# ภาคผนวก ก: ตัวอย่างการออกแบบ

## ลักษณะสะพานแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการรวบรวมข้อมูลสะพานที่อยู่ในความดูแลรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท พบว่าสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab Bridge) เป็นสะพานช่วงสั้น มีความยาวช่วงประมาณ 5-10 เมตร ปกตินิยมการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (Cast in Situ) โดยการวางเหล็กเสริมเป็นแบบแผ่นพื้น 2 ทาง ความหนาของพื้นสะพานมีการออกแบบตั้งแต่ 32 เซนติเมตร ถึง 56 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับความยาวของสะพาน รายละเอียดของสะพานดังแสดงในตารางที่ ก-1 (แต่ทั้งนี้แบบก่อสร้างสะพานของกรมทางหลวงชนบทได้มีการปรับปรุงมาตลอดและต่อเนื่องรายละเอียดต่างๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากนี้)

**ตารางที่ ก-1** แสดงข้อมูลโดยทั่วไปของสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงแบบเลขที่ สอมส.38103

| Bridge Dimension | | Slab Depth | | Material Properties | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Road Width | 8 m. | Length (m.) | Depth (m.) | Concrete | $f'_c$ (28 days) | 210 ksc. |
| Span Length | 5-10 m. | 5 | 0.33 | Steel | $f_s$ (DB) | 1500 ksc. |
| Bridge Skew | 0-30° | 6 | 0.37 | | $f_s$ (RB) | 1200 ksc. |
| Height | > 7 m. | 7 | 0.41 | Top Covering (Slab) | | 5.0 cm. |
| Depth | 0.35-0.55 m. | 8 | 0.46 | Under Covering (Slab) | | 2.5 cm. |
| (depend on span length) | | 9 | 0.51 | Chamfer | | 2.5 cm. |
| | | 10 | 0.56 | Topping include with slab | | |
| Side Slope | 1.5% | | | | | |

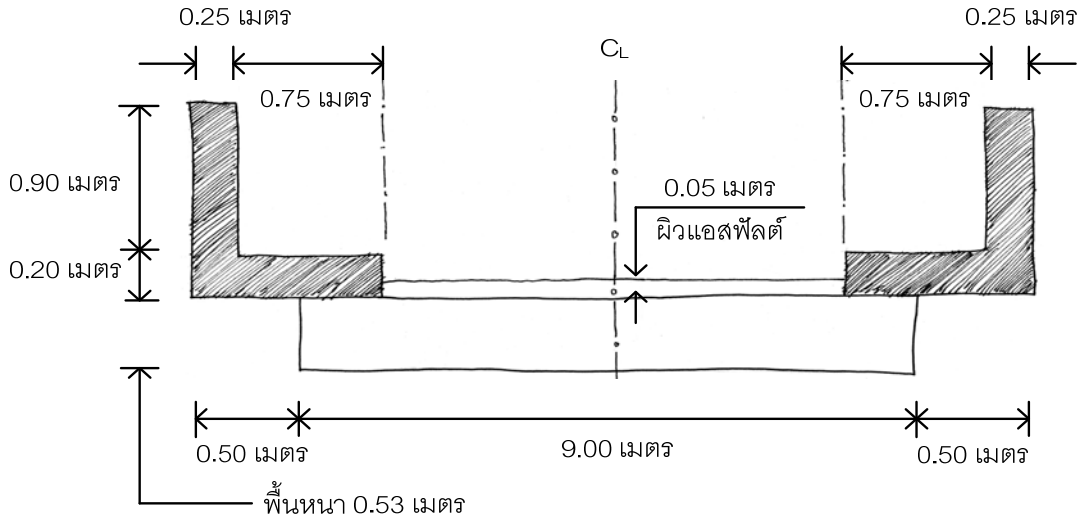
| Steel Reinforcement | | | |
|---|---|---|---|
| | size | Spacing (m) | |
| Bottom | Φ = 12 mm | 0.16-0.13 | (transverse) |
| | Φ = 25 mm | 0.19-0.10 | (longitudinal) |
| Top | Φ = 9 mm | 0.30 | (transverse) |
| | Φ = 9mm | 0.30 | (longitudinal) |

| Bridge Support | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Bearing Support: NEOPRENE PAD | | Fixed Support | | Free Support | |
| | | t | 1 cm | t | 1 cm |
| Dowel Spacing | 1.00 m. | Φ | 16 mm | Φ | 16 mm |
| Gap | 1 cm. | Grout with elastic material | | | |

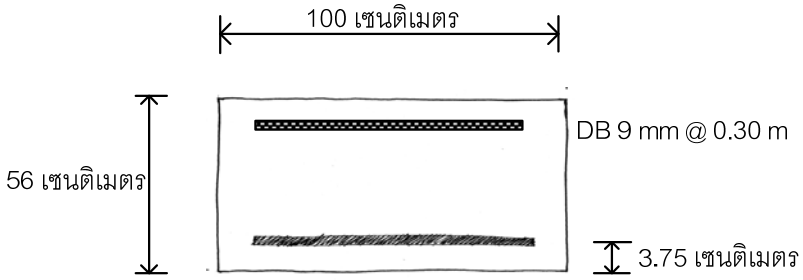
**ตัวอย่างการออกแบบ**

ตัวอย่างที่ 1 การออกแบบสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความต่อเนื่องโดยใช้เหล็กเสริม

(แบบ สอมส.38103 สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท กระทรวงมหาดไทย)




**หน้าตัด**




As = 52.22 ตารางเซนติเมตร / ความกว้าง 1 เมตร

เหล็กเสริมหลัก

DB 2.5 cm @ 0.094 m

**การเสริมเหล็กในพื้น (ต่อความกว้าง 1 หน่วย)**

**กำหนดให้**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ความยาวช่วงพาดของสะพาน | 10 เมตร | | |
| คุณสมบัติของวัสดุ | คอนกรีต | $f_c' = 210$ | กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| | | $w_c = 2,400$ | กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร |
| | เหล็กเสริม | $f_y = 3,000$ | กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| | แอสฟัลต์ | $w_{Asphalt} = 2,300$ | กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร |
| Condition Rating | 6 | | |
| ปริมาณการจราจรต่อวัน | ไม่ทราบ | | |
| มุมเอียงของสะพาน (Skew) | 0 องศา | | |
| Dynamic Load Allowance (IM) | 33 เปอร์เซ็นต์ | | |

**การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่**

พิจารณาต่อความกว้าง 1 เมตร

A) องค์ประกอบ ผลจากน้ำหนักโครงสร้าง ( $DC$ )

พื้นคอนกรีต $0.56(1.0)(2,400) = 1,344$ กิโลกรัมต่อเมตร

ทางเดินเท้า และ ราวกันตก $2\left[0.2(1.0)+0.9(0.25)\right](1.0)(2,400)/9$

$= 226.6$ กิโลกรัมต่อเมตร

น้ำหนักรวมของพื้นคอนกรีต ทางเดินเท้า และราวกันตก ( $DC$ ) $= 1,570.6$ กิโลกรัมต่อเมตร

$M_{DC} = \frac{1}{8}(1570.6)(10)^2$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$= 19,633$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$V_{DC} = \frac{1}{2}(1570.6)(10)$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$= 7853$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

B) ผิวทาง ผลจากน้ำหนักผิวทาง ( $DW$ )

ความหนาของแอสฟัลต์ = 5 เซนติเมตร

น้ำหนักแอสฟัลต์เททับหน้า $0.05(1.0)(2300) = 115$ กิโลกรัมต่อเมตร

$M_{DW} = \frac{1}{8}(115)(10)^2$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$= 1,438$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$V_{DW} = \frac{1}{2}(115)(10)$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

$= 575$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

**การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร**

พิจารณาความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนักของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุก โดยเลือกค่าที่น้อย ซึ่งได้จากพิจารณารูปแบบการกระทำของน้ำหนักบรรทุก 2 แบบ

A) น้ำหนักบรรทุกกระทำเลนเดียว

$E = 250 + 0.42\sqrt{L_1 W_1}$ LRFD 4.6.2.3 Eq. 4.6.2.3-1

เมื่อ $E$ = ความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนัก

$L_1$ = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18000 มิลลิเมตร

$W_1$ = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 9000 มิลลิเมตร

ในที่นี้ $L_1$ = 10000 มิลลิเมตร < 18000 มิลลิเมตร Ok.

$W_1$ = 9000 มิลลิเมตร = 9000 มิลลิเมตร Ok.

$E = 250 + 0.42\sqrt{10,000(9,000)}$

$= 4,234.47$ มิลลิเมตร

$= 4.234$ เมตร

B) น้ำหนักบรรทุกกระทำมากกว่า 1 เลน

$$E = 2100 + 0.12\sqrt{L_1 W_1} \le \frac{W}{N_L}$$ LRFD 4.6.2.3 Eq.4.6.2.3-2

เมื่อ $E$ = ความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนัก

$L_1$ = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18000 มิลลิเมตร

$W_1$ = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 9000 มิลลิเมตร

$W$ = ความกว้างของสะพานไม่รวมทางเดินเท้า (Clearance)

$N_L$ = จำนวนเลนเทียบเท่าที่ใช้ในการคำนวณ

ในที่นี้ $L_1$ = 10000 มิลลิเมตร < 18000 มิลลิเมตร Ok.

$W_1$ = 9000 มิลลิเมตร = 9000 มิลลิเมตร Ok.

$E = 2100 + 0.12\sqrt{10000(9000)}$

$= 3238.42$ มิลลิเมตร

$= 3.238$ เมตร $< 4.234$ เมตร

$W = 8500$ มิลลิเมตร

$N_L = \frac{W}{3600} = \frac{8500}{3600}$ = 2 Design Lanes LRFD 3.6.1.1.1

$\frac{W}{N_L} = \frac{8500}{2}$ = 4250 มิลลิเมตร > 3238 มิลลิเมตร Ok.

เพราะฉะนั้น ใช้ $E$ = 3.238 เมตร

จากข้อกำหนดของ AASHTO 3.6.1.3 (2003) ค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบหรือประเมินสะพาน พิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร โดยเลือกใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่มากกว่าระหว่างผลจาก Tandem Load (น้ำหนักบรรทุก 2 เพลา ขนาดเพลาละ 11000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่างเพลา 1.2 เมตร) และ ผลจาก Truck Load ซึ่งค่านี้รวมผลของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นด้วย จากนั้นนำไปรวมกับค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Design Lane Load ขนาด 9.3 นิวตันต่อมิลลิเมตร กระจายต่อความกว้างสะพาน 3 เมตร

Dynamic Load Allowance = 33 เปอร์เซ็นต์

ความกว้างของแถบเทียบเท่า $(E)$ = 3.238 เมตร

Design Lane Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

At Middle Span

Design Lane Load = $9.3\left(\frac{1,000}{9.807}\right)$ = 948.30 กิโลกรัม/เมตร

Design Lane Load Moment = $\frac{1}{8}(948.3)(10)^2$ กิโลกรัม-เมตร

= 11,853 กิโลกรัม-เมตร

At Support

Design Lane Load Shear = $\frac{1}{2}(948.3)(10)$ กิโลกรัม-เมตร

= $4,741$ กิโลกรัม-เมตร

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 7,027 กิโลกรัม-เมตร

At Intermediate Support

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าโมเมนต์ที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 12,456 กิโลกรัม-เมตร

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าแรงเฉือนที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 6,247 กิโลกรัม

Truck Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) ซึ่งมีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 70,091 กิโลกรัม-เมตร หรือ 52,700 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัด (บวก) สูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) ซึ่งมีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 55,640 กิโลกรัม-เมตร หรือ 41,835 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

At Intermediate Support

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัด (ลบ) สูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) มีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 57,580 กิโลกรัม-เมตร หรือ 43,293 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 32,341 กิโลกรัม หรือ 24,317กิโลกรัม (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

Tandem Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 65,641 กิโลกรัม-เมตร หรือ 49,354 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัด (บวก) สูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 51,950 กิโลกรัม-เมตร (หรือ 39,060 กิโลกรัม-เมตร ไม่รวม IM)

At Intermediate Support

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัด (ลบ) สูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 26,480 กิโลกรัม-เมตร หรือ19,910 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ IM)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 28,077 กิโลกรัม หรือ 21,111 กิโลกรัม (ไม่รวมผลของ IM)

Design Load

พิจารณาน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 11,853+1.33(52,700)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 81,945$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{81,945}{3.238}\right) = 25,307 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 7,027+1.33(41835)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 62667$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{62667}{3.238}\right) = 19353 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

At Intermediate Support

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 12456+1.33(43293)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 70036$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{70036}{3.238}\right) = 21629 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

Design Load Shear $V_{LL+IM} = 6247+1.33(24317)$ กิโลกรัม

$= 38589$ กิโลกรัม

แรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{V_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{38589}{3.238}\right) = 11917 \quad \text{กิโลกรัม/เมตร}$$

**<u>การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของหน้าตัด</u>**

**หาความต้านทานการดัด** (Flexural Strength)

หน้าตัดสี่เหลี่ยม $b = 100$ เซนติเมตร

$$c = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' \beta_1 b} \qquad \text{LRFD 5.7.3.2.3 Eq. (5-19)}$$

$A_s = 52.22$ ตารางเซนติเมตร

$\beta_1 = 0.85$

$$c = \frac{52.22(3,000)}{0.85(210)(0.85)(100)}$$

$= 10.32$ เซนติเมตร

$a = c\beta_1$

$= 10.32(0.85)$

$= 8.77$ เซนติเมตร

$d_s = 56 - 3.75 = 52.25$ เซนติเมตร

$$M_n = A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2}\right)$$

$$= 52.22(3,000)\left(52.25 - \frac{8.77}{2}\right)$$

$= 7,493,831$ กิโลกรัม-เซนติเมตรต่อเมตร

$M_n = 74,938$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

**หาความต้านทานแรงเฉือน** (Shear Strength)

กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{210}(100)(52.22)$$

$V_c = 40107$ กิโลกรัม

**การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามหลักการของ LRFR**

MOMENT RATING FACTOR

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_p)(P)}{(\gamma_L)(LL + IM)}$$

เมื่อ $C = \varphi_c \varphi_s \varphi R_n$

**ตัวคูณปรับค่า** (for Strength Limit States)

a) Resistance Factor $\varphi$

$\varphi = 0.90$ สำหรับโมเมนต์ดัด LRFD 5.5.4.2

b) Condition Factor $\varphi_c$

$\varphi_c = 1.00$ สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 6

c) System Factor $\varphi_s$

$\varphi_s = 1.00$ สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

**ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(74938) - (1.25)(19633) - (1.25)(1438)}{(1.75)(25307)}$

$= 0.92$

Operating; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(74938) - (1.25)(19633) - (1.25)(1438)}{(1.35)(25307)}$

$= 1.20$

**ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING ( At middle span)

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(74938) - (1.25)(19633) - (1.25)(1438)}{(1.75)(19353)}$

$= 1.21$

Operating; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(74938) - (1.25)(19633) - (1.25)(1438)}{(1.35)(19353)}$

$= 1.57$

**สรุปค่า Moment Rating Factor**

| Limit States | | ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง | | ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Inventory | Operating | Inventory | Operating |
| Strength I | Flexure | 0.92 | 1.20 | 1.21 | 1.57 |

SHEAR RATING FACTOR

**ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง**

จากข้อกำหนดของ AASHTO (2003) “การออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือพื้นสะพานที่กระทำตามข้อกำหนดของ AASHTO ถือได้ว่าเป็นการออกแบบที่พิจารณาถึงแรงเฉือนไปในตัว ดังนั้นจึงไม่ต้องตรวจสอบแรงเฉือนสำหรับการประเมินน้ำหนักบรรทุกออกแบบ และน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมายของชิ้นส่วนคอนกรีต”

**ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

**ตัวคูณปรับค่า** (for Strength Limit States)

d) Resistance Factor $\varphi$

$\varphi = 0.85$ สำหรับแรงเฉือน

e) Condition Factor $\varphi_c$

$\varphi_c = 1.00$ สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 6

f) System Factor $\varphi_s$

$\varphi_s = 1.00$ สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \dfrac{(1.0)(1.0)(0.85)(40107)-(1.25)(7853)-(1.25)(575)}{(1.75)(11917)}$

$= 1.13$

Operating; $RF = \dfrac{(1.0)(1.0)(0.85)(40107)-(1.25)(7853)-(1.25)(575)}{(1.35)(11917)}$

$= 1.46$

เพราะฉะนั้นที่บริเวณ Intermediate Support มีค่า Inventory Shear Rating Factor มากกว่า 1.00 นั่นคือสะพานสามารถรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุงพื้นสะพานให้ต่อเนื่อง เมื่อประเมินด้วยน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน ได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน ไม่จำเป็นต้องทำการเสริมกำลังเพื่อรับแรงเฉือน

ออกแบบปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับรับโมเมนต์ลบ บริเวณ Intermediate Support

สมมติให้บริเวณดังกล่าวมีค่า Inventory Rating Factor เท่ากับ 1.00 จากสมการข้างต้น จะได้

$$R_n = \frac{RF\left(\gamma_L\right)\left(LL+IM\right)+\left(\gamma_{DC}\right)\left(DC\right)+\left(\gamma_{DW}\right)\left(DW\right)}{\left(\varphi_c\right)\left(\varphi_s\right)\left(\varphi\right)}$$

$$R_n = \frac{1.00(1.75)(19353)+(1.25)(19633)+(1.25)(1438)}{(1.0)(1.0)(0.9)}$$

$$R_n = 80785$$

$\beta_1$ = 0.85 เพราะ $f_c' < 280$

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y}\left(\frac{6120}{6120 + f_y}\right)$$

$$\rho_b = \frac{0.85(210)(0.85)}{3000}\left(\frac{6120}{6120+3000}\right)$$

$$\rho_b = 0.0339$$

$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b = 0.75(0.0339) = 0.0254$$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = \frac{14}{3000} = 0.00467$$

$$R = \frac{M_n}{bd^2}$$

$$R = \frac{80785(100)}{100(53.5)^2} = 28.22$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f_c'} = \frac{3000}{0.85(210)} = 16.80$$

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

$$\rho = \frac{1}{16.80}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2(16.80)(28.22)}{3000}}\right)$$

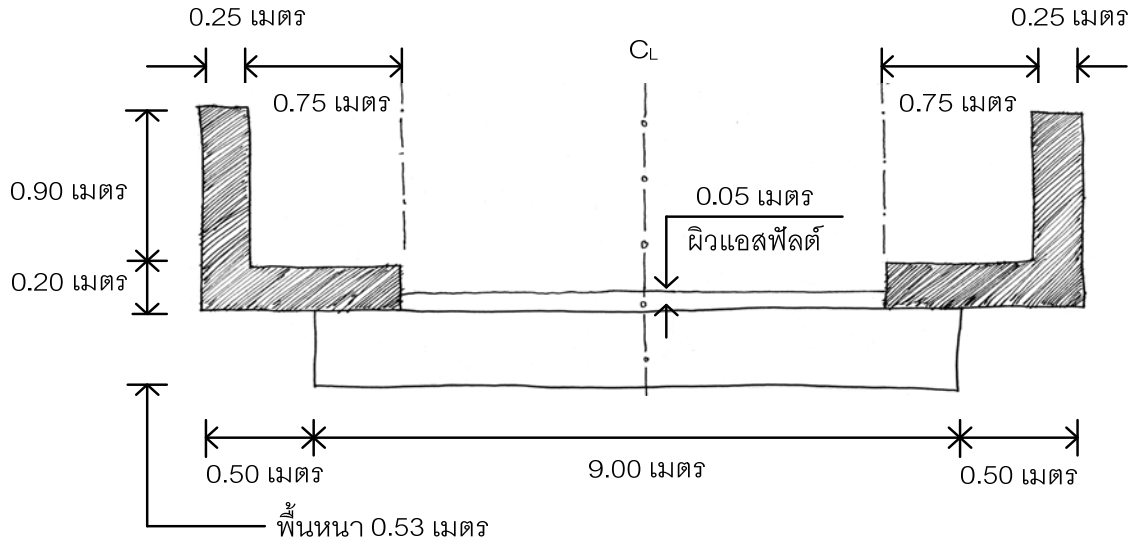
$$\rho = 0.0103$$

$$A_s = \rho bd = 0.0103(100)(53.5) = 55.10\ cm^2/m$$

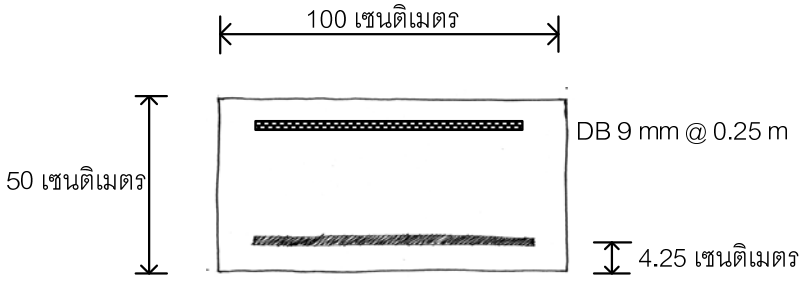
ใช้ DB 25 mm @ 0.075 m จะได้ As =65.47 $cm^2$/m

ตัวอย่างที่ 2 การออกแบบสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความต่อเนื่องโดยใช้เหล็กเสริม

(แบบ มฐ 03/2529 กรมโยธาธิการ)




**หน้าตัด**




As = 54.54 ตารางเซนติเมตร / ความกว้าง 1 เมตร

เหล็กเสริมหลัก

DB 2.5 cm @ 0.09 m

**การเสริมเหล็กในพื้น (ต่อความกว้าง 1 หน่วย)**

**กำหนดให้**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ความยาวช่วงพาดของสะพาน | 10 เมตร | | |
| คุณสมบัติของวัสดุ | คอนกรีต | $f_c^{'} = 200$ | กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| | | $w_c = 2,400$ | กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร |
| | เหล็กเสริม | $f_y = 3,000$ | กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| | แอสฟัลต์ | $w_{Asphalt} = 2,300$ | กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร |
| Condition Rating | 6 | | |
| ปริมาณการจราจรต่อวัน | ไม่ทราบ | | |
| มุมเอียงของสะพาน (Skew) | 0 องศา | | |
| Dynamic Load Allowance (IM) | 33 เปอร์เซ็นต์ | | |

**การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่**

พิจารณาต่อความกว้าง 1 เมตร

A) องค์ประกอบ ผลจากน้ำหนักโครงสร้าง ( $DC$ )

พื้นคอนกรีต $0.50(1.0)(2,400) = 1,200$ กิโลกรัมต่อเมตร

ทางเดินเท้า และ ราวกันตก $2\left[0.2(1.0)+0.9(0.25)\right](1.0)(2,400)/9$

$= 226.6$ กิโลกรัมต่อเมตร

น้ำหนักรวมของพื้นคอนกรีต ทางเดินเท้า และราวกันตก ( $DC$ ) $= 1,426.6$ กิโลกรัมต่อเมตร

$M_{DC} = \frac{1}{8}(1426.6)(10)^2$ กิโลกรัม-เมตร

$= 17,833$ กิโลกรัม-เมตร

$V_{DC} = \frac{1}{2}(1426.6)(10)$ กิโลกรัม

$= 7133$ กิโลกรัม

B) ผิวทาง ผลจากน้ำหนักผิวทาง ( $DW$ )

ความหนาของแอสฟัลต์ = 5 เซนติเมตร

น้ำหนักแอสฟัลต์เททับหน้า $0.05(1.0)(2300) = 115$ กิโลกรัมต่อเมตร

$M_{DW} = \frac{1}{8}(115)(10)^2$ กิโลกรัม-เมตร

$= 1,438$ กิโลกรัม-เมตร

$V_{DW} = \frac{1}{2}(115)(10)$ กิโลกรัม

$= 575$ กิโลกรัม

**การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร**

พิจารณาความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนักของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุก โดยเลือกค่าที่น้อย ซึ่งได้จากพิจารณารูปแบบการกระทำของน้ำหนักบรรทุก 2 แบบ เนื่องจากความยาวและความกว้างของสะพานเท่ากัน จากตัวอย่างที่ 1 จะได้

A) น้ำหนักบรรทุกกระทำเลนเดียว

$E$ = 4.234 เมตร

B) น้ำหนักบรรทุกกระทำมากกว่า 1 เลน

$E$ = 3.238 เมตร $< 4.234$ เมตร

$W$ = 8500 มิลลิเมตร

$N_L = \frac{W}{3600} = \frac{8500}{3600}$ = 2 Design Lanes LRFD 3.6.1.1.1

$\frac{W}{N_L} = \frac{8500}{2}$ = 4250 มิลลิเมตร > 3238 มิลลิเมตร Ok.

เพราะฉะนั้น ใช้ $E$ = 3.238 เมตร

จากข้อกำหนดของ AASHTO 3.6.1.3 (2003) ค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบหรือประเมินสะพาน พิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร โดยเลือกใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่มากกว่าระหว่างผลจาก Tandem Load (น้ำหนักบรรทุก 2 เพลา ขนาดเพลาละ 11000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่างเพลา 1.2 เมตร) และ ผลจาก Truck Load ซึ่งค่านี้รวมผลของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นด้วย จากนั้นนำไปรวมกับค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Design Lane Load ขนาด 9.3 นิวตันต่อมิลลิเมตร กระจายต่อความกว้างสะพาน 3 เมตร

| | | |
|---|---|---|
| Dynamic Load Allowance | = | 33 เปอร์เซ็นต์ |
| ความกว้างของแถบเทียบเท่า $(E)$ | = | 3.238 เมตร |

Design Lane Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

**At ?iddle Span**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Design Lane Load | = | $9.3\left(\frac{1,000}{9.807}\right)$ | = 948.30 | กิโลกรัม/เมตร |
| Design Lane Load Moment | = | $\frac{1}{8}(948.3)(10)^2$ | | กิโลกรัม-เมตร |
| | = | $11,853$ | | กิโลกรัม-เมตร |

**At Support**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Design Lane Load Shear | = | $\frac{1}{2}(948.3)(10)$ | กิโลกรัม |
| | = | $4,741$ | กิโลกรัม |

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

**At Middle Span**

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 7,027 กิโลกรัม-เมตร)

**At Intermediate Support**

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าแรงเฉือนที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 12,456 กิโลกรัม-เมตร

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าแรงเฉือนที่เกิดจาก Design Lane Load เท่ากับ 6,247 กิโลกรัม

Truck Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

**At Middle Span**

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) ซึ่งมีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 70,091 กิโลกรัม-เมตร หรือ 52,700 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัด (บวก) สูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) ซึ่งมีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 55,640 กิโลกรัม-เมตร หรือ 41,835 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

At Intermediate Support

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าโมเมนต์ดัด (ลบ) สูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) มีค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 57580 กิโลกรัม-เมตร หรือ 43293 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวงแบบที่ 6 (รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ) มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 32341 กิโลกรัม หรือ 24317กิโลกรัม (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

Tandem Load Moment

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 65,641 กิโลกรัม-เมตร หรือ 49,354 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัด (บวก) สูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 51,950 กิโลกรัม-เมตร (39,060 กิโลกรัม-เมตร ไม่รวมผลของ IM)

At Intermediate Support

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโมเมนต์ดัด (ลบ) สูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าเท่ากับ 26,480 กิโลกรัม-เมตร หรือ19,910 กิโลกรัม-เมตร (ไม่รวมผลของ Impact Factor)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดจาก Tandem Load มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 28,077 กิโลกรัม หรือ 21,111 กิโลกรัม (ไม่รวมผลของ IM)

Design Load

พิจารณาน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ

**ระบบโครงสร้างแบบอย่างง่าย**

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 11,853+1.33(52,700)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 81,945$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{81,945}{3.238}\right) = 25,307 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

**ระบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง**

At Middle Span

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 7,027+1.33(41835)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 62667$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{62667}{3.238}\right) = 19353 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

At Intermediate Support

Design Load Moment $M_{LL+IM} = 12456+1.33(43293)$ กิโลกรัม-เมตร

$= 70036$ กิโลกรัม-เมตร

โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{M_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{70036}{3.238}\right) = 21629 \quad \text{กิโลกรัม-เมตร/เมตร}$$

Design Load Shear $V_{LL+IM} = 6247+1.33(24317)$ กิโลกรัม

$= 38589$ กิโลกรัม

แรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1 เมตร

$$\frac{V_{LL+IM}}{E} = \left(\frac{38589}{3.238}\right) = 11917 \quad \text{กิโลกรัม/เมตร}$$

**<u>การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของหน้าตัด</u>**

**หาความต้านทานการดัด** (Flexural Strength)

หน้าตัดสี่เหลี่ยม $b = 100$ เซนติเมตร

$$c = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' \beta_1 b} \qquad \text{LRFD 5.7.3.2.3 Eq. (5-19)}$$

$A_s$ = 54.54 ตารางเซนติเมตร

$\beta_1$ = 0.85

$$c = \frac{54.54(3,000)}{0.85(200)(0.85)(100)}$$

$= 10.84$ เซนติเมตร

$a = c\beta_1$

$= 10.84(0.85)$

$= 9.21$ เซนติเมตร

$d_s = 50 - 4.25 = 45.75$ เซนติเมตร

$M_n = A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right)$

$= 54.54(3,000)\left( 45.75 - \frac{9.21}{2} \right)$

$= 6,732,145$ กิโลกรัม-เซนติเมตรต่อเมตร

$M_n = 67,321$ กิโลกรัม-เมตรต่อเมตร

**หาความต้านทานแรงเฉือน** (Shear Strength)

กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd$

$V_c = 0.53\sqrt{200}(100)(45.75)$

$V_c = 34291$ กิโลกรัม

**<u>การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามหลักการของ LRFR</u>**

MOMENT RATING FACTOR

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_p)(P)}{(\gamma_L)(LL + IM)}$$

เมื่อ $C = \varphi_c \varphi_s \varphi R_n$

**ตัวคูณปรับค่า** (for Strength Limit States)

g) Resistance Factor $\varphi$

$\varphi = 0.90$ สำหรับโมเมนต์ดัด LRFD 5.5.4.2

h) Condition Factor $\varphi_c$

$\varphi_c = 1.00$ สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 6

i) System Factor $\varphi_s$

$\varphi_s = 1.00$ สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

**ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(67321) - (1.25)(17833) - (1.25)(1438)}{(1.75)(25307)}$

$= 0.82$

Operating; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(67321) - (1.25)(17833) - (1.25)(1438)}{(1.35)(25307)}$

$= 1.06$

**ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING ( At middle span)

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(67321) - (1.25)(17833) - (1.25)(1438)}{(1.75)(19353)}$

$= 1.07$

Operating; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.9)(67321) - (1.25)(17833) - (1.25)(1438)}{(1.35)(19353)}$

$= 1.39$

**สรุปค่า Moment Rating Factor**

| Limit States | | ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง | | ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Inventory | Operating | Inventory | Operating |
| Strength I | Flexure | 0.82 | 1.06 | 1.07 | 1.39 |

SHEAR RATING FACTOR

**ระบบโครงสร้างก่อนการปรับปรุง**

จากข้อกำหนดของ AASHTO (2003) "การออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือพื้นสะพานที่กระทำตามข้อกำหนดของ AASHTO ถือได้ว่าเป็นการออกแบบที่พิจารณาถึงแรงเฉือนไปในตัว ดังนั้นจึงไม่ต้องตรวจสอบแรงเฉือนสำหรับการประเมินน้ำหนักบรรทุกออกแบบ และน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมายของชิ้นส่วนคอนกรีต"

**ระบบโครงสร้างหลังการปรับปรุง**

DESIGN LOAD RATING

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL+IM)}$$

**ตัวคูณปรับค่า** (for Strength Limit States)

j) Resistance Factor $\varphi$

$\varphi = 0.85$ สำหรับแรงเฉือน LRFD 5.5.4.2

k) Condition Factor $\varphi_c$

$\varphi_c = 1.00$ สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 6

l) System Factor $\varphi_s$

$\varphi_s = 1.00$ สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

| LOAD | INVENTORY | OPERATING |
|---|---|---|
| $DC, DW$ | 1.25 | 1.25 |
| $LL + IM$ | 1.75 | 1.35 |

Inventory; $RF = \frac{(1.0)(1.0)(0.85)(34291) - (1.25)(7133) - (1.25)(575)}{(1.75)(11917)}$

$= 0.93$

Operating; $RF = \dfrac{(1.0)(1.0)(0.85)(34291)-(1.25)(7133)-(1.25)(575)}{(1.35)(11917)}$

$= 1.21$

เพราะฉะนั้นที่บริเวณ Intermediate Support มีค่า Inventory Shear Rating Factor น้อยกว่า 1.00 นั่นคือหน้าสะพานไม่สามารถแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุงพื้นสะพานให้ต่อเนื่องเมื่อประเมินด้วยน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน ได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังเพื่อรับแรงเฉือน

ออกแบบปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับรับโมเมนต์ลบ บริเวณ Intermediate Support สมมติให้บริเวณดังกล่าวมีค่า Inventory Rating Factor เท่ากับ 1.00 จากสมการข้างต้น จะได้

$$R_n = \frac{RF(\gamma_L)(LL+IM)+(\gamma_{DC})(DC)+(\gamma_{DW})(DW)}{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)}$$

$$R_n = \frac{1.00(1.75)(19353)+(1.25)(19633)+(1.25)(1438)}{(1.0)(1.0)(0.9)}$$

$$R_n = 80785$$

$\beta_1$ = 0.85 เพราะ $f_c' < 280$

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y}\left(\frac{6120}{6120+f_y}\right)$$

$$\rho_b = \frac{0.85(200)(0.85)}{3000}\left(\frac{6120}{6120+3000}\right) = 0.03232$$

$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b = 0.75(0.03232) = 0.02424$$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = \frac{14}{3000} = 0.00467$$

$$R = \frac{M_n}{bd^2}$$

$$R = \frac{80785(100)}{100(45.75)^2} = 38.596$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f_c'} = \frac{3000}{0.85(200)} = 17.647$$

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

$$\rho = \frac{1}{17.647}\left(1-\sqrt{1-\frac{2(17.647)(38.596)}{3000}}\right)$$

$$\rho = 0.0148$$

$$A_s = \rho bd = 0.0148(100)(45.75) = 67.71\ cm^2/m$$

ใช้ DB 25 mm @ 0.07 m จะได้ As = 70.15 $cm^2$/m

ตัวอย่างที่ 3 การคำนวณออกแบบ CFRP Plate สำหรับติดที่ผิวบนของพื้นสะพานคอนกรีต ตรงตำแหน่งตอม่อสะพาน เพื่อรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นจากความต่อเนื่อง

**วิธีทำ**

จากการวิเคราะห์โครงสร้างได้ค่า

| | | | |
|---|---|---|---|
| $M_D^-$ | = | 2,550 | kg–m/m |
| $V_D$ | = | 1,530 | kg/m |
| $M_L^-$ | = | 22,000 | kg–m/m |
| $V_L$ | = | 10,910 | kg/m |

ข้อมูลทั่วไป

สะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตมีความกว้าง 9 m หนา 0.50 m

กำลังคอนกรีต fc' = 250 ksc

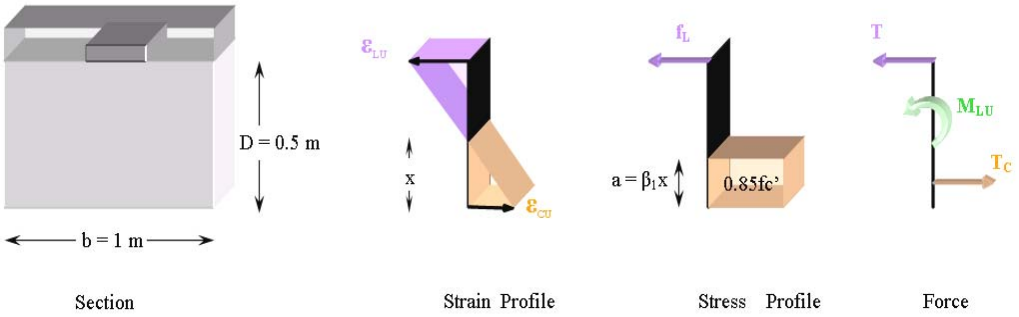
ใช้ CFRP Plate ในการเสริมกำลัง มีคุณสมบัติดังนี้

พื้นที่หน้าตัด $A_L = B_L \times t_L = 150\ mm \times 1.2\ mm = 180\ mm^2$

ค่าแรงดึง $f_{LU}$ = 2,400,000 kPa

Modulus of elasticity $E_L$ = 155,000,000 kPa

$\varepsilon_{LU} = f_{LU} / E_L = 2{,}400{,}000 / 155{,}000{,}000 = 0.01548$




**รูปที่ ก-1** Strain Diagram และ Stress Diagram ของพื้นสะพานคอนกรีต

**ขั้นตอนที่ 1** หา $M_n^-$(required)

$\phi M_n^- > 1.3\ Mg^- + 2.171(1 + I)\ Mq^-$

โดยที่ I = 15.24/(L+38) = 15.24/(10+38) = 0.3175 ใช้ 0.3

$\phi M_n > 1.3 \times 2550 + 2.171 \times (1 + 0.3) \times 22000 = 65406$ kg–m /m

$M_n^-$(require) = 65406 / ø = 65406 /0.9 = 72673 kg–m/m

**ขั้นตอนที่** 2 การออกแบบรับโมเมนต์ดัด

สมมุติให้ Concrete ถึงจุด Ultimate $\varepsilon_C = \varepsilon_{CU} = 0.003$

CFRP ไม่ถึงจุด Ultimate $\varepsilon_L < \varepsilon_{LU} = 0.01548$

จากความสัมพันธ์ Strain Distribution

$\varepsilon_L / (D - X) = \varepsilon_C / X$

$a = \beta_1 X$

โดยที่

$\beta_1 = 0.85 - 0.05(fc' - 280)/70 \geq 0.65$ สำหรับ $fc' > 280$ ksc

$\beta_1 = 0.85$ สำหรับ $fc' \leq 280$ ksc

หา Max

$C_C = 0.85\, fc'\, ba = 0.85 \times 250 \times 100 \times a = 21250a$

$M^-_n(req'd) = C_C (D - a/2)$

$72673 \times 100 = 21250a(50 - a/2)$

แก้สมการได้ $a = 7.4$ cm

$X = a/\beta_1 = 7.4/0.85 = 8.71$ cm

จะได้ Max , $C_C = 0.85 \times 250 \times 100 \times 7.4 = 157250$ kg

จากสมการสมดุล $C = T$

$157250 = A_L \times f_L$

จาก $f_L = E_L \times \varepsilon_L$

$E_L = 1550000$ ksc

จาก $\varepsilon_L / (D - X) = \varepsilon_{CU} / X$

$\varepsilon_L = \varepsilon_{CU}(D - X)/X = 0.003x(50 - 8.71)/8.71 = 0.01422$

$f_L = 1550000 \times 0.01422 = 22041$ ksc

จะได้ $A_L = 157250/22041 = 7.13$ cm$^2$

เพราะฉะนั้น 1 m จะต้องใช้ CFRP Plate จำนวน $7.13/1.8 = 3.96 \sim 4$ แผ่น /m

**ขั้นตอนที่** 3 การตรวจสอบการวิบัติในรูปแบบอื่นๆ

**ขั้นตอนที่** 3.1 ตรวจสอบค่าการรับแรงเฉือนของหน้าตัด

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd = 0.53\sqrt{250}(100)(50) = 41900 \text{ kg}$$

$\phi V_n > 1.3\, Vg + 2.171(1 + I)\, Vq$

$\phi V_n > (1.3 \times 1530) + 2.171(1 + 0.3) \times 10910$

$\phi V_n > 32071$ kg

$V_n$(required) = 32071/0.85 = 37730 kg

$V_n$(required) < Vc ok

**ขั้นตอนที่** 3.2 ตรวจสอบการวิบัติแบบ Delamination

$V_U = f_{CV}bx + f_{CV}b(D - x)(1 - \varepsilon_L/\xi) + \chi(E_S A_{ST} + E_L A_L)$ แต่ $(1 - \varepsilon_L/) \geq 0$

- เมื่อ fc' = 250 ksc = 24.9 MPa จะได้ $f_{CV}$ = 2 MPa = 2000 kPa
- b = 1 m - $\xi$ = 0.00606
- x = 0.0871 m - $\chi$ = 0.00103
- D = 0.5 m - $E_L$ = 155000000 kPa
- $\varepsilon_L$ = 0.01422 - $A_L$ = 180 x 4 = 720 $mm^2$

จะได้

- $f_{CV}bx$ = 2000 x 1 x 0.0871 = 174 kN
- $(1 - \varepsilon_L/\xi)$ = 1 – 0.01422/0.00606 = -1.554 $\leq$ 0 ใช้ 0

  $f_{CV}b(D - x)(1 - \varepsilon_L/\xi)$ = 2000x1x( 0.5 – 0.0871 ) x 0 = 0
- $\chi(E_S A_{ST} + E_L A_L)$ = 0.00103( 0 + 155000000x180x4 )/1000000 = 115 kN

จะได้ $V_U$ = 174 + 115 = 289 kN = 29460 kg

จาก $\phi V_U$ > $1.25V_g + 1.5 V_q$

ใช้ ø = 0.7

$\phi V_U$ > (1.25 x 1530) + (1.5 x 10910 )

20622 kg > 18278 kg ok

**ขั้นตอนที่** 3.3 ตรวจสอบการวิบัติเนื่องจาก Anchorage

$l_V = (\gamma Z_{LD})^2/[(b_L^2)kt_e\tau] \geq 0.5$ m

- $\gamma$ = 1 สำหรับวิธี Ultimate
- $Z_{LD}$ = T/4 = 157250 kg/4 = 39313 kg = 385.66 kN
- $b_L$ = 150 mm = 0.15 m
- k = reference stress = 30000 kPa
- $t_e = t_L f_{LU} / f_{SY}$
- $t_L$ = 1.2 mm = 0.0012 m
- $f_{LU}$ = 24000 ksc = 2400000 kPa
- $f_{SY}$ เนื่องจากไม่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ผิวบนของคอนกรีต ในที่นี้จึงใช้ค่าแรงดึงของคอนกรีต $(f_r) = 2.0\sqrt{fc'} = 2.0x\sqrt{250} = 31.6$ ksc

- จะได้ค่า $t_e$ = 0.0012 x 2400000/3160 = 0.91 m
- หาค่า $\tau$ จากค่า $f_{CS}$ เนื่องจากค่า $f_{CS}$ เป็นค่าแรงดึงที่ผิวของคอนกรีต ซึ่งต้องหาจากการทดสอบจริงของโครงสร้าง ในที่นี้จึงของใช้ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้คือ 20 ksc = 2000 kPa แล้วนำไปหาค่า $\tau$ จากตารางที่ 4-2 จะได้ค่า $\tau$ = 7143 kPa

$l_v = (1 \times 385.66)^2 / (0.15^2 \times 30000 \times 0.91 \times 7143) = 0.034$ m ใช้ 0.5 m เป็นอย่างน้อย ok