilon_y$  = ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม

#### 3.3.2.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ในการวิเคราะห์ไฟในอิลิเมนต์ ประกอบด้วย

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

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



## บทที่ 4

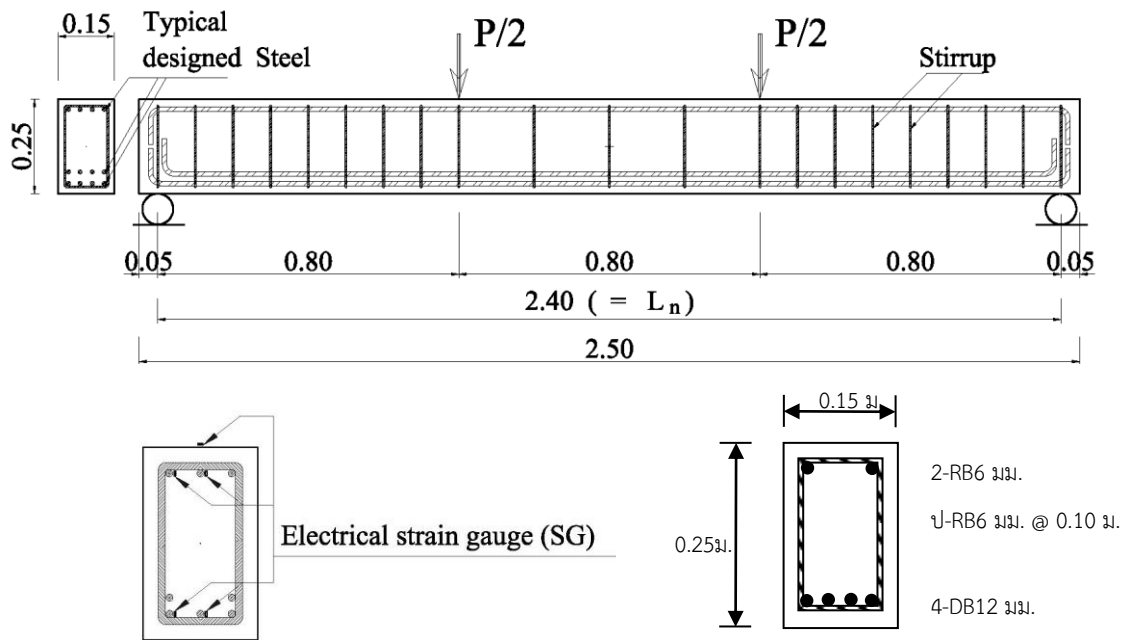
### ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีต

#### 4.1 การสร้างแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMB1)

แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พัฒนาขึ้นจะถูกตรวจสอบความถูกต้อง โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ [18] นำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการทดสอบคาน ขนาดหน้าตัด รายละเอียดการเสริมเหล็ก และตำแหน่งการติดแผ่นวัดการยืด-หด (Electrical Strain Gauges) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ (B1) โดยคาน B1 มีขนาดหน้าตัด 0.15 เมตร x 0.25 เมตร มีความยาวทั้งหมด 2.50 เมตร และมีระยะวัดระหว่างตำแหน่งจุดรองรับทั้งสองข้างเท่ากับ 2.40 เมตร เนื่องจากคุณสมบัติสมมาตรของหน้าตัดและลักษณะการให้แรงกระทำ แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นจะมีขนาดเพียงหนึ่งในสี่ของคานทดสอบ B1 ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ และการใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ รูปที่ 4.2 แสดงขนาดและวิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหนึ่งในสี่ของคานทดสอบ ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีตเสริม (FEMB1) ขนาดหนึ่งในสี่ของคานทดสอบ โดยคอนกรีตนั้นถูกสร้างโดยใช้อิลิเมนต์ชนิด SOLID65 ส่วนเหล็กเสริมและเหล็กปลอกใช้อิลิเมนต์ชนิด LINK8 และสำหรับการศึกษานี้จะทำการสมมุติการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตเป็นแบบยึดแน่นสมบูรณ์ โดยจะทำการเชื่อมจุด (node) ของเหล็ก และจุด (node) ของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกันให้มีคิรีของความอิสระเท่ากัน ทั้งนี้ในการกำหนดตำแหน่งจุดของเหล็กและจุดของคานให้ตรงกันพอดี เพื่อลดปัญหาการวิเคราะห์ของโปรแกรม

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1 เป็นค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังดึงของเหล็กเสริมที่จุดคราก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12) และ 6 มิลลิเมตร (RB6) และตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMB1) โดยค่า  $f'_c$ ,  $f'_y$ ,  $E_s$  นั้นใช้ค่าที่ได้จากผลการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่า  $E_c$  ของคอนกรีตคำนวณจากสมการ  $4733\sqrt{f'_c}$  ค่า  $f_r$  คำนวณจากสมการ  $0.623\sqrt{f'_c}$  และค่า  $\nu$  ถูกสมมุติเท่ากับ 0.2 และ 0.3

สำหรับคอนกรีตและเหล็กเสริมตามลำดับ ส่วนค่า  $\beta_t$  สมมุติเท่ากับ 0.3 และ 0.9 สำหรับคอนกรีตที่พังแบบราบเรียบและรุนแรง



รูปที่ 4.1 รายละเอียดการทดสอบคาน ขนาดหน้าตัด รายละเอียดการเสริมเหล็ก และตำแหน่งการติดแผ่นวัดการยืด-หด (Electrical Strain Gauges) ของคานในห้องปฏิบัติการ (B1) [18]

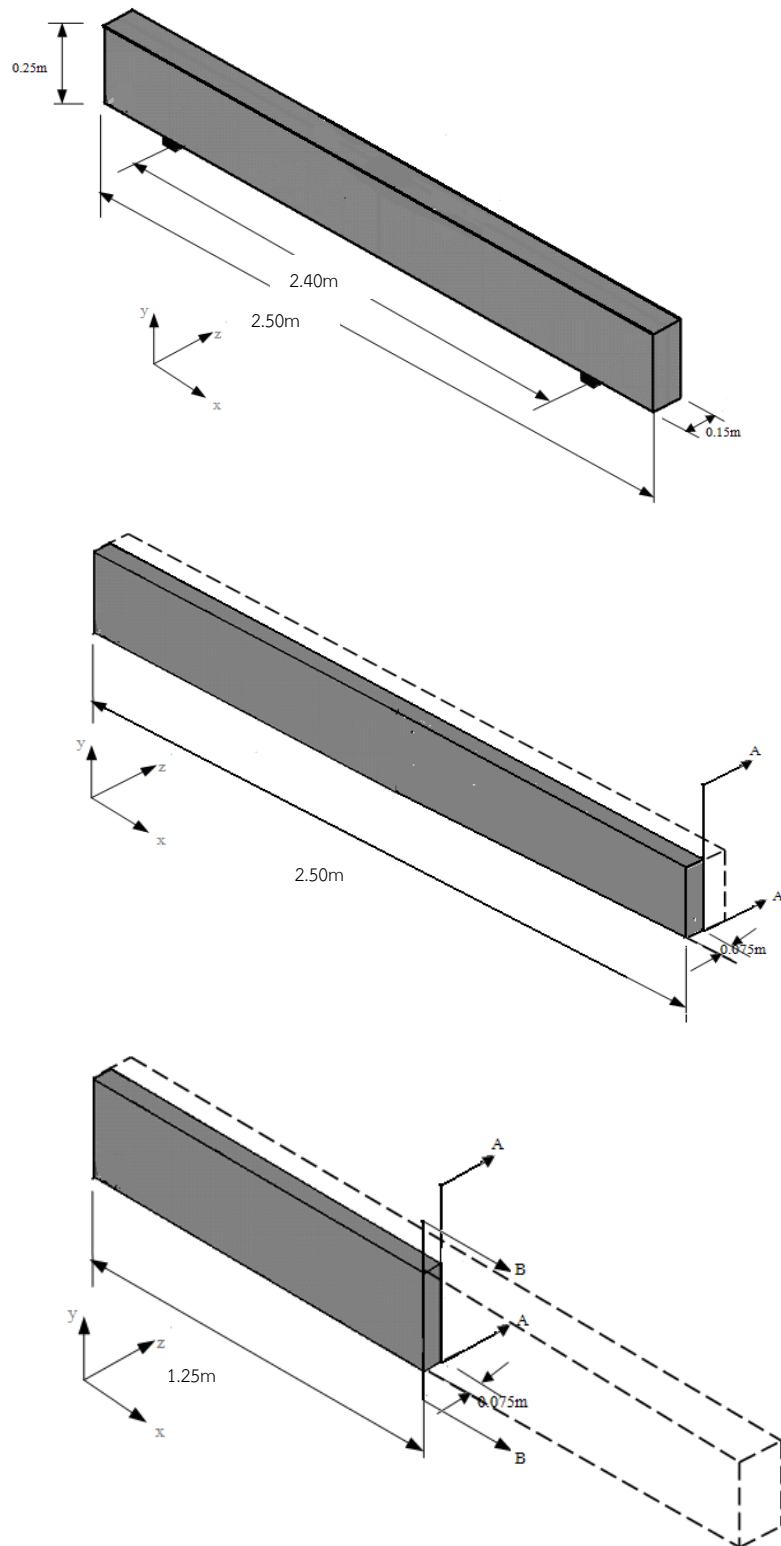
ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบในห้องปฏิบัติการ (B1)

คาน	$f'_c$ (คอนกรีต) MPa	$f_y / E_s$ (DB12) MPa	$f_y / E_s$ (RB6) MPa
B1	42	462/217,367	419/219,437

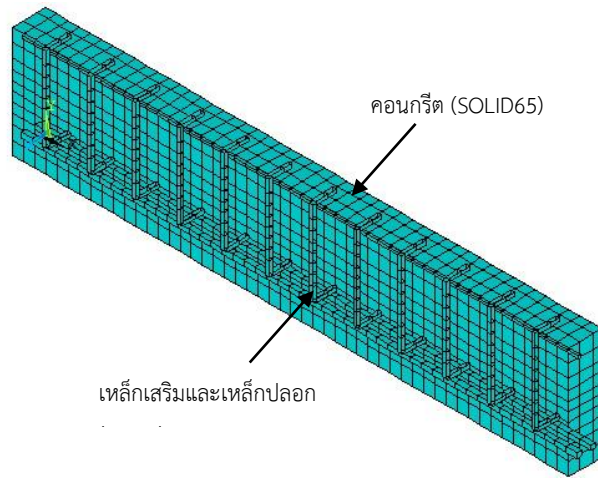
คาน	$f_y$	$E_s$	$f'_c$	$E_c$	$f_r$	$v$	$\beta_t$
FFMP1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		

							ราบเรียบ	รุนแรง
คอนกรีต	-	-	42	30,609.8	4.04	0.2	0.3	0.9
DB12	462	217,367	-	-	-	0.3	-	-
RB6	419	219,437	-	-	-	0.3	-	-

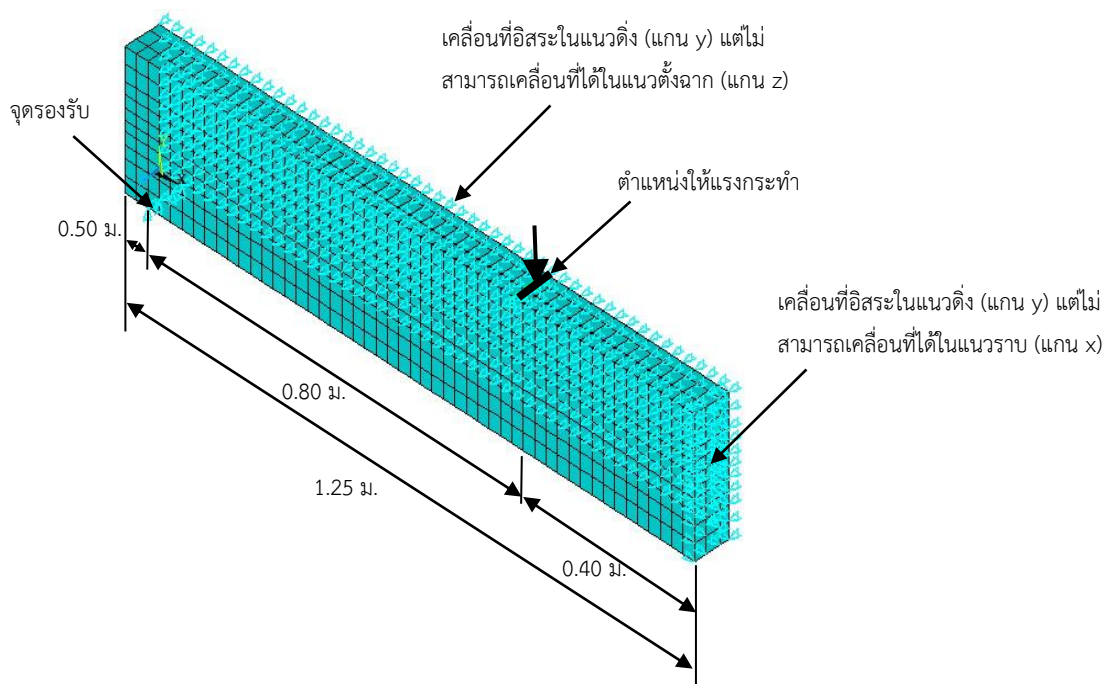
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMB1)



รูปที่ 4.2 ขนาดและวิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหนึ่งในสี่ของคานทดสอบ



รูปที่ 4.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คานคอนกรีตเสริม (FEMB1)



#### รูปที่ 4.4 การจำลองคุณสมบัติสมมาตร จุดรองรับ และการใส่แรง ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คาน FEMB1

รูปที่ 4.4 แสดงการจำลองคุณสมบัติสมมาตร จุดรองรับ และการใส่แรง ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คาน FEMB1 ที่พัฒนาขึ้น มีการใส่แรงกระทำที่ตำแหน่ง 0.80 เมตร จากจุดรองรับ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งการให้แรงกระทำในการทดสอบคาน B1 ให้ห้องปฏิบัติการ เพื่อทำการจำลองคุณสมบัติสมมาตรดังกล่าวไปแล้วข้างต้น ที่กึ่งกลางความยาวคานเท่ากับ 1.25 เมตร จากปลายคาน จุด (node) ทั้งหมดบนระนาบนี้ทั้งระนาบจะเคลื่อนที่ลงได้อิสระในแนวตั้ง (แกน y) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ (แกน x) แสดงดังในรูป และที่ระนาบครึ่งหนึ่งของหน้าตัดตลอดความยาวคาน แสดงดังรูปตัดจุด (node) ที่อยู่บนระนาบนี้ทั้งหมดจะเคลื่อนที่อิสระในแนวตั้ง (แกน y) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งฉาก (แกน z) ที่ตำแหน่งจุดรองรับคานทดสอบจุด (node) บริเวณนี้จะจำลองการเคลื่อนที่แบบลูกกลิ้ง (Roller) โดยเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวราบ (แกน x) แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งฉากกับแนวราบที่เหลืออีก 2 แนว (แกน y และ z) การวิเคราะห์แบบจำลอง FEMB1 จะใช้การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) และเพื่อให้แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ผลลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence) สิ่งที่สำคัญที่จำเป็นต้องทำการปรับค่าคือ การกำหนดค่าการต้านทานผลการลู่เข้า (Convergence Tolerance) โดยทำการเพิ่มค่าจากค่ากำหนดมาตรฐานของโปรแกรมอีก 5 เท่า เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ผลได้

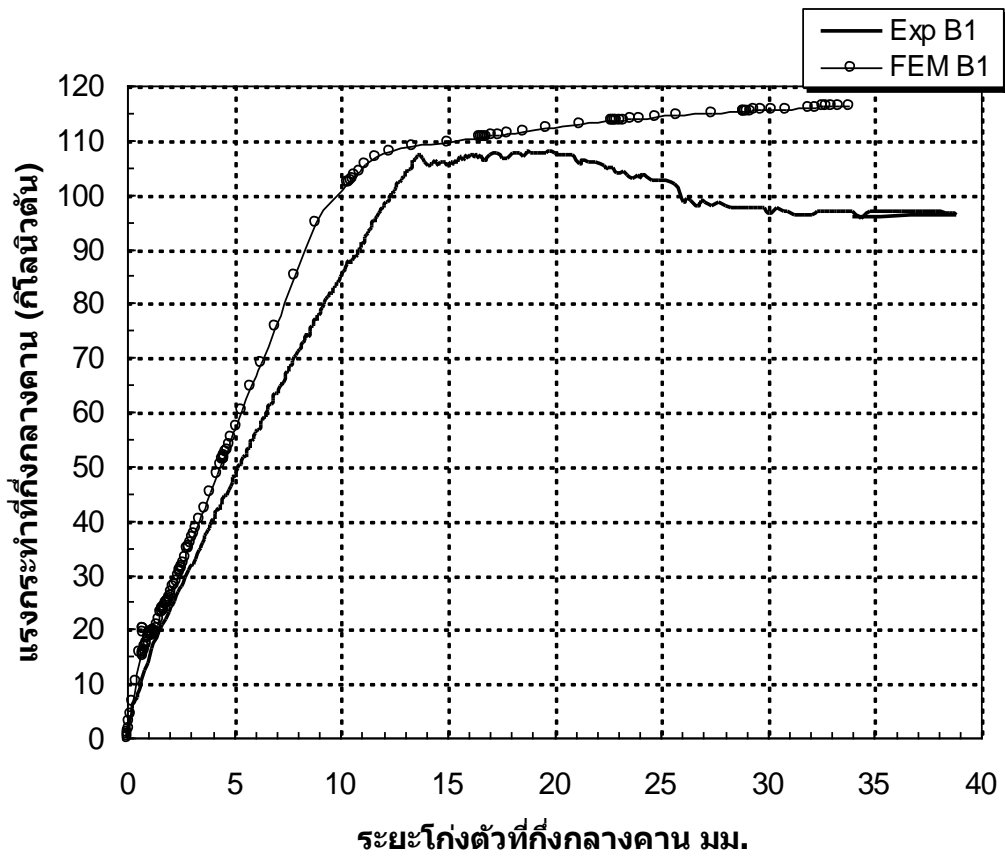
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ FEMB1

ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง FEMB1 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบคาน B1 นำเสนอด้วยกราฟแรงกระทำที่กึ่งกลางคานและระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน โดยค่าแรงกระทำที่กึ่งกลางคานที่ได้จากแบบจำลองคำนวณจากการนำค่าแรงปฏิกิริยาที่ได้จากแบบจำลองคูณด้วย 4 เพื่อให้เทียบผลได้กับการทดสอบคาน นอกจากนี้จะทำการเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตเมื่อคานมีค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานเพิ่มขึ้น โดยนำเสนอเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบและค่าความเครียดใช้งานของคอนกรีต (0.003) ค่าความเครียดต่างๆดังกล่าวข้างต้นที่ได้จากแบบจำลองจะนำค่าที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ติดแผ่นวัดการยืด-หด (Strain Gauge) ในคานทดสอบแสดงตำแหน่งตามรูปที่ 4.1

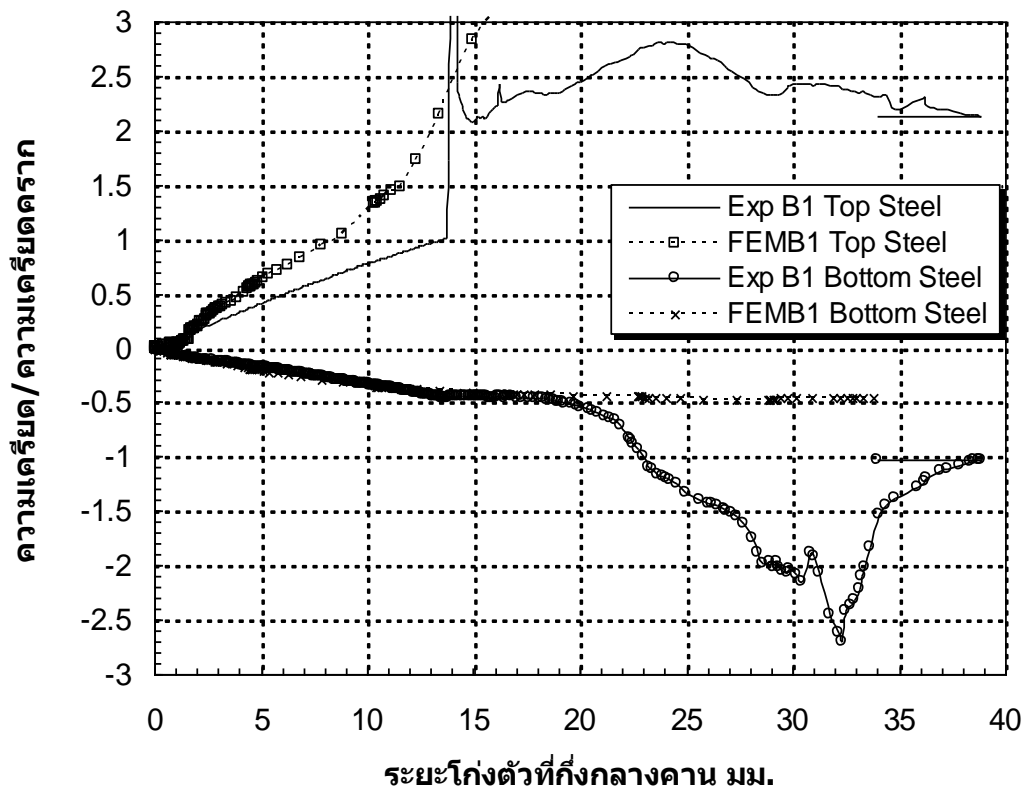
รูปที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงกระทำและระยะโก่งตัวที่กึ่งกลาง (1.20 ม.) วัดจากจุดรองรับของคาน โดยผลการทดสอบแสดงด้วยกราฟเส้นทึบ และผลการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงด้วยเส้นทึบวงกลม จากรูปพบว่า คานทดสอบ (Exp B1) มีรอยร้าวแรกที่แรงกระทำประมาณ 16 กิโลนิวตัน ส่วนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEMB1) แสดงรอยร้าวแรกที่แรงเท่ากับ 19 กิโลนิวตัน คาน Exp B1 สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 107 กิโลนิวตัน ส่วนแบบจำลอง FEMB1 รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 117 กิโลนิวตัน เมื่อเปรียบเทียบผลพบว่า แบบจำลอง FEMB1 ให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบประมาณ 9% และเมื่อเทียบค่าความชันของเส้นกราฟทั้งสองในช่วงแรงบริการ (Service Load) พบว่า แบบจำลองมีค่ามากกว่า แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความแข็ง (Stiffness) มากกว่าคานทดสอบ เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมบน-ล่าง และผิวคานคอนกรีต พบว่าเหล็กล่างในคาน B1 ถึงจุดครากที่ระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางคานประมาณ 14 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งนี้ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.5 พบว่า แรงกระทำมีค่าเท่ากับ 107 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คานแสดงพฤติกรรมถึงจุดครากเช่นกัน และเมื่อพิจารณาแบบจำลอง FEMB1 จะพบพฤติกรรมในลักษณะเช่นเดียวกัน กล่าวคือ จากกราฟแสดงความเครียดของเหล็กล่าง (FEMB1) เหล็กล่างจะครากที่ระยะโก่งตัวประมาณ 9 มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาแรงกระทำในรูปที่ 4.5 พบว่าเป็นตำแหน่งที่แบบจำลอง FEMB1 แสดงพฤติกรรมถึงจุดครากของคาน ส่วนค่าความเครียดของเหล็กบนพบว่า ค่าที่ได้จากผลการทดสอบและแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมากจนถึงระยะโก่งตัวประมาณ 20 มิลลิเมตร จากนั้นค่าความเครียดในเหล็กบนจากผลการทดสอบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเหล็กบนถึงจุดครากที่ระยะโก่งตัวประมาณ 23.5 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาแรงกระทำจากรูปที่ 4.5 ที่ระยะโก่งตัว 23.5 มิลลิเมตร พบว่า เป็นตำแหน่งที่แรงกระทำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งนี้คานเริ่มแสดงพฤติกรรมการพังแบบสมบูรณ์

รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในผิวบนคอนกรีต จากรูปพบว่าค่าที่ได้จากผลทดสอบและแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงระยะโก่งตัวของคานที่ประมาณ 7 มิลลิเมตร จากนั้นค่าความเครียดบนผิวคอนกรีตของคาน Exp B1 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลุดจากผิวเมื่อระยะโก่งตัวประมาณ 19 มิลลิเมตร ส่วนค่าความเครียดของผิวคอนกรีตด้านบนของแบบจำลองจะมีความชันลดลงเกือบคงที่

ผลจากการศึกษาในส่วนนี้ สามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMB1) จะให้ค่าแรงกระทำสูงกว่าผลการทดสอบเล็กน้อย แต่แบบจำลองก็สามารถทำนายแรงกระทำที่สภาวะคราก ได้แม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีมาก นอกจากนี้แบบจำลอง FEMB1 ยังสามารถจำลองพฤติกรรมการพังของคานได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองนี้ไปทำการศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กเชิงตัวแปรซึ่งจะกล่าวในส่วนต่อไปได้

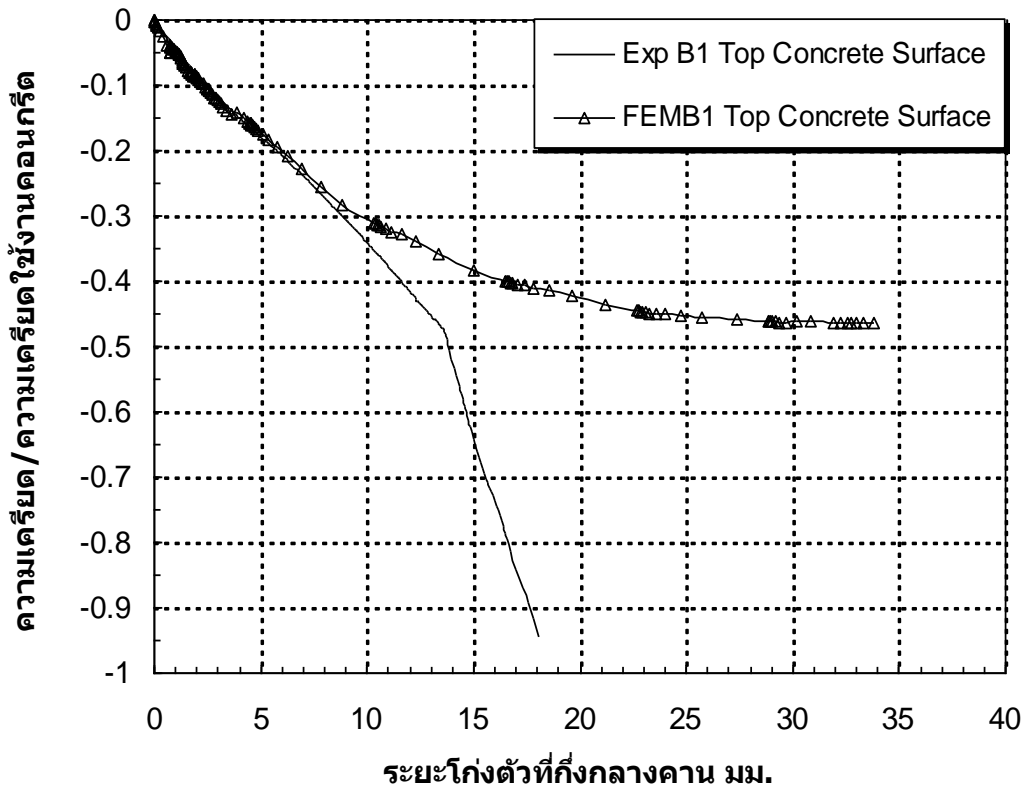


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบแรงกระทำที่กึ่งกลางคานและระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความเครียด/ความเครียดดรามและระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของเหล็กเสริมหลักในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์





รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความเครียด/ความเครียดใช้งานคอนกรีตและระยะโง่งตัวที่กึ่งกลางคานของ  
 ฝัวนคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบจำลองไฟไนอิติเมนต์

