

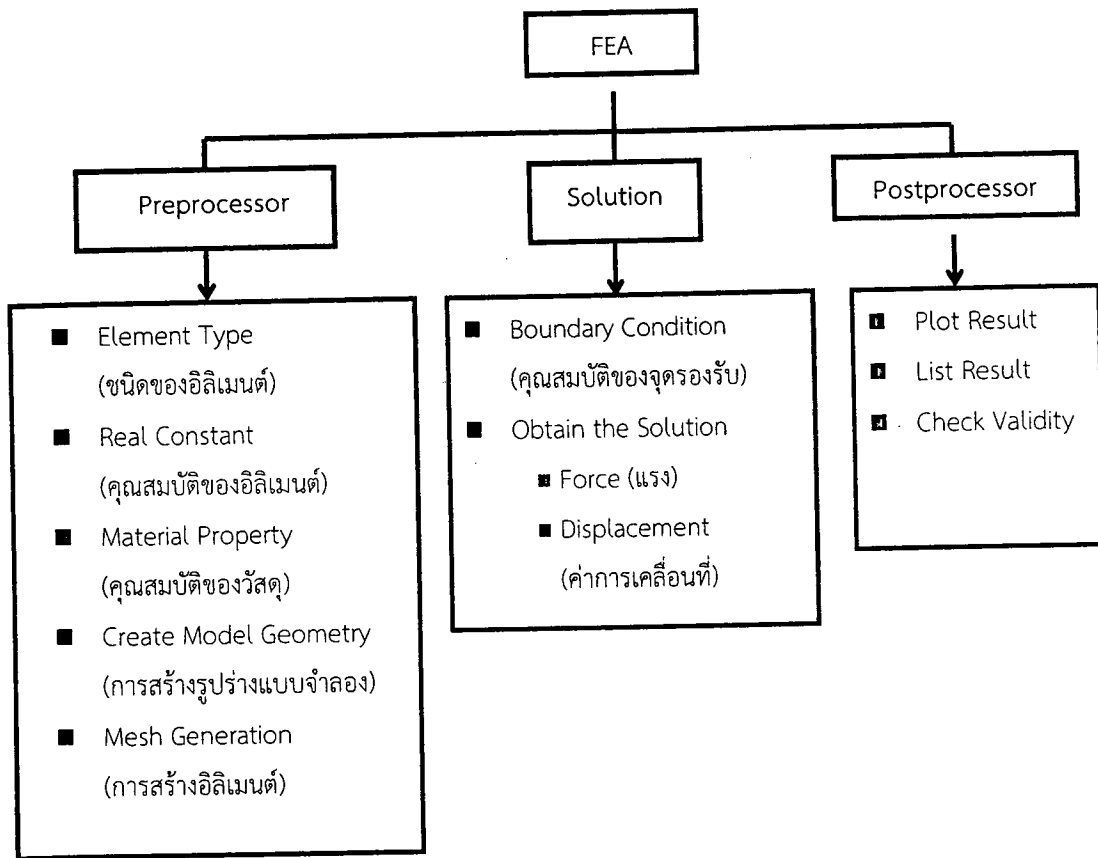
### บทที่ 3

#### การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.1 บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่ได้รับความนิยม มีประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน โดยไม่ต้องทำการทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องอาศัยองค์ความรู้เฉพาะทางซึ่งมีความซับซ้อน สำหรับการทำงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

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

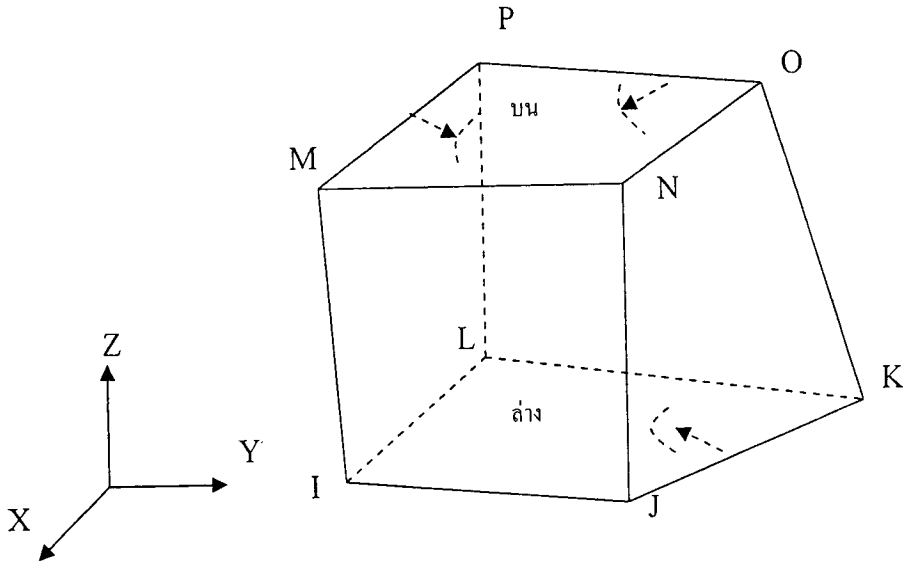


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังสรุปการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

### 3.2 ชนิดของชิ้นส่วนย่อยวัสดุ

#### 3.2.1 คอนกรีต

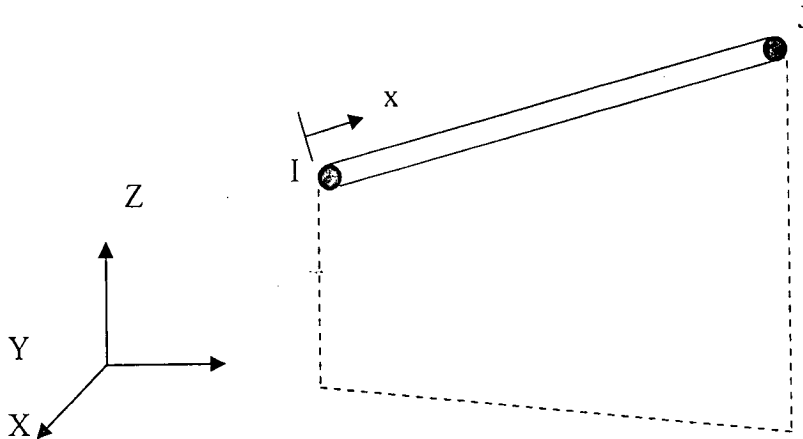
ชนิดของชิ้นส่วนย่อย (Element Type) ที่ใช้สำหรับคอนกรีตคือ ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีตจะถูกกำหนดขนาดด้วยความกว้าง ยาว และสูง ด้วยคำสั่งที่ใช้ในการสร้างจุดต่อจุด (Node) ทั้งหมด 8 จุด ที่ระบุเป็นตัวเลขทรงสี่เหลี่ยม และอ้างอิงพิกัดของจุดต่อตามแกน X Y และ Z ตามลำดับ แต่ละจุดมีดีกรีความอิสระ (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

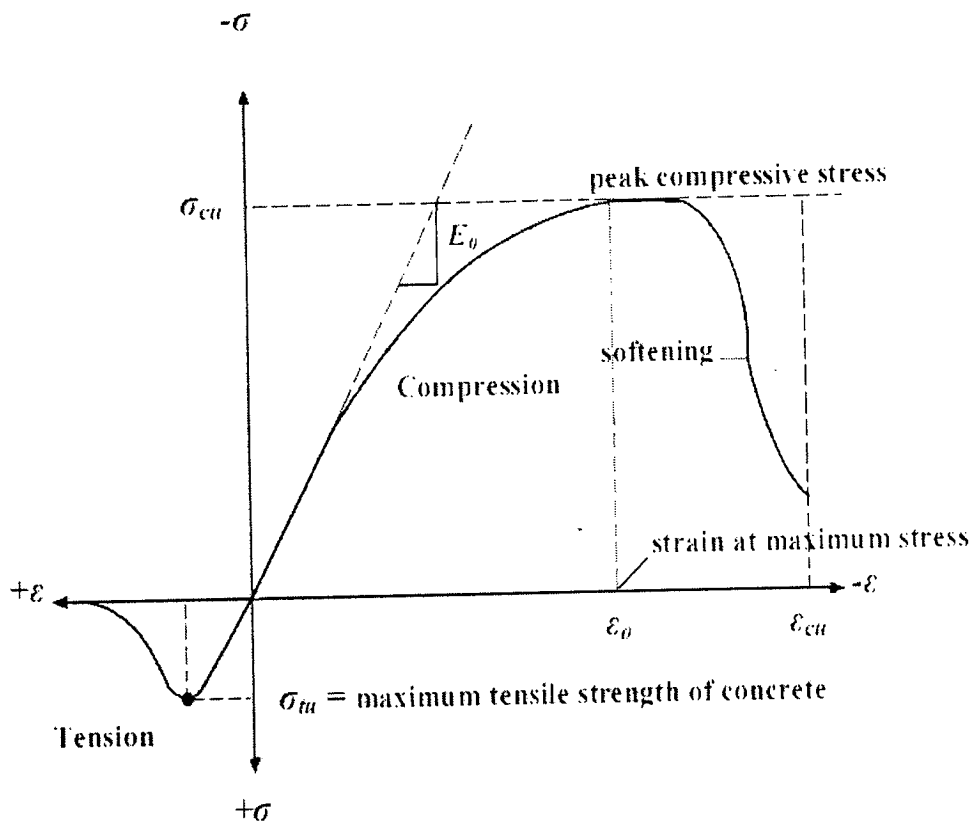


รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับเหล็ก

### 3.3 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 3.4 ซึ่งแสดงเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Bangash 1989)



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตที่น้ำหนักปกติ (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

$$f_r = 1.8 \sqrt{f'_c} \qquad \text{กก./ตร.ซม.} \qquad \dots\dots\dots (3.1)$$

กำหนดให้

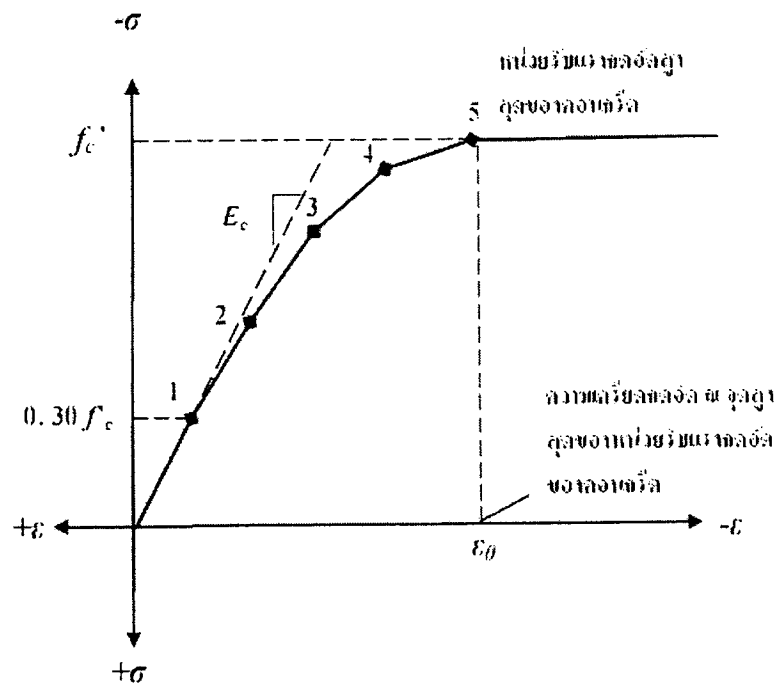
- $f_r$  = ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต
- $f'_c$  = หน่วยรับแรงอัดสูงสุดคอนกรีต

4) ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต (Poisson's ratio,  $\nu$ ) เป็นค่าแสดงสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวราบของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ต่อด้วยความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์รับรับแรงอัด จากการทดสอบ คอนกรีตธรรมดา มีค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 ในการศึกษาี้ กำหนดค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตที่ 0.2 ในการใส่ค่าคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

5) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (Shear transfer coefficient,  $B_r$ ) ในการใส่ค่าคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การพังด้วยแรงเฉือนของคอนกรีตจะแบ่งการใส่ค่าเป็น 2 แบบ คือ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบราบเรียบ (Shear transfer coefficients for an open crack (smooth crack)) และ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบรุนแรง (Shear transfer coefficients for a closed crack (rough crack)) ซึ่งเป็นค่าแสดงลักษณะการพังของ

คอนกรีตด้วยแรงเฉือนโดยในโปรแกรม 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 3.2-3.4 ค่าแรกจะเริ่มที่ศูนย์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต แล้วมายังจุดที่ 1 ที่คำนวณจาก  $0.3f_c'$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีตในช่วงเชิงเส้น และจุดที่ 2 3 4 และจุดที่ 5 เป็นจุดสูงสุดของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตพอผ่านจุดที่ 5 ไปคอนกรีตจะเกิดการวิบัติของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปแสดงลักษณะเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต Desayi และ Krishnan (1964)

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \dots\dots\dots (3.4)$$

กำหนดให้

$f'_c$  = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$E_c$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

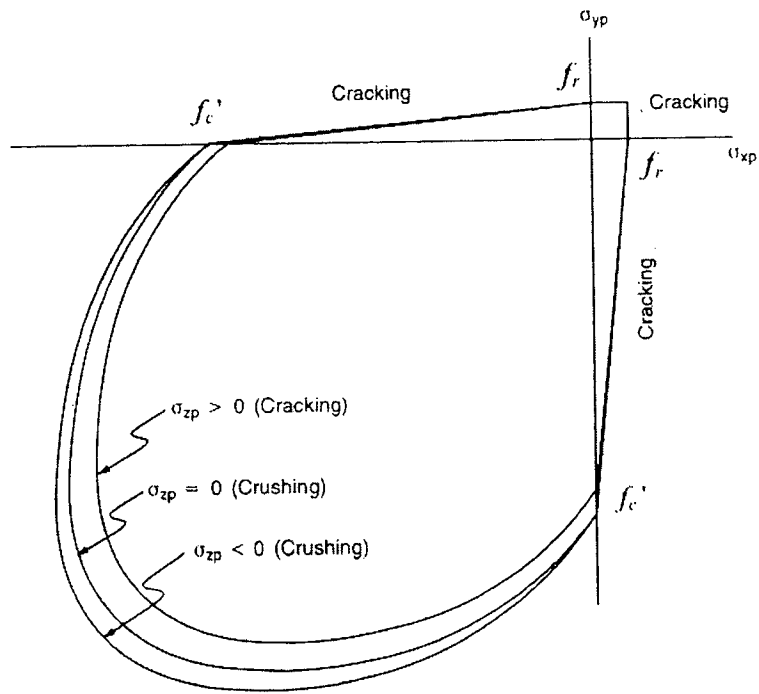
$\varepsilon_0$  = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$\sigma_c$  = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

$\varepsilon_c$  = ความเครียดอัดของคอนกรีต

#### 7) เกณฑ์การพังของคอนกรีต

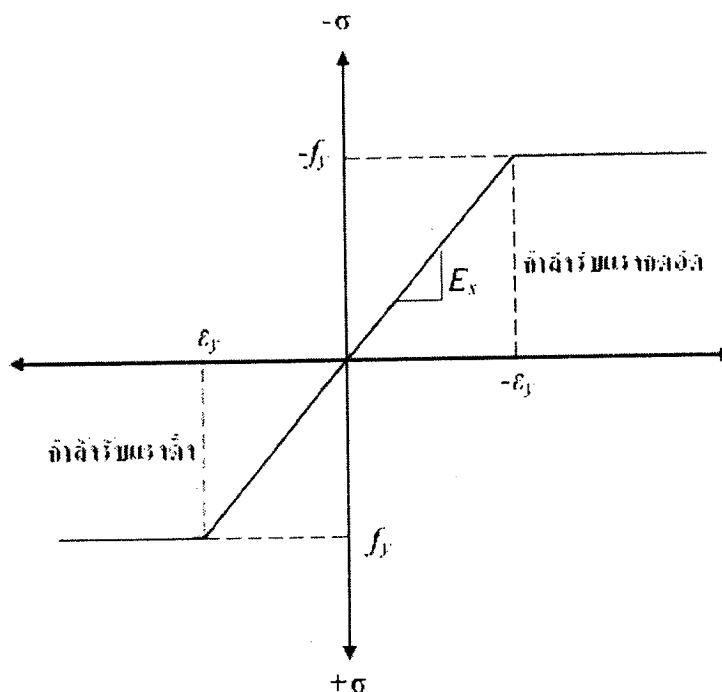
ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID 65) เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองของวัสดุคอนกรีตนั้นต้องทำการกำหนดลักษณะการพังของคอนกรีตด้วย ซึ่งลักษณะการพังของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ ฉีกขาด (cracking) หรือแตกหัก (crushing) ด้วยแรงอัดเมื่อคอนกรีตได้รับในแนวแกน เกณฑ์การพังของคอนกรีตเนื่องจากหน่วยแรงอัดของคอนกรีต สามารถคำนวณได้ (William และ Warnke 1975) ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติที่แสดงดังรูป 3.6 มีความสำคัญในการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในทิศทางแนวแกน x และ y โดยอธิบายแนวแกนด้วยสัญลักษณ์  $\sigma_{xp}$  และ  $\sigma_{yp}$  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 3.6 รูปแสดงลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติ (William และ Warnke 1975)

### 3.3.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของเหล็กเสริม การใส่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติกโดยสมบูรณ์ (ไม่คิดพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่ม) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียด ของเหล็กเสริม

กำหนดให้

$\sigma$  = ความเค้นของเหล็กเสริม

$\epsilon$  = ความเครียดของเหล็กเสริม

$E_s$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

$f_y$  = ความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริม

$\epsilon_y$  = ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม

### 3.3.2.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 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

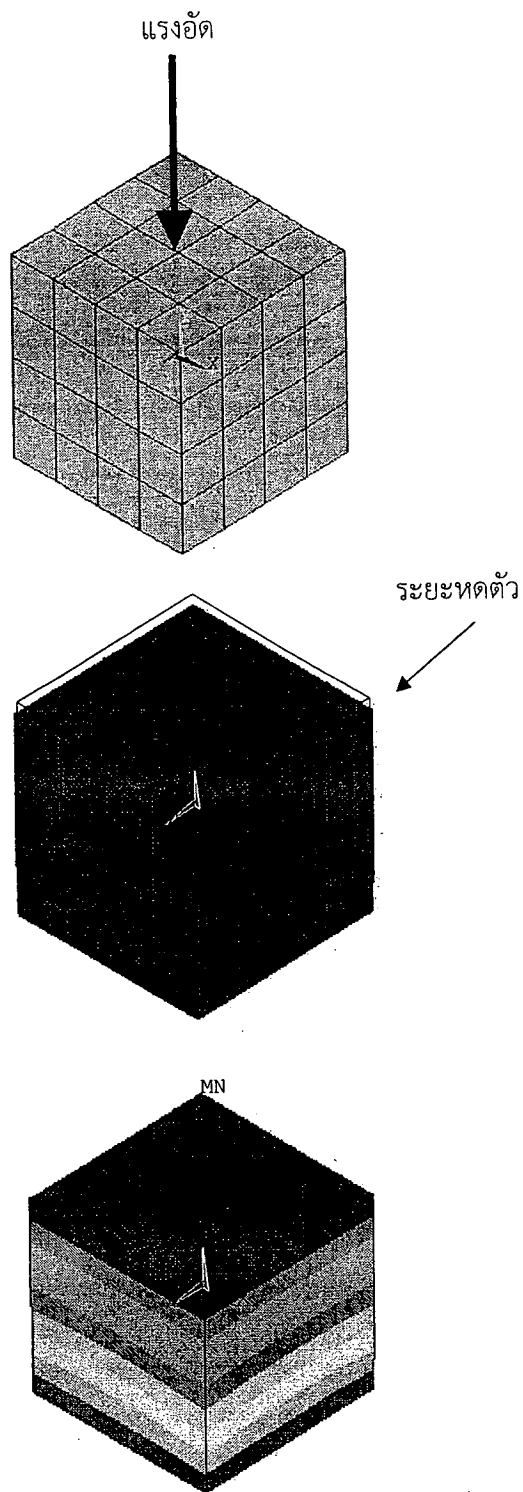
3.4 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงลูกบาศก์

ส่วนหนึ่งของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ ข้อมูลการทดสอบคอนกรีตลูกบาศก์ ในห้องปฏิบัติการถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยทำการสร้างแบบจำลองคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 4x4 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8 ข้อมูลวัสดุคอนกรีต ( $f'_c$ ) ที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ ได้มาจากข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่า  $f_r$  คำนวณจากสมการที่ 3.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคำนวณได้จากสมการ ACI 318 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดคอนกรีต คำนวณจากสมการของ Desayi & Krishnan [9] และค่า  $\nu, \beta_1$  แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

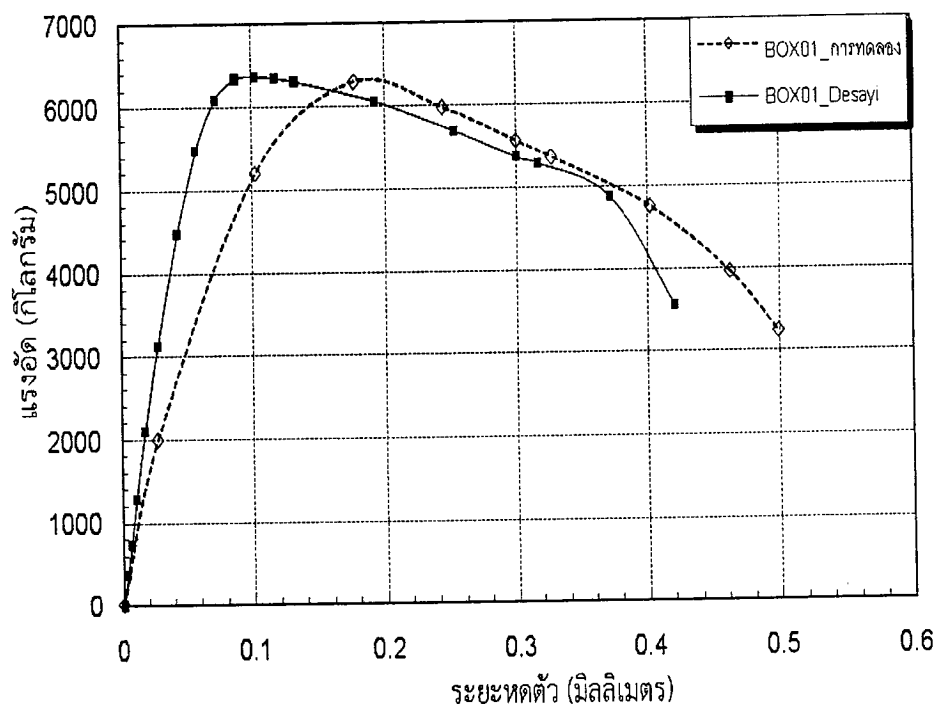
ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงลูกบาศก์

| ความเค้น&ความเครียด<br>คอนกรีต | $f'_c$<br>ksc. | $E_c$<br>ksc. | $f_r$<br>ksc. | $\nu$ | $\beta_1$ |        |
|--------------------------------|----------------|---------------|---------------|-------|-----------|--------|
|                                |                |               |               |       | ราบเรียบ  | รุนแรง |
| Desayi&Krishnan                | 300            | 259,237.1     | 34            | 0.2   | 0.3       | 0.9    |

จากรูปที่ 3.9 พบว่าผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่ใช้ข้อมูลจากสมการของ Desayi & Krishnan [9] ทำนายค่าแรงอัดสูงสุดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองดีมาก แต่ให้ค่าระยะหดตัวของทรงลูกบาศก์แตกต่างจากผลการทดสอบพอสมควร ทั้งนี้เป็นเพราะค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตที่คำนวณจากสมการให้ค่าแตกต่างจากผลการทดสอบแบบจำลองทำนายแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ได้ดีทั้งในช่วงพิกัดยืดหยุ่นและเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวไปแล้ว ดังนั้นจึงสรุปว่าแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4x4 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตรมีความถูกต้องแม่นยำสูงสามารถนำไปพัฒนาใช้กับตัวอย่างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ต่อไป



รูปที่ 3.8 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ (BOX1)



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบแรงอัดและระยะหดตัวของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (BOX1)