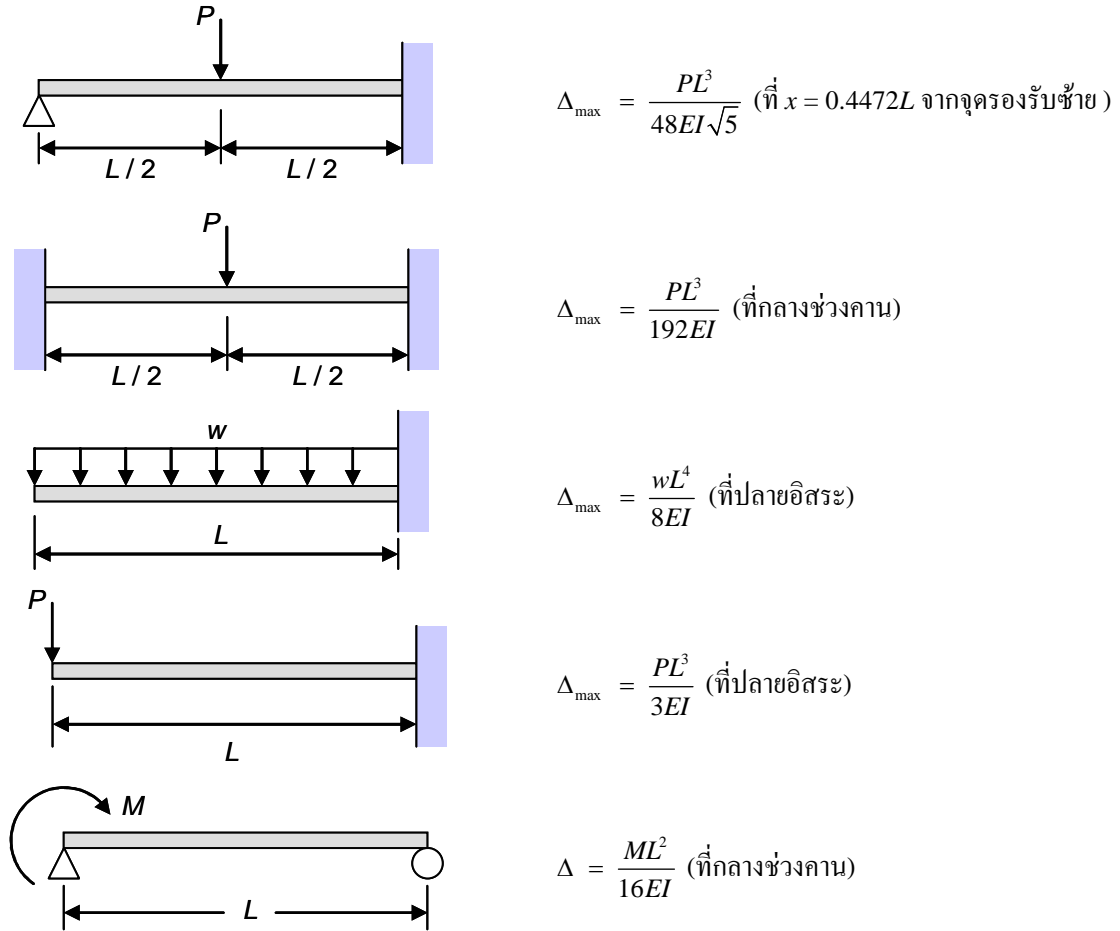
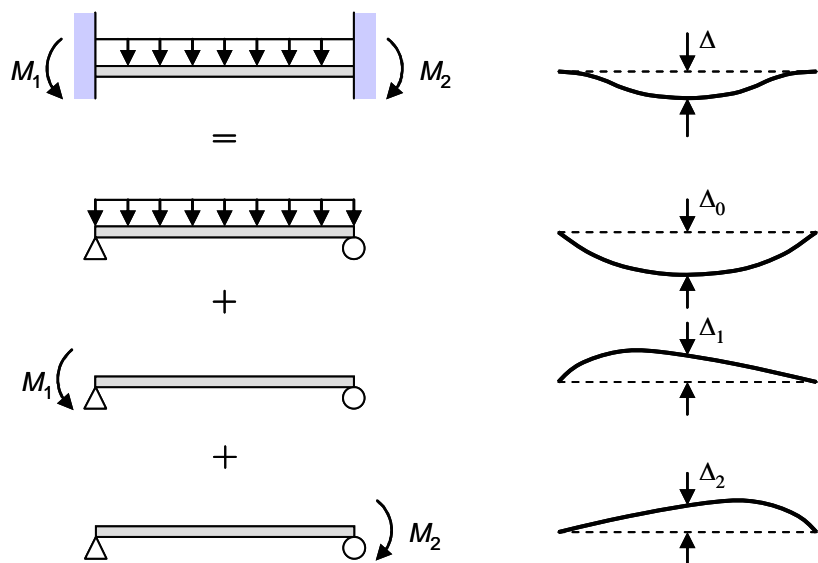


ตารางที่ 10.4 ต่อเนื่อง



ถ้าคานรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกหลายชนิด ก็จะคำนวณระยะแอ่นตัวจากน้ำหนักแต่ละชนิดแล้วนำมารวมกัน หรืออย่างเช่นในคานต่อเนื่องซึ่งคานแต่ละช่วงจะรับน้ำหนักบรรทุกทุกและโมเมนต์ที่ปลายคานทั้งสองดังในรูปที่ 10.10

ระยะแอ่นตัวที่กลางช่วงคาน : $\Delta = \Delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2$



รูปที่ 10.10 การคำนวณระยะแอ่นตัวสำหรับคานต่อเนื่อง

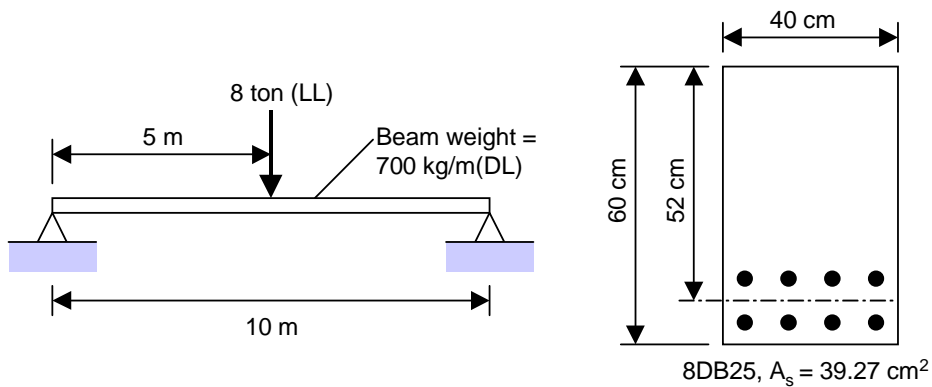
จากแนวคิดเรื่องโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลจะเห็นได้ว่าหน้าตัดจะเกิดความเสียหายขึ้นอย่างถาวร เมื่อโมเมนต์มีค่าเกินโมเมนต์แตกร้าว ซึ่งผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดลดลง การแอ่นตัวก็จะมีมากขึ้น สภาวะของการรับน้ำหนักมีอยู่ด้วยกัน 2 ช่วงคือ ช่วงรับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ถือรับเฉพาะน้ำหนักอาคารเองโดยยังไม่มีการใช้งาน Δ_D และในช่วงรับน้ำหนักเต็มทีคือน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกจร Δ_{D+L}

การแอ่นตัวจากน้ำหนักคงที่ซึ่งจะเกิดขึ้นแน่นอนตลอดอายุโครงสร้างอาจลดได้โดยการหล่อคานให้โก่งขึ้น (Camber) ไว้ก่อนล่องหน้า เมื่อคานเริ่มรับน้ำหนักตัวเองหลังถอดแบบหล่อออกก็จะแอ่นตัวลงมาหักล้างที่ทำให้โก่งไว้ล่วงหน้าพอดี ดังนั้นจึงเหลือเพียงการพิจารณาการแอ่นตัวจากน้ำหนักจร Δ_L ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\Delta_L = \Delta_{D+L} - \Delta_D \quad (10.12)$$

ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำหนักบรรทุกจรไม่เคยกระทำกับโครงสร้างโดยปราศจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และการรับน้ำหนักในแต่ละช่วงมีผลต่อความเสียหายถาวรของหน้าตัด ดังนั้นในการคำนวณระยะแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกจรจึงคิดจากการหักระยะแอ่นจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ออกจากระยะแอ่นจากน้ำหนักบรรทุกรวม

ตัวอย่างที่ 10.3 ตรวจสอบการแอ่นตัวของคานช่วงเดียวในรูปที่ 10.11 ซึ่งมีช่วงยาว 10 เมตร สมมติว่าคานถูกออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยใช้ $f'_c = 280$ ก.ก./ซม² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม²



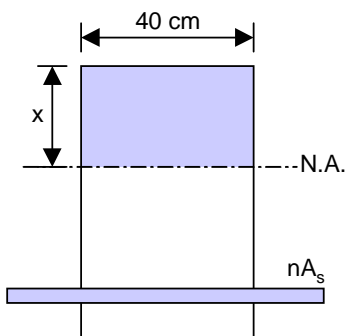
รูปที่ 10.11 คานสำหรับตัวอย่างที่ 10.3

วิธีทำ ความลึกน้อยที่สุดถ้าไม่คำนวณการแอ่นตัวคือ $L/16 = 10(100)/16 = 62.5$ ซม. ดังนั้นจึงต้องคำนวณการแอ่นตัว

1. การแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ โมเมนต์อินเนอร์เซียทั้งหมด

$$I_g = \frac{1}{12} (40) (60)^3 = 720,000 \text{ ซม.}^4$$

$$M_a = \frac{(0.7)(10)^2}{8} = 8.75 \text{ ตัน-เมตร}$$



$$E_c = 15,100 \sqrt{f'_c} = 15,100 \sqrt{280} = 252,671 \text{ ก.ก./ซม.}^2$$

$$n = E_s/E_c = \frac{2.04 \times 10^6}{252,671} = 8.1$$

$$40 \frac{x^2}{2} = (8.1)(39.27)(52 - x)$$

$$x^2 + 15.71x - 816.82 = 0$$

$$x = 21.8 \text{ ซม.}$$

รูปที่ 10.12 หน้าตัดแตกร้าวแปลง

คำนวณโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดกกร้าวแปลง

$$I_{cr} = I_{concrete} + I_{steel} = \frac{1}{3}(40)(21.8)^3 + 8(39.27)(52 - 21.8)^2$$

$$I_{cr} = 424,663 \text{ ซม.}^4$$

โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล I_e จะขึ้นกับโมเมนต์ค้ำ M_{cr} ที่ทำให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวรับแรงดึง

$$f_r = 2.0\sqrt{280} = 33.5 \text{ ก.ก./ซม.}^2$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{33.5 \times 720,000}{30 \times 100} = 8,040 \text{ ก.ก.-ม.}$$

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = \frac{8,040}{8,750} = 0.92, \quad \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 = 0.78$$

จากสมการ (10.9) โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลคือ

$$I_e = 0.78(720,000) + 0.22(424,663) = 655,026 \text{ ซม.}^4$$

ระยะแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่จะเท่ากับ

$$\Delta_D = \frac{5wL^4}{384E_c I_e} = \frac{5 \times 7 \times (10 \times 100)^4}{384 \times 252671 \times 655026} = 0.55 \text{ ซม.}$$

ระยะแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่น่าจะแก้ไขโดยการหล่อคานให้โก่งตัวขึ้น (Camber) แต่ก็จะไม่มีผลกับเพดานหรือผนัง เพราะถูกนำมาติดตั้งหลังเกิดการแอ่นตัวแล้วนั่นเอง ที่มีปัญหาคือการแอ่นตัวจากน้ำหนักจรและการแอ่นตัวระยะยาวจากความคืบและการหดตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักคงค้าง

2. การแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกจร โมเมนต์มากที่สุดที่สภาวะใช้งานคือ

$$M_{\max} = 8.75 + 8(10)/4 = 28.75 \text{ ตัน-เมตร}$$

$$\frac{M_{cr}}{M_{\max}} = \frac{8,040}{28,750} = 0.28, \quad \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^3 = 0.022$$

จากสมการ (11.8) โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลคือ

$$I_e = 0.022(720,000) + 0.978(424,663) = 431,160 \text{ ซม.}^4$$

$$\begin{aligned} \Delta_{D+L} &= \frac{5wL^4}{384E_c I_e} + \frac{PL^3}{48E_c I_e} \\ &= \frac{5 \times 7 \times (10 \times 100)^4}{384 \times 252,671 \times 431,160} + \frac{8,000(10 \times 100)^3}{48 \times 252,671 \times 431,160} \\ &= 0.84 + 1.53 = 2.37 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

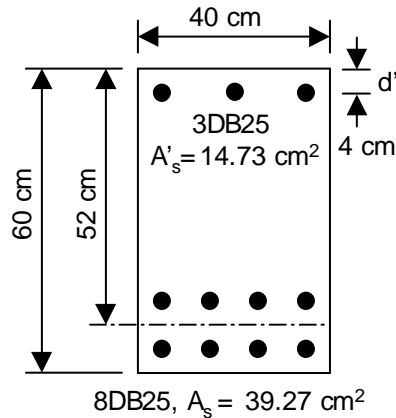
3. การแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกจร

$$\Delta_L = \Delta_{D+L} - \Delta_D = 2.37 - 0.55 = 1.82 \text{ ซม.}$$

จากตารางที่ 11.3 ค่า Δ_L ที่ยอมให้ $= \frac{L}{360} = \frac{10(100)}{360} = 2.78 \text{ ซม.} > 1.82 \text{ ซม.}$

OK

ตัวอย่างที่ 10.4 จงตรวจสอบการแอ่นตัวทันทีบนคานช่วงเดียวในตัวอย่าง 10.3 โดยมีเหล็กบน 3DB25 ดังในรูปที่ 10.13



รูปที่ 10.13 หน้าตัดคานในตัวอย่างที่ 10.4

วิธีทำ

1. คำนวณโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดกไว้แปลง

$$B = \frac{b}{n A_s} = \frac{40}{(8.1)(39.27)} = 0.126 \text{ ซม.} \quad r = \frac{(n-1)A'_s}{n A_s} = \frac{(7.1)(14.73)}{(8.1)(39.27)} = 0.329$$

$$x = \left[\sqrt{2dB(1+rd'/d) + (1+r)^2} - (1+r) \right] / B$$

$$= \left[\sqrt{2(52)(0.126)(1+0.329(4)/52) + (1.329)^2} - 1.329 \right] / 0.126 = 20.4 \text{ ซม.}$$

$$I_{cr} = bx^3/3 + nA_s(d-x)^2 + (n-1)A'_s(x-d')^2$$

$$= (40)(20.4)^3/3 + (8.1)(39.27)(52-20.4)^2 + (7.1)(14.73)(20.4-4)^2$$

$$= 458,953 \text{ ซม.}^4$$

2. โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิภาพ

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ $M_{cr}/M_a = 0.92$ และ $(M_{cr}/M_a)^3 = 0.78$ (จากตัวอย่างที่ 10.3)

$$I_e = 0.78(720,000) + 0.22(458,953) = 662,570 \text{ ซม.}^4$$

$$\Delta_D = \frac{5wL^4}{384E_c I_e} = \frac{5 \times 7 \times (10 \times 100)^4}{384 \times 252,671 \times 662,570} = 0.54 \text{ ซม.}^4 \text{ (ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ 10.3)}$$

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกจร $M_{cr}/M_a = 0.28$ และ $(M_{cr}/M_a)^3 = 0.022$ (จากตัวอย่างที่ 10.3)

$$I_e = 0.022(720,000) + 0.978(458,953) = 464,696 \text{ ซม.}^4$$

$$\Delta_{D+L} = \frac{5 \times 7 \times (10 \times 100)^4}{384 \times 252,671 \times 464,696} + \frac{8,000(10 \times 100)^3}{48 \times 252,671 \times 464,696}$$

$$= 0.78 + 1.42 = 2.20 \text{ ซม.}^4 \text{ (ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ 10.3)}$$

3. การแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกจร

$$\Delta_L = \Delta_{D+L} - \Delta_D = 2.20 - 0.54 = 1.66 \text{ ซม.}$$

10.10 การแอ่นตัวระยะยาว (Long-term deflection)

การแอ่นตัวระยะยาวเป็นผลมาจากการหดตัว(Shrinkage)และความคืบ(Creep) เมื่อมีน้ำหนักคงค้าง(Sustained load) กระทำกับโครงสร้างเป็นเวลานาน โดยการแอ่นตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การประมาณระยะแอ่นตัวจากการหดตัวและความคืบ Δ_{cp+sh} นั้น มาตรฐาน ACI กำหนดให้หาได้โดยคูณการแอ่นตัวระยะสั้นด้วยตัวคูณ λ ดังนี้

$$\Delta_{cp+sh} = \lambda(\Delta_i)_D \tag{10.13}$$

เมื่อ
$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} \tag{10.14}$$

และ $(\Delta_i)_D$ คือการแอ่นตัวทันทีจากน้ำหนักคงที่ทั้งหมด ค่าของ ξ ที่ยอมให้ตาม ACI จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการรับน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 10.5 สำหรับเหล็กเสริมรับแรงอัด $\rho' = A'_s / bd$ จะใช้ของหน้าตัดที่จู่รองรับในกรณีคานยื่น และใช้หน้าตัดที่กลางช่วงคานในกรณีคานช่วงเดี่ยวและคานต่อเนื่อง

ตารางที่ 10.5 ค่าตัวแปร ξ ที่ช่วงเวลารับน้ำหนักคงค้างต่างๆ

ช่วงเวลารับน้ำหนักคงค้าง	ξ
5 ปีหรือมากกว่า	2.0
1 ปี	1.4
6 เดือน	1.2
3 เดือน	1.0

ตัวอย่างที่ 10.5 สำหรับคานในตัวอย่างที่ 10.3 จงพิจารณาการแอ่นตัวจากความคืบและการหดตัวตามมาตรฐาน ACI

วิธีทำ การแอ่นตัวระยะสั้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่จากข้อ 1. ในตัวอย่างที่ 10.3 คือ $(\Delta_i)_D = 0.55$ ซม.

เนื่องจากไม่มีเหล็กรับแรงอัด สมการ(10.14) สำหรับระยะเวลา 5 ปี หรือมากกว่าจะเป็น

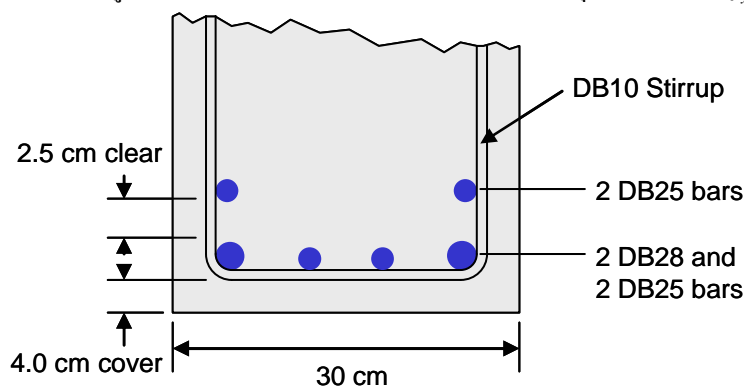
$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} = \frac{2.0}{1+50(0.0)} = 2.0$$

ดังนั้นจากสมการ (10.15)

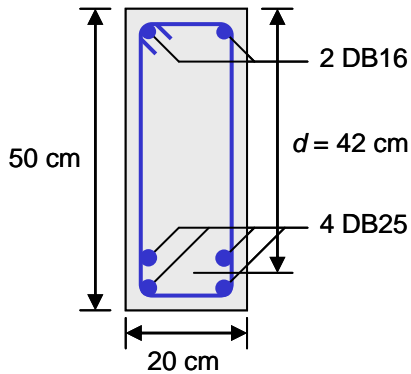
$$\Delta_{cp+sh} = \lambda(\Delta_i)_D = 2.0(0.55) = 1.10 \text{ ซม.} \quad \blacksquare$$

ปัญหาท้ายบทที่ 10

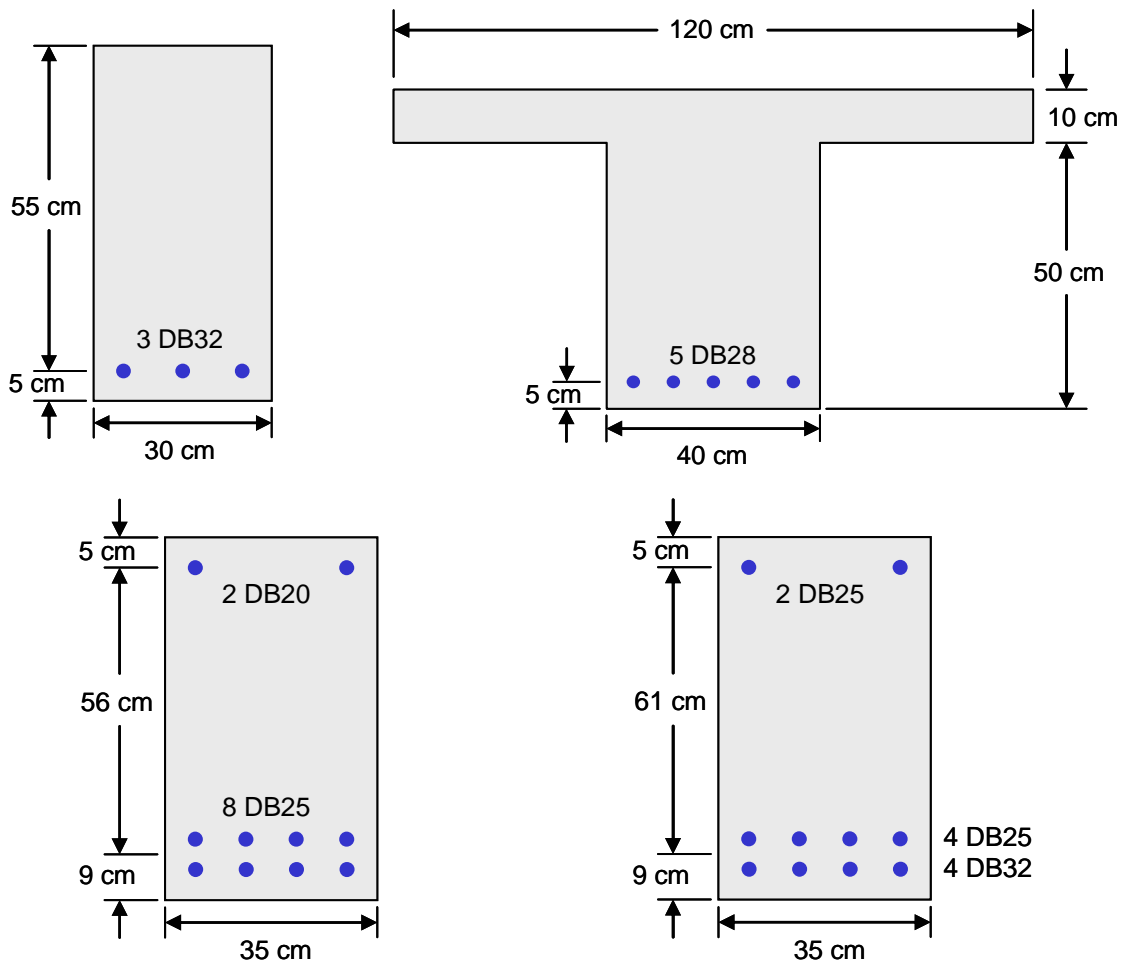
10.1 จงตรวจสอบว่าหน้าตัดคานในรูปข้างล่างเป็นไปตามข้อกำหนด ACI เพื่อควบคุมการแตกร้าว $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²



- 10.2 คานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับการดัดแบบคานช่วงเดียวดังแสดงในรูปข้างล่าง จงคำนวณความกว้างรอยร้าวการดัดมากที่สุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และตรวจสอบว่าคานเป็นไปตามข้อกำหนดการแตกร้าวหรือไม่? กำหนด $f'_c = 320$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.² ระยะหุ้ม 4.0 ซม.



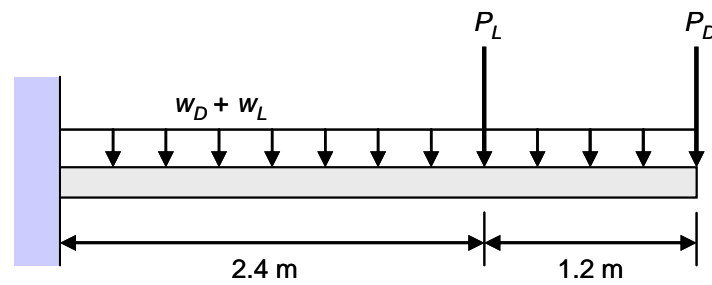
- 10.3 หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังในรูปข้างล่างมีค่า $f'_c = 280$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.² จงตรวจสอบว่าเป็นไปตามข้อกำหนด ACI ในการควบคุมการแตกร้าวหรือไม่?



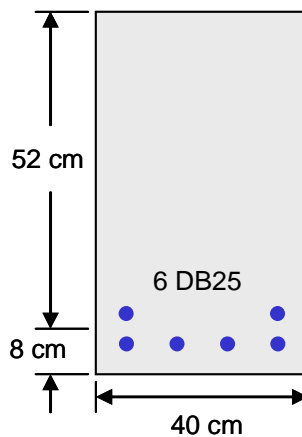
- 10.4 จงคำนวณระยะห่างมากที่สุดของเหล็ก DB16 ในพื้นทางเดียวซึ่งมีระยะหุ้มคอนกรีต 2.5 ซม. โดยยังเป็นไปตามข้อกำหนด ACI เพื่อควบคุมการแตกร้าว $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²
- 10.5 จากรูปหน้าตัดในข้อ 10.3 จงคำนวณ (ก) โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด, I_g (ข) ตำแหน่งแกนสะเทินของหน้าตัดแตกร้าวและ I_{cr} และ (ค) โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล I_e สำหรับ $M_a = 0.6\phi M_{cr}$

10.6 จงพิจารณาการแอ่นตัวทันทีและการแอ่นตัวระยะยาวที่ปลายอิสระของคานยื่นช่วงยาว 3.6 เมตร สำหรับแต่ละกรณี บรรทุกตามตารางข้างล่าง สมมุติว่ามีเพียงน้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นน้ำหนักคงค้ำ และในการคิณน้ำหนักบรรทุกคงที่ ให้รวมน้ำหนักคานด้วย ใช้ค่า $f'_c = 280$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²

กรณี	b (ซม.)	d (ซม.)	h (ซม.)	A_s (ซม. ²)	A'_s (ซม. ²)	w_D (ตัน/ม.)	w_L (ตัน/ม.)	P_D (ตัน)	P_L (ตัน)
(1)	40	54	60	8DB28	2DB28	4.0	3.2	-	-
(2)	45	64	70	6DB32	-	2.5	1.2	3.2	2.4
(3)	30	48	55	8DB25	2DB25	3.0	1.0	-	-
(4)	35	54	60	8DB28	2DB28	3.5	1.3	2.5	2.2



10.7 คานช่วงเดี่ยวน้ำหนักตัดตั้งในรูปข้างล่าง มีช่วงความยาวคาน 7.2 เมตร รองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ 2 ตัน/เมตร รวม น้ำหนักคานเอง และน้ำหนักบรรทุกจร 1.6 ตัน/เมตร ใช้ค่า $f'_c = 240$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.² จงคำนวณ (ก) การแอ่นตัวทันทีจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ข) การแอ่นตัวทันทีจากน้ำหนักบรรทุกคงที่บวกน้ำหนักบรรทุกจร (ค) การแอ่นตัวหลังจากติดตั้งพาร์ติชัน สมมุติว่าพาร์ติชันถูกติดตั้ง 2 เดือนหลังค้ำยันแบบหล่อคานถูกถอดออก และสมมุติว่า 20% ของน้ำหนักบรรทุกจรเป็นน้ำหนักคงค้ำ



10.8 กำหนดการแอ่นตัวทั้งแบบระยะสั้นและระยะยาวสำหรับพื้นพาดทางเดี่ยวช่วงเดี่ยว 4 เมตร มีความหนา 15 ซม. น้ำหนักบรรทุกคงที่ 340 ก.ก./ตรม. และน้ำหนักบรรทุกจร 540 ก.ก./ตรม. เหล็กเสริมใช้ DB16@0.15 ม. สมมุติว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกจรคงค้ำตลอดช่วงเวลา 30 เดือน กำหนด $f'_c = 240$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²

10.9 คานรองรับพื้นหนา 10 ซม. เป็นคานต่อเนื่องสี่ช่วง แต่ละช่วงยาว 8 เมตร ปลายคานช่วงริมฝังเข้าในผนัง เวกานกว้าง $b_w = 30$ ซม. ความลึกคานทั้งหมด $h = 50$ ซม. น้ำหนักบรรทุกคงที่ 2.6 ตัน/ม. (รวมน้ำหนักตัวเองแล้ว) และน้ำหนักบรรทุกจร 7.6 ตัน/ม. เหล็กเสริมรับแรงดึงที่กลางช่วงคานใช้ 4DB28 และเหล็กเสริมที่จุดรองรับ 6DB32 และสมมุติว่า 55% ของน้ำหนักบรรทุกจรคงค้ำกระทำตลอดช่วง 24 เดือน กำหนด $f'_c = 320$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²

10.10 คานดังแสดงในรูปข้างล่างรับ น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ 1.4 ตัน/ม. และน้ำหนักบรรทุกจร 1.8 ตัน/ม. จงคำนวณ (ก) การแอ่นตันระยะสั้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ (ข) การแอ่นตัวระยะสั้นจากน้ำหนักบรรทุกที่บวกน้ำหนักจร และ (ค) การแอ่นตัวหลังติดตั้งพาร์ติชัน สมมติว่าติดตั้งพาร์ติชันหลังถอดค้ำยัน 4 เดือน และ 10% น้ำหนักจรคงค้าง กำหนด $f'_c = 280$ ก.ก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ ก.ก./ซม.²

