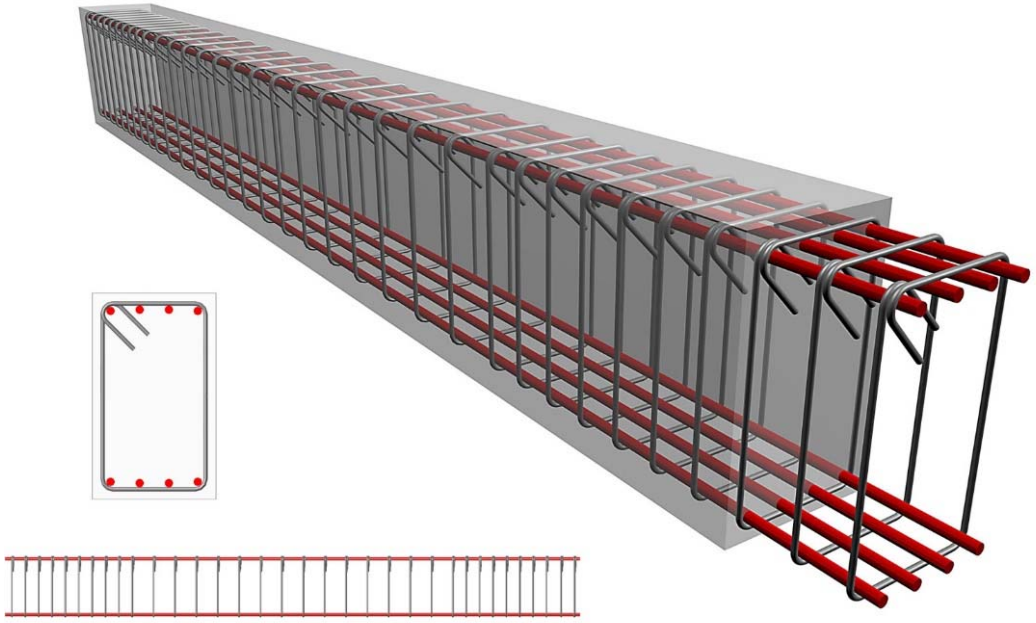
3

Reinforced Concrete Design II

Flexural Design of Beam Sections 2



- Single RC Beam Design
- Reinforcement Locations
- Practical Design Example
- Double RC Beam Design

Mongkol JIRAVACHARADET

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INSTITUTE OF ENGINEERING

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

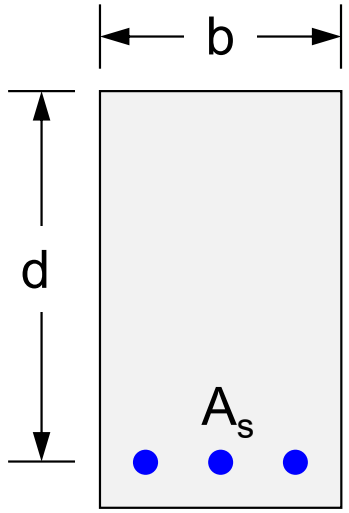
การออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงดัดที่เสริมเพียงเหล็กรับแรงดึง

ออกแบบ b, d และ A_s จากโมเมนต์ดัดที่ต้องการ M_u และคุณสมบัติของวัสดุ f'_c และ f_y การออกแบบมีสองแนวทางคือ

(1) ขั้นตอนการออกแบบโดยเลือกปริมาณเหล็กก่อนแล้วจัดขนาดคาน

- เลือกอัตราส่วนเหล็กเสริม ρ ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$ ออกแบบโดยเผื่อความปลอดภัยมากหน่อยก็ใช้ที่ $0.50\rho_{max}$
- คำนวณสัมประสิทธิ์ต้านทานโมเมนต์ดัด R_n จากอัตราส่วนเหล็กเสริมที่เลือก

$$R_n = \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f'_c}\right)$$



- พิจารณาขนาดหน้าตัดที่ต้องการจาก

$$bd^2 = \frac{M_n}{R_n} = \frac{M_u}{\phi R_n}$$

การออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงดัดที่เสริมเพียงเหล็กรับแรงดึง

(2) ขั้นตอนการออกแบบโดยเลือกขนาดคานก่อนแล้วคำนวณปริมาณเหล็กที่ต้องการ

- เลือกขนาดคาน b และ d โดยเริ่มจากเลือกความลึกทั้งหมด h แล้วคำนวณ d โดยการลบระยะหุ้มคอนกรีตออก
- คำนวณสัมประสิทธิ์ต้านทานโมเมนต์ดัด R_n จากอัตราส่วนเหล็กเสริมที่เลือก

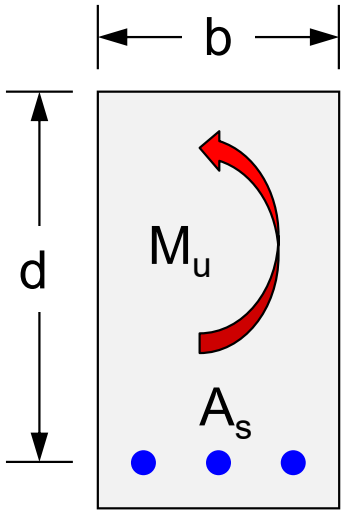
$$R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \frac{M_u}{\phi bd^2}$$

- คำนวณอัตราส่วนเหล็กเสริมจาก $\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right)$
- ตรวจสอบอัตราส่วนเหล็กเสริมว่า $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$ หรือไม่?
- เลือกเหล็กเสริมและตรวจสอบกำลังของหน้าตัดเพื่อให้แน่ใจว่า $\phi M_n \geq M_u$

ตัวอย่างที่ 3.5 ออกแบบหน้าตัดคานเสริมเหล็กเดี่ยวเมื่อรู้ค่า b และ h

ออกแบบเหล็กเสริมเมื่อหน้าตัดคานถูกกำหนดให้มีความกว้าง b = 30 ซม. และ h = 50 ซม. เพื่อรับโมเมนต์ประลัย M_u = 20 ตัน-เมตร กำลังอัดคอนกรีต f'_c = 240 กก./ซม.^{2} และ f_y = 4,000 กก. /ซม.^{2}

วิธีทำ



1. พิจารณาค่าจำกัดของอัตราส่วนเสริมเหล็ก ρ

จากตารางที่ ก.3 ρ_{max} = 0.0197

$$\rho_{min} = 14/4{,}000 = 0.0035$$

2. อัตราส่วนเสริมเหล็ก ρ ที่ต้องการ

สมมุติความลึกประสิทธิผล d = 50 – 6 = 44 ซม.

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{20 \times 10^5}{0.9 \times 30 \times 44^2} = 38.26 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right)$$

$$= \frac{0.85\times 240}{4{,}000}\left(1-\sqrt{1-\frac{2\times 38.26}{0.85\times 240}}\right) = 0.0106 \qquad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

OK

3. คำนวณ $\mathbf{A_s}$ ที่ต้องการและเลือกใช้เหล็กเสริม

$$A_s = \rho b d = 0.0106\times 30\times 44 = 13.99\ cm^2$$

เลือกเหล็กเสริม **3DB25** (A_s = 14.73 ซม.^{2})

4. ตรวจสอบการออกแบบ

$$T = A_s f_y = (14.73)(4.0) = 58.92 \text{ ตัน}$$

$$a = \frac{T}{0.85f'_c b} = \frac{58.92}{0.85(0.24)(30)} = 9.63$$

$$M_n = T\left(d-\frac{a}{2}\right) = 58.92\left(44-9.63/2\right)/100$$

= 23.1 ตัน-เมตร > [M_u/ϕ = 20/0.9 = 22.2 ตัน-เมตร]

OK

หรือใช้สูตรคำนวณกำลังโมเมนต์ดัดโดยตรง

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f'_c}\right)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{14.73}{30 \times 44} = 0.01116 \qquad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

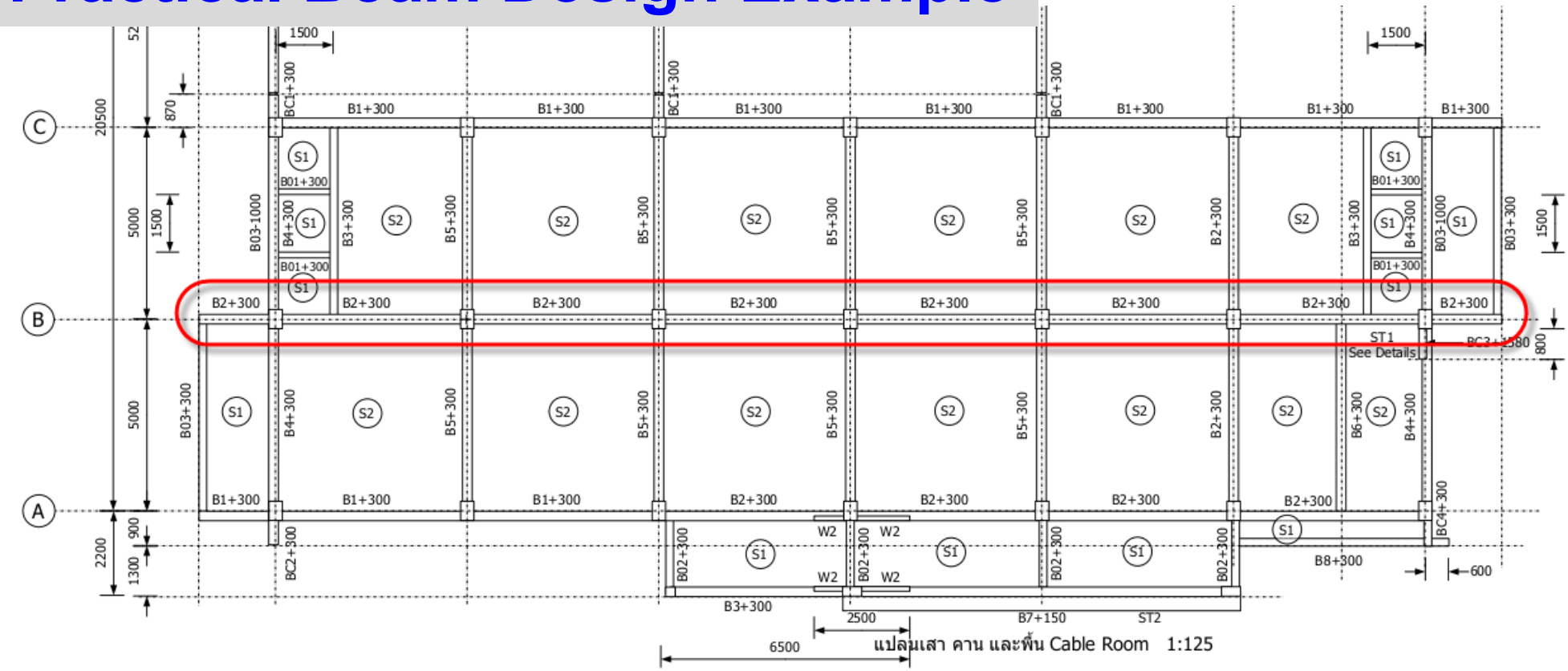
OK

$$M_n = 0.01116 \times 4.0 \times 30 \times 44^2 \left(1 - \frac{0.01116 \times 4.0}{1.7 \times 0.24}\right) / 100$$

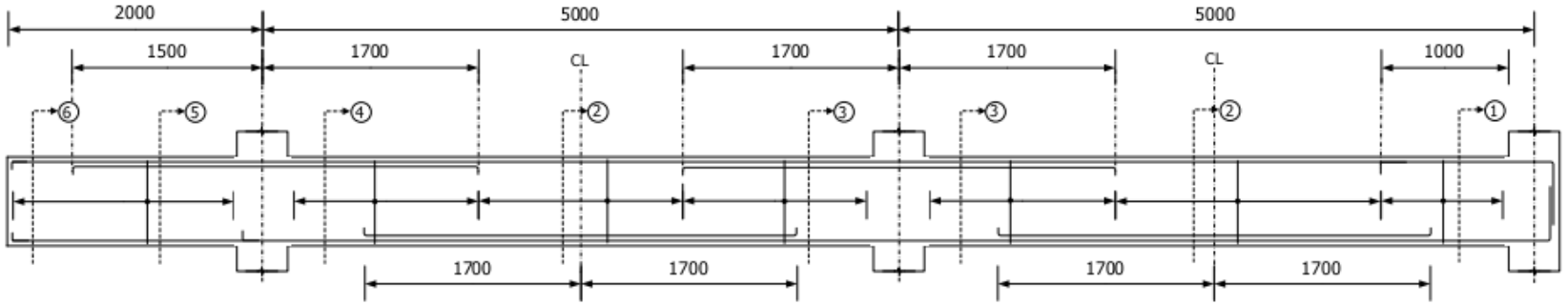
$$= 23.1 \text{ ตัน-เมตร} > [\, M_u/\phi = 20/0.9 = 22.2 \text{ ตัน-เมตร} \,]$$

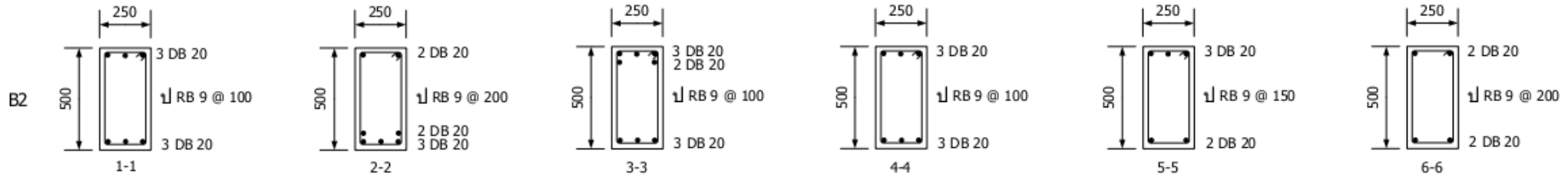
OK

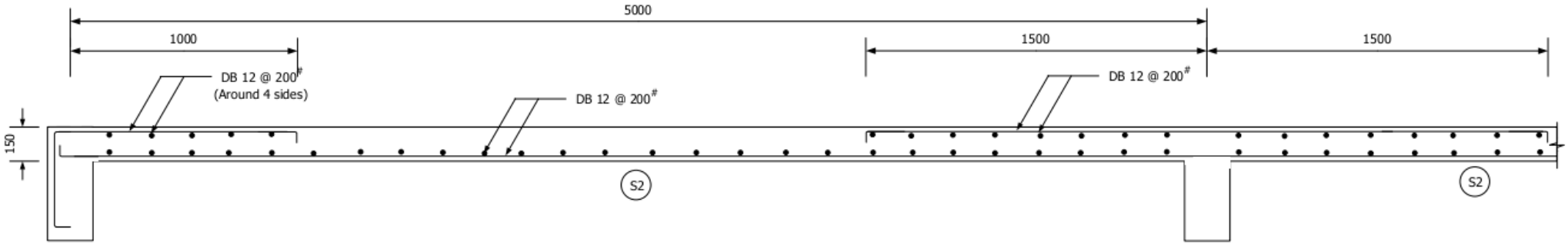
Practical Beam Design Example



แปลนเสา คาน และพื้น Cable Room 1:125

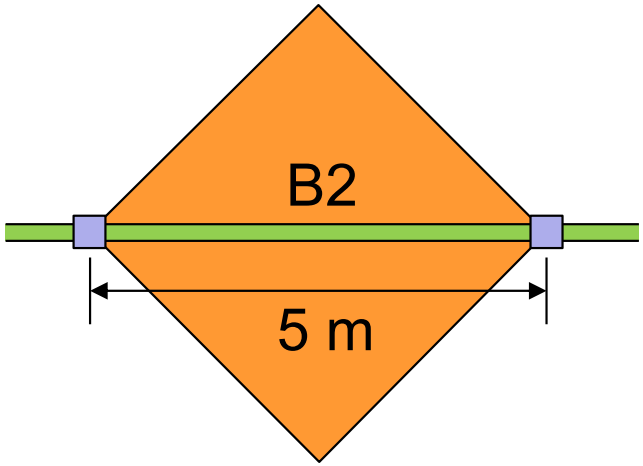






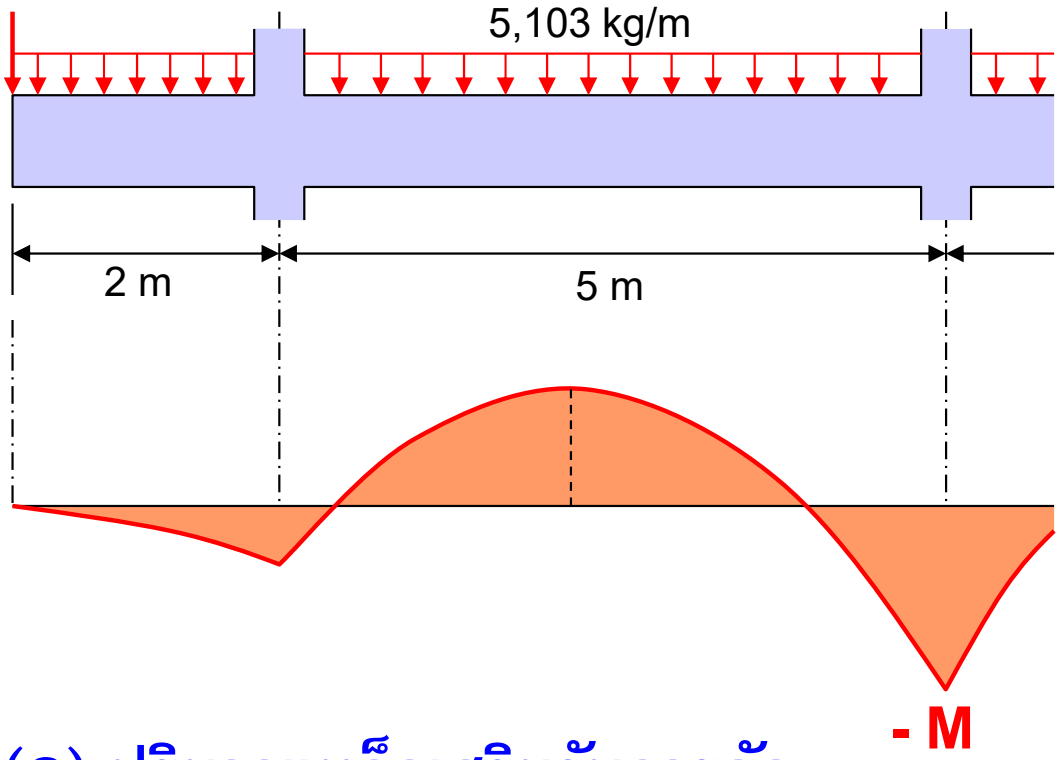
วิธีทำ (1) คำนวณน้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักพื้น S2 (DL) = 0.15 × 2400	=	360	kg/m^2
วัสดุผิวพื้น (SDL)	=	100	kg/m^2
น้ำหนักบรรทุกจร (LL)	=	300	kg/m^2
น้ำหนักประลัย w_u = 1.4(460)+1.7(300)	=	1,154	kg/m^2



น้ำหนักบรรทุกบนคาน B2:

น้ำหนักจากพื้น = 2×1,154×5/3	=	3,843	kg/m
น้ำหนักคาน = 1.4×0.3×0.5×2,400	=	504	kg/m
น้ำหนักผนัง = 1.4×3×180	=	756	kg/m
รวมน้ำหนักทั้งหมด	=	5,103	kg/m



โมเมนต์ลบที่จุดรองรับในตัวแรก:

$$M^{-}_{max} = \frac{1}{10} \times 5{,}103 \times 5^2$$

$$= 12{,}758 \text{ kg-m}$$

(2) ปริมาณเหล็กเสริมรับการดัด

USE DB20: $d = 40 - 4 - 2.0/2 - 0.9 = 44$ cm

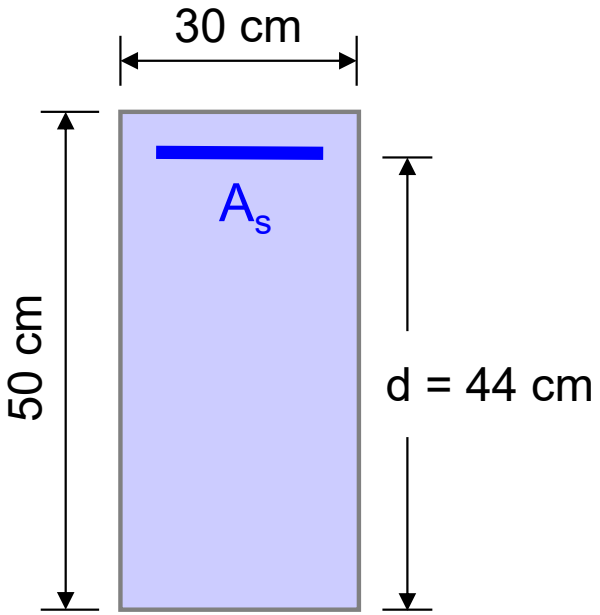
$$\rho_{min} = 14 / f_y = 14 / 4{,}000 = 0.0035$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \times 240}{4{,}000}(0.85)\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + 4{,}000}\right) = 0.0262$$

$$\rho_{max} = 0.75\ \rho_b = 0.75(0.0262) = 0.0197$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c} = \frac{4{,}000}{0.85 \times 240} = 19.61$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{12{,}758 \times 100}{0.9 \times 30 \times 44^2} = 24.41 \ \text{kg/cm}^2$$



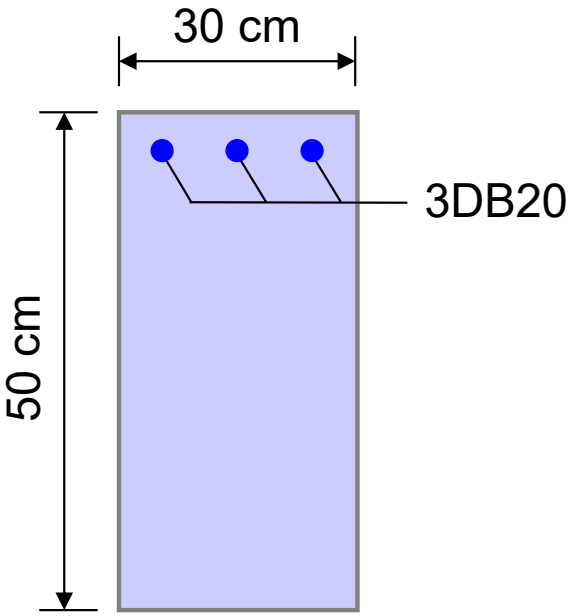
ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ:

$$\rho = \frac{1}{19.61}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 19.61 \times 24.41}{4{,}000}}\right) = 0.00652$$

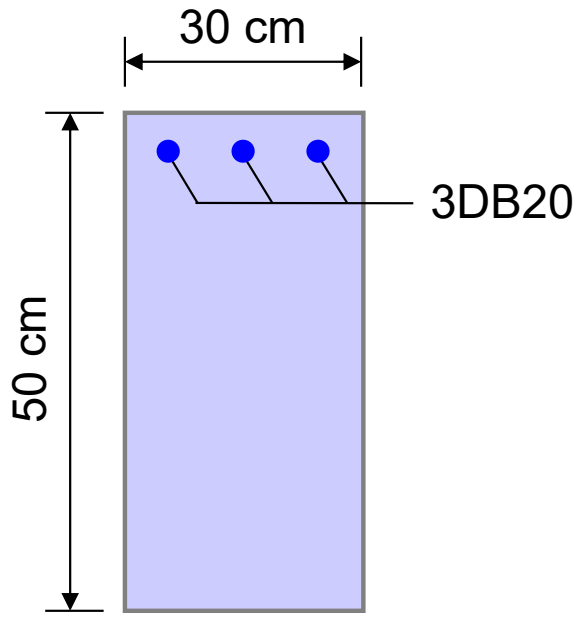
ρ_{min} = **0.0035** < ρ = **0.0065** < ρ_{max} = **0.0197** **OK**

$$A_s = \rho\, b\, d = 0.0065 \times 30 \times 44 = 8.58 \ \text{cm}^2$$

USE 3DB20 (A_s = 9.42 cm^2) **เหล็กเสริมบน**



(3) ตรวจสอบกำลังดัดของหน้าตัด



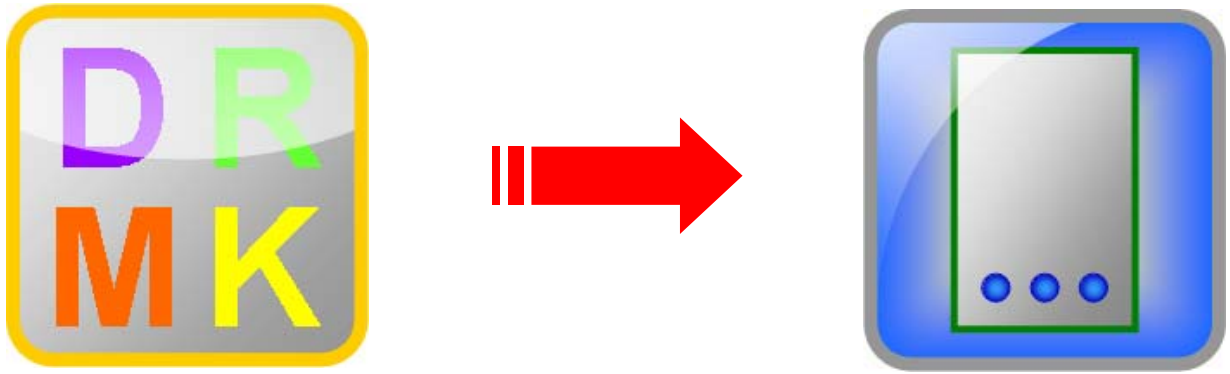
$$\rho = 9.42 / (30 \times 44) = 0.0071$$

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f'_c}\right)$$

$$= 0.0071 \times 4{,}000 \times 30 \times 44^2 \left(1 - \frac{0.0071 \times 4{,}000}{1.7 \times 240}\right)$$

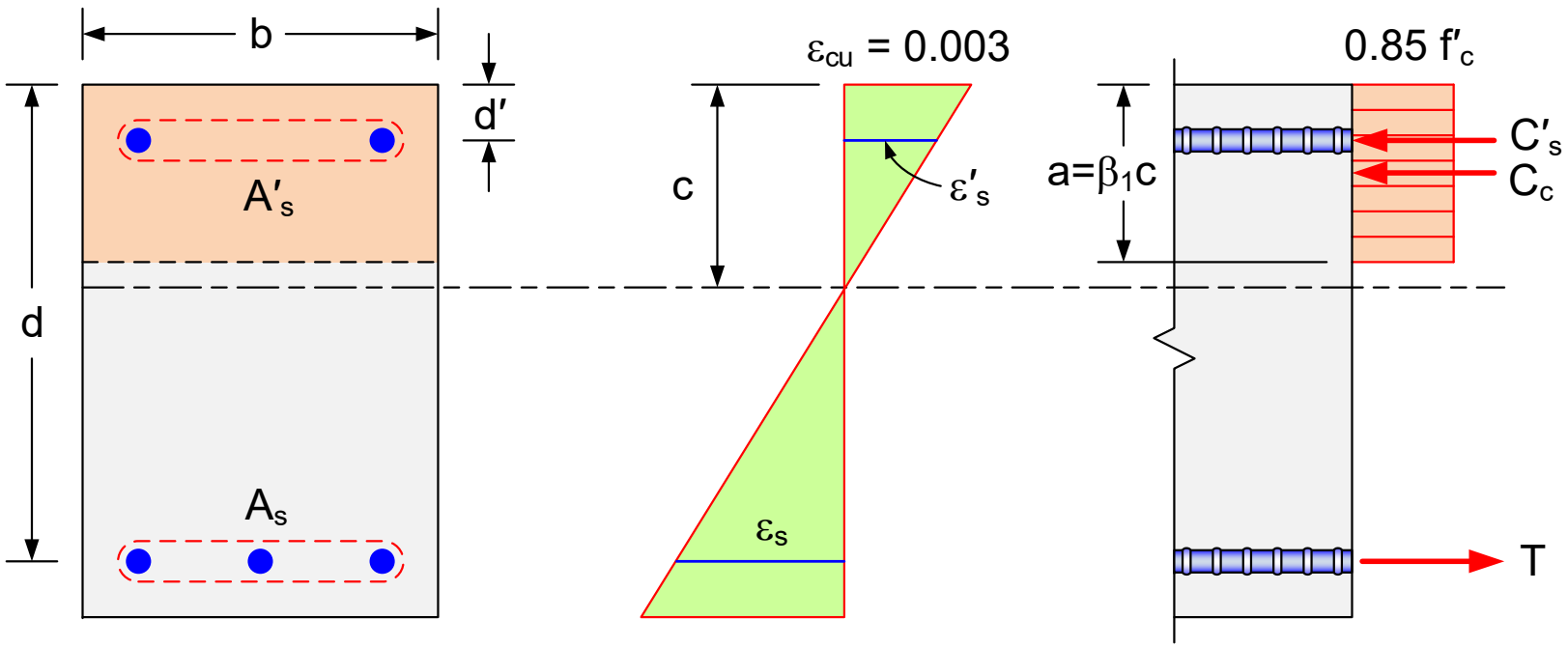
$$= 1{,}534{,}656 \text{ kg-cm} = 15.35 \text{ t-m}$$

$\phi M_n \geq M_u$ $\quad 0.9 \times 15.35 = 13.82 > 12.76$ t-m **OK**



คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

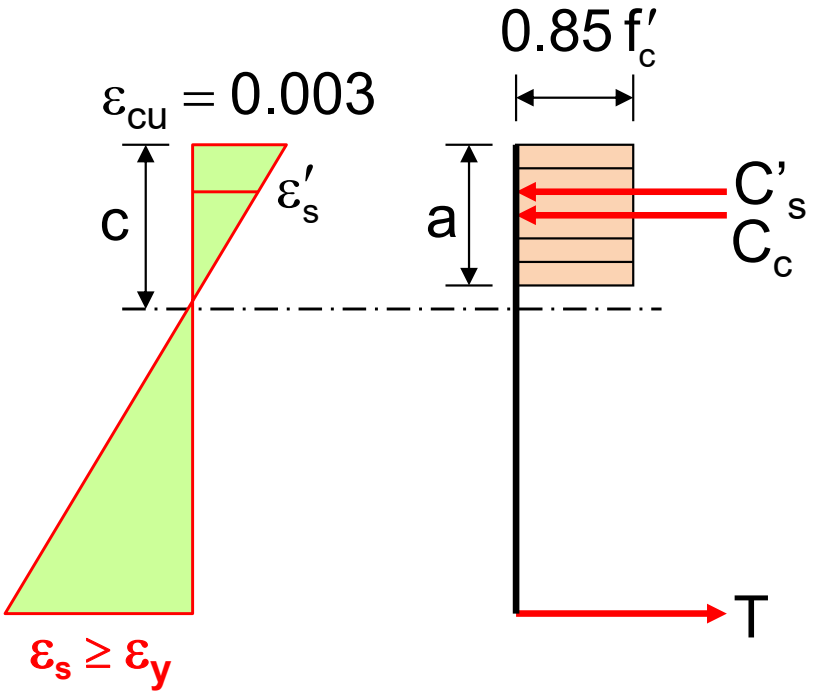
Double RC



เสริมเหล็กรับแรงอัด A'_s ที่ตำแหน่ง d' เพื่อแรงอัด C'_s ทำให้เพิ่มกำลังโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น M_{n2}:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = C_c\left(d - \frac{a}{2}\right) + C'_s(d - d')$$

หรือ $$M_n = 0.85f'_c\,b\,a\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s\,f'_s(d - d')$$



โดยปกติเหล็กรับแรงดึงมักจะคราก $f_s = f_y$

จากสภาวะสมดุลของแรงในแนวราบ

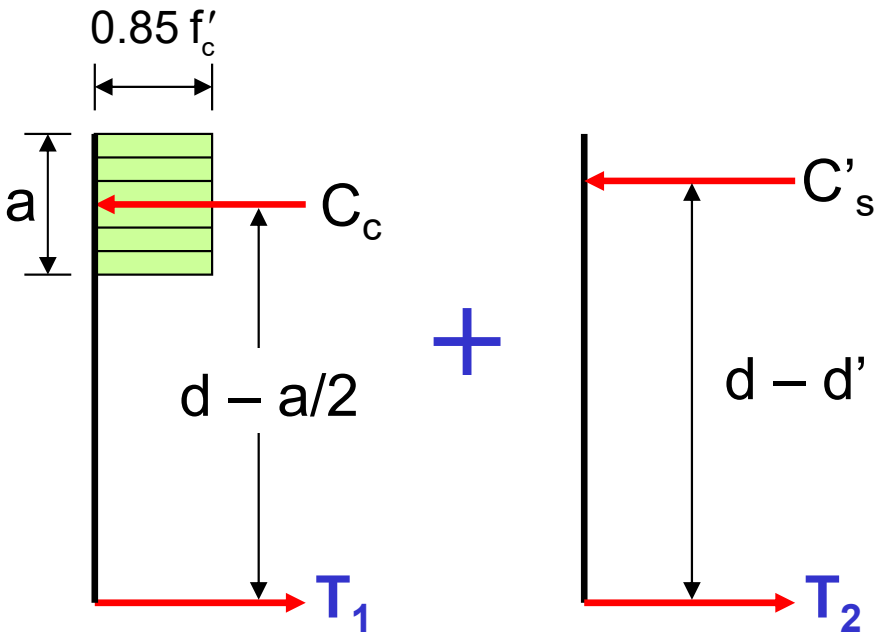
$$T = C_c + C'_s$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b a + A'_s f'_s$$

แบ่งเหล็กรับแรงดึงออกเป็นสองส่วน

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}$$

$$T = T_1 + T_2$$



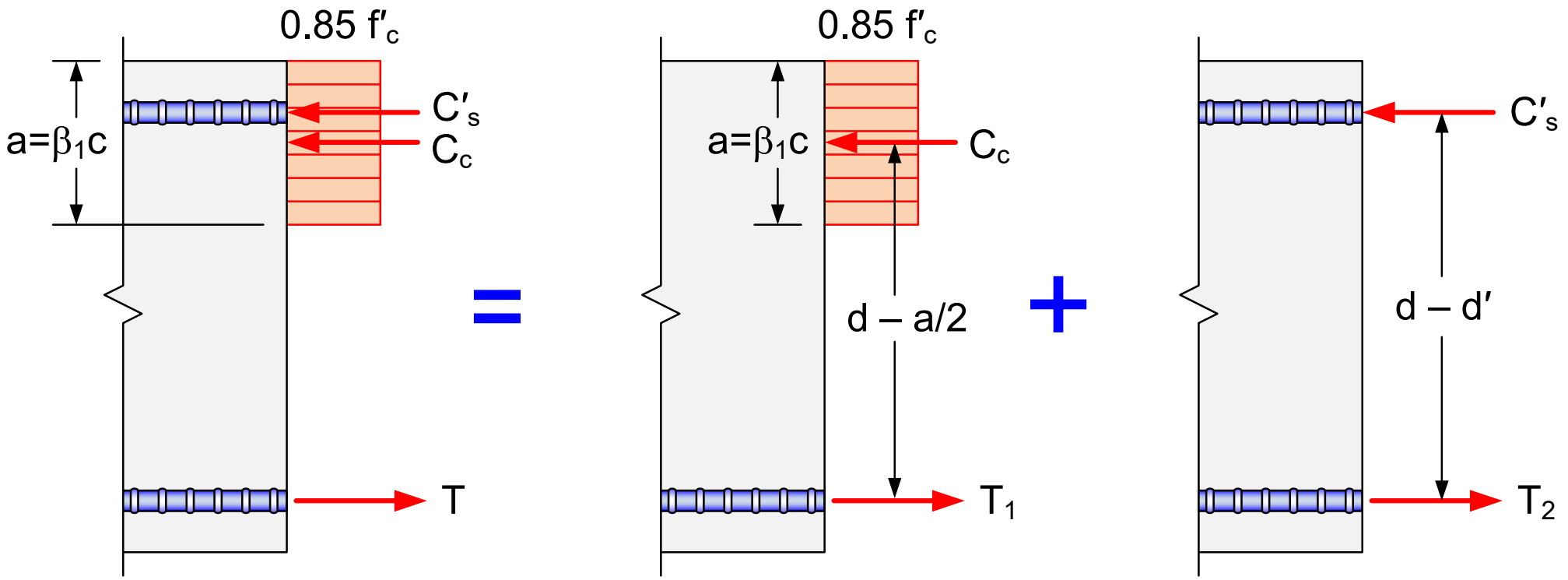
เพื่อแยกสมดุลกับแต่ละแรงอัด

$$T_1 = A_{s1} f_y = C_c = 0.85 f'_c b a$$

$$T_2 = A_{s2} f_y = C'_s = A'_s f'_s$$

กำลังโมเมนต์ดัด M_{n1} และ M_{n2}

Double RC



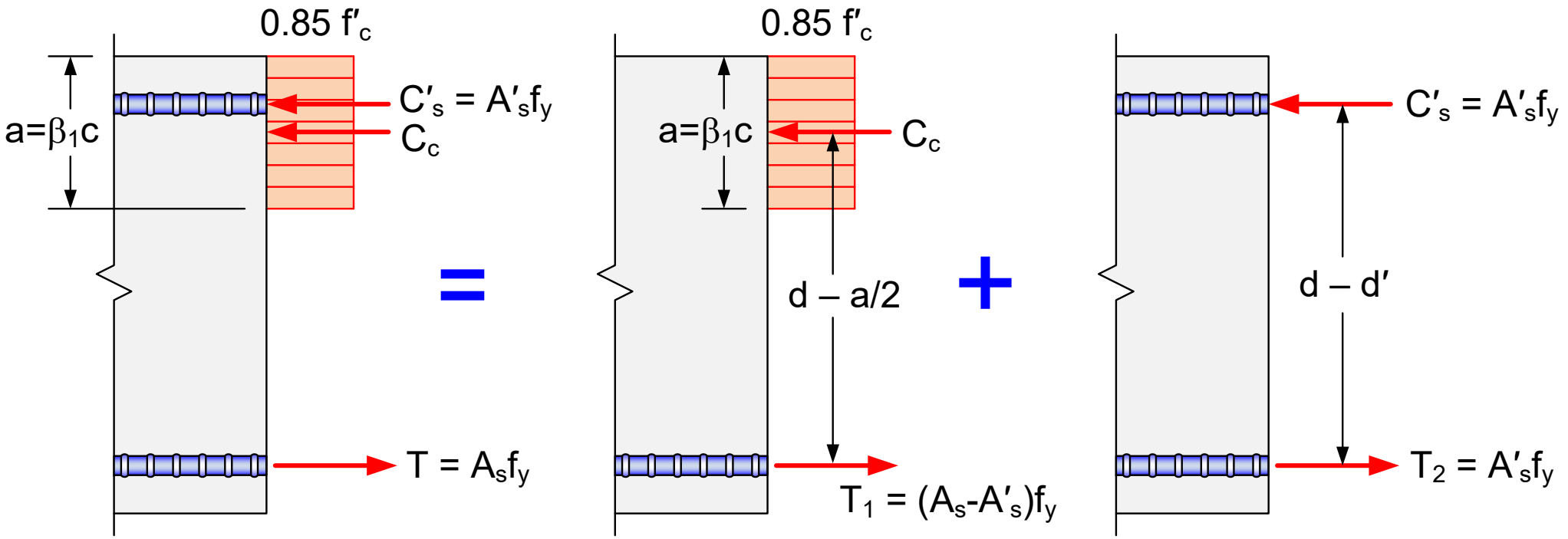
$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

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

$$M_{n2} = A'_s f'_s \left(d - d'\right) = A_{s2} f_y \left(d - d'\right)$$

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f'_s = f_y$

Double RC



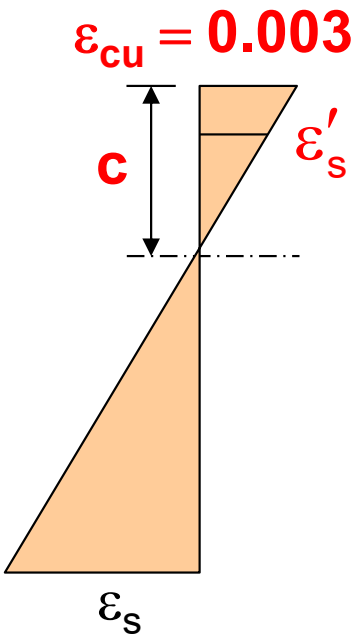
$$A'_s = A_{s2} \rightarrow \quad A_s = A_{s1} + A_{s2} = A_{s1} + A'_s \rightarrow A_{s1} = A_s - A'_s$$

$$A_{s1} f_y = (A_s - A'_s) f_y = 0.85 f'_c \, b \, a$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c \, b} \rightarrow \begin{cases} M_{n1} = (A_s - A'_s) f_y \left(d - \dfrac{a}{2} \right) \\ M_{n2} = A'_s f_y (d - d') \end{cases}$$

ตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงอัด

Double RC



จากกฎสามเหลี่ยมคล้าย :

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

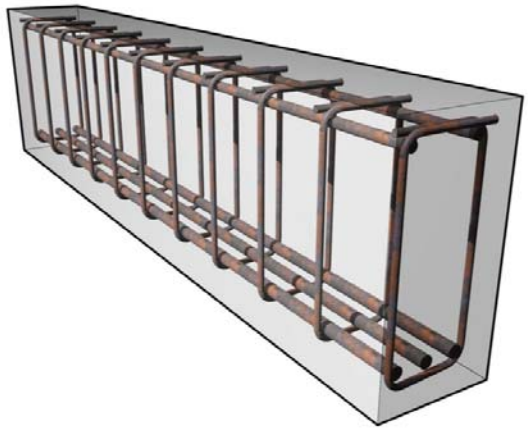
$$\varepsilon'_s = 0.003\left(\frac{c - d'}{c}\right) = 0.003\left(1 - \frac{d'}{c}\right)$$

Compression steel yield condition:

$$\varepsilon'_s \geq \left[\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{2{,}040{,}000}\right]$$

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

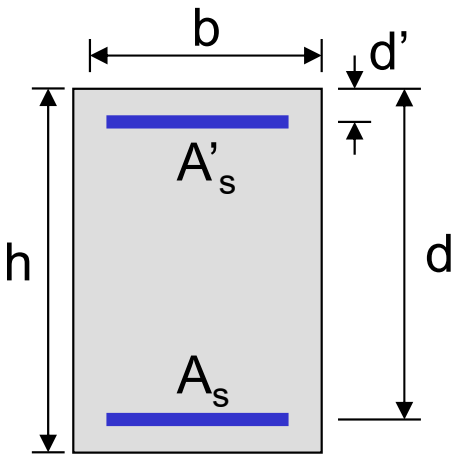
$$c = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85 f'_c b \beta_1} = \frac{(\rho - \rho')f_y d}{0.85 f'_c \beta_1}$$



เงื่อนไขการครากของเหล็กเสริมรับแรงอัด

Double RC

$$\varepsilon'_s = 0.003\left(1-\frac{d'}{c}\right) \geq \left[\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{2{,}040{,}000}\right]$$



แทนค่า c ลงในสมการจะได้

$$0.003\left(1-\frac{0.85 f'_c \beta_1}{(\rho-\rho')f_y}\frac{d'}{d}\right) \geq \frac{f_y}{E_s}$$

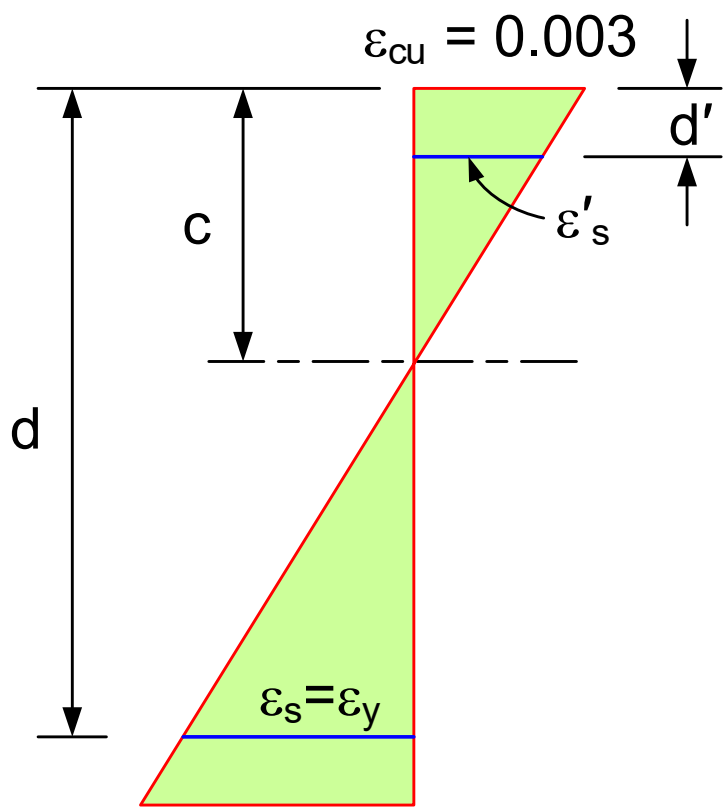
เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้เงื่อนไขที่เหล็กรับแรงอัดจะถึงจุดครากคือ

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

หน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัด: $f'_s = E_s \varepsilon'_s = 6{,}120\left(1-\frac{0.85 f'_c \beta_1 d'}{(\rho-\rho')f_y d}\right) \leq f_y$

เหล็กเสริมรับแรงดึงสมดุล ρ_b

Double RC



จากกฎสามเหลี่ยมคล้าย :

$$\frac{c}{d-c} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} = \frac{0.003}{f_y / E_s}$$

แทนค่า $E_s = 2.04 \times 10^6$ ก.ก./ซม.^{2} จะได้

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

จากสมดุลของแรง $T = C_c + C'_s$

$$A_{sb} f_y = 0.85 f'_c b a + A'_s f'_s$$

เมื่อ A_{sb} คือปริมาณเหล็กรับแรงดึงที่สภาวะสมดุล

แทนค่า

$$A_{sb} = \rho_b b d \quad \rightarrow \quad f_y \rho_b b d = 0.85 f'_c a b + f'_s \rho' b d$$

$$\left(\frac{c}{d}\right) = \left(\frac{6{,}120}{6{,}120 + f_y}\right) \rightarrow \rho_b = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(\frac{a}{d}\right) + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{c}{d}\right) + \rho' \frac{f'_s}{f_y}$$

เหล็กเสริมรับแรงดึงสมดุล ρ_b

Double RC

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

หรือ $$\rho_b = \bar{\rho}_b + \rho'\frac{f'_s}{f_y}$$

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

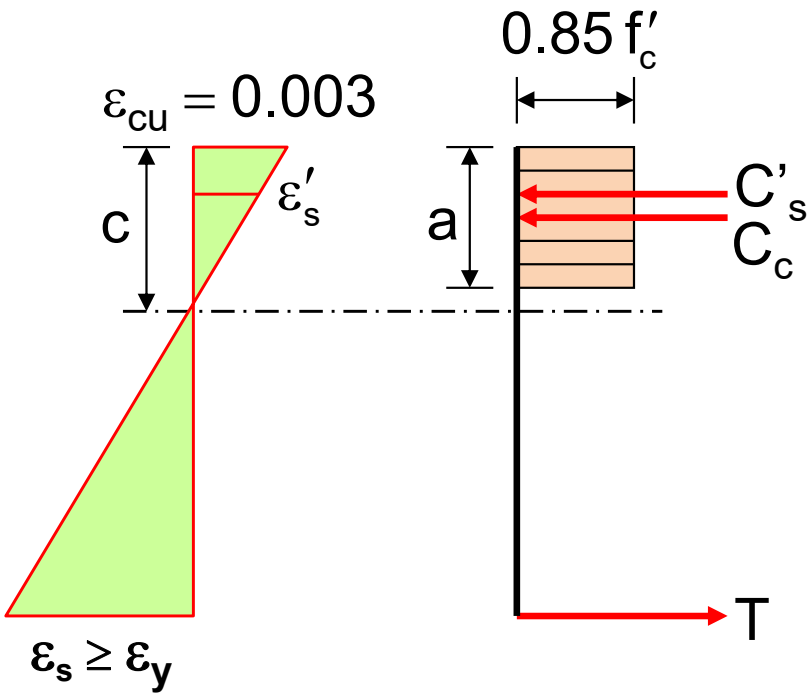
$=$ อัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุลของ Single RC

อัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงมากที่สุดของ Double RC:

$$\rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b + \rho'\frac{f'_s}{f_y}$$

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก $f'_s < f_y$

Double RC



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

$$f'_s = E_s\,\varepsilon'_s = 6{,}120\left(\frac{c-d'}{c}\right)$$

จากสมดุลของแรง $T = C_c + C'_s$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c \beta_1 b c + 6{,}120\,A'_s\left(\frac{c-d'}{c}\right)$$

แก้สมการกำลังสองเพื่อหาค่า c โดยจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$c^2 + \frac{6{,}120A'_s - A_s f_y}{0.85 f'_c \beta_1 b}c - \frac{6{,}120A'_s d'}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 0$$

กำหนดให้ $R = \dfrac{6{,}120\,A'_s - A_s\,f_y}{1.7\,f'_c\,\beta_1\,b}$ และ $Q = \dfrac{6{,}120\,A'_s\,d'}{0.85\,f'_c\,\beta_1\,b}$

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก $f'_s < f_y$

Double RC

แทนค่าในสมการจะได้ $c^2 + 2Rc - Q = 0$ เมื่อแก้สมการกำลังสองจะได้คำตอบคือ

$$c = -R \pm \sqrt{R^2 + Q}$$

เลือกค่า c ที่เป็นไปได้จากนั้นคำนวณค่าที่อื่นๆได้ดังนี้

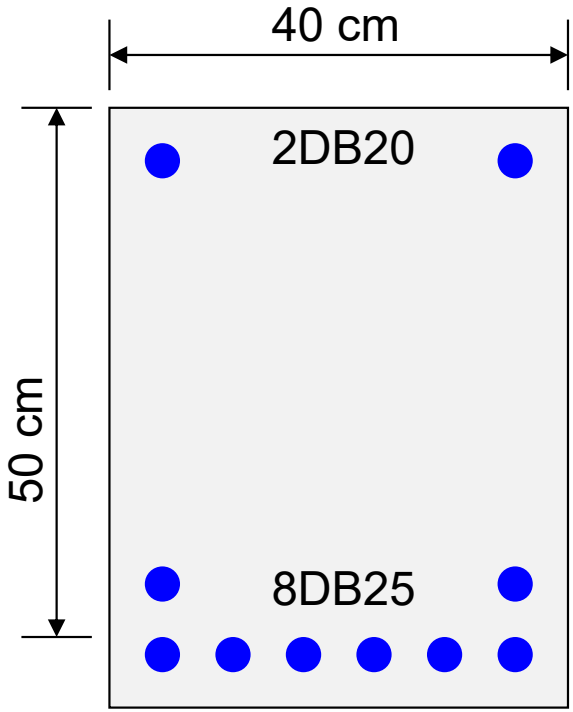
$$a = \beta_1 c$$

$$f'_s = 6{,}120\left(1 - \frac{d'}{c}\right) \leq f_y$$

และกำลังรับโมเมนต์ดัดในกรณีนี้จะเป็น

$$M_n = 0.85 f'_c ab\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d')$$

Example 3.8: Determine resisting moment of double RC beam with d = 50 cm, b = 40 cm, d' = 6 cm, comp. steel 2DB20 (A'_s = 6.28 cm^2) and ten. steel 8DB25 (A_s = 39.27 cm^2) use f'_c = 240 ksc, f_y = 4,000 ksc



$$A_s - A'_s = 39.27 - 6.28 = 32.99\ cm^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{32.99}{40 \times 50} = 0.0165$$

ตรวจสอบว่าเหล็กรับแรงอัดครากหรือไม่

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

$$\frac{0.85 \times 0.85 \times 240 \times 6}{4{,}000 \times 50}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 - 4{,}000}\right) = 0.0150$$

Since $\rho - \rho' = 0.0165 > 0.0150$, comp. steel yield $f'_s = f_y = 4{,}000$ ksc

เหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล :

$$\bar{\rho}_b = \frac{0.85f'_c}{f_y}\beta_1\left(\frac{6{,}120}{6{,}120+f_y}\right) = \frac{0.85\times 240}{4{,}000}0.85\left(\frac{6{,}120}{6{,}120+4{,}000}\right) = 0.0262$$

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมากที่สุด :

$$\rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b + \rho'\frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0262) + 0.0031\frac{4{,}000}{4{,}000}$$

$$= 0.0228 \quad > \quad [\rho = 0.0196] \quad \textbf{OK}$$

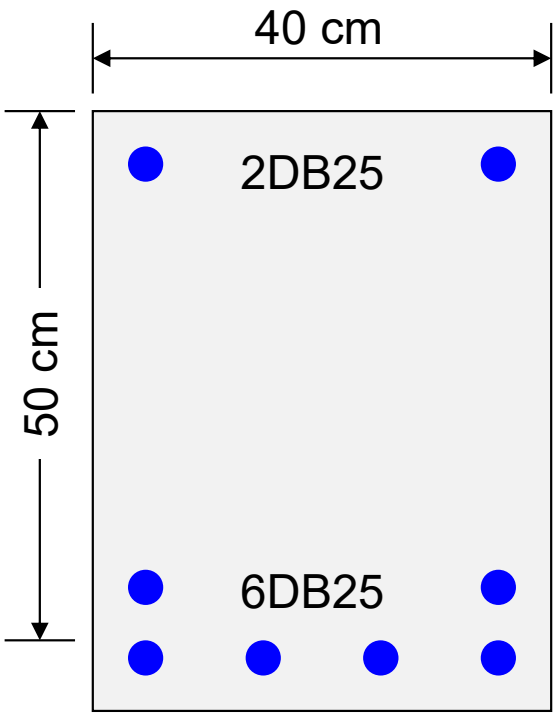
$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{32.99\times 4{,}000}{0.85\times 240\times 40} = 16.17 \text{ cm}$$

กำลังรับโมเมนต์ : $M_n = (A_s - A'_s)f_y(d - a/2) + A'_s f_y(d - d')$

$$= 39.27\times 4{,}000\times(50 - 16.17/2) + 6.28\times 4{,}000\times(50-6)$$

$$= 6{,}633{,}030 \text{ kg-cm} = 66.33 \text{ t-m} \quad \underline{\qquad\qquad} \quad \textbf{Ans}$$

Example 3.9: Repeat Example 3.8 by changing reinforcing steel to comp. steel 2DB25 (A'_s = 9.82 cm^2) and ten. steel 6DB25 (A_s = 29.45 cm^2) use f'_c = 240 ksc and f_y = 4,000 ksc



วิธีทำ

1. ตรวจสอบเหล็กรับแรงอัดคราก

$$A_s - A'_s = 29.45 - 9.82 = 19.63\ cm^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{19.63}{40 \times 50} = 0.0098 < 0.0150$$

(from Ex3.8)

$\therefore$ Comp. steel not yield $f'_s < f_y$

2. คำนวณหน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัด

สมดุลของแรง : $A_s f_y = 0.85 f'_c b a + A'_s f'_s$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ และ $f'_s = E_s \varepsilon'_s = 6{,}120\left(\frac{c - d'}{c}\right)$

$$(29.45)(4{,}000) = 0.85(240)(40)(0.85)c + (9.82)(6{,}120)\left(\frac{c-6}{c}\right)$$

$$c^2 - 8.32c - 52.0 = 0 \rightarrow c = 12.49 \text{ cm}$$

หรือคำนวณโดยวิธีใช้สูตร

$$R = \frac{6{,}120\,A_s' - A_s\,f_y}{1.7\,f_c'\,\beta_1\,b} = \frac{6.12 \times 9.82 - 29.45 \times 4.0}{1.7 \times 0.24 \times 0.85 \times 40} = -4.16$$

$$Q = \frac{6{,}120\,A_s'\,d'}{0.85\,f_c'\,\beta_1\,b} = \frac{6.12 \times 9.82 \times 6}{0.85 \times 0.24 \times 0.85 \times 40} = 52.0$$

$$c = -R \pm \sqrt{R^2 + Q} = 4.16 \pm \sqrt{4.16^2 + 52} \rightarrow c = 12.49 \text{ cm}$$

$$a = 0.85 \times 12.49 = 10.61 \text{ cm}$$

$$f_s' = 6{,}120(12.49 - 6)/12.49 = 3{,}180 \text{ ksc}$$

2. ตรวจสอบปริมาณเหล็กรับแรงดึง

$$\rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0262) + 0.0049 \frac{3{,}180}{4{,}000}$$

$$= 0.0235 > [\rho = 0.0147] \qquad \textbf{OK}$$

3. คำนวณกำลังโมเมนต์ดัด

$$M_n = \left(A_s f_y - A'_s f'_s\right)\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$= (29.45 \times 4.0 - 9.82 \times 3.18)(50 - 10.61/2) + 9.82 \times 3.18 \times (50 - 6)$$

$$= 5{,}243 \text{ t-cm} = 52.43 \text{ t-m} \qquad \blacksquare$$

การออกแบบคานเสริมเหล็กคู่

สมการสมดุล

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = C_c\left(d - \frac{a}{2}\right) + C'_s(d - d')$$

$$T = T_1 + T_2 = C_c + C'_s$$

ขั้นตอนในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัด

STEP 1: Moment strength from single RC beam

$$\text{Choose}: \quad \rho_1 = \rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b$$

$$M_{n1} = \rho_1 f_y b d^2\left(1 - \frac{\rho_1 f_y}{1.7 f'_c}\right) = R_{n1} b d^2$$

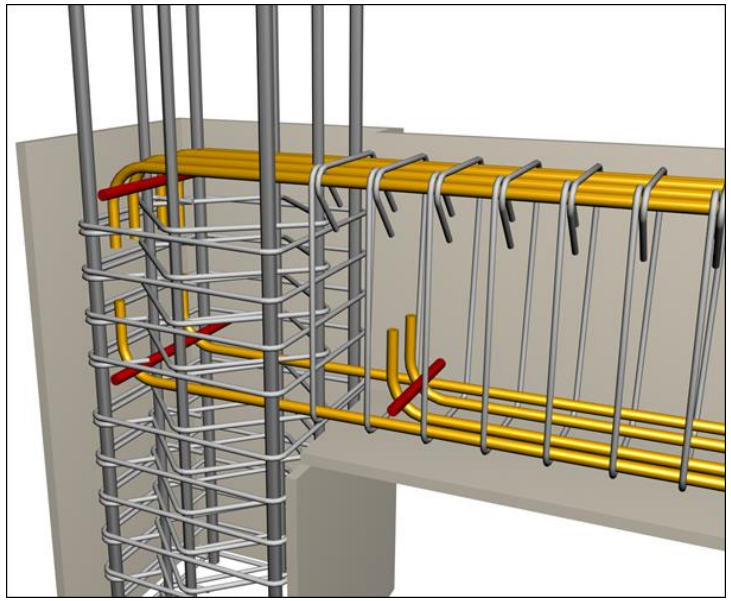
STEP 2: Addition moment strength required

$$M_{n2} = M_u / \phi - M_{n1}$$

STEP 3: Addition tension steel A_{s2} (assume $f'_s = f_y$)

$$M_{n2} = T_2(d - d') = A_{s2} f_y (d - d') \rightarrow A_{s2} = \frac{M_{n2}}{f_y (d - d')}$$

STEP 4: Total tension steel $A_s = A_{s1} + A_{s2}$



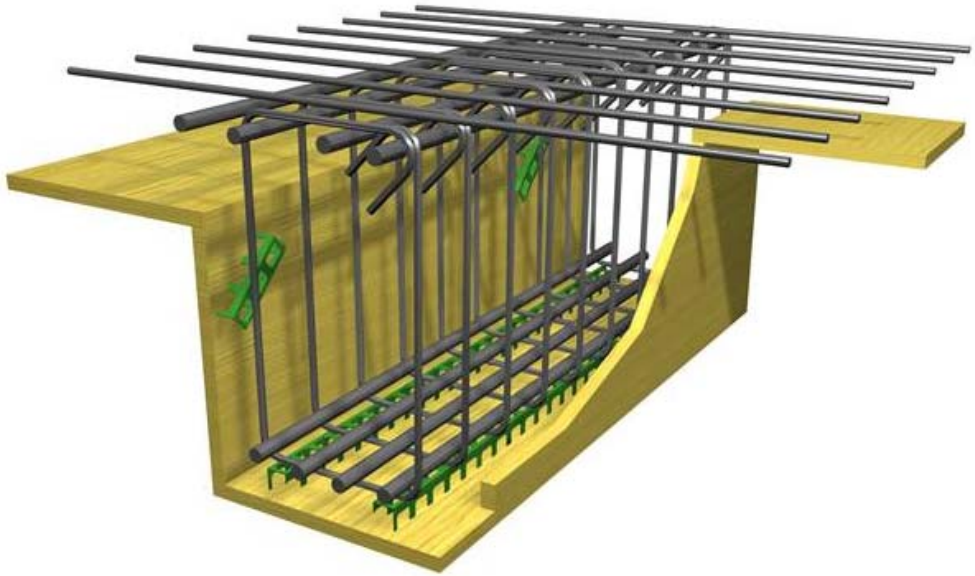
STEP 5: Stress in compression steel

$$a = \frac{A_{s1} f_y}{0.85 f'_c b}, \qquad c = a / \beta_1$$

$$f'_s = 0.003 E_s \left(\frac{c - d'}{c} \right) = 6{,}120 \left(\frac{c - d'}{c} \right) \leq f_y$$

STEP 6: Compression steel

$$A_{s2} f_y = A'_s f'_s$$



Example 3.10: Design beam section with d = 54 cm d' = 6 cm subjected to M_u = 90 t-m use f'_c = 280 ksc and f_y = 4,000 ksc

วิธีทำ สมมุติให้ b = 40 ซม.

1. พิจารณากำลังมากสุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสริมเหล็กเดี่ยว

เหล็กเสริมมากที่สุด $\rho_1 = \rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b = 0.0229$ (จากตารางที่ ก.3)

พื้นที่เหล็กเสริมรับดึง $A_{s1} = \rho_1 b d = 0.0229(40)(54) = 49.46\ cm^2$

$$a = \frac{A_{s1} f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{49.46 \times 4.0}{0.85 \times 0.28 \times 40} = 20.78\ cm$$

$$c = a/\beta_1 = 20.78/0.85 = 24.45\ cm$$

$$M_{n1} = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) = 49.46(4.0)\left(54 - \frac{20.78}{2}\right)$$

$$= 8{,}628\ \text{t-cm} = 86.28\ \text{t-m} < M_u/\phi = 90/0.9 = 100\ \text{t-m}$$

ดังนั้นต้องเสริมเหล็กรับแรงอัด

2. โมเมนต์ที่ต้องการเพิ่มเติม

$$M_{n2} = M_n - M_{n1} = 100 - 86.28 = 13.72 \text{ t-m}$$

3. เหล็กรับแรงดึงที่ต้องการเพิ่มเติม

$$A_{s2} = \frac{M_{n2}}{f_y(d-d')} = \frac{13.72\times10^5}{4{,}000(54-6)} = 7.15 \text{ cm}^2$$

4. เหล็กรับแรงดึงทั้งหมด

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 49.46 + 7.15 = 56.61 \text{ cm}^2$$

ใช้เหล็กรับแรงดึง 5DB32+3DB28 (A_s = 40.21 + 18.47 = 58.68 cm^2)

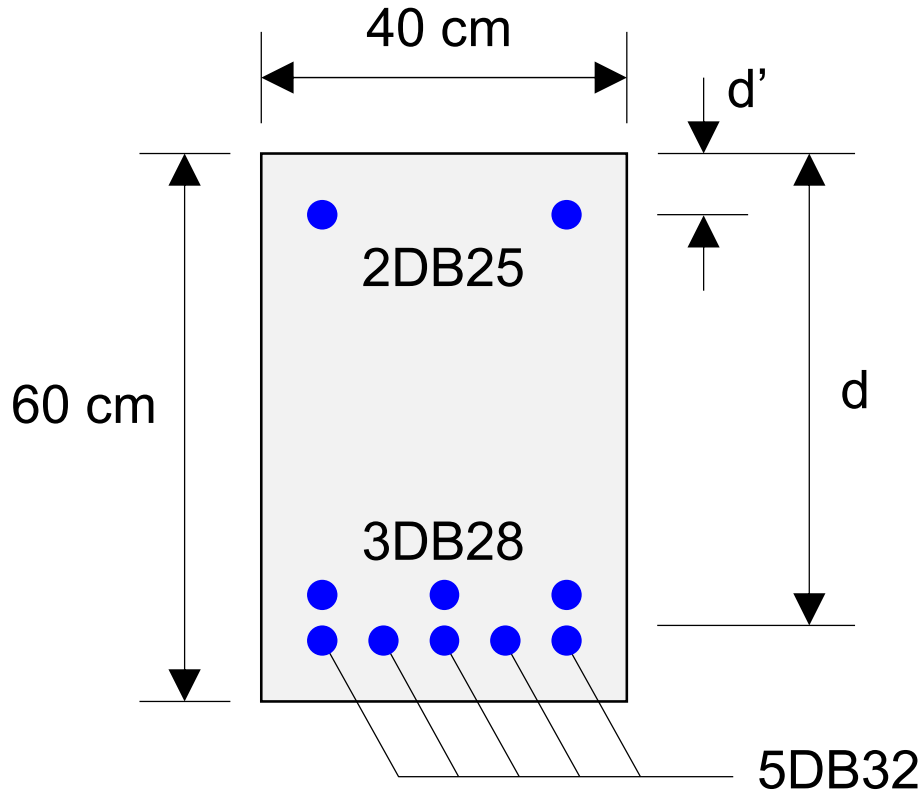
5. พิจารณาเหล็กรับแรงอัด

$$f_s' = 6{,}120\left(1-\frac{6}{24.45}\right) = 4{,}618 \text{ ksc} > [\, f_y = 4{,}000 \text{ ksc} \,]$$

$$\therefore\ f_s' = f_y = 4{,}000 \text{ ksc}$$

6. ปริมาณเหล็กรับแรงอัด $A'_s = A_{s2} = 7.15\ cm^2$

ใช้เหล็ก 2DB25 (A_s = 9.82 ซม.^{2})



7. ตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัด

ความลึก d' = 4 ซม.(ระยะหุ้ม) + 1 ซม.(เหล็กปลอก) + 1.25 ซม. (ครึ่ง DB25)

= 6.25 ซม.

ระยะศูนย์ถ่วงเหล็กรับแรงดึง $= \dfrac{40.21(4+1+1.6)+18.47(4+1+3.2+2.5+1.4)}{40.21+18.47}$

$= 8.33$ ซม.

ความลึก $d = 60$ ซม.(ความลึก h) $-$ 8.33 ซม.(ระยะศูนย์ถ่วงเหล็กรับแรงดึง)

$= 51.7$ ซม.

$$\rho - \rho' = \frac{58.68}{40 \times 51.7} - \frac{9.82}{40 \times 51.7} = 0.0283 - 0.0047 = 0.0236$$

$$\frac{0.85\beta_1 f'_c d'}{f_y d}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 - f_y}\right) = \frac{0.85 \times 0.85 \times 280 \times 6.3}{4{,}000 \times 51.9}\left(\frac{6{,}120}{6{,}120 - 4{,}000}\right) = 0.0177$$

$$\rho - \rho' = 0.0236 > 0.0177 \rightarrow f'_s = f_y = 4{,}000 \text{ ksc}$$

ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมากที่สุด

$$\rho_{max} = 0.75\bar{\rho}_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.0229 + 0.0047 = 0.0276 \approx 0.0283$$ **OK**

ความลึกของบล็อกหน่วยแรงอัดในคอนกรีต :

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{48.86 \times 4{,}000}{0.85 \times 280 \times 40} = 20.5 \text{ cm}$$

กำลังรับโมเมนต์ดัด:

$$M_n = (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$

$$= 48.86 \times 4{,}000 \times (51.7 - 20.53/2) + 9.82 \times 4{,}000 \times (51.7 - 6.25)$$

$$= 9{,}886 \text{ t-cm} = 98.9 \text{ t-m} \approx M_n \text{ ที่ต้องการ } 100 \text{ ตัน-เมตร}$$ **OK**