บทที่ 2

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีกำลัง

เพื่อความสมบูรณ์ของเนื้อหาในบทนี้ทางคณะผู้จัดทำได้ยกมาจากหนังสือ โครงการอบรม การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. และ ACI

2.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย

การวิเคราะห์และการออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยเป็นวิธีที่แตกต่างไปจากวิธีหน่วยแรงใช้งาน ซึ่งวัสดุคือคอนกรีตและเหล็กยังอยู่ในช่วงอีลาสติก แต่ในวิธีกำลังประลัยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กมีค่ามากเกินกว่าขีดยืดหยุ่น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวจะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์และการออกแบบโดยวิธีนี้มีสมมติฐานในข้อ ก) - ค) เหมือนกับสมมติฐานในวิธีหน่วยแรงใช้งาน ส่วนสมมติฐานในข้อ ง) – ฉ) เป็นสมมติฐานเพิ่มเติมสำหรับวิธีกำลังประลัย

ก) ระนาบของหน้าตัดก่อนการดัดยังคงเป็นระนาบหลังการดัด ดังนั้นหน่วยการยืดหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน

ข) คอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก ในการคำนวณให้ถือว่าคอนกรีตไม่ช่วยในการรับแรงดึง

ค) คอนกรีตและเสษเหล็กยึดเกาะกันดีมาก ดังนั้นหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กและคอนกรีตจะมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน

ง) หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะถือว่าวิบัติเมื่อคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวเท่ากับ ε_{cu} ซึ่งเป็นหน่วยการหดตัวสูงสุดขณะคอนกรีตเกิดการแตกหัก (crushing) มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดให้ใช้ค่า $\varepsilon_{cu} = 0.003$

จ) การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่สถานะประลัยซึ่งไม่เป็นเชิงเส้นสามารถดัดแปลงเป็นการกระจายหน่วยแรงเชิงเส้นเทียบเท่าได้ในการคำนวณได้ ถ้ามีผลการทดลองที่พิสูจน์ได้ว่าการกระจายหน่วยแรงเชิงเส้นเทียบเท่านั้นสามารถคำนวณกำลังของหน้าตัดได้เท่ากัน

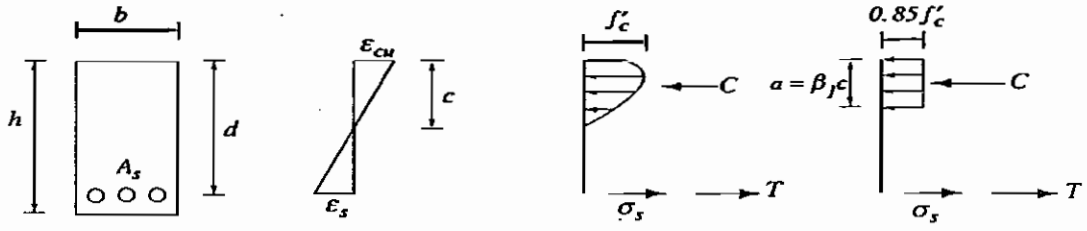
ฉ) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง σ_s และหน่วยการยืดหดตัว ε_s ในเหล็กเสริม แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ความสัมพันธ์ก่อนเกิดการครากและหลังจากเกิดครากกล่าวคือ

$$\sigma_s = E_s\varepsilon_s \text{ ถ้า } \varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ (เหล็กยังไม่คราก)} \quad (2.1)$$

$$= f_y \text{ ถ้า } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \text{ (เหล็กครากแล้ว)} \quad (2.2)$$

โดยที่ ε_y คือ หน่วยการยืดหดตัวที่จุดครากซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{f_y}{E_s}$

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.04×10^6 กก./ซม.^{2}



(ก) หน้าตัดคาน (ข) การกระจายของหน่วยการยืดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง (ง) การกระจายของหน่วยแรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.1 หน้าตัดคานภายใต้โมเมนต์ดัดที่สถานะประลัย

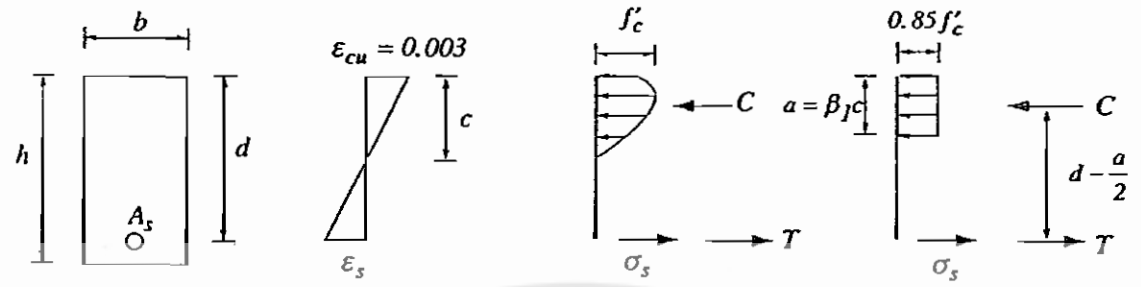
พิจารณาหน้าตัดคานภายใต้โมเมนต์ดัดในรูปที่ 2.1(ก) ที่สถานะประลัยการกระจายของหน่วยการยืดหดตัวยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแนวแกนสะเทิน และหน่วยการหดตัวสูงสุดที่ผิวบนของคานเท่ากับ $\varepsilon_{cu} = 0.003$ ดังรูปที่ 2.1(ข) แต่การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป หน่วยแรงอัดในคอนกรีตนี้จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากศูนย์ที่แนวแกนสะเทิน จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งและจะลดลงจนถึงผิวบนสุดของคานดังรูปที่ 2.1(ค) โมเมนต์ต้านทานของหน้าตัดเกิดจากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C – T ในการคำนวณจึงมีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่าและตำแหน่งของแรงลัพธ์ C เนื่องจากการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณหาค่าและตำแหน่งของแรงลัพธ์ C จะค่อนข้างยุ่งยาก มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดให้ใช้การกระจายของหน่วยแรงเทียบเท่าซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง โดยถือว่าการกระจายของหน่วยแรงเทียบเท่าที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้มีพื้นที่ภายในเท่ากับการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงโดยพื้นที่แรเงาในรูปที่ 2.1(ค) และ 2.1(ง) นอกจากนี้เซ็นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองก็อยู่ในระดับเดียวกันด้วย ดังนั้นการกระจายหน่วยแรงเทียบเท่ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ จะถือว่าใช้แทนการกระจายของหน่วยแรง ที่เกิดขึ้นจริงได้ มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดหน่วยแรงเทียบเท่านี้ไว้เท่ากับ $0.85f'_c$ คงที่ตลอดความลึก a โดยที่ a เป็นฟังก์ชั่นของความลึกของแนวแกนสะเทิน c ดังสมการที่ 2.3

$$a = \beta_1 c \tag{2.3}$$

โดยที่ β_1 = 0.85 เมื่อ $f'_c \le 280$ กก./ซม.^{2}

$$= 0.85 - 0.05\frac{f'_c - 280}{70} \ge 0.65 \text{ เมื่อ } f'_c > 280 \text{ กก./ซม.}^2$$

2.2 การวิเคราะห์คานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

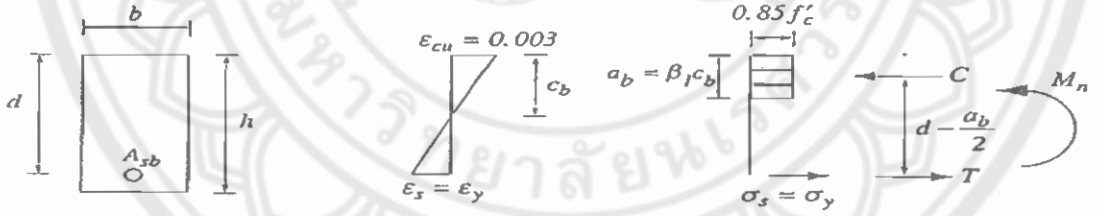


(ก) หน้าตัดคาน (ข) หน่วยการยืดหดตัวที่สถานะประลัย (ค) การกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงที่สถานะประลัย (ง) แรงและหน่วยแรงเทียบเท่าที่สถานะประลัย

รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

การวิบัติของหน้าตัดคานถูกกำหนดโดยหน่วยการหดตัวของคอนกรีต เมื่อหน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่าเท่ากับหน่วยการหดตัวสูงสุด จะถือว่าหน้าตัดคานนั้นเกิดการวิบัติแล้ว โดยไม่คำนึงถึงว่าเหล็กจะเกิดการครากหรือไม่ การวิบัติสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ การวิบัติที่จุดสมดุล (balanced failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (compression failure)

2.2.1 การวิบัติที่จุดสมดุล $(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s = \varepsilon_y, \rho = \rho_b)$



(ก) หน้าตัดคาน (ข) หน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นที่สถานะประลัย (ค) การกระจายของหน่วยแรงที่สถานะประลัย

รูปที่ 2.3 การวิบัติที่จุดสมดุลของหน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง

การวิบัติที่จุดสมดุลของหน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 การวิบัติของหน้าตัดคานจะเรียกว่าการวิบัติที่จุดสมดุลก็ต่อเมื่อขณะที่คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ $\varepsilon_{cu} = 0.003$ เหล็กเสริมรับแรงดึงก็พอดีครากพร้อมกัน นั่นคือ $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ โดยที่ ε_y คือ หน่วยการยืดตัวของเหล็กที่จุดคราก $(= f_y / E_s)$ การวิบัติที่จุดสมดุลจะเกิดในกรณีที่หน้าตัดคานมีปริมาณเหล็กเสริมพอดีเกณฑ์สมดุล $\rho_b (= A_{sb} / bd)$ ถ้าให้ c_b คือ ความลึกของแนวแกนสะเทินสำหรับการวิบัติที่จุดสมดุล จะสามารถหาค่า c_b ได้โดย

จากรูปที่ 2.3 (ข) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_y} = \frac{c_b}{d - c_b}$$

จัดรูปใหม่จะได้ว่า $$c_b = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_y} \right) d \qquad (2.4)$$

แทนค่า $\varepsilon_c = 0.003$ และ $\varepsilon_y = f_y / E_s$ โดยที่ $E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ซม.^{2} ลงในสมการที่ 2.4

ดังนั้น $$c_b = \left(\frac{5{,}1200000000}{6{,}120 + f_y} \right) d \qquad (2.5)$$

แรงอัดในคอนกรีต C สามารถหาได้จากปริมาตรของการกระจายหน่วยแรงอัดเทียบเท่า ดังนั้น

$$C = 0.85 f'_c a_b b = 0.85 f'_c \beta_1 c_b b \qquad (2.6)$$

แรงดึงในเหล็กเสริม T สามารถหาได้จาก $T = A_s \sigma_s$ เนื่องจากการวิบัติที่จุดสมดุลเหล็กจะพอดีคราก

ดังนั้น $$T = A_{sb} f_y = \rho_b b d f_y \qquad (2.7)$$

จากสมดุลของแรง $C = T$

$$0.85 f'_c \beta_1 c_b b = \rho_b b d f_y \qquad (2.8)$$

แทนค่า c_b จากสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

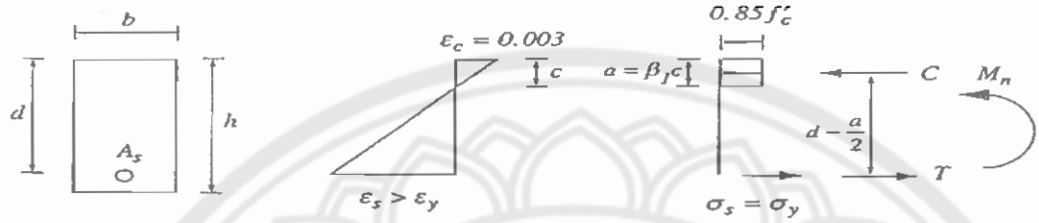
$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y} \right) \qquad (2.9)$$

สมการที่ 2.9 เป็นสมการสำหรับการคำนวณหาค่าปริมาณเหล็กเสริมที่พอดีทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุลของหน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง โมเมนต์ดัดประลัย M_n ที่หน้าตัดสามารถรับได้หรือบางทีเรียกว่า กำลังระบุในการรับโมเมนต์ดัด (nominal moment strength) สามารถหาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C – T โดยแขนของโมเมนต์เท่ากับระยะ $d - \frac{a_b}{2}$ ดังนั้น

$$M_n = C\left(d - \frac{a_b}{2}\right) = 0.85 f_c' \beta_1 c_b b\left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right) \quad (2.10)$$

$$= T\left(d - \frac{s_b}{2}\right) = A_{sb} f_y \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right) \quad (2.11)$$

2.2.2 การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก $\left(\varepsilon_b = 0.003, \varepsilon_s > \varepsilon_y, \rho < \rho_b\right)$



(ก) หน้าตัดคาน (ข) หน่วยการยืดหดตัว (ค) แรงและหน่วยแรงเทียบเท่าที่สถานะประลัย

รูปที่ 2.4 การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักของหน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง

การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก เป็นหน้าตัดคานที่ขณะเกิดการวิบัติซึ่งคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ $\varepsilon_{cu} = 0.003$ หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมจะมีค่าเกินกว่า ε_y ซึ่งหมายถึงว่าเหล็กเสริมจะเกิดการครากก่อนที่จะวิบัติ การครากของเหล็กเสริมไม่ได้หมายความว่าหน้าตัดจะเกิดการวิบัติตราบใดที่หน่วยการหดตัวในคอนกรีตยังมีค่าไม่ถึง ε_{cu} เมื่อเหล็กเกิดการครากการโก่งตัวของคานจะเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ดีคานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีก โดยที่หน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเมื่อหน่วยการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ ε_{cu} คานจะเกิดการวิบัติและขณะวิบัตินี้หน่วยการยืดตัวของเหล็กจะมากกว่า ε_y ดังนั้นหน่วยแรงดึงในเหล็ก $\sigma_s = f_y$ การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้จะเกิดในกรณีที่หน้าตัดคานมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล $\left(\rho < \rho_b\right)$

จากสมดุลของแรง $C = T$

$$0.85 f_c' ab = A_s f_y$$

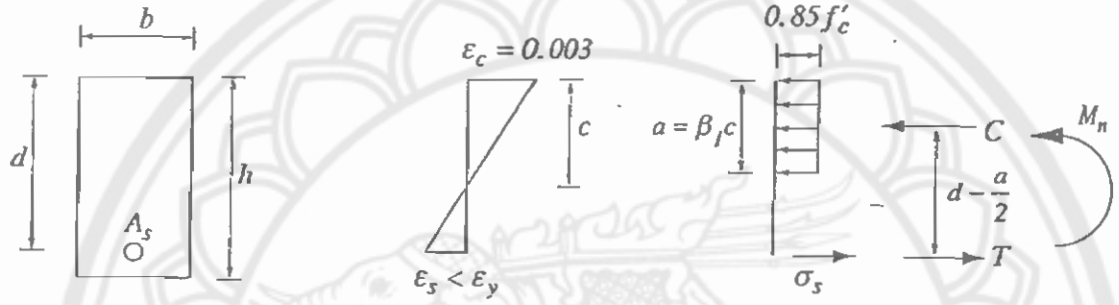
$$\mu = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} \quad (2.12)$$

ดังนั้น กำลังระบุในการรับโมเมนต์ดัด M_n สามารถหาได้จาก

$$M_n = C\left(d-\frac{a}{2}\right)=0.85f'_cab\left(d-\frac{a}{2}\right) \quad (2.13)$$

$$= T\left(d-\frac{a}{2}\right)=A_sf_y\left(d-\frac{a}{2}\right) \quad (2.14)$$

2.2.3 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก $\left(\varepsilon_b=0.003,\varepsilon_s<\varepsilon_y,\rho>\rho_b\right)$



(ก) หน้าตัดคาน (ข) หน่วยการยืดหดตัวที่สถานะประลัย (ค) แรงและหน่วยแรงเทียบเท่าที่สถานะประลัย

รูปที่ 2.5 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักของหน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง

การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก เป็นหน้าตัดคานที่ขณะเกิดการวิบัติซึ่งคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ ε_{cu} หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมยังมีค่าน้อยกว่า ε_y ซึ่งหมายถึงว่าเหล็กยังไม่เกิดการครากขณะที่เกิดการวิบัติ ดังนั้นหน่วยแรงดึงในเหล็ก $\sigma_s<f_y$ โดยจะต้องคำนวณจาก $\sigma_s=E_s\varepsilon_s$ การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักจะเกิดขึ้นในกรณีที่หน้าตัดคานมีปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล $\left(\rho>\rho_b\right)$

จากสมดุลของแรง $C = T$

$$0.85f'_c\beta_1cb=A_s\sigma_s=A_sE_s\varepsilon_s \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.5 (ข) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c}=\frac{d-c}{c}$$

แทนค่า $\varepsilon_c=0.003$ ดังนั้น

$$\varepsilon_s=0.003\left(\frac{d-c}{c}\right) \quad (2.16)$$

แทนค่า ε_s จากสมการที่ 2.16 ลงในสมการที่ 2.15 จะได้ว่า

$$0.85 f'_c \beta_1 cb = A_s E_s \left[0.003 \left(\frac{d-c}{c} \right) \right] \tag{2.17}$$

แก้สมการที่ 2.17 จะได้ค่า c และสามารถหาค่า ε_s ได้จากสมการที่ 2.16 จากนั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังระบุในการรับโมเมนต์ดัด M_n ของหน้าตัดได้จาก

$$M_n = C\left(d - \frac{a}{2}\right) = 0.85 f'_c cb\left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \tag{2.18}$$

$$= T\left(d - \frac{a}{2}\right) = A_s E_s \varepsilon_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \tag{2.19}$$

ในวิเคราะห์หน้าตัดคานจำเป็นจะต้องรู้ก่อนว่าหน้าตัดจะเกิดการวิบัติแบบใด การตรวจสอบชนิดของการวิบัติจะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัด $\left(\rho = \frac{A_s}{bd}\right)$ กับปริมาณเหล็กเสริมที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุล ρ_b ในสมการที่ 2.9 ถ้า ρ ของหน้าตัดพอดีเท่ากับ ρ_b หน้าตัดจะเกิดการวิบัติแบบสมดุล ถ้า ρ ของหน้าตัดน้อยกว่า ρ_b หน้าตัดจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก และถ้า ρ ของหน้าตัดมากกว่า ρ_b หน้าตัดจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก

2.3 ข้อกำหนดสำหรับตัวคูณน้ำหนัก (load factor) และตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor)

ความปลอดภัยของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีกำลังประลัย จะเน้นที่การเพิ่มส่วนขึ้นไปของน้ำหนักบรรทุกด้วยตัวคูณน้ำหนัก ปริมาณการเพิ่มส่วนของน้ำหนักบรรทุกขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักบรรทุก มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนักไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณน้ำหนักตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลังประลัย ของ ว.ส.ท. ปี 2538

$$U = 1.4D + 1.7L \tag{2.20}$$

โดยที่ U คือ กำลังที่ต้องการ(required strength)

D คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่

L คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

ถ้ามีการพิจารณาผลของแรงลมร่วมด้วยจะต้องหากำลังที่ต้องการจากค่าสูงสุดของทั้งสามสมการ คือ

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) \tag{2.21}$$

$$U = 0.9D + 1.3W$$

โดยที่ W คือ ผลของแรงลม

นอกจากตัวคูณน้ำหนักแล้ว สัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยอีกอันหนึ่งคือตัวคูณลดกำลัง ϕ ในการออกแบบนั้นกำลังประลัยของหน้าตัดหรือกำลังระบุของหน้าตัดจะต้องถูกลดลง เนื่องจากความไม่แน่นอนของกำลังของหน้าตัดที่คำนวณได้ซึ่งขึ้นกับว่าปัจจุบันมีความเข้าใจพฤติกรรมที่แท้จริงแค่ไหน เช่น ความเข้าใจในเรื่องของพฤติกรรมภายใต้โมเมนต์ดัดมีมากกว่าความเข้าใจในเรื่องพฤติกรรมภายใต้แรงเฉือน ดังนั้น ค่าตัวคูณลดกำลัง ϕ ของโมเมนต์ดัดจึงสูงกว่าตัวคูณลดกำลัง ϕ ของแรงเฉือน นอกจากนี้ค่าตัวคูณลดกำลัง ϕ นี้ยังขึ้นอยู่กับความสำคัญของโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของโครงสร้างด้วย มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดค่าตัวคูณกำลัง ϕ สำหรับกำลังชนิดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวคูณลดกำลังตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลังประลัยของ ว.ส.ท. ปี 2538

	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
1. โมเมนต์ดัดที่ไม่มีแรงตามแนวแกน	0.9	0.8
2. แรงดึงตามแนวแกนและแรงดึงตามแนวแกนที่มีโมเมนต์ดัดร่วมด้วย	0.9	0.8
3. แรงดัดตามแนวแกนและแรงอัดตามแนวแกนที่มีโมเมนต์ดัดร่วมด้วย		
- สำหรับชิ้นส่วนเหล็กเสริมปลอกเกลียว	0.75	0.65
- สำหรับชิ้นส่วนเหล็กปลอกเดี่ยวและอื่นๆ	0.70	0.60
4. แรงเฉือนและแรงบิด	0.85	0.75
5. แรงแบกทานบนคอนกรีต	0.70	0.60

2.4 การออกแบบหน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

หลักการในการออกแบบนั้นจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (required strength) โดยที่กำลังที่ออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (nominal strength) ด้วยตัวคูณกำลัง (ดูค่า ϕ ในตารางที่ 2.2) และกำลังที่ต้องการสามารถคำนวณหาได้จากสมการในตารางที่ 2.1

ดังนั้น ในการออกแบบหน้าตัดคานเพื่อโมเมนต์ดัดจะต้องออกแบบให้โมเมนต์ของหน้าตัดที่ออกแบบ ϕM_n มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับโมเมนต์ที่ต้องการ M_n โดยที่ $\phi = 0.9$ (ตารางที่ 2.2)

$$\phi M_n \geq M_n \tag{2.22}$$

$$\text{หรือ} \quad M_n \geq \frac{M_n}{\phi} \tag{2.23}$$

ในการออกแบบหน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวนั้น จะต้องออกแบบให้หน้าตัดมีสถานะประลัยเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก เนื่องจากหน้าตัดที่มีการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เป็นหน้าตัดที่เหนียว (ductile) คานเกิดการโก่งตัวได้มากก่อนการวิบัติจะเกิดขึ้น การแตกของเหล็กเสริมทำให้เกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่ในคอนกรีตซึ่งเป็นสัญญาณบอกล่วงหน้าก่อนการวิบัติ แต่สำหรับหน้าตัดคานที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักจะเป็นหน้าตัดที่เปราะ (brittle) การวิบัติจะเกิดขึ้นทันทีทันใดโดยไม่มีสัญญาณเตือนล่วงหน้า ขณะวิบัติการโก่งของคานจะน้อยเนื่องจากเหล็กเสริมยังไม่เกิดการคราก การออกแบบโดยทั่วไปต้องการให้โครงสร้างมีความเหนียวเพียงพอ จากที่ได้กล่าวมาแล้วการวิบัติชนิดต่างๆขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัด ρ ถ้าต้องการออกแบบให้หน้าตัดวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักจะต้องออกแบบให้ปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัด ρ มีค่าน้อยกว่าปริมาณเหล็กที่ทำให้เกิดการวิบัติสมดุล ρ_b มาตรฐาน ว.ส.ท. และมาตรฐาน ACI กำหนดปริมาณเหล็กสูงสุด ρ_{max} ในการออกแบบไว้เท่ากับ $0.75\rho_b$ เพื่อต้องการให้หน้าตัดมีความเหนียวเพียงพอ ดังนั้นการออกแบบจะต้องออกแบบให้ปริมาณเหล็กเสริมหน้าตัด ρ น้อยกว่า ρ_{max} หรือ $0.75\rho_b$ โดย ρ_b หาได้จากสมการที่ 2.9

$$\rho_{max} = 0.75\rho_b \tag{2.24}$$

หรือ
$$\rho_{max} = 0.75\left[\frac{0.85f'_c\beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120+f_y}\right)\right] \tag{2.25}$$

นอกจากปริมาณเหล็กสูงสุด ρ_{max} ที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบเพื่อให้หน้าตัดมีความเหนียวเพียงพอแล้ว ยังมีปริมาณเหล็กต่ำสุด ρ_{min} ที่จะต้องถูกกำหนดไว้ด้วย เนื่องจากในบางครั้งเมื่อโมเมนต์ที่ต้องการ M_n มีค่าน้อยๆจากการคำนวณจะได้ปริมาณเหล็กเสริม ρ น้อยด้วยแต่อย่างไรก็ดีถ้าปริมาณเหล็กเสริม ρ น้อยเกินไปขณะที่คานเริ่มแตกร้าวก็จะเกิดการวิบัติทันที เนื่องจากโมเมนต์ประลัยของหน้าตัด M_n มีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ที่ทำให้คานเริ่มแตกร้าว M_{cr} โดยปกติแล้วการออกแบบจะต้องการให้ M_n มีค่ามากกว่า M_{cr} เพื่อให้หลังจากคานเริ่มแตกร้าวคานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้ก่อนการวิบัติ ถ้า M_{cr} มีค่ามากกว่า M_n คานจะวิบัติทันทีทันใดหลังจากคานเริ่มแตกร้าว M_{cr} จะมีค่ามากกว่า M_n ในกรณีที่ปริมาณเหล็กเสริมมีน้อยเกินไป ค่าของ M_{cr} จะคิดจากหน้าตัดคอนกรีตล้วนๆซึ่งเป็นหน้าตัดทั้งหมด แต่ค่า M_n คิดจะหน้าตัดที่แตกร้าวและค่าของ M_n ขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริม การที่จะออกแบบให้ M_n มีค่ามากกว่า M_{cr} เพื่อป้องกันการวิบัติทันทีทันใดขณะคอนกรีตเริ่มแตกร้าวจะต้องกำหนดไม่ให้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยเกินไป มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดไว้ดังสมการที่ 2.26

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \tag{2.26}$$

มาตรฐาน ACI 318 – 99 กำหนดปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดแตกต่างไปจากมาตรฐาน ว.ส.ท. ดังสมการที่ 2.27

$$\rho_{max} = \text{ค่าที่มากของ} \begin{cases} 0.8\dfrac{\sqrt{f'_c}}{f_y} \\ \dfrac{14}{f_y} \end{cases} \quad (2.27)$$

สมการสำหรับการออกแบบหน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงสามารถหาได้จาก

จากสมดุลของแรง $C = T$

$$0.85 f'_c ab = A_s f_y = \rho b d f_y$$

$$a = \rho\left(\frac{f_y}{0.85 f'_c}\right)d \quad (2.28)$$

$$M_n = T\left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$= \rho b d f_y\left[d - \frac{\rho}{2}\left(\frac{f_y}{0.85 f'_c}\right)d\right]$$

$$= \rho f_y\left[1 - \frac{\rho}{2}\left(\frac{f_y}{0.85 f'_c}\right)\right]bd^2 \quad (2.29)$$

กำหนดให้ $m = \dfrac{f_y}{0.85 f'_c}$ (2.30)

$$R = \rho f_y\left(1 - \rho\frac{m}{2}\right) \quad (2.31)$$

ดังนั้น สมการที่ 2.29 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.32

$$M_n = Rbd^2 \quad (2.32.1)$$

หรือ $$bd^2 = \frac{M_n}{R} \quad (2.32.2)$$

สมการที่ 2.32 เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาขนาดของหน้าตัดคานเมื่อกำหนดโมเมนต์ระบุที่ต้องการ M_n และปริมาณเหล็กเสริม ρ มาให้ เมื่อรู้ค่า ρ จะสามารถหาค่า R จากสมการที่ 2.31 และจะสามารถหาขนาดของคาน bd ที่ต้องการได้ ขั้นตอนในการออกแบบจะใช้วิธีการสมมติค่า ρ ก่อนคำนวณหาค่า R จากสมการที่ 2.31 จากนั้นหาขนาดของคานได้จากสมการที่ 2.32 และในที่สุดจะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม A_s ที่ต้องการได้จาก $A_s = \rho bd$ ในตอนที่สมมติค่านั้น จะต้องสมมติให้ค่า ρ อยู่ระหว่าง ρ_{max} และ ρ_{max} ในสมการที่ 2.27 และ 2.25 ตามลำดับ ขนาดของคาน bd และพื้นที่หน้าตัดเหล็ก จะขึ้นอยู่กับการสมมติค่า ρ ถ้าสมมติค่า ρ มากจะได้พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเล็กกว่า แต่พื้นที่หน้าตัดเหล็กมากกว่าการสมมติค่า ρ น้อย

ถ้าในการออกแบบหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องการขนาดหน้าตัดคานที่เล็กที่สุดก็ให้สมมติ ρ เท่ากับ ρ_{max} และในทำนองตรงกันข้าม ถ้าต้องการให้ใช้เหล็กเสริมน้อยที่สุดก็ให้สมมติ ρ เท่ากับ ρ_{max}

ในกรณีที่กำหนดขนาดหน้าตัดคาน bd มาให้พร้อมกับโมเมนต์ระบุที่ต้องการของหน้าตัด M_n ซึ่งหมายความว่าค่า R ถูกกำหนดไว้แล้ว $R = \frac{M_n}{bd^2}$ การหาปริมาณเหล็กเสริม ρ สำหรับหน้าตัดที่กำหนดให้นี้สามารถหาได้จากสมการที่ 2.33

จากสมการที่ 2.31 $$R = \rho f_y\left(1-\frac{\rho_m}{2}\right)$$

$$R = \rho f_y - \frac{\rho^2 f_y m}{2}$$

$$\frac{\rho^2 f_y m}{2} - \rho f_y = -R$$

$$\rho^2 m^2 - 2\rho m = -\frac{2mR}{f_y}$$

$$1 - 2\rho m + \rho^2 m^2 = 1 - \frac{2mR}{f_y}$$

$$(1-\rho m)^2 = 1 - \frac{2mR}{f_y}$$

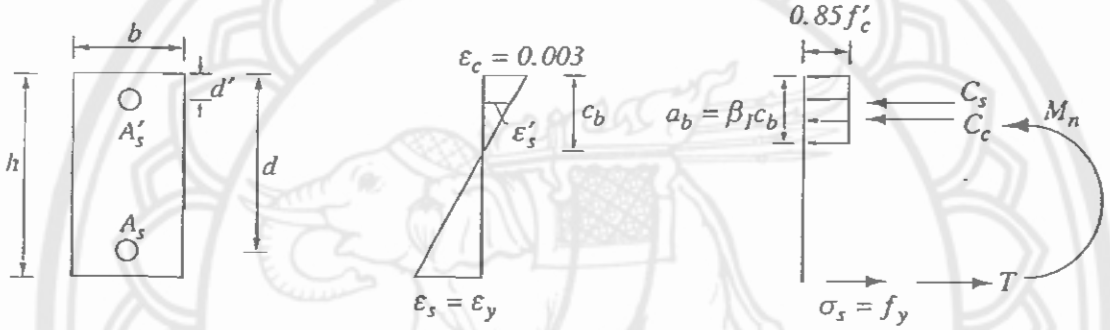
$$\rho = \frac{1}{m}\left(1-\sqrt{1-\frac{2mR}{f_y}}\right) \qquad (2.33)$$

2.5 การวิเคราะห์หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

เมื่อหน้าตัดคานถูกจำกัดขนาดและความลึก คานอาจจำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดร่วมกัน นอกจากนี้เหล็กเสริมรับแรงดึงของโมเมนต์บวกที่กึ่งกลางคานบางส่วนจะขยายต่อออกไปในบริเวณที่รองรับซึ่งเกิดโมเมนต์ลบที่ยึดเหล็กปลอกในคาน และเหล็กที่ขยายต่อออกมานี้สามารถทำหน้าที่เป็นเหล็กเสริมรับแรงอัดในการออกแบบได้

ข้อกำหนดของวิบัติของคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดจะเหมือนกับคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว คือคานจะถือว่าวิบัติเมื่อหน่วยการหดตัวในคานมีค่าเท่ากับ $\varepsilon_{cu}(=0.003)$ การวิบัติสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด การวิบัติที่จุดสมดุล การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก ชนิดของการวิบัตินี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเหล็กเสริมรับแรงดึงขณะเกิดการวิบัติ ถ้าขณะวิบัติหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 เหล็กเสริมรับแรงดึงพอดีคราก การวิบัติชนิดนี้เรียกว่าการวิบัติที่จุดสมดุล ถ้าขณะวิบัติหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 เหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากไปก่อนแล้ว การวิบัติชนิดนี้เรียกว่าการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก ถ้าขณะวิบัติหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 เหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่คราก การวิบัติชนิดนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก ชนิดของการวิบัตินี้ไม่ขึ้นกับลักษณะของเหล็กเสริมรับแรงอัดขณะเกิดการวิบัติซึ่งเหล็กเสริมรับแรงอัดจะครากหรือไม่ก็ได้

2.5.1 การวิบัติที่จุดสมดุล $(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s = \varepsilon_y, \varepsilon'_s <$ หรือ $> \varepsilon_y)$



(ก) หน้าตัดคาน (ข) การกระจายของหน่วยการยืดหดตัว (ค) แรงและหน่วยแรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.6 การวิบัติที่จุดสมดุลของหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด

การวิบัติที่จุดสมดุลเป็นการวิบัติที่เหล็กเสริมรับแรงดึงพอดีคราก $(\varepsilon_s = \varepsilon_y)$ ขณะที่คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวเท่ากับ $\varepsilon_{cu}(=0.003)$ ดังนั้นหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง σ_s จะมีค่าเท่ากับ f_y ส่วนเหล็กเสริมรับแรงอัดจะครากหรือไม่ไม่ครากก็ได้ ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดครากจะได้ว่า $\sigma'_s = f_y$ แต่ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ครากจะได้ว่า $\sigma'_s = E_s\varepsilon'_s$

จากรูปที่ 2.6 (ข) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{c_b}{d - c_b}$$

ดังนั้น

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}\right) d \qquad (2.34)$$

แทนค่า $\varepsilon_c = 0.003$ และ $\varepsilon_s = \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{2.04\times10^6}$ ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$c_b = \left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right)d \tag{2.35}$$

ขอให้สังเกตว่าสมการสำหรับการคำนวณหาความลึกของแนวแกนสะเทินของวิบัติที่จุดสมดุลจะเหมือนกัน ระหว่างหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด คือ **สมการที่** 2.35 จะเหมือนกับสมการที่ 2.5

การวิเคราะห์หน้าตัดที่วิบัติที่จุดสมดุล จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดครากและก**รณีเหล็ก**เสริมรับแรงอัดไม่คราก

กรณี 1 <u>**การวิบัติที่จุดสมดุลโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก**</u> $\left(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s = \varepsilon_y, \varepsilon_s' \geq \varepsilon_y\right)$

จากสมดุลของแรง $c_c + c_s = T$

$$0.85 f_c' \beta_1 c_b b + A_s' f_y = A_s f_y$$

$$A_s - A_s' = \frac{0.85 f_c' \beta_1 c_b b}{f_y} \tag{2.36}$$

จาก $\rho = \frac{A_s}{bd}, \rho' = \frac{A_s'}{bd}$ และแทนค่า c_b จากสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.36 จะได้ว่า

$$\rho - \rho' = \frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) \tag{2.37}$$

หรือ $$\rho = \frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) + \rho' \tag{2.38}$$

จะเห็นว่าค่าทางขวามือของสมการที่ 2.38 จะคล้ายกับค่าทางขวามือของสมการที่ 2.9 แตกต่างกัน**เพียงว่า**ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุลของหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึง**จะมีพจน์ของ** ρ' **เพิ่มเติมเข้าในสมการ** ถ้าสมมติให้ $\overline{\rho}_b = \frac{0.85 f_c' \beta_1}{f}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right)$ **ดังนั้นสมการที่** 2.38 **ซึ่งเป็นสมการสำหรับปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุลกรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดครากสามารถเขียนใหม่เป็น**

$$\rho_b = \overline{\rho}_b + \rho' \tag{2.39}$$

กรณีที่ 2 <u>การวิบัติที่จุดสมดุลโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก</u> $(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s = \varepsilon_y, \varepsilon'_s < \varepsilon_y)$

จากสมดุลของแรง $c_c + c_s = T$

$$0.85 f'_c \beta_1 c_b b + A'_s \sigma'_s = A_s f_y$$

$$A_s - \frac{A'_s \sigma'_s}{f_y} = \frac{0.85 f'_c \beta_1 c_b b}{f_y}$$

ดังนั้น

$$\rho - \rho' \frac{\sigma'_s}{f_y} = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f} \left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y} \right) \qquad (2.40)$$

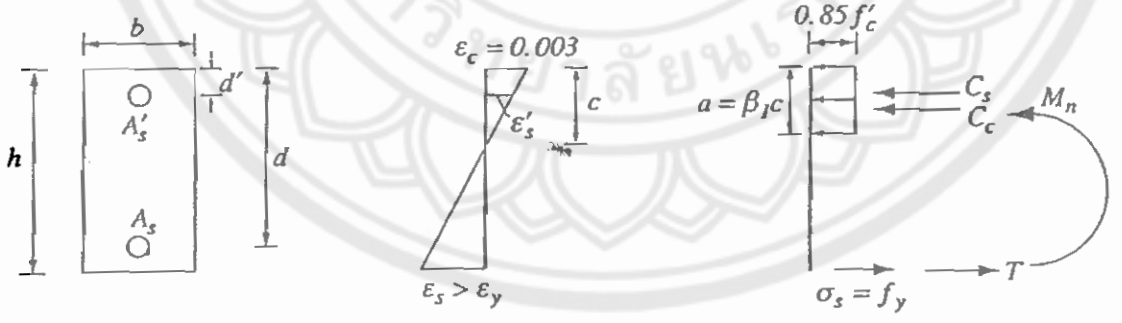
หรือ

$$\rho_b = \overline{\rho}_b + \rho' \frac{\sigma'_s}{f_y} \qquad (2.41)$$

สมการที่ 2.41 เป็นสมการสำหรับปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุล กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก สมการที่ 2.41 นี้สามารถใช้แทนสมการที่ 2.38 ซึ่งเป็นสมการสำหรับกรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดครากได้เพราะถ้าแทน σ'_s ในสมการที่ 2.41 ด้วย f_y ก็จะได้สมการที่ 2.38 เช่นกัน ขอให้สังเกตว่าสมการที่ 2.38 และสมการที่ 2.41 ไม่ได้คิดส่วนของคอนกรีตที่ถูกแทนที่โดยเหล็กเสริมรับแรงอัดในการคำนวณ

สมการที่ 2.41 เป็นสมการสำหรับคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุล ซึ่งใช้ตรวจสอบชนิดของการวิบัติได้ ถ้า ρ ของหน้าตัด $(= A_s / bd)$ มีค่าพอดีเท่ากับ ρ_b ในสมการที่ 2.41 จะเป็นการวิบัติที่จุดสมดุล ถ้า ρ น้อยกว่า ρ_b จะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักและถ้า ρ มากกว่า ρ_b จะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก

<u>2.5.2 การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก</u>



(ก) หน้าตัดคาน (ข) การกระจายของหน่วยการยืดหดตัว (ค) แรงและการกระจายของหน่วยแรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.7 การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักของหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด

การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก เป็นการวิบัติที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะเกิดการครากไปก่อนแล้ว ขณะที่คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ $\varepsilon_{cu} = (0.003)$ ดังนั้นหน่วยรับแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง σ_s จะมีค่าเท่ากับ f_y ส่วนเหล็กเสริมรับแรงอัดจะครากหรือไม่ก็ได้

ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดครากจะได้ว่า $\sigma'_s = f_y$ แต่ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ครากจะได้ว่า $\sigma'_s = E_s\varepsilon'_s$ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 <u>การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก</u> $(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s = \varepsilon_y, \varepsilon'_s \geq \varepsilon_y)$

จากสมดุลของแรง $C_c + C_s = T$

$$0.85f'_c\beta_1 c_b b + A'_s f_y = A_s f_y$$

$$c = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b\beta_1} \qquad (2.42)$$

คิดโมเมนต์รอบเหล็กเสริมรับแรงดึงจะสามารถหากำลังระบุในการรับโมเมนต์ M_n ได้จาก

$$M_n = C_c\left(d - \frac{a}{2}\right) + C_s(d - d')$$

$$= 0.85f'_c\beta_1 cb\left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + A'_s f_y(d - d') \qquad (2.43)$$

กรณีที่ 2 <u>การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ครากโดย</u> $(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s > \varepsilon_y, \varepsilon'_s < \varepsilon_y)$

จากสมดุลของแรง $C_c + C_s = T$

$$0.85f'_c\beta_1 cb + A'_s E_s\varepsilon'_s = A_s f_y \qquad (2.44)$$

จากรูปที่ 2.7 (ข) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\varepsilon'_s}{0.003} = \frac{c - d'}{c}$$

$$\varepsilon'_s = 0.003\left(\frac{c - d'}{c}\right) \qquad (2.45)$$

แทนค่า ε'_s จากสมการที่ 2.45 ลงในสมการที่ 2.44 จะได้ว่า

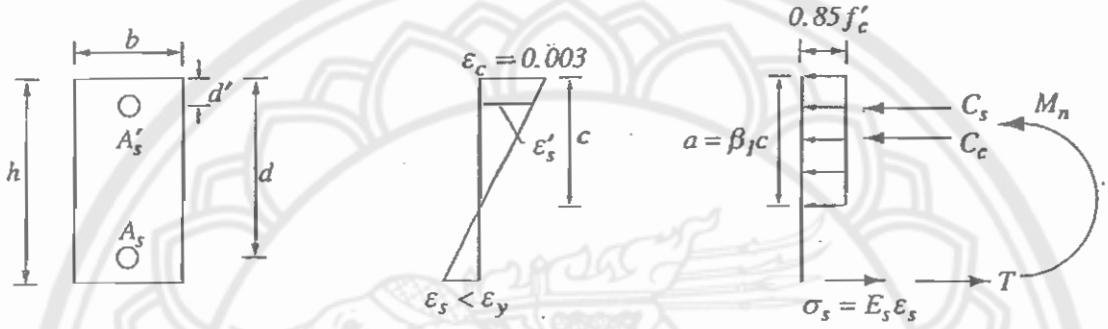
$$0.85f'_c\beta_1 cb + A'_s E_s\varepsilon'_s\left[0.003\left(\frac{c - d'}{c}\right)\right] = A_s f_y \qquad (2.46)$$

แก้สมการที่ 2.46 จะได้ว่าค่าความลึกของแนวแกนสะเทิน c และสามารถหาค่า ε_s' ได้จากสมการที่ 2.45 ดังนั้น กำลังระนุในการรับโมเมนต์หาได้จากคิดโมเมนต์รอบเหล็กเสริมรับแรงดึง

$$M_n = C_c\left(d-\frac{a}{2}\right)+C_s(d-d')$$

$$= 0.85f_c'\beta_1 cb\left(d-\frac{\beta_1 c}{2}\right)+A_s'E_s\varepsilon_s'(d-d') \qquad (2.47)$$

2.5.3 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก $\left(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s < \varepsilon_y, \varepsilon_s' < \text{หรือ} > \varepsilon_y\right)$



(ก) หน้าตัดคาน (ข) การกระจายของหน่วยการยืดหดตัว (ค) แรงและการกระจายของหน่วย แรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.8 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักของหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด

การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักเป็นการวิบัติที่เหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่เกิดการคราก ขณะที่คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ $\varepsilon_{cu} = (0.003)$ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง σ_s จะต้องคำนวณจาก $\sigma_s = E_s\varepsilon_s$ ส่วนเหล็กเสริมรับแรงอัดจะครากหรือไม่ก็ได้ ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดครากจะได้ว่า $\sigma_s' = f_y$ แต่ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ครากจะได้ว่า $\sigma_s' = E_s\varepsilon_s'$ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 <u>การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก</u> $\left(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s < \varepsilon_y, \varepsilon_s' \geq \varepsilon_y\right)$

จากสมดุลของแรง $C_c + C_s = T$

$$0.85f_c'\beta_1 cb + A_s'f_y = A_sE_s\varepsilon_s \qquad (2.48)$$

จากรูปที่ 2.8 (ข) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{\varepsilon_s'}{0.003} = \frac{d-c}{c}$$

$$\varepsilon_s = 0.003\left(\frac{d-c}{c}\right) \qquad (2.49)$$

แทนค่า ε_s จากสมการที่ 2.49 ลงในสมการที่ 2.48 จะได้ว่า

$$0.85f'_c\beta_1 cb + A'_s f_y = A_s E_s\left[0.003\left(\frac{d-c}{c}\right)\right] \quad (2.50)$$

แก้สมการที่ 2.50 จะได้ค่า c และสามารถหาค่า ε_s ได้จากสมการที่ 2.49 กำลังระบุในการรับโมเมนต์ M_n หาได้จากคิดโมเมนต์รอบเหล็กเสริมรับแรงดึง

$$M_n = C_c\left(d-\frac{a}{2}\right)+C_s(d-d')$$

$$= 0.85f'_c\beta_1 cb\left(d-\frac{\beta_1 c}{2}\right)+A'_s f_y(d-d') \quad (2.51)$$

กรณีที่ 2 <u>การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก</u> $\left(\varepsilon_c = 0.003, \varepsilon_s < \varepsilon_y, \varepsilon'_s < \varepsilon_y\right)$

จากสมดุลของแรง $C_c + C_s = T$

$$0.85f'_c\beta_1 cb + A'_s E_s \varepsilon'_s = A_s E_s \varepsilon_s \quad (2.52)$$

จากสามเหลี่ยมคล้าย $\varepsilon'_s = 0.003\left(\frac{c-d'}{c}\right)$ และ $\varepsilon_s = 0.003\left(\frac{d-c}{c}\right)$ แทนค่าลงในสมการที่ 2.52 จะได้ว่า

$$0.85f'_c\beta_1 cb + A'_s E_s\left[0.003\left(\frac{c-d'}{c}\right)\right] = A_s E_s\left[0.003\left(\frac{d-c}{c}\right)\right] \quad (2.53)$$

แก้สมการที่ 2.53 จะได้ค่า c สามารถหาค่า ε'_s และ ε_s ได้ กำลังระบุในการรับโมเมนต์ M_n หาได้จากคิดโมเมนต์รอบเหล็กเสริมรับแรงดึง

$$M_n = C_c\left(d-\frac{a}{2}\right)+C_s(d-d')$$

$$= 0.85f'_c\beta_1 cb\left(d-\frac{\beta_1 c}{2}\right)+A'_s E_s \varepsilon'_s(d-d') \quad (2.54)$$

ในการวิเคราะห์หน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดจะต้องรู้ก่อนว่าหน้าตัดเป็นหน้าตัดที่เกิดการวิบัติชิดใดเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่ การตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดจะตรวจสอบจากค่าของ ε_s และ ε'_s ตามลำดับ โดยเทียบกับ $\varepsilon_y\left(=f_y/E_s\right)$ ค่าของ ε_s และ ε'_s สามารถหาได้จากสมการที่ 2.49 และสมการที่ 2.45 ตามลำดับ การวิเคราะห์หน้าตัดคานนี้จะเกิด

การวิบัติได้ 3 ชนิด คือ การวิบัติที่จุดสมดุล การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักและการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก การวิบัติแต่ละชนิดยังแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่เหล็กเสริมรับแรงอัดครากและไม่คราก การวิเคราะห์จึงมีทั้งหมด 6 กรณี แต่อย่างไรก็ตาม การวิบัติที่จุดสมดุลเป็นการวิบัติที่เป็นเส้นแบ่งระหว่างการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักและแรงอัดเป็นหลัก การที่จะเกิดการวิบัติที่จุดสมดุลนั้นปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงจะต้องพอดีเท่ากับสมการที่ 2.41 ซึ่งในความเป็นจริงการเลือกหน้าตัดคานและขนาดของเหล็กเสริมจะต้องถูกกำหนดโดยหน้าตัดที่มีใช้อยู่ ในทางปฏิบัติการวิบัติที่จุดสมดุลจึงเป็นได้ยากมาก

ดังนั้นการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติจะมีเพียงแค่ 4 กรณีเท่านั้นคือ 2 กรณีจากการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักและอีก 2 กรณีจากการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การวิเคราะห์จะต้องรู้ก่อนว่าจะเป็นกรณีใดในกรณีต่อไปนี้

1. การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก โดยที่เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก
2. การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก โดยที่เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก
3. การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก โดยที่เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก
4. การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก โดยที่เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก

การตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด โดยตรวจสอบจากค่าของ ε_s และ ε'_s ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.49 และสมการที่ 2.45 นั้น จะเห็นว่าค่าของ ε_s และ ε'_s ขึ้นอยู่กับค่า c และค่า c นี้ยังไม่รู้ค่าในตอนเริ่มต้น วิธีการวิเคราะห์วิธีหนึ่งคือ สมมติกรณีการวิบัติเป็นกรณีหนึ่งในสี่กรณีนั้นก่อนซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่า c ได้ จากนั้นตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมว่าเป็นไปตาม กรณีที่สมมติหรือไม่ ถ้าเป็นไปตามที่สมมติแสดงว่าการสมมติถูกต้อง ถ้าไม่เป็นไปตามที่สมมติแสดงว่าไม่ถูกต้องให้สมมติใหม่ตามที่ตรวจสอบได้

2.6 สมการสำหรับตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สมการการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับว่าการวิบัติอยู่ในกรณีใดใน 4 กรณี จากนั้นสามารถคำนวณหาค่า c และตรวจสอบการครากของเหล็กได้ว่าเป็นไปตามที่สมมติหรือไม่ วิธีการวิเคราะห์อีกวิธีหนึ่งคือพยายามหาสมการเพื่อตรวจสอบให้ได้ก่อน ว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

การหาสมการเพื่อตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด อาจทำได้โดยการตรวจสอบค่าของ ε_s และ ε'_s โดยอ้างอิงกับการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลักและเหล็กเสริมรับแรงอัดครากดังนั้น

จากสมการที่ 2.42

$$c = \frac{(A_s - A'_s)}{0.85 f'_c b \beta_1} = \frac{(\rho - \rho')f_y d}{0.85 f'_c \beta_1} \qquad (2.55)$$

ถ้าเหล็กเสริมรับแรงดึงคราก

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &\geq \varepsilon_y \\ 0.003\left(\frac{d-c}{c}\right) &\geq \frac{f_y}{2.04\times10^6} \\ c &\leq \frac{6{,}120d}{6{,}120 + f_y} \end{aligned} \qquad (2.56)$$

แทนค่า c จากสมการที่ 2.55 ลงในสมการที่ 2.56 จะได้ว่า

$$\frac{(\rho-\rho')f_y d}{0.85f'_c\beta_1} \leq \frac{6{,}120d}{6{,}120+f_y}$$

$$\rho-\rho' \leq \frac{0.85f'_c\beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120+f_y}\right) \qquad (2.57)$$

สมการที่ 2.57 เป็นสมการที่ใช้ตรวจสอบเงื่อนไขของการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง ถ้าสมการที่ 2.57 นี้เป็นจริงจะได้ว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงคราก ขอให้สังเกตว่าสมการที่ 2.57 นี้เป็นสมการเดียวกับสมการที่ 2.38 ซึ่งเป็นสมการสำหรับหาปริมาณเหล็กที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุล ถ้าค่าของ $\rho-\rho'$ น้อยกว่าค่าที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดสมดุล การวิบัติจะเกิดเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักซึ่งเหล็กเสริมรับแรงดึงจะคราก ดังแสดงในสมการที่ 2.57

ถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

$$\varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$$

$$0.003\left(\frac{c-d'}{c}\right) \geq \frac{f_y}{2.04\times10^6}$$

$$1-\frac{d'}{c} \geq \frac{f_y}{6{,}120}$$

$$c \geq \frac{6{,}120d'}{6{,}120-f_y} \qquad (2$$

แทนค่า c จากสมการที่ 2.55 ลงในสมการที่ 2.58 จะได้ว่า

$$\frac{(\rho-\rho')f_y d}{0.85f'_c\beta_1} \geq \frac{6{,}120d'}{6{,}120-f_y}$$

$$\rho-\rho' \leq \frac{0.85f'_c\beta_1}{f_y}\left(\frac{d'}{d}\right)\left(\frac{6{,}120}{6{,}120-f_y}\right) \qquad (2.59)$$

สมการที่ 2.59 เป็นสมการที่ใช้ตรวจสอบเงื่อนไขของการครากของ แสริมรับแรงอัด ถ้าสมการที่ 2.59 นี้เป็นจริงจะได้ว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก อย่างไรก็ดีสมการที่ใช้ตร การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด คือสมการที่ 2.57 และสมการที่ 2.59 นี้มาจากกา งอิงกับกรณีการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก โดยเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก สมการสำหรับการตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมทั้งสองสมการนี้ไม่ใช่สมการตรวจสอบที่ถูกต้องอย่างแท้จริง อาจผิดพลาดได้บ้างแต่มีโอกาสน้อยมากซึ่งจะเกิดในกรณีคานที่มีความลึกน้อย ๆ เท่านั้น

แต่อย่างไรก็ดีเมื่อกำหนดได้ค่า c ออกมาแล้วควรตรวจสอบการคราดของเหล็กเสริมด้วยสมการที่ 2.45 และสมการที่ 2.49 อีกครั้งหนึ่ง

$$\rho - \rho' = \frac{A_s}{bd} - \frac{A'_s}{bd}$$

จากสมการที่ 2.57 ตรวจสอบการคราดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$$\rho - \rho' \leq \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right)$$

จากสมการที่ 2.59 ตรวจสอบการคราดของเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{d'}{d}\right)\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right)$$

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ให้เริ่มต้นด้วยการสมมติว่าการวิบัติเป็นชนิดแรงดึงเป็นหลัก โดยเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก

2.7 ข้อกำหนดในการออกแบบหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

ในการออกแบบหน้าตัดคานเพื่อรับโมเมนต์ M_n ที่กำหนดมาให้นั้น ถ้าไม่มีข้อจำกัดทางด้านขนาดของหน้าตัดคาน การออกแบบคานสามารถออกแบบให้เป็นหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวหรือเป็นหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กเสริมแรงดึงและแรงอัดก็ได้ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของคาน ถ้าหน้าตัดคานที่เลือกมีขนาดเล็ก หรือในบางครั้งขนาดของคานอาจถูกจำกัดโดยองค์ประกอบทางด้านสถาปัตย์ โมเมนต์ M_n ของหน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกินค่าของโมเมนต์ M_n เมื่อ $\rho = 0.75\rho_b$ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการออกแบบหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กรับแรงดึง เพื่อความเหนียวของหน้าตัดขณะวิบัติดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในการออกแบบ ถ้ากำหนดขนาดของคานมาให้เพื่อรับโมเมนต์ M_n ที่ต้องการ ถ้าโมเมนต์ M_n ที่ต้องการมีค่ามากกว่า M_n ที่คำนวณได้จาก $\rho = 0.75\rho_b$ แล้ว จะต้องออกแบบ หน้าตัดให้มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

มาตรฐาน ว.ส.ท. และมาตรฐาน ACI กำหนดปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงในหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.75 ของปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงของการวิบัติที่จุดสมดุลเหมือนกับในหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงกล่าวคือ

$$\rho \leq 0.75\rho_b \qquad (2.60)$$

หรือ

$$\rho_{max} = 0.75\rho_b \qquad (2.61)$$

จากสมการที่ 2.39 สำหรับการวิบัติที่จุดสมดุลโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดครากจะได้ว่า

$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) + \rho' \qquad (2.62)$$

จากสมการที่ 2.41 สำหรับการวิบัติที่จุดสมดุลโดยเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ครากจะได้ว่า

$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) + \rho'\frac{\sigma'_s}{f_y} \qquad (2.63)$$

จากสมการที่ 2.62 และสมการที่ 2.63 สามารถเขียนเป็นสมการเดียวกันโดยใช้ สมการที่ 2.63 อย่างเดียว เพราะเป็นกรณีที่เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก การแทนค่า σ'_s ด้วย f_y ในสมการที่ 2.63 จะได้สมการที่ 2.62 เหมือนกัน ดังนั้นจากสมการที่ 2.61 และ 2.63 จะได้ว่า

$$\rho_{max} = 0.75\left[\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) + \rho'\frac{\sigma'_s}{f_y}\right] \qquad (2.64)$$

หรือ

$$\rho_{max} = 0.75\left(\overline{\rho}_b + \rho'\frac{\sigma'_s}{f_y}\right) \qquad (2.65)$$

มาตรฐาน ว.ส.ท. และมาตรฐาน ACI เสนอว่าเพื่อความสะดวกในการออกแบบ การคูณด้วย 0.75 ในสมการที่ 2.65 ในพจน์ของเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ต้องคูณด้วย 0.75 ก็ได้ ดังนั้น

$$\rho_{max} = 0.75\overline{\rho}_b + \rho'\frac{\sigma'_s}{f_y} \qquad (2.66)$$

โดยที่

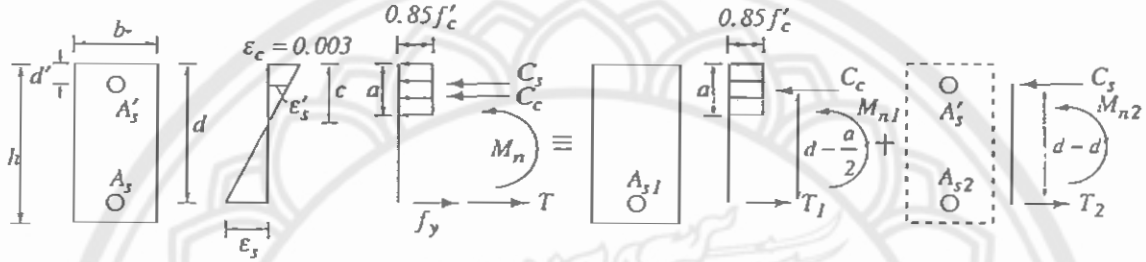
$$\overline{\rho}_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right)$$

สำหรับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดในหน้าตัดคานที่มีทั้งเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด ให้ใช้เหมือนในหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว คือ

$$\rho_{max} = \frac{14}{f_y} \qquad (2.67)$$

ในการออกแบบตามข้อกำหนดจะทำให้หน้าตัดวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก เหล็กเสริมรับแรงดึงคราก ขณะที่คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.003 การออกแบบจะทำได้ง่ายมากยิ่งขึ้นถ้าเหล็กเสริมรับแรงอัดเกิดการคราดก้วยขณะวิบัติ การออกแบบควรออกแบบให้ปริมาณเหล็กเสริมสอดคล้องกับสมการที่ 2.59 ซึ่งปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัดคราดคือ

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{d'}{d}\right)\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 - f_y}\right) \qquad (2.68)$$



(ก) คานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด (ข) หน้าตัดในส่วนของ M_1 (ข) หน้าตัดในส่วนของ M_2

รูปที่ 2.9 การแบ่งหน้าตัดสำหรับการออกแบบหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

2.8 วิธีการออกแบบหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

วิธีการออกแบบหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดนี้ จะใช้วิธีการแบ่งหน้าตัดออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่จะรับโมเมนต์ M_{n1} ซึ่งมีลักษณะเป็นหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงพื้นที่หน้าตัด A_{s1} และส่วนที่จะรับโมเมนต์ M_{n2} ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่รับโดยโมเมนต์คู่ควบของเหล็กเสริมรับแรงดึงพื้นที่หน้าตัด A_{s2} และเหล็กเสริมรับแรงอัดพื้นที่หน้าตัด A'_s ดังนั้น

กำลังระบุในการรับโมเมนต์ $M_n = M_{n1} + M_{n2}$ (2.69)

พิจารณาส่วนของ M_{n1}

จากสมดุลของแรง $C_c = T_1$

$$0.85 f'_c ab = A_{s1} f_y$$

$$a = \frac{A_{s1} f_y}{0.85 f'_c b} \qquad (2.70)$$

$$M_{n1} = T_1\left(d - \frac{a}{2}\right)$$

5040546
16 ก.ค. 2550
สำนักหอสมุด
QA 76.76 .A65 ร1940 2550

แทนค่า a จะได้ว่า $M_{n1} = A_{s1} f_y \left[d - \frac{A_{s1} f_y}{2(0.85 f'_c b)} \right]$

พิจารณาส่วนของ M_{n2}

จากสมการที่ 2.69 $M_{n2} = M_n - M_{n1}$

จากสมดุลของแรง $C_2 = T_2$

$$A'_s \sigma'_s = A_{s2} f_y \tag{2.72}$$

ถ้าออกแบบให้เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก จะได้ว่า $\sigma'_s = f_y$ ดังนั้น

$$A'_s = A_{s2} \tag{2.73}$$

โดยที่ค่าของ A'_s และ A_{s2} สามารถหาได้จาก

$$A'_s = A_{s2} = \frac{M_{n2}}{f_y (d - d')} \tag{2.74}$$

ในการออกแบบถ้ากำหนดขนาดคานมาให้พร้อมกับโมเมนต์ M_n ที่ต้องการจะต้องตรวจสอบก่อนว่าหน้าตัดที่กำหนดมาให้นี้ ถ้าออกแบบให้เป็นหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงจะสามารถรับ M_n ที่ต้องการได้หรือไม่ โดยตรวจสอบค่าของโมเมนต์ $M_{n,\max}$ ที่รับได้เมื่อ $\rho = 0.75\rho_b$ ถ้า $M_{n,\max}$ มากกว่า M_n ที่ต้องการก็ให้ออกแบบเป็นหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง แต่ถ้า $M_{n,\max}$ น้อยกว่า M_n ที่ต้องการต้องออกแบบเป็นหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด $M_{n,\max}$ สามารถหาได้จาก

จากสมดุลของแรง $0.85 f'_c ab = A_s f_y = 0.75\rho_b b d f_y$

$$a = \frac{0.75\rho_b d f_y}{0.85 f'_c} \tag{2.75}$$

ดังนั้น $M_{n,\max} = T\left(d - \frac{a}{2}\right)$

$$= 0.75\rho_b b d f_y \left[d - \frac{0.75\rho_b d f_y}{2(0.85 f'_c)} \right] \tag{2.76}$$

เมื่อตรวจสอบแล้ว $M_{n,\max}$ มีค่าน้อย M_n ที่ต้องการจะต้องออกแบบเป็นหน้าตาที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด และถ้าจะออกแบบให้เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก้วย ดังนั้นเงื่อนไขในการออกแบบจะต้องเป็นไปตามสมการที่ 4.68 และ ρ จากมาตรฐาน วสท. ต้องไม่เกิน $\rho_{\max}$ ในสมการที่ 2.66 โดยที่แทนค่า σ_s' ด้วย f_y

ดังนั้น $\rho \leq 0.75\overline{\rho}_b + \rho'$

หรือ $\rho - \rho' \leq 0.75\overline{\rho}$

หรือ $$\rho - \rho' \leq 0.75\left[\frac{0.85f_c'\beta_1}{f_y}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120+f_y}\right)\right] \qquad (2.77)$$

สมการที่ 2.77 เป็นสมการสำหรับความเหนียวของหน้าตัดขณะวิบัติ โดยให้วิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักซึ่งเหล็กเสริมรับแรงดึงคราก สมการที่ 2.68 เป็นสมการสำหรับการครากของเหล็กเสริมรับแรงอัดขณะวิบัติ ดังนั้นในการออกแบบจึงควรสมมติค่าของ $\rho - \rho'$ ให้เป็นไปตามสมการที่ 2.77 และสมการที่ 2.68 เนื่องจาก $A_{s2} = A_s'$ (จากสมการที่ 2.73) ดังนั้น $\rho - \rho'$ จะมีค่าเท่ากับ $\rho_1 = \frac{A_{s1}}{bd}$ ซึ่งพิสูจน์ได้ดังนี้

$$A_{s1} = A_s - A_{s2} = A_s - A_s'$$

ดังนั้น $$\rho_1 = \rho - \rho' \qquad (2.78)$$

ขั้นตอนในการออกแบบหน้าตัดที่มีทั้งเหล็กเสริมแรงดึงและแรงอัด

1. สมมติค่าของ ρ_1 ให้เป็นไปตามสมการที่ 2.77 และสมการที่ 2.68
2. หาค่า A_{s1} จาก $A_{s1} = \rho_1 bd$
3. หาค่า M_{n1} จากสมการที่ 2.71
4. หาค่า M_{n2} จาก $M_{n2} = M_n - M_{n1}$
5. หาค่า A_{s2} และ A_s' ได้จากสมการที่ 2.74