

แบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น มีความยุ่งยากมากกว่ากรณีโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นเนื่องจากค่าสติฟเนสที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นส่วนนั่นเอง โดยเฉพาะการวิเคราะห์ภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งต้องมีการลดลงของค่าสติฟเนสและกำลังต้านทานของหน้าตัดเนื่องมาจากผลของแรงกระทำที่มีลักษณะกลับไปมานั่นเอง ดังนั้นในการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงจำเป็นต้องมีการจำลองลักษณะต่างๆ ของชิ้นส่วนภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรและสามารถอธิบายพฤติกรรมของชิ้นส่วนเมื่ออยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ในการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถอธิบายพฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นทั้งการวิเคราะห์แบบสถิตและการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้ดี โดยมีการจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนดังจะได้อธิบายต่อไป

ในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งพิจารณาในรูปของความสัมพันธ์โมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด และกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 การวิเคราะห์โมเมนต์คัตและความโค้งของหน้าตัดชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Force-deformation relationship) ของชิ้นส่วนมีความจำเป็นต่อการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำนั่นเอง ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้ค่าสติฟเนสของชิ้นส่วนและสร้างเป็นสมการรูปเมตริกซ์ของสติฟเนสของทั้งโครงสร้างได้ โดยเฉพาะพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่นที่ค่าสติฟเนสจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อชิ้นส่วนเกิดความเสียหาย ในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่าความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในรูปความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับความโค้ง (Moment-curvature relationship) ของหน้าตัด โดยในการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าว ใช้วิธีแบ่งหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ และใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีต และเหล็กเสริมในการคำนวณ ซึ่งจะได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณต่อไป แต่จากการศึกษาโปรแกรมพบว่าความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ใช้มีลักษณะที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ในกรณีของเสาเนื่องจากแบบจำลองที่ใช้เป็นของ Kent และ Park(1971) ซึ่งไม่คำนึงถึงผลของแรงอัดตามแนวแกน และการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กปลอก แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวเหมาะที่ใช่กับการคำนวณหาค่าโมเมนต์และความโค้งของคาน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้โมเมนต์และความโค้งที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม IDARC เฉพาะของหน้าตัดคานและผนังรับแรงเฉือน ส่วนหน้าตัดเสาเนื่องจากมีผลของเหล็กปลอกจึงแบ่งหน้าตัดเป็นสองส่วน ได้แก่ส่วนที่อยู่ภายนอกเหล็กปลอก ซึ่งเหล็กปลอกไม่มีผลต่อลักษณะของความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต ในส่วนนี้ใช้แบบ

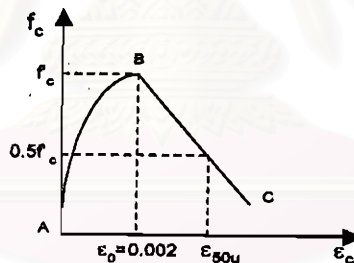
จำลองของ Kent และ Park (1971) และส่วนของหน้าตัดคอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก ซึ่งได้มีผู้นำเสนอหลายงานวิจัย แต่ที่นำมาใช้เป็นของ Sheikh และ Yeh (1992) เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ค่อนข้างล่าสุดและครอบคลุมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังมีผลการทดลองเปรียบเทียบที่ค่อนข้างชัดเจนและมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์กับความโค้งของเสาใช้การคำนวณลักษณะเดียวกับโปรแกรม IDARC คือแบ่งหน้าตัดคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนย่อย สมมติค่าความเครียดที่ผิวนอกสุดของคอนกรีต กำหนดแกนสะเทิน (Neutral axis) แล้วคำนวณค่าความเครียดที่ชิ้นส่วนย่อยต่างๆ หากความเค้นที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนย่อยของคอนกรีตและที่เกิดขึ้นที่เหล็กเสริมโดยใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมตามลำดับ คำนวณหาแรงตามแนวแกนแล้วเปรียบเทียบกับค่าแรงตามแนวแกนที่กำหนด ถ้าแตกต่างกันในระดับที่ยอมรับได้ ก็คำนวณหาค่าโมเมนต์ ถ้ามีค่าแตกต่างกันมากก็สมมติค่าแกนสะเทินแล้วคำนวณใหม่

3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต

หน้าตัดคอนกรีตถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1.1.1 คอนกรีตที่อยู่ภายนอกเหล็กปลอก (Unconfined concrete) ใช้แบบจำลองของ Park (1971)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีผลของเหล็กปลอก

ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่

ช่วง AB

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

(3.1)

ช่วง BC

$$\varepsilon_c > \varepsilon_0$$

$$f_c = f_c' - Z_1(\varepsilon_c - \varepsilon_0)$$

เมื่อ $\varepsilon_c < 0.004$

(3.2ก)

$$f_c = 0$$

เมื่อ $\varepsilon_c \geq 0.004$

(3.2ข)

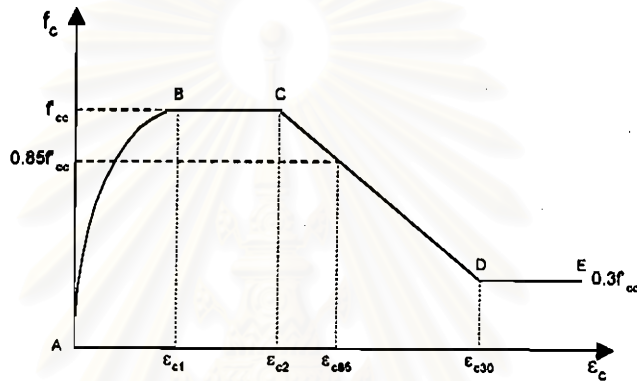
โดยที่

ϵ_0 เป็นความเครียดของคอนกรีตที่กำลังอัดสูงสุดมีค่า 0.002

$$Z_1 = \frac{f'_c - 0.5f'_c}{\epsilon_{50u} - 0.002} \quad (3.3ก)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002f'_c}{f'_c - 1000} \quad (3.3ข)$$

3.1.1.2 คอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก (Confined concrete) ใช้แบบจำลองของ Sheikh และ Yeh (1992)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีตที่คิดผลของเหล็กปลอก

ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดแบ่งเป็น 4 ช่วง ได้แก่

ช่วง AB $\epsilon_c \leq \epsilon_{c1}$

$$f_c = f'_{cc} \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

ช่วง BC $\epsilon_{c1} < \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$

$$f_c = f'_{cc} \quad (3.5)$$

ช่วง CD $\epsilon_{c2} < \epsilon_c \leq \epsilon_{c30}$

$$f_c = f'_{cc} [1 - Z_2(\epsilon_c - \epsilon_{c2})] \quad (3.6)$$

ช่วง DE $\epsilon_c > \epsilon_{c30}$

$$f_c = 0.3f'_{cc} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$f'_{cs} = K_s \eta f'_c \quad (3.8)$$

$$\epsilon_{c1} = 0.55 K_s f'_c (10^{-6}) \quad \text{สำหรับ คอนกรีตที่มีกำลังอัดใกล้เคียง 4000 ปอนด์/นิ้ว}^2 \quad (3.9ก)$$

$$= 0.0022 K_s \quad \text{สำหรับ คอนกรีตทั่วไป} \quad (3.9ข)$$

$$\frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_{c0}} = 1 + \left\{ \frac{0.81}{C} \left[1 - s \left(\frac{s}{B} \right)^2 \right] + 0.25 \sqrt{\frac{B}{C}} \right\} \frac{\rho_s f'_s}{\sqrt{f'_c}} \quad (3.10)$$

$$\epsilon_{c85} = 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}} + \epsilon_{c2} \quad (3.11)$$

$$Z_2 = \frac{1.0}{1.5 \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}}} \quad (3.12)$$

$$K_s = 1.0 + \frac{B^2}{10.58 P_{occ}} \left[\left(1 - \frac{nC^2}{5.5B^2} \right) \left(1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f'_s} \quad (3.13)$$

$$\eta = 1 - 0.575 \frac{P - P_b}{f'_c A_g} \leq 1.0 \quad (3.14)$$

$$P_{occ} = \eta f'_c (A_{cv} - A_s) \quad \text{กิโลปอนด์/นิ้ว}^2 \quad (3.15)$$

$$\epsilon_{c0} = 0.0022$$

f'_c เป็นกำลังอัดของคอนกรีต (ปอนด์/นิ้ว²)

A_{cv} เป็นพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริมตามขวาง

A_s เป็นพื้นที่ของเหล็กเสริมตามยาว

B เป็นระยะที่วัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริมตามขวาง

C เป็นระยะที่วัดระหว่างเหล็กเสริม

f'_s เป็นหน่วยแรงที่เกิดในเหล็กปลอก ใช้ค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก (ปอนด์/นิ้ว²)

s เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (นิ้ว)

ρ_s เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางกับปริมาตรของแกนคอนกรีต

n เป็นจำนวนเหล็กเสริมตามยาว

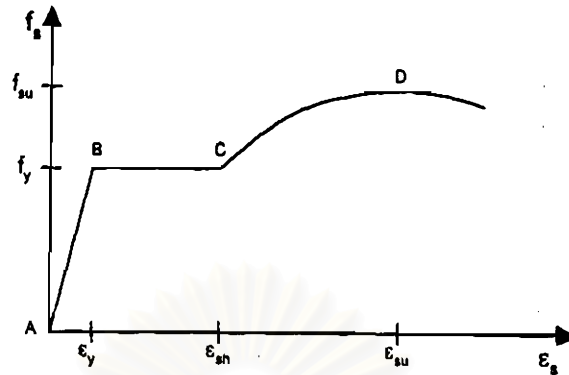
P เป็นแรงกระทำตามแนวแกน

P_b เป็นแรงตามแนวแกนที่กระทำต่อเสาเมื่อความเครียดที่ผิวบนของคอนกรีตมีค่า 0.003 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าเท่ากับความเครียดที่จุดคราก (Balance load from ACI code procedure)

A_g เป็นพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต

c เป็นระยะของแกนสะเทินวัดจากผิวนอกสุดของคอนกรีตรับแรงอัด

3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว : Park และ Paulay (1975)



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับเหล็กเสริมตามยาว

แบ่งเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 3.3

ช่วง AB $\epsilon_s \leq \epsilon_y$

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (3.16)$$

ช่วง BC $\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$

$$f_s = f_y \quad (3.17)$$

ช่วง CD $\epsilon_{sh} < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$

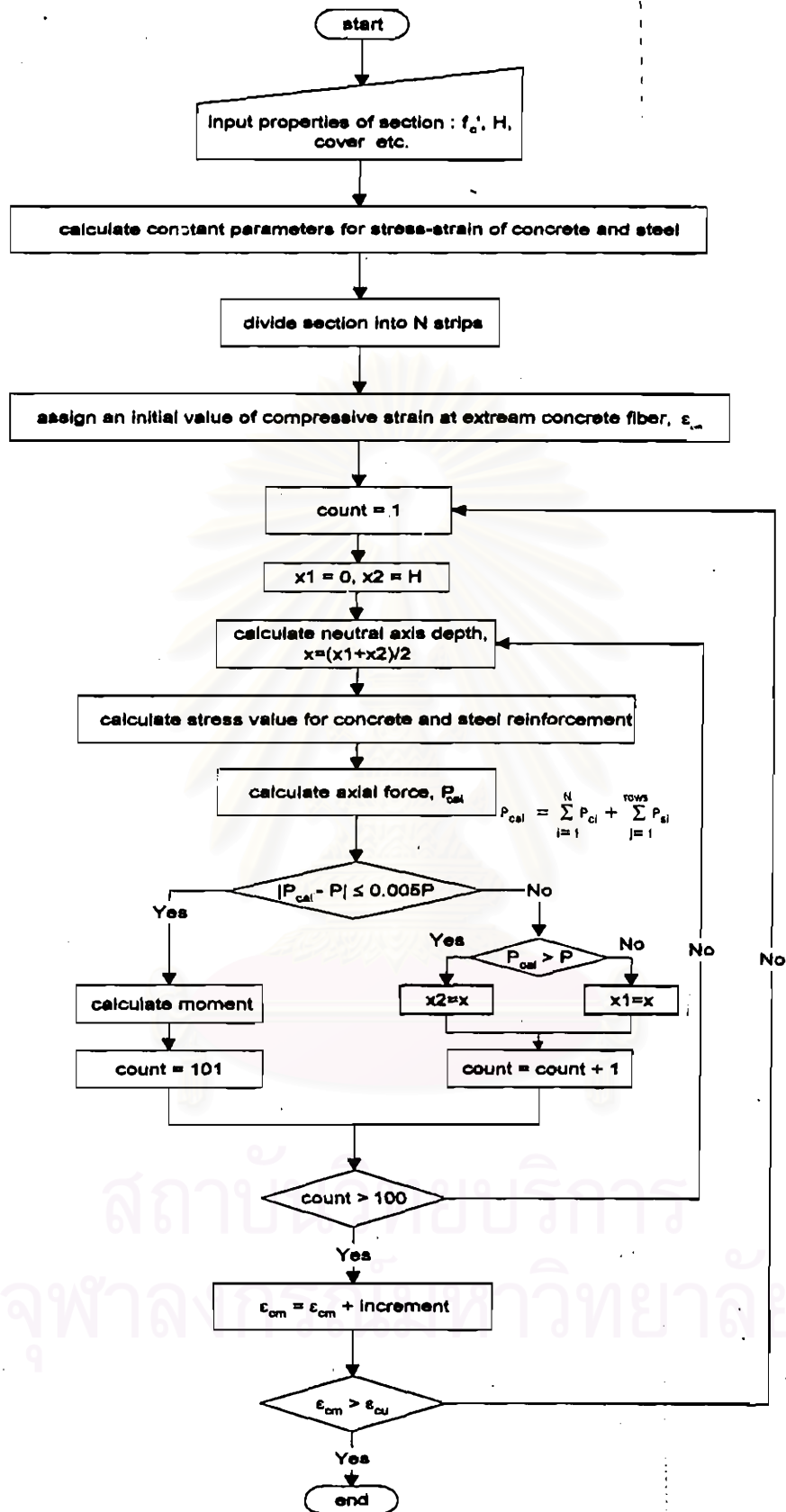
$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (3.18)$$

โดยที่

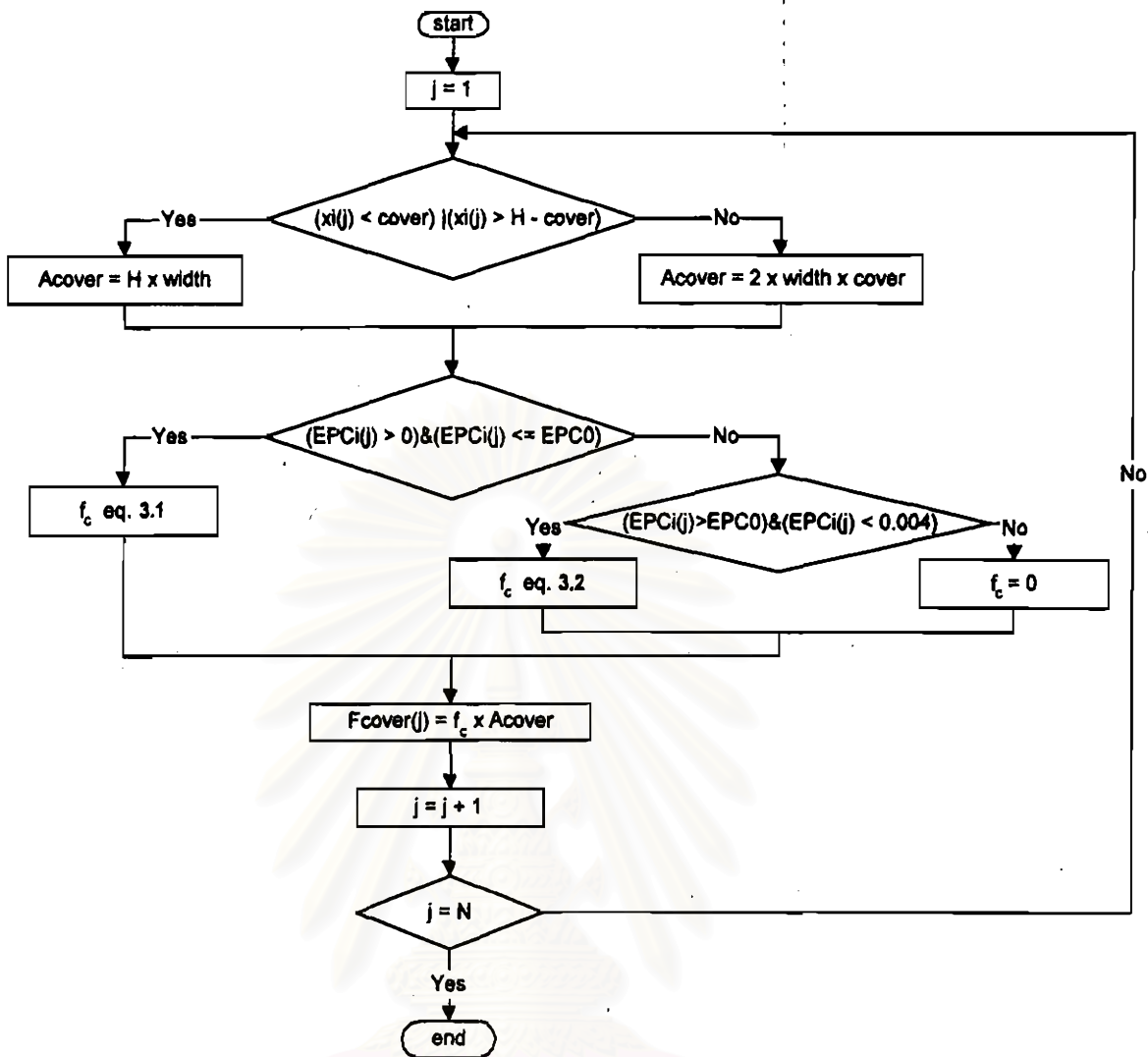
$$m = \frac{(f_{su} / f_y)(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (3.19ก)$$

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh} \quad (3.19ข)$$

สำหรับขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.8 โดยรูปที่ 3.4 เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ทั้งหมด และรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.8 เป็นการคำนวณค่าแรงที่เกิดขึ้นที่คอนกรีตและเหล็กเสริมตามยาว ตามลำดับ

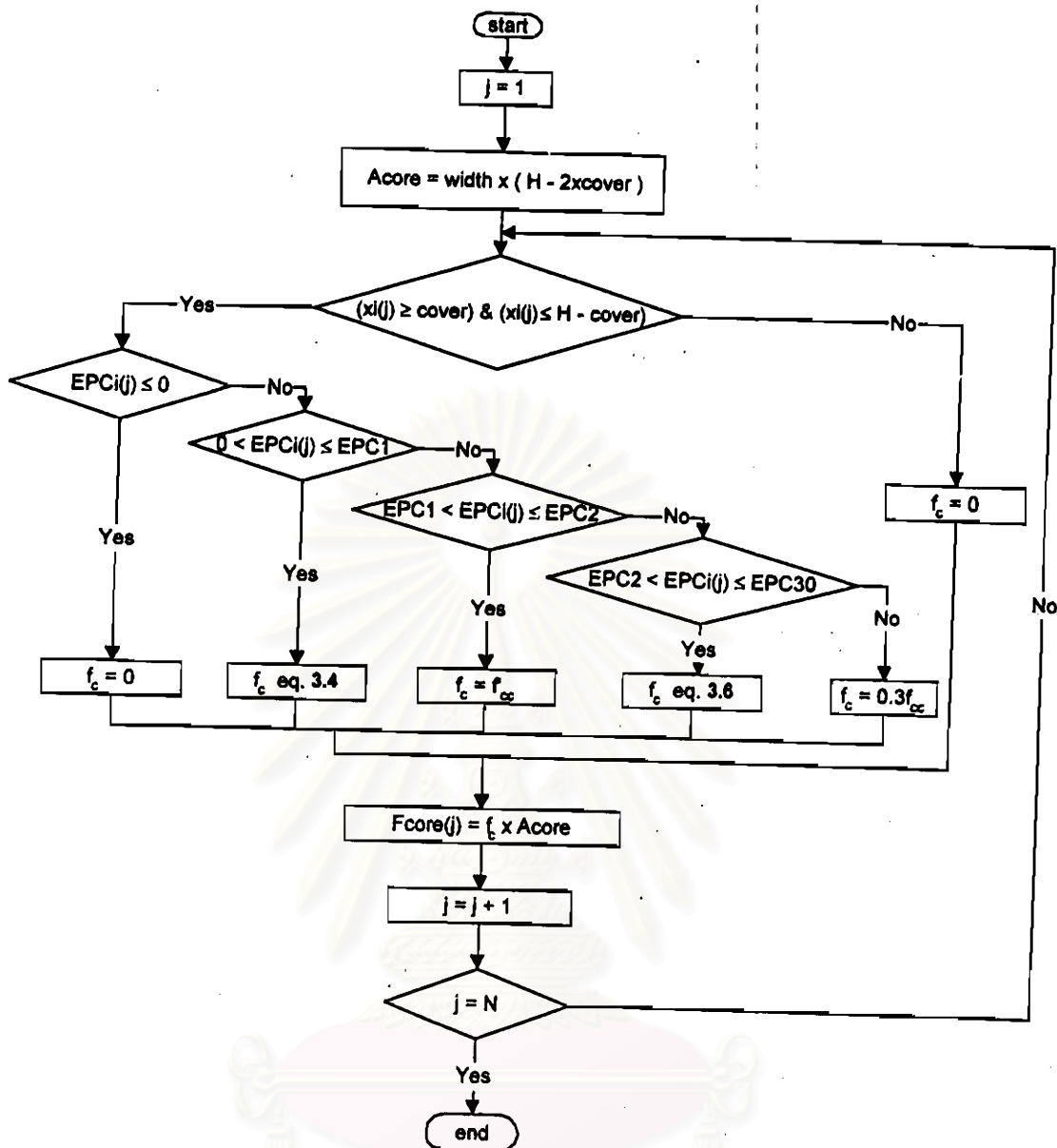


รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าโมเมนต์และความโค้ง



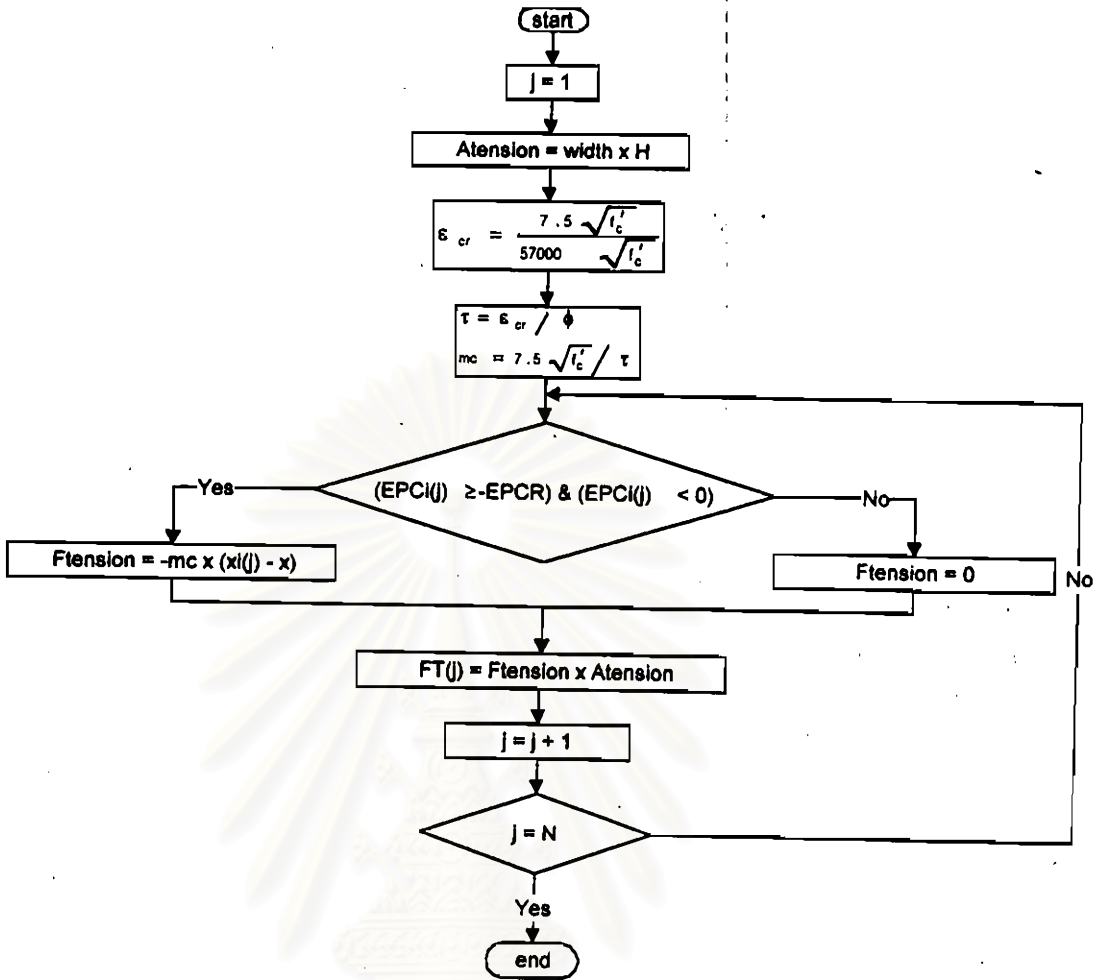
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่ภายนอกเหล็กปลอก (Unconfined concrete)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



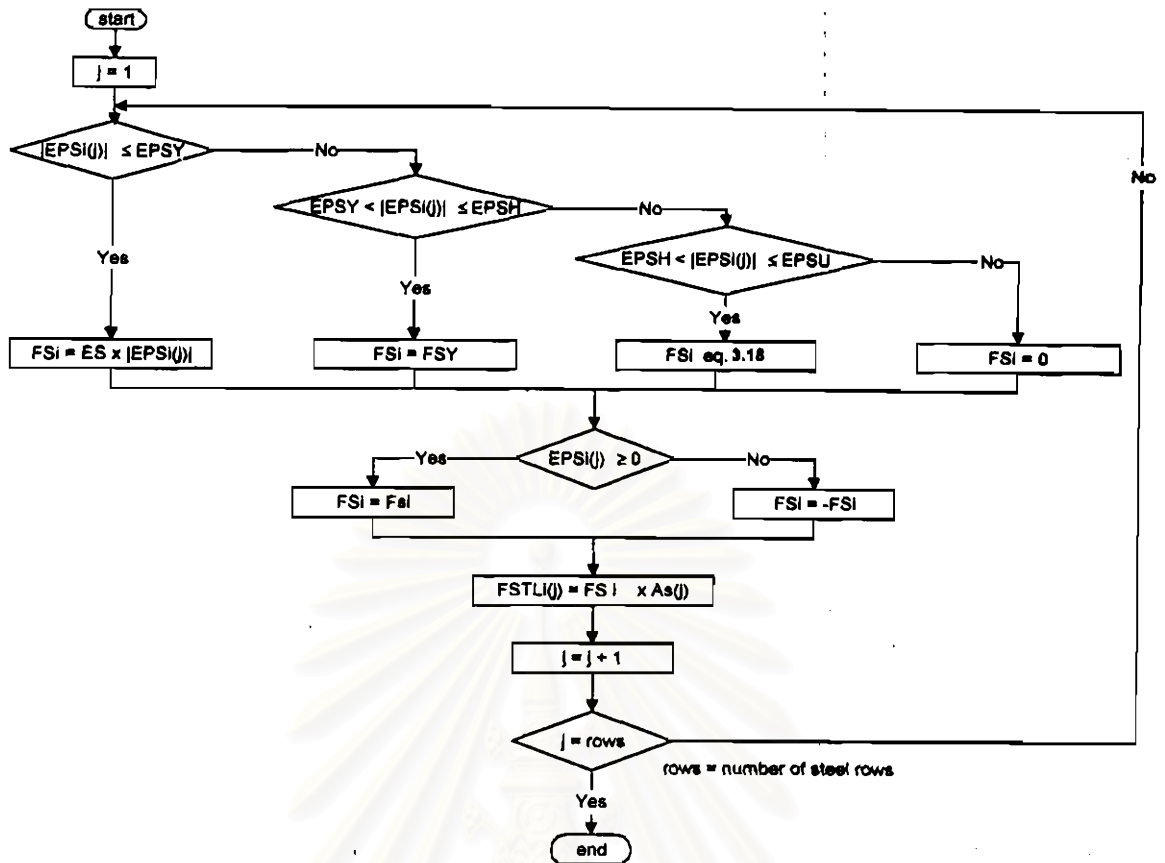
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก (Confined concrete)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงดึงในคอนกรีต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงในเหล็กเสริมตามยาว

สำหรับเงื่อนไขการวิบัติ ซึ่งเป็นจุดยุติการคำนวณกำหนดดังนี้

1. เมื่อความเครียดของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าความเครียดวิบัติของเหล็ก ($\epsilon_s > \epsilon_{su}$)
2. เมื่อความเครียดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าความเครียดของคอนกรีตที่ทำให้เกิดการกระจายตัวด้านข้างเนื่องจากแรงอัดจนทำให้เหล็กเสริมตามขวางขาด ($\epsilon_c > \epsilon_{cu}$)

โดยที่

$$\epsilon_{cu} = \text{ความเครียดตามแนวแกนที่ทำให้เหล็กเสริมตามขวางขาดมีค่า} = 0.004 + \frac{1.4 \times \rho_s \times \epsilon_{su} \times f'_s}{f'_c}$$

3.2 แบบจำลองโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น

แบบจำลองโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่นนี้ ได้มีผู้เสนอมามากแล้วหลายงานวิจัย แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องศึกษาแบบจำลองต่างๆ ของโปรแกรม สำหรับโปรแกรม IDARC นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Park และคณะ (1987) และต่อมา Kunnath และคณะ (1992) ได้ปรับปรุงให้ดีขึ้น สำหรับ IDARC2D version 4.0 (A computer program for the inelastic damage analysis of buildings) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาโดย Valles และคณะ (1996) ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น และจากงานวิจัยในอดีตพบว่าโปรแกรมดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

สำหรับสมมติฐานของโปรแกรมนี้นี้ กำหนดให้พื้นของอาคารเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid floor diaphragms) มีดีกรีของควมอิสระต่อชั้น (Degree of freedom per floor) เท่ากับ 1 และในการวิเคราะห์ได้จำลองโครงสร้างให้เป็นโครงข้อแข็ง 2 มิติ (Plane frame) ไม่คิดผลจากการบิด (Torsion) และการวิบัติเนื่องจากการเฉือน (Shear failure) ของโครงสร้าง

3.2.1 การจำลองเสา, คาน และผนัง และการสร้างสมการรูปเมตริกซ์ของสตีเฟนส

ชั้นส่วนของคานอาคารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ชั้นส่วนเสา, คาน และผนังรับแรงเฉือน ซึ่งได้แสดงดีกรีของควมอิสระของแต่ละชั้นส่วนดังรูปที่ 3.9(ก), 3.9(ข) และ 3.9(ค) สำหรับชั้นส่วนเสา, คาน และผนังรับแรงเฉือนตามลำดับ โดยที่เสาและผนังมีดีกรีของควมอิสระต่อชั้นส่วนต่อต้านเท่ากับ 3 ได้แก่ การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการเฉือน, การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากแรงตามแนวแกน และการหมุนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัด โดยคิดว่าการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชั้นส่วนเป็นอิสระจากการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนและการหมุนของชั้นส่วน และจำลองให้เป็นชั้นส่วนสปริงยืดหยุ่น (Linear spring element) สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนและการหมุนของชั้นส่วนให้มีความสัมพันธ์กันและจำลองให้เป็นชั้นส่วนแบบไม่ยืดหยุ่นด้วยแบบจำลองต่างๆ ดังจะได้กล่าวต่อไป

สำหรับคานมีดีกรีของควมอิสระต่อชั้นส่วนต่อต้านเท่ากับ 2 คือคิดเฉพาะการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการเฉือน และการหมุนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัดเท่านั้น การสร้างสมการรูปเมตริกซ์ของสตีเฟนส สำหรับการดัดและการเฉือนแสดงได้ดังนี้

มุมหมุนและโมเมนต์ ที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง แสดงในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

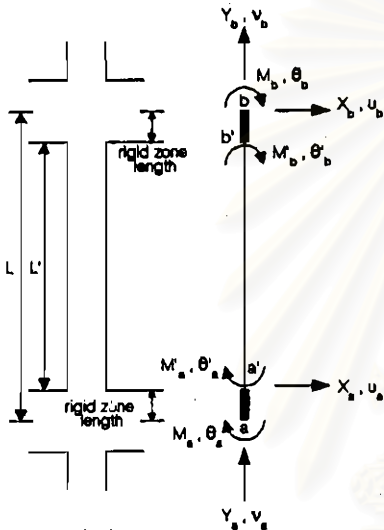
$$\begin{Bmatrix} M'_a \\ M'_b \end{Bmatrix} = [K'] \begin{Bmatrix} \theta'_a \\ \theta'_b \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

โดยที่

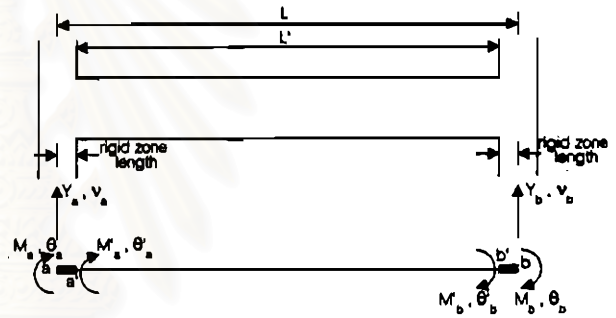
M'_a และ M'_b เป็นโมเมนต์ที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง

θ'_a และ θ'_b เป็นมุมหมุนที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง

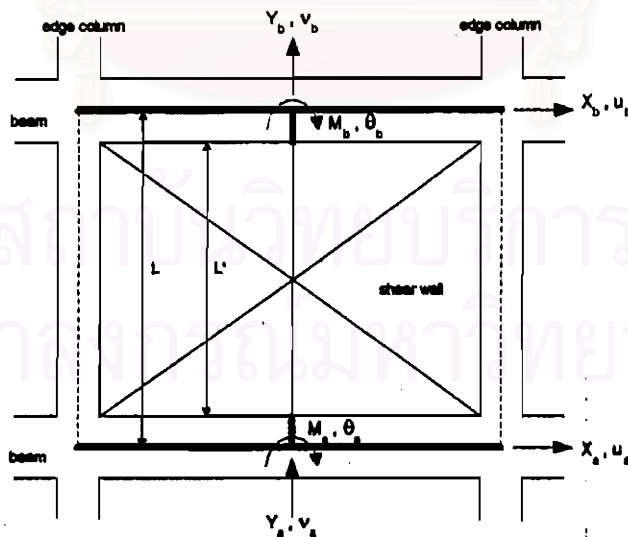
$[K']$ เป็นเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนโครงสร้างคิดที่ผิวหน้าของชิ้นส่วน ซึ่งรวมผลของการเฉือนและการดัดโดยให้แบบจำลองของการกระจายพลาสติก ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป



รูปที่ 3.9(ก) ดักรีของควมอิสระสำหรับเสา



รูปที่ 3.9(ข) ดักรีของควมอิสระสำหรับคาน



รูปที่ 3.9(ค) ดักรีของควมอิสระสำหรับผนัง

$$[K'] = \begin{bmatrix} k_{uu} & k_{uh} \\ k_{hu} & k_{hh} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$k_{au} = \frac{12EI_0EI_aEI_b}{D_{ei}L} (f'_{hb}GA_zL^2 + 12EI_0EI_aEI_b) \quad (3.22ก)$$

$$k_{ah} = k_{hu} = \frac{-12EI_0EI_aEI_b}{D_{ei}L} (f'_{uh}GA_zL^2 + 12EI_0EI_aEI_b) \quad (3.22ข)$$

$$k_{hh} = \frac{12EI_0EI_aEI_b}{D_{ei}L} (f'_{uu}GA_zL^2 + 12EI_0EI_aEI_b) \quad (3.22ค)$$

$$D_{ei} = GA_zL^2 (f'_{au}f'_{hb} - f'_{uh}{}^2) + 12EI_0EI_aEI_b (f'_{uu} + f'_{hh} - 2f'_{uh}) \quad (3.22ง)$$

EI_0 เป็นสติฟเนสของการหมุนช่วงยืดหยุ่น (Elastic rotational stiffness)

EI_a เป็นสติฟเนสสัมผัสของการหมุน (Tangent rotational stiffness) ที่ปลาย a

EI_b เป็นสติฟเนสสัมผัสของการหมุน (Tangent rotational stiffness) ที่ปลาย b

GA_z เป็นสติฟเนสของการเฉือน (Shear stiffness)

L. เป็นความยาวของชิ้นส่วน

เมื่อคิดผลของส่วนแข็งเกร็ง (Rigid length zone) ของชิ้นส่วนจะได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} M_u \\ M_b \end{Bmatrix} = [K_s] \begin{Bmatrix} \theta_u \\ \theta_b \end{Bmatrix} \quad (3.23)$$

โดยที่

$[K_s]$ เป็นรูปเมตริกซ์ของสติฟเนสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุนและโมเมนต์ที่ตำแหน่งปลายของชิ้นส่วน

$$[K_s] = [\tilde{L}][K'][\tilde{L}]^T \quad (3.24)$$

$$[\tilde{L}] = \frac{1}{1 - \lambda_u - \lambda_b} \begin{bmatrix} 1 - \lambda_b & \lambda_u \\ \lambda_b & 1 - \lambda_u \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

M_u และ M_b เป็นโมเมนต์ที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้าง

θ_u และ θ_b เป็นมุมหมุนที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้าง

λ_u และ λ_b เป็นอัตราส่วนของส่วนแข็งเกร็งต่อความยาวของชิ้นส่วน แสดงดังรูปที่ 3.12

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคัตและแรงเฉือนกับการเปลี่ยนตำแหน่ง ของชิ้นส่วนแสดงได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} X_a \\ M_a \\ X_b \\ M_b \end{Bmatrix} = [K_e] \begin{Bmatrix} u_a \\ \theta_a \\ u_b \\ \theta_b \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

โดยที่

$[K_e]$ เป็นรูปเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งและแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วน

$$[K_e] = [R_e][K_s][R_e]^T \quad (3.27)$$

X_a และ u_a เป็นแรงเฉือนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย a

X_b และ u_b เป็นแรงเฉือนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย b

สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วน สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} Y_a \\ Y_b \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_a \\ V_b \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

โดยที่

Y_a และ V_a เป็นแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย a

Y_b และ V_b เป็นแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย b

$\frac{EA}{L}$ เป็นสติฟเนสตามแนวแกนของชิ้นส่วน

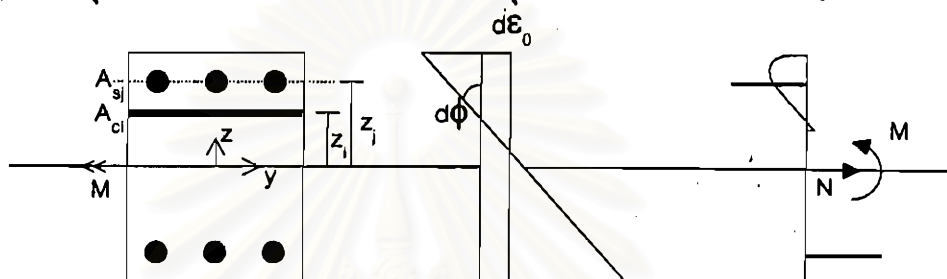
ค่าของเมตริกซ์ของสติฟเนส, $[K']$ มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ยืดหยุ่น โดยค่าของสติฟเนสจะแปรเปลี่ยนตามแบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model) และ แบบจำลองฮิสเทอเรติก (Hysteretic model) ของชิ้นส่วนในโครงสร้าง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวพิจารณาตามคุณสมบัติของหน้าตัดของชิ้นส่วน ได้แก่ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และความโค้ง เป็นต้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถกำหนดได้ 2 วิธี ได้แก่

1. กำหนดค่าโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด
2. กำหนดค่าคุณสมบัติของหน้าตัด ได้แก่ ขนาด, ปริมาณเหล็กเสริม เป็นต้น เพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าโมเมนต์และความโค้ง (Fiber model (Kunnath และคณะ (1992)))

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับความโค้งในหน้าตัดคานและผนัง ใช้ค่าที่ได้จากโปรแกรม IDARC จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าคุณสมบัติของหน้าตัด ตามข้อ 2 ให้กับโปรแกรม สำหรับเสาคานคำนวณโมเมนต์กับความโค้ง แล้วจึงกำหนดเป็นค่าโมเมนต์และความโค้งเข้าไปในโปรแกรมเลย ตามข้อ 1 นั้นเอง

3.2.2 การคำนวณค่าความสัมพันธ์โมเมนต์และความโค้ง (Moment–curvature relationship) ของหน้าตัด จากโปรแกรม IDARC

การคำนวณค่าความสัมพันธ์ของโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดที่ใช้ในโปรแกรม IDARC2D version 4.0 นี้อาศัยวิธีของ Kunnath และคณะ (1992) ในลักษณะเดียวกับการคำนวณโมเมนต์และความโค้งดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น คือโดยการแบ่งหน้าตัดออกเป็นส่วนเล็กๆ ดังแสดงดังรูปที่ 3.10 และเพิ่มค่าความโค้งให้กับหน้าตัด แล้วพิจารณาความสอดคล้องของความเครียด (Strain compatibility) จะได้ค่าความเครียดที่ทุกๆ ส่วนย่อยนั้น แล้วจึงคำนวณค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนย่อยจากความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด (Stress–strain relationship) ของวัสดุ ซึ่งได้แก่คอนกรีตและเหล็ก พิจารณาสมดุลของหน้าตัด แล้วหาค่าโมเมนต์

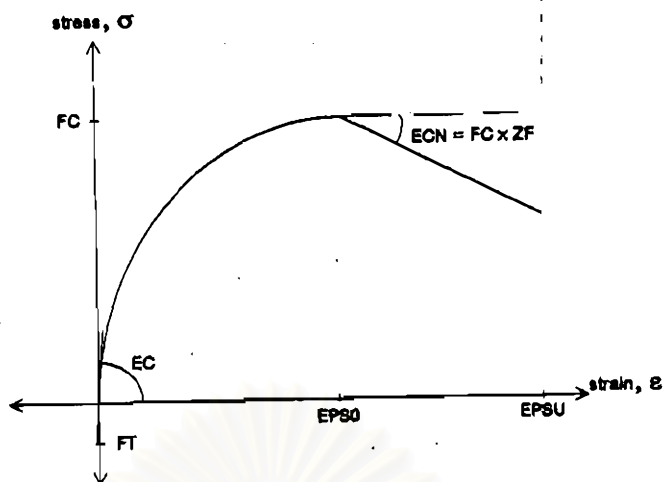


รูปที่ 3.10 หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับการวิเคราะห์หาโมเมนต์และความโค้งโดยวิธีแบ่งเป็นส่วนย่อย (Fiber model)

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง

1. หน้าตัดของชิ้นส่วนภายหลังการรับแรงดัดยังคงเป็นเส้นตรง (Plane sections remain plain after bending)
2. ไม่คิดกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ภายหลังเกิดรอยร้าว
3. เหล็กเสริมและคอนกรีตยึดเกาะกันดี
4. ไม่คิดความแตกต่างระหว่างคอนกรีตที่อยู่ภายในและภายนอกเหล็กปลอกเนื่องจากผลของการรัดรอบ (Confinement) ของเหล็กปลอก
5. แรงอัดตามแนวแกนคงที่ ในกรณีเสา และไม่คิดแรงในแนวแกน กรณีคาน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีตโดยไม่คำนึงผลของเหล็กปลอก

สำหรับเสาซึ่งมีแรงตามแนวแกน เมื่อคิดผลของเหล็กปลอก จาก Park และ Paulay (1975) และ Richart และคณะ (1928) กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$f'_{cc} = f'_c + 2.05 \rho_s f_y \quad (3.29)$$

โดยที่

f'_c, f_y เป็นกำลังอัดของคอนกรีตและกำลังครากของเหล็กเสริมตามขวาง ตามลำดับ

f'_{cc} เป็นกำลังอัดของคอนกรีตคิดผลของเหล็กปลอก

ρ_s เป็นอัตราส่วนปริมาณเหล็กปลอกกับคอนกรีตภายในเหล็กปลอก

นอกจากนั้นเหล็กปลอกยังมีส่วนในการเพิ่มความเหนียวด้วยดังสมการของ Kent และ Park (1971) ดังนี้

$$ZF = \frac{0.5}{\epsilon_{s0u} + \epsilon_{s0h} - \epsilon_0} \quad (3.30)$$

โดยที่

$$\epsilon_{s0u} = \frac{3 + \epsilon_0 f'_c}{f'_c - 1000}$$

$$\epsilon_{s0h} = 0.75 \rho_s \sqrt{\frac{b}{s_h}}$$

ϵ_0 เป็นความเครียดที่ก้ำกึ่งอัดสูงสุดของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 0.002

b เป็นความกว้างของคอนกรีตภายในเหล็กปลอก

s_h เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

3.2.3 แบบจำลองการกระจายพฤติกรรมแบบพลาสติกขององค์อาคาร (Spread plasticity model)

เมื่อชิ้นส่วนของอาคารเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic deformation) รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อ จะมีมากขึ้นและแพร่เข้าสู่ภายในของชิ้นส่วน อันเนื่องมาจากการกระจายความโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.12 ทำให้น้ำตักมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ค่าสถิติเอนตและกำลังต้านทานของชิ้นส่วนลดลงขึ้นกับระดับความเสียหายที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งแสดงแบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model)

โมเมนต์และมุมหมุนที่ปลายชิ้นส่วนมีความสัมพันธ์กัน แสดงได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} \\ f_{ba} & f_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_a \\ M_b \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

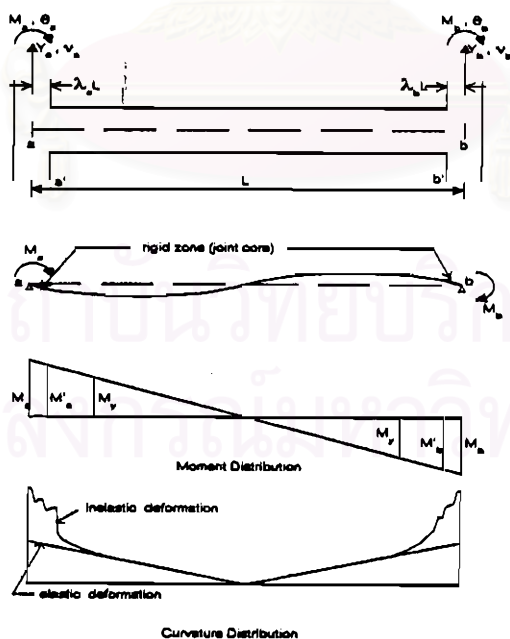
โดยที่

f_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์เฟล็กซิบิลิตีของชิ้นส่วน มีค่า

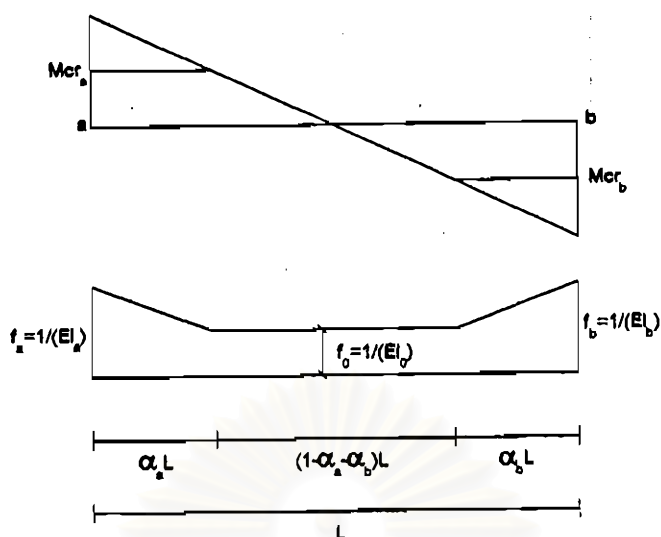
$$f_{ij} = \int_0^L \frac{m_i(x)m_j(x)}{EI(x)} dx + \int_0^L \frac{V_i(x)V_j(x)}{GA_x} dx \quad (3.32)$$

$m_i(x)$ และ $m_j(x)$ เป็นโมเมนต์หนึ่งหน่วยที่กระทำที่ปลาย i และ ปลาย j ตามลำดับ

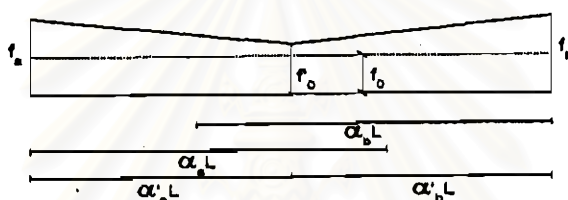
$V_i(x)$ และ $V_j(x)$ เป็นแรงเฉือนหนึ่งหน่วยที่กระทำที่ปลาย i และ ปลาย j ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 การกระจายความโค้งของชิ้นส่วน (Curvature distribution)



รูปที่ 3.13 แบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model)



รูปที่ 3.14 ความยาวระยะคราก (Yield penetration length) ของชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่นตลอดชิ้นส่วน

เมื่อคิดว่าโครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นและการกระจายเฟลกซิบิลิตีของชิ้นส่วนเป็นดังรูปที่ 3.13 สามารถเขียนสัมประสิทธิ์เฟลกซิบิลิตีได้เป็น

$$f_{aa} = \frac{L}{12} \left[\frac{4}{EI_a} + \left[\frac{1}{EI_a} - \frac{1}{EI_0} \right] (6\alpha_a - 4\alpha_a^2 + \alpha_a^3) + \left[\frac{1}{EI_b} - \frac{1}{EI_0} \right] \alpha_b^3 \right] + \frac{1}{GA_s L} \quad (3.33ก)$$

$$f_{ab} = \frac{L}{12} \left[\frac{-2}{EI_0} - \left[\frac{1}{EI_a} - \frac{1}{EI_0} \right] (2\alpha_a^2 - \alpha_a^3) - \left[\frac{1}{EI_b} - \frac{1}{EI_0} \right] (2\alpha_b^2 - \alpha_b^3) \right] + \frac{1}{GA_s L} \quad (3.33ข)$$

$$f_{ba} = f_{ab} \quad (3.33ค)$$

$$f_{bb} = \frac{L}{12} \left[\frac{4}{EI_b} + \left[\frac{1}{EI_b} - \frac{1}{EI_0} \right] (6\alpha_b - 4\alpha_b^2 + \alpha_b^3) + \left[\frac{1}{EI_a} - \frac{1}{EI_0} \right] \alpha_a^3 \right] + \frac{1}{GA_s L} \quad (3.33ง)$$

สำหรับ IDARC2D version 4.0 นี้ได้มีการปรับปรุงสัมประสิทธิ์เฟลกซิบิลิตีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคำนวณมีความผิดพลาดเมื่อการคัดและการเชื่อมเข้าใกล้เงื่อนไขการวิบัติ สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$f_{uu} = \frac{L}{12 EI_0 EI_a EI_b} f'_{uu} + \frac{1}{GA_z L} \quad (3.34ก)$$

$$f_{uh} = f_{hu} = \frac{L}{12 EI_0 EI_a EI_b} f'_{uh} + \frac{1}{GA_z L} \quad (3.34ข)$$

$$f_{hh} = \frac{L}{12 EI_0 EI_a EI_b} f'_{hh} + \frac{1}{GA_z L} \quad (3.34ค)$$

โดยที่

$$f'_{uu} = 4 EI_a EI_b + (EI_0 - EI_a) EI_b (6\alpha_u - 4\alpha_u^2 + \alpha_u^3) + (EI_0 - EI_b) EI_a \alpha_b^3 \quad (3.35ก)$$

$$f'_{uh} = -2 EI_a EI_b - (EI_0 - EI_a) EI_b (2\alpha_u^2 - \alpha_u^3) - (EI_0 - EI_b) EI_a (2\alpha_b^2 - \alpha_b^3) \quad (3.35ข)$$

$$f'_{hh} = 4 EI_a EI_b + (EI_0 - EI_a) EI_b \alpha_u^3 + (EI_0 - EI_b) EI_a (6\alpha_b - 4\alpha_b^2 + \alpha_b^3) \quad (3.35ค)$$

จากเมทริกซ์เฟล็กริบิลิตีที่กล่าวมานี้ สามารถนำไปหาเมทริกซ์สติฟเนสได้

3.2.4 แบบจำลองการเกิดการคราก (Yield penetration model)

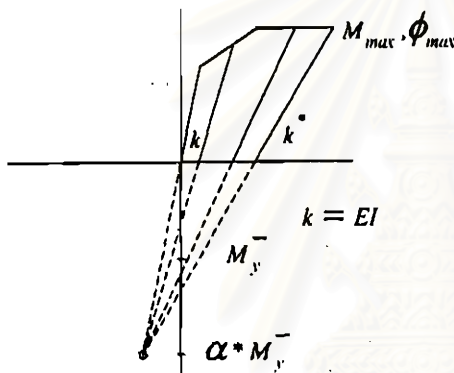
แบบจำลองการเกิดการคราก (Yield penetration model) เป็นแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความยาวของระยะการครากของชิ้นส่วนโครงสร้าง (Yield penetration coefficients, α_u และ α_b) และค่าสติฟเนสของการดัด (Flexural stiffness, EI_0) ที่ตำแหน่งกลางชิ้นส่วน ซึ่งเป็นค่าที่ต้องนำไปใช้ในแบบจำลองการกระจายพลาสติกิก (Spread plasticity model) ที่กล่าวมาข้างต้น ค่าของ α_u และ α_b เป็นค่าอัตราส่วนของความยาวของส่วนที่มีค่าโมเมนต์มากกว่าค่าโมเมนต์ที่ชิ้นส่วนสามารถต้านทานได้โดยที่คอนกรีตไม่แตกร้าวเนื่องจากแรงดิ่ง (Cracking moment) กับความยาวของชิ้นส่วนทั้งหมด ที่ปลาย a และปลาย b ตามลำดับ โดยค่า α_u และ α_b ที่คำนวณได้ใหม่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในครั้งก่อน การคำนวณแบ่งเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ชิ้นส่วนมีการกระจายโมเมนต์เป็นแบบความโค้งเดี่ยว (Single curvature, $M_a M_b \geq 0$) และแบบความโค้งคู่ (Double curvature, $M_a M_b < 0$)

3.2.5 พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่มีคดหย่น

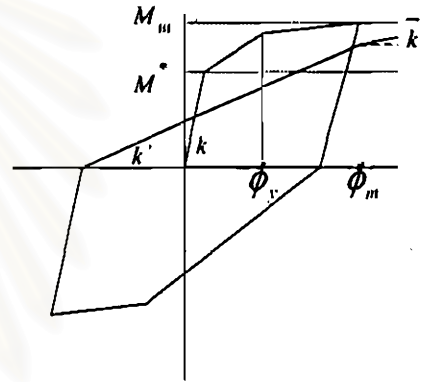
จากแบบจำลองการกระจายพลาสติกิกและแบบจำลองการเกิดการครากที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ว่าหลังจากที่โครงสร้างถูกแรงกระทำจนเกิดความเสียหายขึ้น ค่าสติฟเนสของโครงสร้างจะลดลง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร นอกจากสติฟเนสจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างถูกแรงกระทำเกินกำลังของหน้าตัดแล้ว

ยังมีผลเนื่องจากแรงที่กระทำแบบกลับไปมาอีกด้วย กล่าวคือจะทำให้ค่าสตีฟเนสมีค่าลดลง, ค่ากำลังต้านทานของหน้าตัดมีค่าลดลง และจากการเคลื่อนที่กลับไปมาทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะของการเปิดและปิดสลับกันกำลังของหน้าตัดจะมีค่าต่ำลง

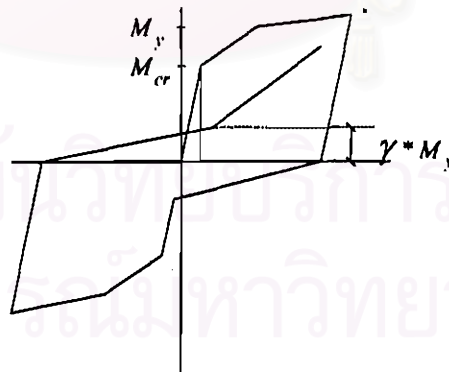
พฤติกรรมดังกล่าวข้างต้น คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ได้ทำเป็นแบบจำลองขึ้น เรียกว่าแบบจำลองฮีสเทอเรติก (Hysteretic model) ซึ่งใช้ตัวแปรที่ได้จากการทดลองในการอธิบายลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการลดของสตีฟเนส (Stiffness degrading parameter), ตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการเสื่อมลดของกำลัง (Strength deterioration parameters) ซึ่งประกอบด้วย การลดลงในแง่ของพลังงาน (Energy-based) และการลดลงในแง่ของความเหนียว (Ductility-based) และตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการเลื่อนหลุด (Slip) หรือการเปิดและปิด (Crack-closing) ที่รอยร้าวของหน้าตัด (Slip หรือ crack-closing parameter) ผลของตัวแปรดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.15



(น) แบบจำลองการลดของสตีฟเนส (Modeling of stiffness degradation)



(ข) แบบจำลองการเสื่อมลดของกำลัง (Modeling of strength deterioration)



(ค) แบบจำลองพฤติกรรมการณ์เลื่อนหลุด (Modeling of slip or pinching behavior)

รูปที่ 3.15 แบบจำลองพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น (Hysteretic model)

การลดของสตีฟเนส (Stiffness degradation) - การลดของสตีฟเนสให้ผลที่ชัดเจน สำหรับกรณีขึ้นส่วนมีความเหนียวมากเมื่อเทียบกับกรณีความเหนียวน้อย ในการจำลองพฤติกรรมดังกล่าวกำหนดให้จุดปลายของช่วงไม่มีแรงกระทำ (Unloading branch) ของขึ้นส่วนรวมที่จุดเดียวกัน ดังรูปที่ 3.15(น) สตีฟเนสที่ขณะเวลานั้น มีค่าเป็น

$$k' = \frac{(M_{max} - \alpha M_y)}{(\phi_{max} - \alpha M_y / k)} \quad (3.36)$$

โดยที่

M_{max} และ ϕ_{max} เป็นค่าโมเมนต์และค่าความโค้งที่จุดเริ่มต้นของช่วงไม่มีแรงกระทำ ตามลำดับ
 α เป็น ตัวแปรที่ควบคุมการลดของสติฟเนส (Stiffness degrading parameter)

M_y เป็นโมเมนต์ที่จุดคราก

k เป็นค่าความแข็งเกร็งเริ่มต้น (Initial flexural rigidity, EI) ของหน้าตัด

การเสื่อมลดของกำลัง (Strength deterioration) – การเสื่อมลดของกำลังในหนึ่งรอบของการเกิดพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น สามารถเขียนได้ในรูปของความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับความเหนียว (Ductility) และการสลายพลังงาน (Dissipated hysteretic energy) ดังสมการ

$$M' = M_m \left(1 - \beta_E \frac{\int dE}{M_y \phi_u} - \beta_d \mu_\phi \right) \quad (3.37)$$

โดยที่

M' เป็นกำลังที่เสื่อมลดเนื่องจากกำลังสูงสุดของรอบก่อน, M_m ที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างค่าเดียวกัน (Deformation)

β_E และ β_d เป็นตัวแปรแสดงอัตราการเสื่อมลดของกำลังในเทอมของการสลายพลังงานต่อรอบ

(Dissipated hysteretic energy per cycle, $E_T = \frac{\int dE}{M_y \phi_u}$) และ ความเหนียวในเทอมของความโค้ง (Curvature ductility, μ_ϕ) ตามลำดับ

หลังจากที่หน้าตัดเกิดการเสื่อมลดของกำลังแล้ว ค่าสติฟเนสหลังการครากของชิ้นส่วนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป กำหนดดังสมการ

$$\bar{k} = k' \frac{\eta}{\mu} \leq k' \quad (3.38)$$

โดยที่

\bar{k} และ k' เป็นสติฟเนสที่เกิดจากการลดลงของกำลัง และสติฟเนสในช่วงหลังการครากที่เป็นค่าเริ่มต้น (Initial post-yield stiffness)

η เป็น ตัวแปรควบคุมการลดลงของค่าสติฟเนส = 4 จากโปรแกรม IDARC version 4.0 ที่พัฒนาโดย Valles และคณะ (1996)

μ เป็นความเหนียวในเทอมความโค้ง (Curvature ductility)

พฤติกรรมการณ์เคลื่อนหลุด (Slip or crack-closing and pinching behavior) – เกิดเนื่องจากการเปิดและปิดของรอยร้าวในคอนกรีต และการลดลงของแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ของเหล็กเสริม จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้โมเมนต์มีค่าเปลี่ยนไปดังสมการ

$$M^* = \gamma M_y \quad (3.39)$$

โดยที่

γ เป็นตัวแปรควบคุมการเกิดการเคลื่อนหลุด

ผลของตัวแปรดังกล่าวโดยคร่าวๆ ได้แก่ หากค่าตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการลดลงของสติฟเนส (Stiffness degrading parameter, α) มีค่ามาก การลดลงของสติฟเนสจะน้อย, หากค่าตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการเสื่อมลดของกำลัง (Strength deterioration parameter, β) มีค่ามาก การลดลงของกำลังจะมาก และหากค่าตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดการเคลื่อนหลุดและการเปิด-ปิดรอยร้าวของหน้าตัด (Target slip หรือ crack-closing parameter, γ) มีค่ามาก การสลายพลังงานด้วยจุดหมุนพลาสติกจะมาก

3.2.6 วิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC2D v. 4.0

คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC2D version 4.0 นี้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ 4 วิธี ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้ ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบสถิต (Static Analysis)
2. การวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างแบบสถิตจนโครงสร้างพัง (Pushover หรือ collapse mode analysis)
3. การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic analysis) โดยให้แรงกระทำที่ฐาน
4. การวิเคราะห์โดยใช้แรงกระทำแบบสลับทิศกระทำแบบสถิตกับโครงสร้าง (Quasi-static analysis)

มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

1. การวิเคราะห์แบบสถิต (Static analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[K_e][\Delta u] = \{\Delta F\} \quad (3.40)$$

2. การวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างต้นแบบสถิตจนโครงสร้างพัง (Pushover หรือ collapse mode analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองและกำลังความต้านทานสูงสุดของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างหรือภายใต้การเคลื่อนที่ทางด้านข้าง โดยการคำนวณหาผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[K_r][\Delta u] = \{\Delta F\} - \{\Delta P_V\} - \{\Delta P_{FR}\} - \{\Delta P_{HY}\} - \{\Delta P_{IW}\} + c_{corr} \{\Delta F_{err}\} \quad (3.41)$$

3. การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic analysis) โดยให้แรงกระทำที่ฐาน เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นแรงที่สามารถกระทำทั้งทางแนวตั้งและแนวราบหรืออาจกระทำแนวใดแนวหนึ่งก็ได้ แต่ทิศทางของแรงจะเป็นแบบสลับทิศ (Cyclic loading) โดยการคำนวณหาผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[M]\{\Delta \ddot{u}\} + [C]\{\Delta \dot{u}\} + [K_r]\{\Delta u\} = -[M] \left(\{L_h\} \Delta \ddot{x}_{gh} + \{L_v\} \Delta \ddot{x}_{gv} \right) - \{\Delta P_V\} - \{\Delta P_{FR}\} - \{\Delta P_{HY}\} - \{\Delta P_{IW}\} + c_{corr} \{\Delta F_{err}\} \quad (3.42)$$

การแก้ปัญหาของโปรแกรม IDARC นี้ใช้วิธีการของนิวมาร์คแบบเบตา (Newmark-beta) ซึ่งพัฒนาโดย Newmark (1959) โดยสมมติให้การเปลี่ยนแปลงความเร่งเป็นแบบเส้นตรง จะได้ว่า

$$\{\Delta \ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \left[1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right] \Delta t \{\ddot{u}\}_t - \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}\}_t + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta u\}_{t+\Delta t} \quad (3.43ก)$$

$$\{\Delta \ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\gamma \Delta t} \{\Delta \dot{u}\}_{t+\Delta t} - \frac{1}{\gamma} \{\ddot{u}\}_t \quad (3.43ข)$$

ค่า β และ γ เป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีค่า 0.25 และ 0.5 ตามลำดับ แทนสมการที่ 3.43 ไปในสมการที่ 3.42 ได้เป็น

$$[K_D]\{\Delta u\}_{t+\Delta t} = \{\Delta F_D\} \quad (3.44)$$

โดยที่

$$[K_D] = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K_r] \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta F_D\} = & -[M] (\{L_h\} \Delta \ddot{x}_{gh} + \{L_v\} \Delta \ddot{x}_{gv}) - \{\Delta P_V\} - \{\Delta P_{FR}\} - \{\Delta P_{HY}\} \\ & - \{\Delta P_{IW}\} + c_{corr} \{\Delta F_{err}\} + \left[\frac{I}{2\beta} [M] + \left[\frac{\gamma}{2\beta} - I \right] \Delta [C] \right] \{\ddot{u}\}, \quad (3.46) \\ & + \left[\frac{I}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C] \right] \{\dot{u}\}, \end{aligned}$$

คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.44 แล้วแทนค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นลงไปในสมการที่ 3.43g และ 3.43ข จะได้ค่าความเร็วและความเร่งที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

4. การวิเคราะห์โดยใช้แรงกระทำแบบสถิตย์กระทำแบบสถิตย์กับโครงสร้าง (Quasi-static analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างหรือภายใต้การเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่มีทิศทางสถิตย์ โดยการคำนวณอาจรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณใช้สมการการคำนวณเดียวกับการวิเคราะห์แบบที่ 2

3.3 การวิเคราะห์ค่าความเสียหาย (Damage analysis)

ค่าดัชนีความเสียหายใช้ใน IDARC นี้ถูกปรับปรุงโดย Kunnath และคณะ (1992) ได้ดังสมการ

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_h \quad (3.47)$$

โดยที่

- θ_m เป็นมุมหมุนที่เกิดขึ้นและมีค่ามากที่สุดของชิ้นส่วน
- θ_r เป็นมุมหมุนที่เหลืออยู่ขณะไม่มีน้ำหนักกระทำ (Unloading)
- θ_u เป็นมุมหมุนที่ตำแหน่งวิบัติของชิ้นส่วน
- M_y เป็นโมเมนต์ครากของหน้าตัด
- E_h เป็นพลังงานที่ถูกสูญเสียไปที่หน้าตัด

สำหรับความเสียหายระดับชิ้นและระดับโครงสร้าง คำนวณโดยวิธีการถ่วงน้ำหนักโดยใช้พลังงานที่ถูกสูญเสียไปที่หน้าตัด (Dissipated energy) แสดงสัดส่วนของความเสียหาย ตามสมการ

$$DI_{story} = \Sigma (\lambda_i)_{component} (DI_i)_{component} \quad (3.48)$$

$$DI_{overall} = \Sigma (\lambda_i)_{story} (DI_i)_{story} \quad (3.49)$$

โดยที่

$$(\lambda_1)_{\text{component}} = \left(\frac{E_i}{\Sigma E_i} \right)_{\text{component}}$$

$$(\lambda_1)_{\text{story}} = \left(\frac{E_i}{\Sigma E_i} \right)_{\text{story}}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย