ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก วางบนคานเหล็ก ตามมาตรฐาน AASHTO

ก.1 การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก

ในส่วนนี้จะแสดงวิธีการออกแบบโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็กขึ้นรูปแบบรีดร้อนหน้าตัดตัวไอปีกกว้างเป็นที่เป็นสะพานแบบช่วงเดียว พิจารณาออกแบบเป็นสะพานที่เป็นหน้าตัดเชิงประกอบระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตและคานเหล็ก และมีข้อกำหนดในการออกแบบตามที่ระบุด้านล่าง

กรณีที่คานเหล็กขึ้นรูปแบบรีดร้อน คานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้างขนาดใหญ่ที่สุด ที่มีการผลิต คือ I 900 (286 กิโลกรัมต่อเมตร) ไม่เพียงพอในการรับโมเมนต์ดัด อาจพิจารณาใช้คานเหล็กที่ต้องออกแบบเป็นพิเศษแทน

ก.1.1 คุณสมบัติที่ใช้ในการออกแบบ

ชนิดของสะพาน : สะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็กขึ้นรูปแบบรีดร้อน (RC Deck Slab on steel Rolled Beam with Cover platy) สะพานช่วงเดียว (Simple Span) แบบหน้าตัดเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกอย่างเดียว (Live Load Composite Only)

ความยาวสะพาน : 18.00 เมตร จากจุดรองรับถึงจุดรองรับ

ความกว้างสะพาน : 9.93 เมตร

คอนกรีต : $fc' = 280$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (28-day Cylinder strength)

$E_c = 15210\sqrt{f'_c} = 15210\sqrt{280} = 254{,}510$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เหล็กเสริม : SR24, f_y =2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (RB6 และ RB9 เท่านั้น)

SD40, f_y = 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (DB12 หรือใหญ่กว่า)

เหล็กรูปพรรณ : A36 Steel ตามมาตรฐาน AISC, f_y = 2,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

E_S = 2,040,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ก.1.2 วิธีการออกแบบ

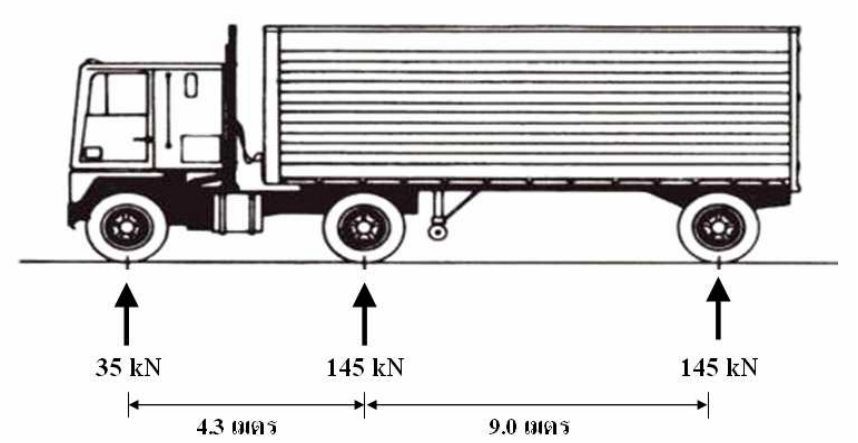
แผ่นพื้น : วิธีกำลัง หรือวิธีตัวคูณน้ำหนัก (Strength Method or Load Factor Design Method) ที่กำหนดโดย AASHTO.

คานเหล็ก : วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Allowable Stress Design) ที่กำหนดโดย AASHTO.

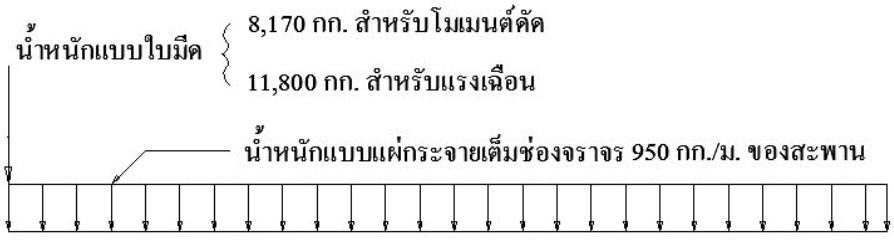
ก.1.3 น้ำหนักบรรทุกในการออกแบบ

น้ำหนักรถยนต์ แบบ HS20 Loading ที่กำหนดโดย AASHTO

น้ำหนักแบบรถบรรทุก	น้ำหนักล้อหน้า	1.75	ตัน
	น้ำหลักล้อกลาง	7.25	ตัน
	น้ำหลักล้อหลัง	7.25	ตัน
น้ำหนักแผ่เทียบเท่า	น้ำหนักแบบใบมีด	11.80	ตัน (สำหรับแรงเฉือน)
		8.17	ตัน (สำหรับค่าโมเมนต์ดัด)
น้ำหนักกระจายสม่ำเสมอ		0.95	ตันต่อเมตร
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต		2.4	ตันต่อลูกบาศก์เมตร



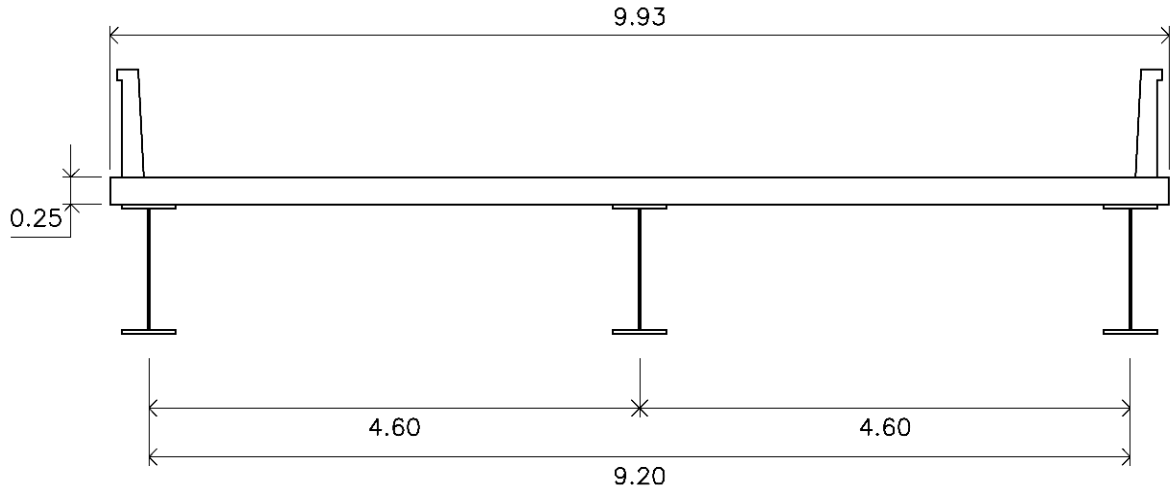
ภาพที่ ก.1 น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ประเภท HS20



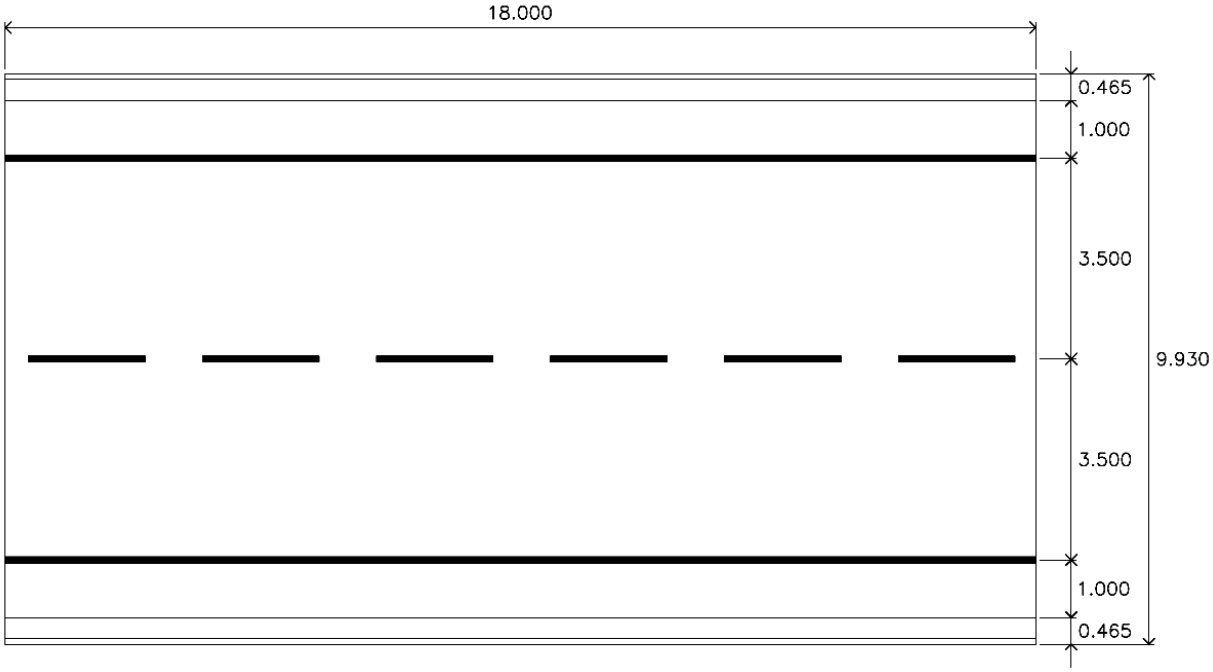
ภาพที่ ก.2 น้ำหนักแผ่เทียบเท่า (Lane Loading) สำหรับรถยนต์แบบ HS20 (AASHTO)

ก.1.4 ขนาดของโครงสร้างสะพาน

รูปแบบของสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว นั้นจะมีรูปร่าง และการจัดวางตำแหน่ง ดังภาพที่ ก.3



(ก) หน้าตัดสะพาน



(ข) ระยะการแบ่งเลน

ภาพที่ ก.3 การกำหนดรูปแบบโครงสร้าง (หน่วยเป็น เมตร)

ก.2 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต

ก.2.1 ความยาวช่วงพื้นที่ใช้ออกแบบ (S)

สำหรับแผ่นพื้นวางบนคานเหล็ก ให้ระยะ S เป็นระยะห่างระหว่างคานเหล็ก

พิจารณาจากภาพที่ ก.3 (ก) จะได้ S = 4.6 - 0.50 = 4.10 เมตร

ก.2.2 ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้น

จากแบบจำลองของสะพานที่ได้สร้างขึ้นมา กำหนดให้แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาอยู่ที่ 0.25 เมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลอง กับมาตรฐาน AASHTO ซึ่งกำหนดให้ค่าการแอ่นตัวของสะพานต้องไม่เกิน $1/800$ ของความยาวช่วงสะพาน ถ้าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ก็สามารถใช้ความหนาที่กำหนดได้

โดยค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองของสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว คือ 0.015 เมตร ส่วนค่าการแอ่นตัวที่กำหนดจาก AASHTO คือ (1/800)(18.0) = 0.0225 เมตร > 0.015 เมตร ดังนั้นสามารถใช้ความหนาของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 0.25 เมตร ได้

ก.2.3 โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

AASHTO กำหนดไว้สำหรับหน้าตัดที่ต้านโมเมนต์ดัด ซึ่งต้องมีเหล็กเสริมรับแรงดึง จะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสำหรับเหล็กรับแรงดึงที่เพียงพอที่จะต้านโมเมนต์ดัดได้ไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์คิดที่ทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracking Moment) ของหน้าตัดนั้น หรือจะต้องไม่น้อยกว่า $4/3$ เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดันที่คำนวณได้

$$\phi M_n \geq 1.2M_{cr}, \phi M_n \geq M_u, \frac{4}{3}As_{(tenstion)} \qquad (1)$$

โดยที่ $M_{cr} = \dfrac{f_r I_g}{y_t}$

$f_r = 2.0\sqrt{fc'}$ = Moment of rupture of concrete

I_g = Moment of inertia of gross section

$y_t = d - kd$ จากแกนสะเทิน ถึงผิวของคอนกรีต ที่เกิดหน่วยแรงดึงของหน้าตัดแตกร้าว

ตามข้อกำหนด AASHTO ได้กำหนดการคำนวณค่าโมเมนต์คัดเนื่องจากน้ำหนักรถยนต์ประเภท HS20 เท่ากับ

$$M_{LL} = \left[\frac{(s + 0.61)}{9.74}\right] \text{ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)} \qquad (2)$$

โดยที่ S คือ ความยาวช่วงของพื้น (เมตร)

ก.2.4 อัตราส่วนแรงกระแทก (Impact Faction, I)

$$I = 15.24/(L+33) \quad , \quad I \leq 0.3 \tag{3}$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)

ก.2.5 วิธีกำลังหรือวิธีตัวคูณน้ำหนัก

$$M_U = 1.3[M_{DL} + 1.67M_{LL}(1+I)] \tag{4}$$

ก.2.6 ข้อมูลสำหรับการออกแบบ (Design Parameters)

Modular ratio, (n) $\quad n = \dfrac{E_s}{E_c}$ (5)

สัมประสิทธิ์ความลึก หรือตัวคูณแบบโมเมนต์, (k) $\quad k = \dfrac{1}{1+\dfrac{f_s}{n.f_c}}$ (6)

โมเมนต์ต้านของคอนกรีต $M_R = \left(\dfrac{f_c+0}{2}\right).b.k.d.j.d = \dfrac{f_c}{2}.k.j.b.d^2$ (7)

โดยที่ $J = 1-\dfrac{k}{3}$

ก.2.7 ข้อกำหนดในการออกแบบ

หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต (f_c')

ว.ส.ท. เมื่อรับแรงดัด $(f_c = 0.45f_c')$

AASHTO เมื่อรับแรงดัด $(f_c = 0.40f_c')$

หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม (รับแรงดึง)

เหล็กเส้นกลม ที่มีกำลังคราก (f_y) ตั้งแต่ 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

f_s = ไม่เกิน 1,200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ก.2.8 เหล็กเสริมกระจายแรง (Distribution Reinforcement)

AASHTO เหล็กเสริมกระจายแรง มีปริมาณเหล็กเป็นร้อยละของเหล็กเสริมหลักที่คำนวณได้จากโมเมนต์คิดบวกดังนี้

กรณีเหล็กเสริมมีแนวขนานกับทิศทางจราจร (สะพานหน้าตัดแผ่นพื้นตัน)

ร้อยละสำหรับเหล็กเสริมกระจายแรง = $\dfrac{55}{\sqrt{s}}$ แต่ไม่เกินร้อยละ 50 (8)

กรณีที่แนวเหล็กเสริมหลักตั้งฉากกับทิศทางจราจร (สะพานแผ่นพื้นวางบนคาน)

ร้อยละสำหรับเหล็กเสริมกระจายแรง = $\dfrac{121}{\sqrt{s}}$ แต่ไม่เกินร้อยละ 67 (9)

โดยที่ S เป็นความยาวช่วงพื้นที่ออกแบบ (เมตร)

ก.2.9 เหล็กเสริมต้านทานการยืดหด (As_{temp})

จะต้องไม่น้อยกว่า 2.65 ตารางเซนติเมตรต่อเมตร และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องไม่เกินสามเท่าของความหนากำแพงหรือแผ่นพื้นและต้องไม่เกิน 45.72 เซนติเมตร วางที่ผิวบนของแผ่นพื้นในทิศทางขนานหรือตั้งฉากกับแนวสะพาน

ก.2.10 การหาโมเมนต์ที่ใช้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงหลัก

เมื่อพิจารณาแผ่นพื้นที่ต่อเนื่องระหว่างคานภายใน เมื่อพิจารณาต่อความกว้างหนึ่งเมตร น้ำหนักบรรทุกตายตัว ประกอบด้วยน้ำหนักของแผ่นพื้น

น้ำหนักบรรทุกตายตัวของแผ่นพื้น, W_{DL} = 0.25×2.4×1 = 0.60 ตันต่อเมตร

จะได้ $M_{DL} = \frac{W_{DL}L^2}{12} = \frac{0.60 \times 4.1^2}{12} = 0.54$ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

$V_{DL} = \frac{W_{DL}L}{2} = \frac{0.60 \times 4.1}{2} = 0.9$ ตัน (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

$M_{LL} = \left[\frac{(s+0.61)}{9.74}\right]$

$= \left[\frac{(4.1+0.61)}{9.74}\right] = 0.37$ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ค่าสัดส่วนแรงกระแทก, I = 15.24/(s+38)

= 15.24/(4.1+38)

= 0.362 > 0.3 **ดังนั้น ใช้** 0.3

$$M_U = 1.3[M_{DL} + 1.67M_{LL}(1+I)]$$

$$M_U = 1.3[0.54 + (1.67x0.37x1.3)]$$

$$= 1.75 \text{ ตัน-เมตร}$$

ตารางที่ ก.1 โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าตัด	M_{DL} **(ตัน-เมตร)**	M_{LL} **(ตัน-เมตร)**	M_U **(ตัน-เมตร)**
ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	0.54	0.37	1.75

พิจารณาใช้ค่าโมเมนต์คิดที่คำนวณได้จากแผ่นพื้นต่อเนื่องคานตัวในในการออกแบบ

$M_U = 1.3[0.54 + (1.67x0.37x1.3)] = 1.75$ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ก.2.11 เหล็กเสริมรับแรงดึงหลักที่ต้องการ

$d = 0.25 - 0.025 = 0.225$ เมตร

$n = \frac{E_S}{E_C} = \frac{2.04 \times 10^6}{15218\sqrt{280}} = 8.015$ **ใช้** 8.0

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{n.f_c}} = \frac{1}{1+\left[\frac{1{,}200}{8.0\times(0.4\times 280)}\right]} = 0.43$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = 1-\frac{0.43}{3} = 0.86$$

$As = \frac{M_U}{f_s\, jd} = \frac{1{,}750\times 100}{(1{,}200\times 0.86\times 22.5)} = 6.92$ ตารางเซนติเมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริม RB9@100 มิลลิเมตร (As = 7.04 ตารางเซนติเมตร ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ก.2.12 เหล็กเสริมกระจายแรง

ร้อยละ $As, dist = \frac{121}{\sqrt{s}} = \frac{121}{\sqrt{4.1}}$ = ร้อยละ 59.76 < ร้อยละ 67

ดังนั้น ใช้ ร้อยละ $A_{s,dist}$ = ร้อยละ 59.76 ของเหล็กเสริมหลักจะได้

$A_{s,dist}$ = 0.5976 × 6.92 = 4.14 ตารางเซนติเมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริมกระจายแรง RB9 @100 มิลลิเมตร

((A_s) = 7.04 ตารางเซนติเมตร ต่อความกว้าง 1 เมตร) **ผ่าน**

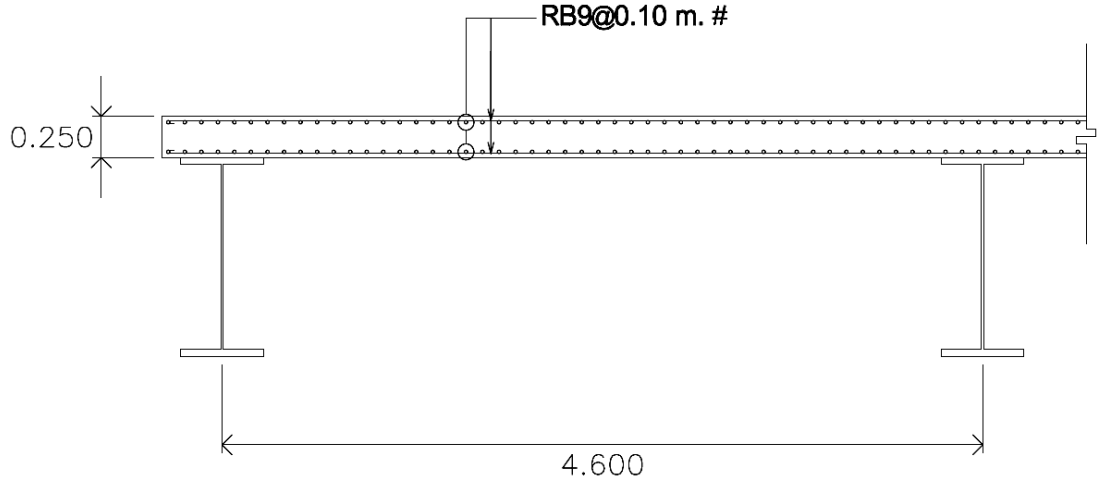
ก.2.13 เหล็กเสริมต้านทานการยืดหด

(As_{temp}) = 2.65 ตร.ซม. ต่อความกว้าง 1 เมตร

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริมต้านทานการยืดหด RB9@100 มิลลิเมตร

((As_{temp}) =4.04 ตารางเซนติเมตร)

ผ่าน



ภาพที่ ก.4 รายละเอียดเหล็กเสริมในพื้นคอนกรีต

ก.3 ออกแบบคานเหล็ก

เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบคานแต่ละตัวจะเป็นลักษณะเดียวกัน ถึงจะใช้คานตัวใน ในการออกแบบ

ก.3.1 น้ำหนักบรรทุก, โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน

ในขั้นตอนก่อสร้างไม่มีการตั้งนั่งร้านค้ำยันคานเหล็กในระหว่างการเทคอนกรีตแผ่นพื้น สะพานที่ออกแบบจึงเป็นสะพานหน้าตัดเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรอย่างเดียว (Live Load composite only)

ดังนั้นคานเหล็กจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวของคานเหล็ก แผ่นพื้นคอนกรีต กว้าง 4.1 เมตร และส่วนประกอบอื่น ๆ ซึ่งรวมกันเป็นน้ำหนักบรรทุกตายตัว, DL จะได้

น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่กระทำกับคานเหล็ก

แผ่นพื้น : 0.75 × 2.4	=	1.80	ตันต่อเมตร
คานเหล็กและส่วนประกอบอื่น ๆ โดยประมาณ	=	0.50	ตันต่อเมตร
รวม DL ต่อคานหนึ่งตัว	=	2.30	ตันต่อเมตร

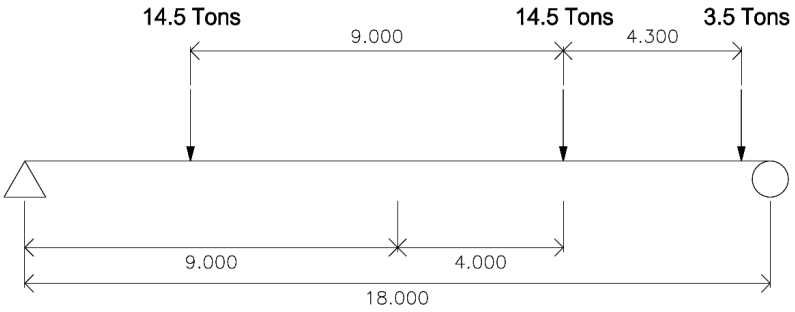
โมเมนต์ดัดสูงสุดที่กึ่งกลางความยาวช่วง

$$M_{DL} = \frac{2.30 \times (18.0)^2}{8} = 93.15 \text{ ตัน-เมตร}$$

แรงเฉือนสูงสุดเกิดที่จุดรองรับ

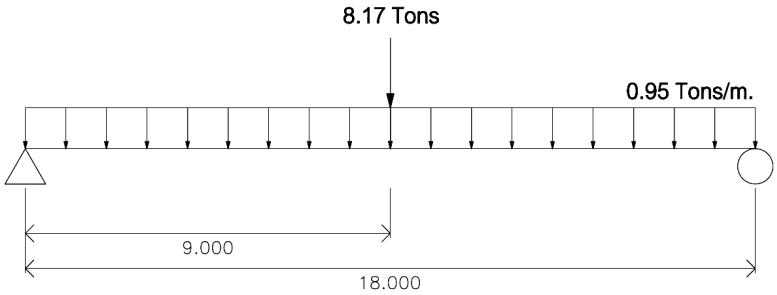
$$V_{DL} = \frac{2.30 \times 18.0}{2} = 20.7 \text{ ตัน}$$

พิจารณาหาโมเมนต์ภายใน โดยการจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าของน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 เพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดในคานสะพาน ตามลำดับ



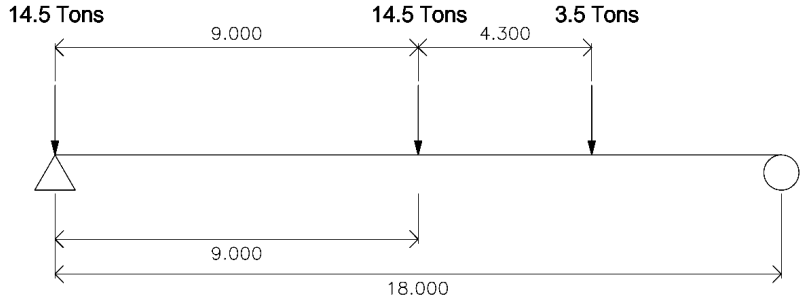
(ก) การจัดรางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถยนต์ทุกเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

(โมเมนต์ดัด M_{LL} = 99.82 ตัน-เมตร)



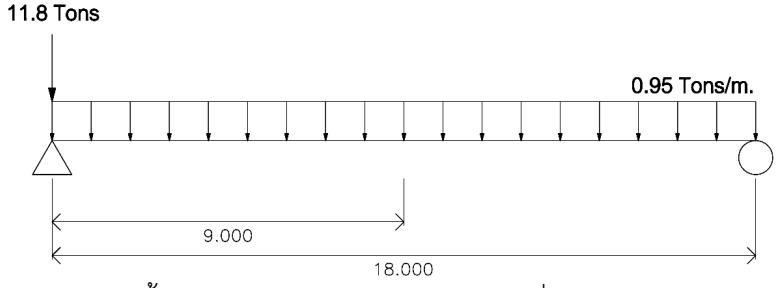
(ข) การจัดรางน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

(โมเมนต์ดัด M_{LL} = 75.24 ตัน-เมตร)



(ค) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถบรรทุกเพื่อให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด

(แรงเฉือน V_{LL} = 22.66 ตัน)



(ง) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าเพื่อให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด

(แรงเฉือน V_{LL} = 20.35 ตัน)

ภาพที่ ก.5 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้เกิดแรงภายในสูงสุด

จากภาพที่ ก.5 (ก) และ(ข) ตามลำดับ

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบรถบรรทุก ; $M_{LL,TL} = 99.82$ ตัน-เมตร

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักแบบแผ่เทียบเท่า ; $M_{LL,TL} = 75.240$ ตัน-เมตร

ดังนั้น โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 = 99.82 ตัน-เมตร

และ โมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 ที่กระทำต่อคานหนึ่งตัว คือ

M_{LL} = 99.82 ตัน-เมตร ต่อ คาน

จากภาพที่ ก.5 (ค) และ(ง) ตามลำดับ

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบรถบรรทุก ; $V_{LL,TL} = 22.66$ ตัน

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่เทียบเท่า ; $V_{LL,LL} = 20.350$ ตัน

ดังนั้น แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ H20 = 22.66 ตัน

และ น้ำหนักแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ HS20 ที่กระทำต่อคานหนึ่งตัว คือ

V_{LL} = 22.66 ตัน ต่อ คาน

อัตราส่วนแรงกระแทกจะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักบรรทุกจรดังนี้

I = 15.24 / (L+38)

= 15.24 / (18.0 + 38)

= 0.272 ซึ่งน้อยกว่า 0.300 ใช้ I = 0.272

ดังนั้น $M_{LL+I} = (1+I)M_{LL} = (1+0.272)(99.82) = 126.97$ ตัน-เมตร ต่อ คาน

$V_{LL+I} = (1+I)V_{LL} = (1+0.272)(22.66) = 28.83$ ตัน ต่อ คาน

ตารางที่ ก.2 แรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียว

	Dead Load	Live Load+I
โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางช่วง (ตัน-เมตร)	93.15	126.97
แรงเฉือนที่จุดรองรับ (ตัน)	27.70	28.83

ก.3.2 คำนวณหน้าตัดที่ต้องการของปีกคานบน และปีกคานล่างของคานเหล็ก

แผ่นพื้นคอนกรีตหนา 25.0 cm. และความหนาประสิทธิผลของแผ่นพื้นคอนกรีตสำหรับหน้าตัดเชิงประกอบคือ 25.0 cm. ดังนั้น ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของปีกคานบนของคานรูปตัวที่จะเป็นค่าที่น้อยที่สุดจากค่าต่อไปนี้

ความยาวช่วง/4 , L/4 = 18.0 / 4 = 4.5 เมตร (450 เซนติเมตร)

ระยะระหว่างคาน = 410 เซนติเมตร

และ 12 เท่าของความหนาแผ่นพื้น = 12 × 25.0 = 300 เซนติเมตร

ดังนั้น ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นคอนกรีตสำหรับหน้าตัดเชิงประกอบ คือ 410 เซนติเมตร

พิจารณาใช้คานหน้าตัดตัวไอปีกกว้างที่มีความลึก 120 เซนติเมตร และใช้ค่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ f_a = 1,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดของปีกล่างของคานเหล็กที่ต้องการ $(A_{bf,r})$ สามารถประมาณได้จาก

$$A_{bf,r} = \left(\frac{1.0\times10^5}{f_a}\right)\left(\frac{M_{DL}}{D_{cg}} + \frac{M_{LL+1}}{D_{cg}+t}\right) \qquad (10)$$

เมื่อ D_{cg} = ระยะระหว่างปีกคาน, D_{cg} = 120 เซนติเมตร

t = ความหนาของพื้นคอนกรีต, t = 25 เซนติเมตร

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการปีกล่างของคานเหล็ก $(A_{bf,r})$ มีค่าเท่ากับ

$$A_{bf,r} = \left[\frac{1.0\times10^5}{1{,}400}\right]\left[\frac{93.15}{120} + \frac{126.97}{120+25}\right]$$

= 118.0 ตารางเซนติเมตร

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกคานบนของคานเหล็ก, $(A_{tf,r})$ กับพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกคานด้านล่างของคานเหล็ก, $(A_{bf,r})$ อาจประมาณได้จากความยาวช่างคาน L ได้ดังนี้

$$R = \frac{A_{tf,r}}{A_{bf,r}} = \frac{15.0}{(57.0-L)} \qquad (11)$$

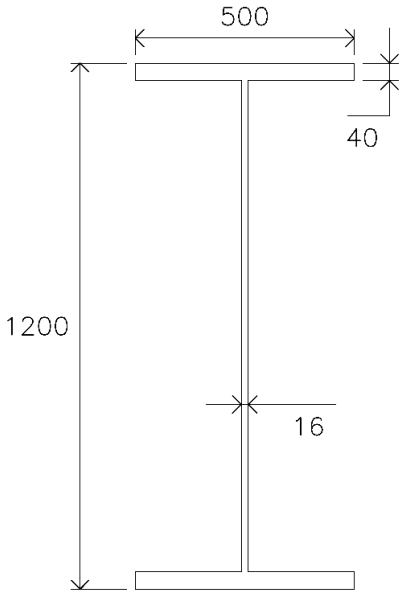
ดังนั้น $$R = \frac{15.0}{(57.0-18.0)} = 0.3846$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกบนของคานเหล็ก, $A_{tf,r}$ มีค่าเท่ากับ

$A_{tf,r} = R(A_{bf,r}) = 0.3846\times118.0 = 45.38$ ตารางเซนติเมตร

ดังนั้น หน้าตัดคานเหล็กที่ต้องกาจะต้องมีความลึกไม่น้อยกว่า 1200 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัดของ ปีกบนไม่น้อยกว่า 45.38 ตารางเซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดของปีกล่างไม่น้อยกว่า 118.0 ตารางเซนติเมตร

พิจารณาใช้คานเหล็กขึ้นรูปแบบรีดร้อนหน้าตัดได้ปีกกว้าง (Wide Flange) ประเภท 1200WB455 มีความกว้างทั้งหมด 500 มิลลิเมตร ปีกคานหนา 40 มิลลิเมตร จะมีพื้นที่หน้าตัดของปีกคาน = 4.0 x 5.00 = 200.00 ตารางเซนติเมตร > 118.0 และ 45.38 ตารางเซนติเมตร **ผ่าน**



ภาพที่ ก.6 รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)

ก.3.3 การคำนวณคุณสมบัติของคานเหล็ก

(1) การคำนวณคุณสมบัติของคานเหล็กที่หน้าตัดที่กึ่งกลางคาน

วัสดุกลสมบัติ

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, E_C : 255,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, E_S : 2,040,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$n = \frac{E_S}{E_C}$: 8.0

คานเหล็ก (1200WB455)

ความหนาปีก, t_1	:	4	เซนติเมตร
ความหนาเอว, t_2	:	1.6	เซนติเมตร
ความกว้างของหน้าตัด, b	:	50	เซนติเมตร
ความลึกของหน้าตัด, h	:	120	เซนติเมตร
จำนวนของคานเหล็ก	:	1	ชิ้น
y_{CL}	:	60	เซนติเมตร
พื้นที่หน้าตัด	:	579.2	ตารางเซนติเมตร
I_{WF}	:	1,533,457	(เซนติเมตร)^4

ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดเชิงประกอบไปยัง

ขอบบนของคานเหล็ก = y_{st} : 60 เซนติเมตร

ขอบล่างของคานเหล็ก = y_{sb} : 60 เซนติเมตร

โมดูลัสของหน้าตัด (S)

ขอบบนของคานเหล็ก (S_{st}) = I_{WF} / y_{st} : 25,600 (เซนติเมตร)^3

ขอบล่างของคานเหล็ก (S_{sb})= I_{WF} / y_{sb} : 25,600 (เซนติเมตร)^3

ในกรณีที่คานสะพานจะรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงเวลาสั้น ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกจรและแรงกระแทก ($n = \frac{E_s}{E_c}$)

(2) การคำนวณคุณสมบัติเชิงประกอบของกึ่งกลางช่วงสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรรวมแรงกระแทก ($n = 8.0$)

วัสดุกลสมบัติ

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, E_C : 255,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, E_S : 2,040,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$n = \frac{E_S}{E_C}$: 8.0

แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete deck)

ความกว้างของช่วงแผ่นพื้น, B	:	410	เซนติเมตร
ความหนาของแผ่นพื้น, H	:	25	เซนติเมตร
y_{CL}	:	12.5	เซนติเมตร
พื้นที่หน้าตัด	:	10,250	ตารางเซนติเมตร
I_{DECK}	:	533,854	(เซนติเมตร)^4

คานเหล็ก (1200WB455)

ความหนาปีก, t_1	:	4	เซนติเมตร
ความหนาเอว, t_2	:	1.6	เซนติเมตร
ความกว้างของหน้าตัด, b	:	50	เซนติเมตร
ความลึกของหน้าตัด, h	:	120	เซนติเมตร
จำนวนของคานเหล็ก	:	1	ชิ้น
y_{CL}	:	60	เซนติเมตร
พื้นที่หน้าตัด	:	579.2	ตารางเซนติเมตร
I_{WF}	:	1,533,457	(เซนติเมตร)^4

หน้าตัดคอมโพสิต

y (Centroil of composite section) : 33 เซนติเมตร

I_{DECK} : 4.86 x10^6 (เซนติเมตร)^4

I_{WF} : 3.10 x10^6 (เซนติเมตร)^4

$I_{comp.}$: 7.95 x10^6 (เซนติเมตร)^4

ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดเชิงประกอบไปยัง

ขอบบนของคานเหล็ก = y_{st} : 8 เซนติเมตร

ขอบล่างของคานเหล็ก = y_{sb} : 112 เซนติเมตร

ขอบบนของแผ่นคอนกรีต = y_c : 33 เซนติเมตร

โมดูลัสของหน้าตัด (S)

ขอบบนของคานเหล็ก (S_{st}) = $I_{comp.} / y_{st}$: 99.38x10^4 (เซนติเมตร)^3

ขอบล่างของคานเหล็ก (S_{sb}) = $I_{comp.} / y_{sb}$: 7.10x10^4 (เซนติเมตร)^3

ขอบล่างของแผ่นคอนกรีต (S_c) = $I_{comp.} / y_c$: 24.10x10^4 (เซนติเมตร)^3

ก.3.4 ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด

เนื่องจากไม่มีการค้ำยันคานเหล็กในระหว่างการเทคอนกรีตของแผ่นพื้นคอนกรีต คานสะพานที่ออกแบบจะเป็นคานหนังตัดเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรอย่างเดียว (Live Load Composite only) หน้าตัดคานเหล็กจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัว (DL) ในขณะที่หน้าตัดคานเชิงประกอบจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (SDL) และน้ำหนักบรรทุกจะรวมแรงกระแทก (LL+I)

การคำนวณน้ำหนักบรรทุกตายตัว (DL) ใช้โมดูลัสของหน้าตัดของคานเหล็กในการคำนวณหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (SDL) ใช้โมดูลัสหน้าตัดเชิงประกอบ (3n=24)หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจะรวมกระแทก (LL+I) ใช้โมดูลัสหน้าตัดเชิงประกอบ (n=8)

ตารางที่ 3.5 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน แสดงว่าหน่วยแรงรวมที่ขอบบนของคานเหล็กและขอบล่างของเหล็กมีค่าน้อยกว่าและใกล้เคียงกับหน่วยแรงที่ยอมให้ (f_a = 1,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ ก.3 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเชิงประกอบบริเวณหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด

หน่วยแรงในคานเหล็ก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
ขอบบนของคานเหล็ก (แรงอัด)	**ขอบล่างของคานเหล็ก (แรงดึง)**
DL : f_b = 93.15×10^3× 10^2/2.56×10^4 = 363.87 LL+I : f_b = 126.97×10^3× 10^2/99.38×10^4 = 12.78	f_b = 93.15×10^3× 10^2/2.56×10^4 = 363.87 f_b = 126.97×10^3×10^2/7.10×10^4 = 178.83
หน่วยแรงรวม = 376.65 < f_a (1,400) **ผ่าน**	หน่วยแรงรวม = 542.70 < f_a (1,400) **ผ่าน**

ตารางที่ ก.4 แสดงหน่วยแรงร่วมที่ขอบบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ($f_{ca} = 0.4\,fc' = 112$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

หน่วยแรงที่ผิวบนของแผ่นพื้นคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
LL+I : f_{cb} = 126.97×10^3×10^2/(24.10×10^4 ×8.0) = 6.59 หน่วยแรงรวม = 6.59 < f_{ca} (112) **ผ่าน**

ก.3.5 ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนสูงสุด

สำหรับคานเหล็กรูปตัวไอปีกกว้าง มีแรงเฉือนสูงสุดที่คำนวณไว้คือ 28.83 ตัน ที่จุดรองรับ เหล็กแผ่นตั้งมีความลึกเท่ากับ 120 เซนติเมตร หนา 1.60 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก

แผ่นตั้งคือ 120 × 1.60 = 192 ตารางเซนติเมตร

หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยในเหล็กแผ่นตั้งเท่ากับ

f_v = (28.83×1,000) / 192 = 150.16 < 835 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เหล็กเสริมข้างคานรับแรง (Bearing Stiffeners) ตรงปลายคานไม่จำเป็นสำหรับคานขึ้นรูปแบบรีดร้อน ถ้าหากหน่วยแรงเฉือนของเหล็กแผ่นตั้งไม่เกินร้อยละ 75 ของค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ (โดยที่หน่วยแรงเฉือนสำหรับเหล็ก A36 มีค่าเท่ากับ 835 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ เท่ากับ

150.16 / 835 = 0.180 < 0.75

ดังนั้น ไม่ต้องใส่เหล็กเสริมข้างคานรับแรงกด (Bearing Stiffeners) ก็ได้