บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทั่ว ๆ ไป ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลากว่าสามสิบปีแล้ว ปัจจุบันมีตำราทั้งภาษาอังกฤษ และ ภาษาไทยมากมายที่กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการนี้ จึงจะไม่กล่าวในที่นี้

ความเหนียวของโครงสร้าง

ความเหนียวของโครงสร้าง คือความสามารถของโครงสร้างที่จะเปลี่ยนรูป (Deform) ต่อไปได้อีกหลังจากหน่วยแรงในโครงสร้างผ่านช่วงอีลาสติกไปแล้ว โดยที่ยังรักษากำลังต้านทานคลากไว้ได้เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติอย่างกะทันหันเมื่อโครงสร้างนั้นถูกแรงกระทำเกินกว่าที่ออกแบบไว้อันอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของธรรมชาติต่าง ๆ เช่น แผ่นดินไหว แรงลม แรงจากคลื่นทะเล เป็นต้น [2, 3, 14]

การนิยามความเหนียวของโครงสร้าง โดยทั่วไปจะนิยามด้วย ค่าดรรชนีความเหนียว (Ductility index) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะโก่งตัวที่จุดประลัยต่อระยะโก่งตัวที่จุดคลากเริ่มต้น หรือ เป็นอัตราส่วนระหว่างความโค้งที่จุดประลัยต่อความโค้งที่จุดคลากเริ่มต้น เป็น

ต้น

งานศึกษานี้จะนิยามความเหนียวของโครงสร้าง โดยใช้ค่าดรรชนีความเหนียว DI ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความโค้งที่จุดประลัย ϕ_u (Ultimate curvature) ต่อ ความโค้งที่จุดคลากเริ่มต้น ϕ_y (First yield curvature) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$DI = \phi_u/\phi_y \tag{2.1}$$

การหาความเหนียวของคานในการศึกษานี้จะไม่คิดผลการรัดรอบของเหล็กปลอก ในขณะที่การหาความเหนียวของเสาจะคิดผลการรัดรอบของเหล็กปลอก สำหรับรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อความเหนียวของคานแบบไม่มีเหล็กปลอกรัดรอบ (Ductility of unconfined beam sections) และ ความเหนียวของเสาแบบมีเหล็กปลอกรัดรอบ (Ductility of confined column sections)

การหาความโค้งของเสาที่จุดคลากและจุดประลัย เป็นการหาความโค้งโดยการสมมติให้แรงอัดในแนวแกนมีค่าคงที่ เนื่องจากในกรณีที่โครงสร้างต้องรับแรงกระทำทางด้านข้างเกินกว่าที่ออกแบบไว้ แรงในแนวแกนของเสาจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเพราะผลของน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่ามากเทียบกับผลจากแรงกระทำทางด้านข้าง ส่วนโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงถือว่าการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดจะมีผลทำให้ความโค้งมีค่าเปลี่ยนแปลงภายใต้แรงในแนวแกนที่มีค่าคงที่

<u>ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมจะสมมติให้เป็นเส้นตรง 2 ช่วง (Bilinear) ช่วงแรก หน่วยแรงเค้นกับความเครียดแปรผันโดยตรง เริ่มจากหน่วยแรงเค้นและความเครียดมีค่าเป็นศูนย์ จนกระทั่งเหล็กเริ่มคลาก ช่วงที่สอง หลังจากที่เหล็กคลากแล้วความเครียดที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อกำลังของเหล็กเสริม กำลังของเหล็กเสริมในช่วง

นี้มีค่าเท่ากับกำลังที่จุดคลาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ความเหนียวของคานแบบไม่มีเหล็กปลอกรัดรอบ

1. ความโค้งที่จุดคลาก (Yield curvature)

ความโค้งที่จุดคลากหมายถึงความโค้งของหน้าตัดเมื่อหน้าตัดรับโมเมนต์คลาก M_y ซึ่งทำให้ความเค้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคลากพอดี โดยการใช้สมมติฐานที่ว่า หน่วยแรงเค้น กับ ความเครียดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) และจากการพิจารณาสภาวะสมดุลระหว่างแรงอัด กับ แรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด โมเมนต์คลาก และความโค้งคลากหาได้จากสมการที่ (2.2) - (2.4) [14]

$$k = \left[(\rho+\rho')^2 n^2 + 2(\rho+\rho' d'/d)n\right]^{1/2} - (\rho + \rho')n \qquad (2.2)$$

$$M_y = A_s f_y jd \qquad (2.3)$$

$$\phi_y = \frac{f_y/E_s}{d(1-k)} \qquad (2.4)$$

โดยที่

kd = ระยะจากผิวของคานด้านที่รับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทิน

ρ = ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง (A_s/bd)

ρ' = ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด (A_s'/bd)

n = อัตราส่วนระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเสริมต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

M_y = โมเมนต์ที่จุดคลาก

A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

f_y = กำลังของเหล็กเสริมที่จุดคลาก

jd = ระยะระหว่างแรงอัดของคอนกรีตกับแรงดึงของเหล็กเสริมบนหน้าตัด

ϕ_y = ความโค้งที่จุดคลาก

E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

2. ความโค้งที่จุดประลัย (Ultimate curvature)

รูปที่ 2.2(ข) แสดงความเครียดและหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่จุดประลัย ในการหาค่าความโค้งที่จุดประลัย ขั้นแรก จะหาค่า a จากการพิจารณาสภาวะสมดุลระหว่างแรงอัดกับแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และ เหล็กเสริม โดยสมมติว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดคลากแล้ว จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.5) ขั้นที่สอง พิจารณาจากความสอดคล้องของความเครียด (Strain compatibility) ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเพื่อตรวจสอบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงอัดคลากหรือไม่ โดยใช้แนวแกนสะเทินที่สอดคล้องกับค่า a ที่ได้ในขั้นแรก สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.6) หากเหล็กเสริมรับแรงอัดยังไม่คลาก $\epsilon_s' \leq f_y/E_s$ จะต้องหาค่า a จากสภาวะสมดุลที่แรงในเหล็กเสริมรับแรงอัด $f_s' = E_s\epsilon_s'$ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.7) ขั้นที่สาม หาความโค้งที่จุดประลัยจากการสมมติว่าความโค้งมีค่าน้อย ๆ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.8)

$$a = (A_s f_y - A_s' f_s') \,/\, 0.85 f_c' b \qquad (2.5)$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_c (c-d')/c \qquad (2.6)$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{a}{d}\right)^2 + \left(\frac{a}{d}\right)\left[\frac{\rho'\epsilon_c E_s - \rho f_y}{1.7 f_c'}\right] - \frac{\rho'\epsilon_c E_s b_1 d'}{1.7 f_c' d} = 0 \qquad (2.7)$$

$$\phi_u = \epsilon_c/c = \epsilon_c b_1/a \quad (2.8)$$

ในเมื่อ

f_y = กำลังของเหล็กเสริมที่จุดคลาก

f_s'= หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงอัด

a = ความลึกของรูปหน่วยแรงอัดสมมูลของคอนกรีตบนหน้าตัด (Stress block)

A_s'= พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด

f_c'= กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

b = ความกว้างของหน้าตัด

ϵ_s'= ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัด

ϵ_c = ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวด้านนอกสุดที่รับแรงอัด

d = ความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริมรับแรงดึง

d' = ความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริมรับแรงอัด

c = ระยะจากผิวด้านนอกสุดของด้านที่รับแรงอัดของหน้าตัดถึงแนวแกนสะเทิน

b1 = ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของรูปหน่วยแรงอัดสมมูลกับความลึกของแนวแกนสะเทิน

ϕ_u = ความโค้งที่จุดประลัย

<u>ความเหนียวของเสาแบบมีเหล็กปลอกรัดรอบ</u>

1. <u>ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีเหล็กสี่เหลี่ยมรัดรอบ</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้น กับ ความเครียดของคอนกรีตที่มีเหล็กสี่เหลี่ยมรัดรอบได้มีการเสนอออกมาหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 [14] Chan เสนอความสัมพันธ์ออกมาในลักษณะที่เป็นเส้นตรง 3 ช่วง (Trilinear) สองช่วงแรก OAB เป็นความสัมพันธ์ที่

ไม่คิดผลของการรัดรอบ ช่วงที่สาม BC เป็นผลจากการรัดรอบของเหล็กปลอก ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) Blume et al เสนอในลักษณะเดียวกับของ Chan แต่ลักษณะของกราฟได้นำเอากำลังคลากของเหล็กปลอกมาใช้พิจารณาด้วยซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.3(ก) Baker เสนอความสัมพันธ์ออกมาเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นกับความเครียดเป็นโค้งพาราโบลา เริ่มจากหน่วยแรงเค้นและความเครียดเป็นศูนย์ จนกระทั่งหน่วยแรงเค้นมีค่าสูงสุดที่ความเครียดเป็น 0.002 หลังจากนั้นความลาดชันของความเครียด (Strain gradient) และ ปริมาณของเหล็กปลอกที่รัดรอบจะมีผลทำให้ความเครียดของหน้าตัดเพิ่มแต่ยังคงหน่วยแรงเค้นสูงสุดไว้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข) Roy และ Sozen เสนอความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเส้นตรง 2 ช่วง ช่วงแรก หน่วยแรงเค้นแปรผันโดยตรงกับความเครียด เริ่มจากหน่วยแรงเค้นและความเครียดเป็นศูนย์ จนกระทั่งความเครียดเป็น 0.002 และ กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ f_c' หลังจากนั้นปริมาณของเหล็กปลอกจะมีผลทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นในขณะที่หน่วยแรงเค้นมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) Soliman and Yu เสนอความสัมพันธ์เป็น 3 ช่วง ลักษณะของความสัมพันธ์เป็นโค้งพาราโบลาต่อกับเส้นตรง 2 เส้น หน่วยแรงเค้นและความเครียดในช่วงที่เป็นเส้นตรงขึ้นกับปริมาณของเหล็กปลอก ระยะห่างของเหล็กปลอก และ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกรัดรอบโดยเหล็กปลอก (Confined area) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ง) Sargin et al และ Yu เสนอความสัมพันธ์เป็นสมการที่มีความต่อเนื่องขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กปลอก ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก กำลังคลากของเหล็กปลอก ความลาดชันของความเครียดบนหน้าตัด และ กำลังของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.3(จ) Kent และ Park ได้นำรูปแบบความสัมพันธ์ข้างต้นมารวมกันและเสนอความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [15] ในการศึกษานี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีเหล็กสี่เหลี่ยมรัดรอบที่เสนอโดย Kent และ Park โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังจะกล่าวต่อไป

ช่วง AB : หน่วยแรงเค้นกับความเครียดมีความสัมพันธ์กันแบบโค้งพาราโบลา เริ่มจากความเครียดเป็นศูนย์ จนกระทั่งความเครียดมีค่าเป็น 0.002 เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.9)

$$f_c = f_c'[2\epsilon_c/0.002 - (\epsilon_c/0.002)^2] \quad (2.9)$$

ช่วง BC : หน่วยแรงเค้นแปรผกผันกับความเครียดเริ่มจากความเครียดมีค่าเป็น 0.002 จนกระทั่งหน่วยแรงเค้นลดลงเหลือเพียง 20% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต หน่วยแรงเค้นที่ความเครียดใด ๆ ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ปริมาณของเหล็กปลอก ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก ความลาดชันของความเครียด และ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกรัดรอบโดยเหล็กปลอก เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.10) - (2.13)

$$f_c = f_c'[1 - Z(\epsilon_c - 0.002)] \qquad (2.10)$$

$$Z = \frac{0.5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0.002} \qquad (2.11)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{0.21 + 0.002\, f_c'}{f_c' - 70} \qquad (2.12)$$

$$\epsilon_{50h} = 0.75\rho_s(b''/S)^{1/2} \qquad (2.13)$$

ช่วง CD : หน่วยแรงเค้นมีค่าคงที่เท่ากับ 20% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.14)

$$f_c = 0.2\, f_c' \qquad (2.14)$$

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้บนหน้าตัดคอนกรีต กำหนดให้ ϵ_{cm} เป็นค่าความเครียดใด ๆ ที่บริเวณผิวนอกสุดของด้านที่รับแรงอัด รูป (ก) เป็นกรณีที่ $\epsilon_{cm} \leq 0.002$ (ข) เป็นกรณีที่ $\epsilon_{cm} > 0.002$ แต่ไม่เกิน ϵ_{20c} สำหรับหน้าตัดรูปสี่

เหลี่ยมที่มีความกว้าง b และ ระยะแนวแกนสะเทิน kd สามารถหาค่าแรงอัด และ ตำแหน่งของแรงกระทำที่เกิดขึ้นในเทอมของสัมประสิทธิ์ α และ γ ได้ดังนี้

แรงอัดของคอนกรีต C_c ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดที่มีความเครียดใด ๆ ที่ผิวนอกสุดหาได้จากผลรวมของหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดตั้งแต่แนวแกนสะเทินถึงผิวด้านที่รับแรงอัด ดังสมการ (2.15a)

$$C_c = \int_0^{kd} f_c b \, dy \tag{2.15a}$$

จากความสอดคล้องของความเครียด เขียนความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ ϵ_c ได้ดังนี้

$$y = kd\epsilon_c/\epsilon_{cm} \tag{2.15b}$$

แทนค่า y จากสมการ (2.15a) จะได้ขอบเขตของการอินทิเกรทใหม่ดังสมการ (2.15c)

$$C_c = \frac{bkd}{\epsilon_{cm}} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c \tag{2.15c}$$

ค่า C_c สามารถเขียนเป็นรูปอย่างง่ายในเทอมของสัมประสิทธิ์ α ได้ดังสมการ (2.15) และจากการเปรียบเทียบสมการ (2.15c) กับสมการ(2.15) จะได้ค่า α ดังสมการ (2.16)

$$C_c = \alpha f_c' bkd \tag{2.15}$$

$$\alpha = \frac{\int_{0}^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c}{f_c'\epsilon_{cm}} \tag{2.16}$$

สำหรับตำแหน่งของแรงอัดคำนวณได้จากผลรวมของโมเมนต์รอบแนวแกนสะเทินตั้งแต่แนวแกนสะเทินถึงผิวด้านที่รับแรงอัด สมมติให้ตำแหน่งของแรงอัด C_c อยู่ที่ระยะ γkd ห่างจากผิวด้านนอกสุดที่รับแรงอัด เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.17a) เมื่อแทนค่า y และ C_c จากสมการ (2.15b) และ (2.15c) ลงในสมการ (2.17a) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ค่า γ ดังสมการ (2.17)

$$(1-\gamma)kdC_c = \int_{0}^{kd} f_c y dy \tag{2.17a}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_{0}^{\epsilon_{cm}} \epsilon_c f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_{0}^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c} \tag{2.17}$$

แทนค่า f_c จากสมการที่ (2.9) - (2.13) ที่สอดคล้องกับค่า ϵ_{cm} ใด ๆ ลงในสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้ค่า α และ γ ดังสมการ (2.18) - (2.21) [3]

เมื่อ $\epsilon_{cm} \leq 0.002$

$$\alpha = (\epsilon_{cm}/0.002)(1-\epsilon_{cm}/0.006) \tag{2.18}$$

$$\gamma = 1 - \frac{2/3 - \epsilon_{cm}/0.008}{1 - \epsilon_{cm}/0.006} \tag{2.19}$$

เมื่อ $0.002 \leq \epsilon_{cm} \leq \epsilon_{20c}$

$$\alpha = \frac{0.004}{3\epsilon_{cm}} + \left(1 - \frac{0.002}{\epsilon_{cm}}\right)\left[1 - \frac{Z(\epsilon_{cm} - 0.002)}{2}\right] \tag{2.20}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\left\{\dfrac{\epsilon_{cm}}{2} - Z\left[\dfrac{\epsilon_{cm}^{2}}{3} - \dfrac{0.002\epsilon_{cm}}{2} + \dfrac{0.002^{3}}{6\epsilon_{cm}}\right] - \dfrac{0.002^{2}}{12\epsilon_{cm}}\right\}}{\left\{\dfrac{0.004}{3} + (\epsilon_{cm} - 0.002) - Z\left[\dfrac{\epsilon_{cm}^{2}}{2} - 0.002\epsilon_{cm} + \dfrac{0.002^{2}}{2}\right]\right\}} \tag{2.21}$$

2. <u>ความโค้งที่จุดคลาก</u> (Yield curvature)

การหาค่าความโค้งที่จุดคลากของเสาซึ่งเป็นโครงสร้างที่รับแรงอัดแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

2.1 ถ้าแรงที่ออกแบบอยู่ในช่วงแรงอัดเป็นหลัก ถือว่าความโค้งคลากคำนวณที่จุดซึ่งเหล็กเสริมด้านที่รับแรงอัดถึงจุดคลาก

2.2 ถ้าแรงที่ออกแบบอยู่ในช่วงแรงดึงเป็นหลัก ถือว่าความโค้งคลากคำนวณที่จุดซึ่งเหล็กเสริมด้านที่รับแรงดึงถึงจุดคลาก

การหาความโค้งของเสาที่จุดคลาก ต้องสมมติค่าความเครียดของคอนกรีตที่ผิวนอก ϵ_{cm} จนกว่าจะได้ค่า ϵ_{cm} ที่ทำให้เหล็กเสริมจากกรณี 2.1 หรือ 2.2 คลากพอดี และ สอดคล้องกับสภาวะสมดุลระหว่างแรงอัด กับ แรงดึง ณ.ความเครียดที่สมมตินั้น โดยผลรวมของแรงภายในตามเครื่องหมายต้องเท่ากับแรงภายนอกที่กระทำกับเสาดังสมการ (2.22) เมื่อได้ความเครียดที่ผิวนอกของคอนกรีตที่สอดคล้องกับสมการ (2.22) แล้ว ค่าโมเมนต์ดัดหาได้จาก ผลรวมของแรงคูณกับระยะที่แรงกระทำห่างจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดตามเครื่องหมายดังสมการ (2.23) ความโค้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.24)

$$P = \alpha f_c' bkd + \sum_{i=1}^{N} A_{si} f_{si} \qquad (2.22)$$

$$M = \alpha f_c' bkd(h/2-\gamma kd) + \sum_{i=1}^{N} A_{si} f_{si}(h/2-d_i) \qquad (2.23)$$

$$\phi_y = \epsilon_c / kd \qquad (2.24)$$

โดยที่

P = แรงอัดในแนวแกนของเสา

M = โมเมนต์ดัดที่จุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเสา

f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

A_{si} = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมแถวที่ i

f_{si} = หน่วยแรงเค้นในเหล็กเสริมแถวที่ i มีเครื่องหมายเป็นบวกสำหรับหน่วยแรงดึง และ เป็นลบสำหรับหน่วยแรงอัด

d_i = ตำแหน่งของเหล็กเสริมแถวที่ i วัดจากผิวด้านที่รับแรงอัด

kd = ระยะจากผิวของคานด้านที่รับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทิน

b = ความกว้างของเสาในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ

h = ความกว้างของเสาในทิศทางที่รับโมเมนต์ดัด

ϕ_y = ความโค้งที่จุดคลาก

3. <u>ความโค้งที่จุดประลัย</u> (Ultimate curvature)

การหาค่าความโค้งที่จุดประลัยจะใช้สมมติฐานว่า คอนกรีตที่หุ้มเหล็กที่รัดรอบจะแตกออกเมื่อมีความเครียดตั้งแต่ 0.004 ขึ้นไป [3, 14] สำหรับคอนกรีตในบริเวณที่มีการรัด

รอบของเหล็กปลอกยังสามารถรับแรงกระทำได้ ซึ่ง Scott et al [3] เสนอว่าค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตมีค่าดังสมการที่ (2.25)

$$\epsilon_{max} = 0.004 + 0.9\rho_s(f_{yh}/300) \qquad (2.25)$$

ค่า ϕ_u สามารถหาได้โดยการสมมติค่าความเครียด และ ตำแหน่งของแนวแกนสะเทินที่สอดคล้องกับสมการ (2.24) ซึ่งความสามารถในการรับโมเมนต์ของหน้าตัดที่ได้จากสมการที่ (2.25) ลดลงเหลือเพียง 75% - 85% ของความสามารถในการรับโมเมนต์สูงสุดของหน้าตัด สำหรับงานศึกษานี้จะถือว่าความสามารถในการรับโมเมนต์ของหน้าตัดเป็นอันสิ้นสุดหากกำลังต่ำกว่า 90% ของความสามารถในการรับโมเมนต์ของหน้าตัดที่ความเครียดเป็น 0.003 ค่าความโค้งที่สัมพันธ์กันจะเรียกว่า ความโค้งประลัย (Ultimate curvature) ϕ_u

<u>ความเหนียวของคานตามมาตรฐาน ACI 318-83</u>

ในกรณีที่เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคลาก ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมากที่สุดกำหนดโดยสมการ (2.26) ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดยังไม่คลาก ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมากที่สุดกำหนดโดยสมการ (2.27) ค่า f_s' หาได้จากสมการสมดุล และ ความสอดคล้องของความเครียดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด

$$\rho_{max} - \rho' < 0.75 \; \frac{0.85 f_c' b_1}{f_y} \; \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_y} \qquad (2.26)$$

$$\rho_{max} - \frac{p' f_s'}{f_y} < 0.75 \; \frac{0.85 f_c' b_1}{f_y} \; \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_y} \qquad (2.27)$$

สำหรับคานที่ต้องการให้เกิดการกระจายโมเมนต์ได้ (Moment redistribution) ปริมาณเหล็กเสริมที่มากที่สุด กำหนดโดย

$$\rho - \rho' \quad \le \quad 0.5 \; \frac{0.85f_c'b_1}{f_y} \; \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_y} \qquad (2.28)$$

สำหรับคานของโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีแผ่นดินไหว และเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคลาก ปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด กำหนดโดย

$$\rho - 0.5\rho' \quad \le \quad 0.5 \; \frac{0.85f_c'b_1}{f_y} \; \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_y} \qquad (2.29)$$

ในการศึกษานี้จำกัดผลต่างระหว่างปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง กับ ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ให้เกิน 75 % ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลที่ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงอัด ดังแสดงในอสมการ (2.26) และ (2.27) จะเห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ต้องคูณด้วย 0.75 เนื่องจากหน้าตัดที่ต้องเสริมเหล็กรับแรงอัดที่สอดคล้องกับอสมการ (2.26) และ (2.27) จะมีความเหนียวเท่ากับความเหนียวต่ำสุดในกรณีที่ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงอัด

<u>พิกัดขั้นต่ำในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก</u>

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก พิจารณาพิกัดขั้นต่ำตามมาตรฐาน ACI 318-83 ดังต่อไปนี้

1. <u>ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงต่ำสุด</u>

เพื่อป้องกันการวิบัติในลักษณะกะทันหันซึ่งอาจเกิดขึ้น หากเหล็กเสริมรับแรงดึงมีปริมาณน้อยเกินไปที่จะรับแรงดึงซึ่งถ่ายมาจากคอนกรีตเมื่อเริ่มแตกร้าว มาตรฐาน ACI ได้กำหนดปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงต่ำสุดดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.30) ซึ่งจำกัดสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย ไม่เกิน 420 กก/ซม^2

$$\rho_{min} = 14/f_y \qquad (2.30)$$

2. <u>ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่ำสุด</u>

ในกรณีที่แรงเฉือนประลัย (Factored shear force) มีค่าเกินกึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงเฉือนระบุ (Nominal shear strength) จะต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนปริมาณต่ำสุด A_v ไม่น้อยกว่าค่าในสมการ (2.31) โดย b เป็นความกว้างของหน้าตัด และ S เป็นระยะระหว่างเหล็กปลอก

$$A_v = 3.5\ bS/f_y \tag{2.31}$$

<u>ผลของความชะลูดในการออกแบบเสารับแรงอัด</u>

ในการออกแบบเสารับแรงอัดต้องพิจารณาผลของความชะลูดซึ่งจะทำให้กำลังในการรับแรงอัดของเสามีค่าลดลง การพิจารณาผลของความชะลูดจะใช้วิธีเพิ่มค่าโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์อันดับที่ 1 วิธีการนี้ต้องรู้ค่า EI และ ค่า k ของเสาเพื่อคำนวณค่า P_{cr} และ ตัวขยายค่าโมเมนต์ของเสาต้นที่ออกแบบ การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัด และ โมเมนต์ที่สอดคล้องกันสำหรับหน้าตัด และ ปริมาณเหล็กเสริมใด ๆ (Interaction curve)

1. <u>ค่า EI ของเสา</u>

ค่า EI ของเสาใช้ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.32) ซึ่งให้ผลในทางปลอดภัย

$$EI = \frac{E_c I_g}{2.5(1+\beta_d)} \tag{2.32}$$

2. <u>ค่า k ของเสา</u>

การหาค่า k ของเสาอาจหาได้จากแผนภูมิอะไลน์เมนต์ (Alignment chart) แต่ในการศึกษานี้จะใช้ค่า k ที่มีการเสนอเป็นสูตรซึ่งหาค่า k ได้โดยไม่ยุ่งยากดังจะกล่าวต่อไป

สำหรับกรณีของโครงที่มีการยึดโยงทางด้านข้าง ค่า k ใช้ค่าประมาณซึ่งเสนอโดย

British Code of Standard Practice โดยใช้ k ค่าน้อยที่เปรียบเทียบระหว่างสมการที่ (2.33) กับ (2.34) [16]

$$k = 0.7 + 0.05\,(\Psi_a + \Psi_b) \leq 1.0 \qquad (2.33)$$

$$k = 0.85 + 0.05\,\Psi_{min} \leq 1.0 \qquad (2.34)$$

สำหรับกรณีของโครงที่ไม่มีการยึดโยงทางด้านข้าง Furlong ได้เสนอสูตรการคำนวณซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (2.35) กับ (2.36) [16] โดยมีข้อจำกัดว่าสามารถใช้ได้กับเสาที่มีการยึดรั้งที่ปลายทั้ง 2 ด้านเท่านั้น สำหรับเสาที่มีการยึดรั้งที่ปลายด้านเดียวใช้ค่า k ของ British Code of Standard ซึ่งแสดงในสมการที่ (2.37) [16] ดังนั้นค่า k ของโครงที่ไม่มีการยึดโยงทางด้านข้างจึงเป็น k ค่าน้อยที่เปรียบเทียบระหว่าง ค่า k ที่เสนอโดย Furlong กับ k ของ British Code of Standard Practice

$$\text{เมื่อ } \Psi_{av} < 2 \;;\; k = \left(\frac{20 - \Psi_{av}}{20}\right)\sqrt{(1 + \Psi_{av})} \qquad (2.35)$$

$$\text{เมื่อ } \Psi_{av} > 2 \;;\; k = 0.9\sqrt{(1 + \Psi_{av})} \qquad (2.36)$$

$$k = 2.0 + 0.3\,\Psi_{min} \qquad (2.37)$$

3. ตัวขยายค่าโมเมนต์

ตัวขยายค่าโมเมนต์ในกรณีของโครงที่มีการยึดโยงทางด้านข้าง คำนวณค่า C_m ได้จากสมการ (2.38) โดย M_1 และ M_2 เป็นโมเมนต์ที่ปลายเสา และ M_2 มีค่ามากกว่า M_1 ตัวขยายค่าโมเมนต์คำนวณได้จากสมการ (2.39) สำหรับกรณีของโครงที่ไม่มีการยึดโยงทางด้านข้าง C_m มีค่าเป็น 1 ตัวขยายค่าโมเมนต์ต้องแยกเป็นกรณีของน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง (δ_b)

ดังสมการ (2.40) และ แรงกระทำทางด้านข้าง (δ_s) ดังสมการ (2.41) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สมมติฐานว่า เสาทุกต้นในชั้นที่กำลังพิจารณามีค่า P/P_{cr} เท่ากัน ดังนั้นตัวขยายค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง จะสมมติให้มีค่าเดียวกับ ตัวขยายค่าโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง

$$C_m = 0.6 + 0.4M_1/M_2 \qquad \geq 0.4 \tag{2.38}$$

$$\delta = \frac{C_m}{1 - P_u/\phi P_{cr}} \geq 1.0 \tag{2.39}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - P_u/\phi P_{cr}} \geq 1.0 \tag{2.40}$$

$$\delta_s = \frac{C_m}{1 - \Sigma P_u/\phi \Sigma P_{cr}} \geq 1.0 \tag{2.41}$$