หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

มาตรฐานการออกแบบ

มาตรฐานการออกแบบมีประโยชน์สำคัญหลายประการ กล่าวคือช่วยแก้ปัญหาทั้งในด้านวิศวกรรม และแง่กฎหมายได้สะดวกและรวดเร็ว ช่วยเสริมสร้างความรู้และประสบการณ์ทางลัดให้วิศวกรที่ยังใหม่ต่อวงการ นอกจากนี้ยังอาจช่วยทำให้การคำนวณตรวจสอบง่ายและรัดกุมขึ้นในบางกรณี ดังนั้นมาตรฐานการออกแบบจึงจำเป็นที่ควรจะพิจารณานำมาใช้

ในการศึกษานี้จะใช้มาตรฐานการออกแบบสะพานของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

2.1 น้ำหนักบรรทุก

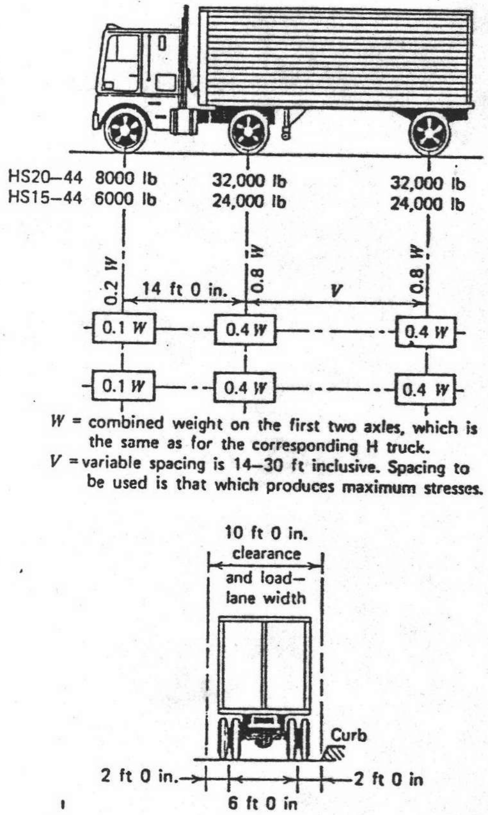
2.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ได้แก่น้ำหนักขององค์อาคารต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นตัวสะพาน และส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ยึดแน่นกับตัวโครงสร้าง เช่น ราวสะพาน ทางเดินเท้า เป็นต้น รวมทั้งน้ำหนักของส่วนคลุมพื้นผิวทางที่จะต้องกระทำในอนาคต

ค่าหน่วยน้ำหนักต่อไปนี้สามารถนำไปใช้หาน้ำหนักบรรทุกคงที่ได้

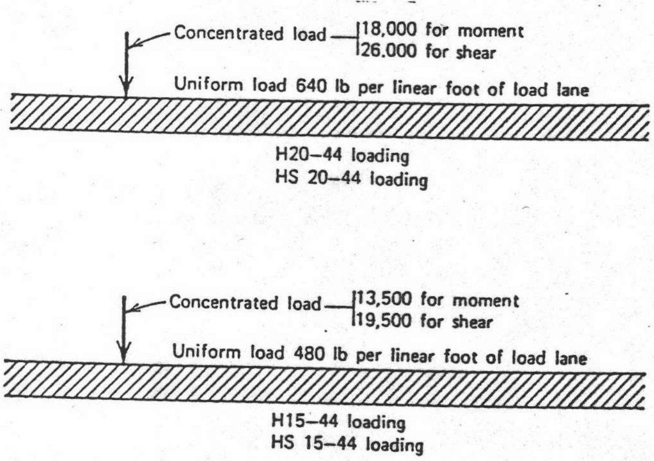
	$\#/ft^3$	(kg/m^3)
Steel or cast steel	490	(7849)
Cast iron	450	(7208)
Aluminum alloys	175	(2803)
Timber (treated or untreated)	50	(801)
Concrete, plain or reinforced	150	(2403)
Stone masonry	170	(2723)
Asphalt plank, 1 inch (25.4 mm) thick	9	lbs.per square foot (44 kg/m^2)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ได้แก่น้ำหนักที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยวดยานและคนเดินเท้า บนพื้นถนนและสะพาน ประกอบด้วยรถบรรทุกมาตรฐาน (Standard Truck) ซึ่งในที่นี้จะใช้แบบ HS 20 และ HS 15 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อให้ปลอดภัยต่อการออกแบบสะพานทางหลวงที่มีสภาพการจราจรคับคั่ง หรืออยู่ในเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างเมือง น้ำหนักบรรทุกจรอีกรูปแบบหนึ่งคือ น้ำหนักบนช่องทาง (Lane Load) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งคิดสมมูลย์กับขบวนรถบรรทุก (Truck Train)



รูปที่ 2.1 รถบรรทุกมาตรฐานแบบ HS



รูปที่ 2.2 น้ำหนักบนช่องทาง (Lane Load)

2.1.3 <u>แรงกระแทก</u> (Impact) เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำหนักบรรทุกจรทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการกระแทกขึ้น มีผลสำคัญต่อโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ของสะพาน สำหรับการหาค่าปริมาณแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะคิดเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักบรรทุกจร ดังสมการ 2.1

$$I = \frac{50}{L + 125} \quad \text{หรือ} \quad \left(\frac{15.24}{L + 38}\right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ I เป็นค่า Impact Fraction มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 30%

L เป็นความยาวช่วงของสะพาน มีหน่วยเป็นฟุต หรือ (เมตร)

สำหรับสะพานแบบช่วงต่อเนื่อง เมื่อมีน้ำหนักบนช่องทางกระทำให้ใช้ความยาวช่วงเฉพาะช่วงที่ใช้พิจารณาหาโมเมนต์บวก (Positive Moment) และใช้ความยาวช่วงเฉลี่ยของช่วงที่รับน้ำหนักทั้ง 2 ช่วงติดกันสำหรับการหาโมเมนต์ลบ (Negative Moment) ส่วนน้ำหนักรถบรรทุก เมื่อหาโมเมนต์จะใช้ความยาวช่วงนั้น ๆ สำหรับกรณีแรงเฉือนจะใช้ความยาวตั้งแต่จุดที่น้ำหนักกระทำไปยังตำแหน่งแรงปฏิกิริยาด้านไกล (Far Reaction)

2.1.4 <u>แรงกระทำตามแนวยาวสะพาน</u> (Longitudinal Force) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วด้วยอัตราเร่งหรืออัตราหน่วงของยวดยาน โดยมีขนาดของแรงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของยวดยาน ความเร็วที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่ง AASHTO ได้กำหนดไว้เท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักบรรทุกจรในทุกช่องทางจราจรที่มีการเคลื่อนที่ของยวดยานไปในทิศทางเดียวกัน น้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าวเป็นแบบน้ำหนักแผ่บนช่องทางบวกกับน้ำหนักกระทำเป็นจุดสำหรับโมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยไม่รวมแรงกระแทก และมีจุดศูนย์กลางของแรงกระทำที่ระดับ 6 ฟุต (1.829 เมตร) เหนือพื้นผิวถนน

2.1.5 <u>แรงลม</u> (Wind Load) เกิดจากกระแสลมพัดกระทำต่อสะพาน มีขนาดมากน้อยขึ้นกับความเร็วของลม สำหรับที่ความเร็วลม 100 ไมล์/ชั่วโมง (160.9 กิโลเมตร/ชั่วโมง) แรงลมที่กระทำต่อคานหลักของสะพานจะเท่ากับ 50 ปอนด์/ฟุต^2 และแรงกระทำไม่ต่ำกว่า 300 ปอนด์/ฟุต ของความยาวช่วงสะพาน ส่วนพื้นที่รับแรงลมของโครงสร้างเป็นพื้นที่ทั้งหมดที่อยู่ในระนาบทำมุม 90 องศากับแกนตามแนวยาวของสะพาน นอกจากนี้แรงลมที่กระทำต่อน้ำหนักบรรทุกจรที่เคลื่อนที่อยู่บนสะพานจะมีเท่ากับ 100 ปอนด์/ฟุต และมีจุดศูนย์กลางของแรงกระทำที่ระดับ 6 ฟุต (1.829 เมตร) เหนือพื้นผิวถนน

2.1.6 <u>แรงอื่น ๆ</u> เช่นแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) แรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Force) แรงดันดิน (Earth Pressure) แรงลอยตัว (Buoyancy) แรงยกตัว (Uplift) แรงกระทำของกระแสน้ำ (Force of Steam Current) เป็นต้น แรงเหล่านี้ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศภูมิอากาศของแต่ละสถานที่ก่อสร้าง รวมทั้งรูปแบบ ชนิด และแนวเส้นทางของสะพาน

2.2 การคำนวณน้ำหนักบรรทุกจร

ในการคำนวณหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร ค่าเปอร์เซนต์ของหน่วยแรงที่นำไปออกแบบเท่ากับ 100 เปอร์เซนต์ เมื่อคิดความกว้างที่น้ำหนักบนช่องทางหรือน้ำหนักรถบรรทุกมาตรฐานกระทำเท่ากับ 10 ฟุต (3.048 เมตร) หรือมีความกว้างของช่องจราจรเท่ากับ 12 ฟุต โดยมีจำนวนช่องจราจรตั้งแต่ 1 ถึง 2 ช่องทาง ส่วนสะพานที่มีจำนวนช่องจราจร 3 ช่องทาง และ 4 ช่องทางขึ้นไป จะมีค่าเปอร์เซนต์ของหน่วยแรงที่จะนำไปใช้ในการออกแบบเท่ากับ 90 และ 75 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

สะพานที่มีช่วงต่อเนื่อง น้ำหนักบนช่องทางจะประกอบด้วยน้ำหนักดังแสดงในรูป 2.2 และน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Concentrated Load) อีกตัวหนึ่ง ซึ่งมีขนาดเท่ากันกระทำในช่วงอื่นของสะพานเพื่อหาค่าโมเมนต์ลบสูงสุด (Maximum Negative Moment) ส่วนกรณีหาค่าโมเมนต์บวกสูงสุด (Maximum Positive Moment) จะใช้น้ำหนักกระทำเป็นจุดเพียงตัวเดียวต่อช่องทาง รวมกับน้ำหนักแผ่ (Uniform Load) ซึ่งอาจต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องกันตลอดทุกช่วงความยาวของสะพาน สำหรับน้ำหนักรถบรรทุกจะใช้เพียงคันเดียวต่อหนึ่งช่องทาง โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาตั้งแต่ 14 ถึง 30 ฟุต (4.267 ถึง 9.144 เมตร) วิ่งผ่านในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดโมเมนต์บวกและลบสูงสุด

2.3 การกระจายของน้ำหนักบรรทุก

การกระจายของน้ำหนักล้อ (Wheel Load) บนคานตามแนวยาว (Longitudinal Beam) สำหรับการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment) จะไม่พิจารณาการกระจาย

ตามแนวยาว (Longitudinal Distribution) ส่วนการกระจายด้านข้าง (Lateral Distribution) จะพิจารณาดังต่อไปนี้

(1) คานช่วงใน (Interior Girder) ค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของคานช่วงในแต่ละตัวจะเปลี่ยนไปตามลักษณะการกระจายของแรงกระทำ บนช่วงเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างคาน (Average Girder Spacing) สำหรับคานคอนกรีตอัดแรง สัมประสิทธิ์การกระจายของน้ำหนักล้อเป็นไปดังสมการ 2.2 และ 2.3

สำหรับสะพาน 1 ช่องทางจราจรและค่า S ไม่เกิน 10 ฟุต (3.048 เมตร)

$$DF = \frac{S}{7.0} \quad \text{หรือ} \quad \left(\frac{S}{2.134}\right) \tag{2.2}$$

สำหรับสะพาน 2 ช่องทางจราจรขึ้นไปและค่า S ไม่เกิน 14 ฟุต (4.267 เมตร)

$$DF = \frac{S}{5.5} \quad \text{หรือ} \quad \left(\frac{S}{1.676}\right) \tag{2.3}$$

เมื่อ DF เป็นสัมประสิทธิ์การกระจายของน้ำหนักล้อ

S เป็นช่วงเฉลี่ยระยะห่างระหว่างคานมีหน่วยเป็นฟุตหรือ (เมตร)

ถ้าหากค่า S เกินกว่าที่กำหนดให้พิจารณาเหมือนคานช่วงนอก

(2) คานช่วงนอก (Exterior Girder) การหาสัมประสิทธิ์การกระจายของน้ำหนักล้อเพื่อคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร จะพิจารณาให้น้ำหนักล้อกระทำบนพื้นซึ่งมีคานรองรับแบบสภาพช่วงเดียว (Simple Span)

2.4 หน่วยแรงที่ยอมให้

2.4.1 เหล็กอัดแรง

หน่วยแรงชั่วคราวก่อนเกิดการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage) ของคอนกรีต.. $0.70\ f'_s$

หน่วยแรงใช้งานหลังเกิดการเสื่อมสูญแรงอัด............ $0.80f^*_y$

2.4.2 คอนกรีต

(1) หน่วยแรงชั่วคราวก่อนเกิดการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต :

หน่วยแรงอัด (Compression)

- โครงสร้างระบบดึงก่อน.................... $0.60 f'_{ci}$
- โครงสร้างระบบดึงที่หลัง.................. $0.55 f'_{ci}$

หน่วยแรงดึง (Tension)

- ในพื้นที่รับแรงดึงที่ไม่มีการเสริมเหล็ก..200 ปอนด์/นิ้ว^2 หรือ $3\sqrt{f'_{ci}}$
- ในพื้นที่รับแรงดึงที่ไม่มีการเสริมเหล็กและได้รับแรงอัดก่อนด้วยระบบการอัดแรง...................... 0
- เมื่อคำนวณหน่วยแรงดึงได้เกินกว่าค่าดังกล่าวข้างต้นจะต้องเสริมเหล็กรับแรงดึงในคอนกรีตซึ่งคำนวณจากสมมุติฐานที่ไม่ยอมให้มีการแตกร้าวเกิดขึ้น โดยค่าหน่วยแรงสูงสุดจะต้องไม่เกิน.. $7.5\sqrt{f'_{ci}}$

(2) หน่วนแรงขณะใช้งานหลังจากมีการเสื่อมสูญแรงอัด :

หน่วยแรงอัด.............................. $0.40 f'_c$

หน่วยแรงดึงในพื้นที่รับแรงอัดก่อนด้วยระบบการอัดแรง

- สำหรับโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็ก............ $6\sqrt{f'_c}$
- สำหรับโครงสร้างที่มีการเสริมและมีสภาพการสึกกร่อนสูง $3\sqrt{f'_c}$
- สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการเสริมเหล็ก............ 0

หน่วยแรงดึงในพื้นที่อื่น ๆ ให้ใช้ตามหน่วยแรงชั่วคราวที่ระบุไว้ในข้อ (1)

หมายเหตุ f'_s, f^*_y, f'_{ci}, f'_c มีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว^2

2.5 การเสื่อมสูญแรงอัด

2.5.1 การเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction Loss) เกิดขึ้นในระบบอัดแรงที่หลังซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.4

$$T_o = T_x e^{(KL + \mu\alpha)} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $(KL + \mu\alpha)$ มีค่าไม่เกิน 0.3 จะใช้สมการ 2.5 ในการคำนวณ

$$T_o = T_x(1 + KL + \mu\alpha) \quad (2.5)$$

โดยที่ค่า K และ μ ได้จากข้อมูลของผู้ผลิตหรือจากตารางที่ 2.1

Type of Steel	Type of Duct	K/ft.	μ	(K/m)
Wire or ungalvanized strand	Bright Metal Sheathing	0.0020	0.30	0.0066
	Galvanized Metal Sheathing	0.0015	0.25	0.0049
	Greased or asphalt-coated and wrapped	0.0020	0.30	0.0066
	Galvanized rigid	0.0002	0.25	0.0007
High-strength bars	Bright Metal Sheathing	0.0003	0.20	0.0010
	Galvanized Metal Sheathing	0.0002	0.15	0.0007

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า K และ μ ของเหล็กอัดแรงและท่อชนิดต่าง ๆ

2.5.2 การเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากสาเหตุอื่น ได้แก่สาเหตุเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) การหดตัวทางอีลาสติก (Elastic Shortening) การคืบของคอนกรีต (Creep) ซึ่งการเสื่อมสูญแรงอัดดังกล่าวนี้หาได้จากสมการ 2.6

$$\Delta f_s = SH + ES + CR_c + CR_s \quad (2.6)$$

เมื่อ Δf_s เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดทั้งหมด ยกเว้นเนื่องจากแรงเสียดทาน

SH เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

ES เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการหดตัวทางอีลาสติก

CR_c เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการคืบในคอนกรีต

CR_s เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการล้าของเหล็กอัดแรง

โดยที่ค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ หาได้ดังนี้

(1) การหดตัวของคอนกรีต

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงก่อน

$$SH = 17.00 - 150\ RH \qquad (2.7)$$

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงทีหลัง

$$SH = 0.80\ (17.00 - 150\ RH)$$

เมื่อ RH เป็นค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เป็นเปอร์เซนต์

(2) การหดตัวทางอีลาสติก

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงก่อน

$$ES = \frac{E_s f_{cir}}{E_{ci}} \qquad (2.9)$$

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงทีหลัง

$$ES = \frac{0.5\ E_s\ f_{cir}}{E_{ci}} \qquad (2.10)$$

เมื่อ E_s เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของเหล็กอัดแรง มีค่าประมาณ 28×10^6 ปอนด์/นิ้ว^2

E_{ci} เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง มีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว^2 หาได้จากสมการ 2.11

$$E_{ci} = 33\ W^{1.5}\sqrt{f'_{ci}} \qquad (2.11)$$

เมื่อ W เป็นหน่วยน้ำหนักคอนกรีต มีหน่วยเป็นปอนด์/ฟุต^3 และ

f_{ci} เป็นกำลังของคอนกรีตขณะถ่ายแรง มีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว^2

f_{cir} เป็นหน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กอัดแรง เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัด และน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานกระทำทันทีหลังจากการถ่ายแรง ซึ่งอาจคำนวณที่หน้าตัดที่เกิดโมเมนต์สูงสุดมีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว^2

(3) การคืบตัวของคอนกรีต

- ทั้งโครงสร้างระบบดึงก่อนและระบบดึงทีหลัง

$$CR_c = 12f_{cir} - 7f_{cds} \quad (2.12)$$

เมื่อ f_{cds} เป็นหน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กอัดแรง เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำในขณะช่วงทำการอัดแรง มีหน่วยเป็นปอนด์/นิ้ว^2

(4) การล้าของเหล็กอัดแรง

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงก่อน

เหล็กตีเกลียว (Strand) เกรด 250K และ 270K

$$CR_s = 20,000 - 0.4ES - 0.2\,(SH + CR_c) \quad (2.13)$$

- สำหรับโครงสร้างระบบดึงทีหลัง

เหล็กตีเกลียวเกรด 250K และ 270K

$$CR_s = 20,000 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR_c) \quad (2.14)$$

ลวดเหล็ก (Wire) เกรด 240K

$$CR_s = 18,000 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR_c) \quad (2.15)$$

เหล็กเส้นอัดแรง (Bar) เกรด 145K และ 160K

$$CR_s = 3,000 \text{ ปอนด์/นิ้ว}^2 \quad (2.16)$$

เมื่อ FR เป็นค่าเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทาน คำนวณได้จากสมการ 2.4 หรือ 2.5 มีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว^2

ES, SH และ CR_c คำนวณได้จากสมการ 2.7 ถึง 2.12

ในกรณีที่มีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กอัดแรงไม่เพียงพอก็อาจใช้ตารางที่ 2.2 ในการประมาณค่าการเสื่อมสูญแรงอัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยที่ค่าที่ได้ยังไม่ได้รวมถึงค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งยังคงต้องใช้สมการ 2.4 หรือ 2.5 ในการคำนวณ

TYPE OF PRESTRESSING STEEL	TOTAL LOSS (psi)	
	f'_c = 4,000 psi	f'_c = 5,000 psi
PRETENSIONING - Strand	-	45,000
POST - TENSION *		
- Wire or Strand	32,000	33,000
- Bars	22,000	23,000

*Losses due to friction are excluded.

ตารางที่ 2.2 ค่าประมาณของการเสื่อมสูญแรงอัดทั้งหมด

2.6 กำลังดัดประลัย

กำลังดัดประลัย (Ultimate Flexural Strength) เป็นค่าสูงสุดของโมเมนต์ดัดที่คานคอนกรีตสามารถรับได้ ซึ่งในการคำนวณหาจะต้องรู้ค่าแรงอัดประสิทธิผลหลังการเสื่อมสูญแรงอัด (Effective Steel Prestress - f_{se}) ในเหล็กอัดแรงเสียก่อนโดยในที่นี้กำหนดให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 50 เปอร์เซนต์ ของกำลังดึงประลัยของเหล็กอัดแรง (f'_s) จากนั้นก็จะสามารถหาค่าหน่วยแรงเฉลี่ยที่น้ำหนักประลัยในเหล็กอัดแรง (f^*_{su}) ได้ดังสมการ 2.17 และ 2.18

สำหรับคานแบบมีแรงยึดหน่วงระหว่างเหล็กอัดแรงกับคอนกรีต (Bonded Member)

$$f^*_{su} = f'_s \left(1 - \frac{0.5\, p^* f'_s}{f'_c} \right) \qquad (2.17)$$

สำหรับคานแบบไร้แรงยึดหน่วงระหว่างเหล็กอัดแรงกับคอนกรีต (Unbonded Member)

$$f^*_{su} = f_{se} + 15,000 \qquad (2.18)$$

เมื่อ p^* เป็นค่าอัตราส่วนของเหล็กอัดแรงต่อพื้นที่หน้าตัดคาน

$$p^* = \frac{A^*_s}{bd} \qquad (2.19)$$

โดยที่ A^*_s เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กอัดแรง

b เป็นความกว้างของปีกคานหรือความกว้างของหน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้า

d เป็นความลึกประสิทธิผลหรือระยะผิวนอกสุดของหน้าตัดซึ่งรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กอัดแรง

เมื่อได้ค่าหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแล้ว การคำนวณหากำลังดัดประลัยจะกระทำได้ตามกรณีต่อไปนี้

(1) สำหรับคานที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือมีปีกคาน และมีแนวแกนสะเทินอยู่ในปีกคาน

- ค่าเปอร์เซนต์เหล็กเสริม $\frac{p^* f^*_{su}}{f'_c}$ น้อยกว่า 0.3

$$M_u = A^*_s f^*_{su} \left(1 - \frac{0.6\, p^* f^*_{su}}{f'_c}\right) \qquad (2.20)$$

- ค่าเปอร์เซนต์เหล็กเสริม $\frac{p^* f^*_{su}}{f'_c}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 0.3

$$M_u = 0.25\, f'_c b d^2 \qquad (2.21)$$

(2) สำหรับคานที่มีปีกคานและมีแนวแกนสะเทินภายนอกปีกคาน (โดยปกติจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาของปีกคานน้อยกว่า $1.4\, dp^* f^*_{su}/f'_c$)

- ค่าเปอร์เซนต์เหล็กเสริม $\frac{A_{sr} f^*_{su}}{b' d f'_c}$ น้อยกว่า 0.3

$$M_u = A_{sr} f^*_{su} d \left(1 - \frac{0.6 A_{sr} f^*_{su}}{b' d f'_c}\right) + 0.85 f'_c (b-b') t (d-0.5t) \qquad (2.22)$$

- ค่าเปอร์เซนต์เหล็กเสริม $\frac{A_{sr} f^*_{su}}{b' d f'_c}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 0.3

$$M_u = 0.25 b' d^2 f'_c + 0.85 f_c (b-b') t (d-0.5t) \qquad (2.23)$$

เมื่อ M_u เป็นค่ากำลังดัดประลัยที่หน้าตัดใด ๆ ของคาน

b เป็นความกว้างของปีกคาน

b′ เป็นความกว้างของตัวคาน

t เป็นความหนาเฉลี่ยของปีกคาน

015936

A_{sr} เป็นพื้นที่หน้าตัดเหล็กอัดแรงที่ใช้เพิ่มกำลังรับแรงอัดของคานสำหรับคานที่มีปีกคาน โดยที่

$$A_{sr} = A^*_s - A_{sf} \quad (2.24)$$

A_{sf} เป็นพื้นที่หน้าตัดเหล็กอัดแรงที่ใช้เพิ่มกำลังรับแรงอัดของปีกคานส่วนที่ยื่นออกจากตัวคาน โดยที่

$$A_{sf} = 0.85\, f'_c\, (b-b')t/f^*_{su} \quad (2.25)$$

ในการพิจารณาใส่เหล็กเสริมเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคานที่สภาวะประลัยจะทำโดยตรวจสอบค่าที่ได้จากสมการ 2.26 และ 2.27 สำหรับคานที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและคานที่มีปีกคานตามลำดับ

$$\frac{pf_{sy}}{f'_c} + \frac{p^*f^*_{su}}{f'_c} - \frac{pf'_y}{f'_c} < 0.3 \quad (2.26)$$

$$\frac{A_s f_{sy}}{b'df'_c} + \frac{A_{sr} f^*_{su}}{b'df'_c} - \frac{A'_s f'_y}{b'df'_c} < 0.3 \quad (2.27)$$

เมื่อ p เป็นอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดคาน

$$p = \frac{A_s}{bd} \quad (2.28)$$

p' เป็นอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดคาน

$$p' = \frac{A'_s}{bd} \quad (2.29)$$

A_s เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

A'_s เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด

2.7 <u>กำลังรับแรงเฉือน</u>

2.7.1 <u>กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต</u> (V_c) จะพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงดัด - เฉือน (Flexural Shear Strength - V_{ci}) หรือกำลังรับแรงเฉือนที่ตัวคาน (Web Shear

Strength - V_{cw}) ซึ่งหาได้จากสมการ 2.30 และ 2.32 โดยเลือกค่าที่น้อยกว่า

$$V_{ci} = 0.6\sqrt{f'_c}\, b'd + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{max}} \qquad (2.30)$$

โดยที่ค่า V_{ci} ที่ได้ต้องไม่น้อยกว่า $1.7\sqrt{f'_c}\, b'd$ และค่า d ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 เท่าของความลึกทั้งหมดของคาน ส่วนค่า M_{cr} ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว (Flexural Cracking Moment) หาได้จากสมการ 2.31

$$M_{cr} = \frac{I}{Y_{t1}}\left(6\sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d\right) \qquad (2.31)$$

สำหรับค่าโมเมนต์สูงสุด (M_{max}) และค่าแรงเฉือน (V_{ci}) ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจะคำนวณได้จากผลรวมน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุดที่หน้าตัดคาน

$$V_{cw} = \left(3.5\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}\right) b'd + V_p \qquad (2.32)$$

โดยที่ค่า d ในสมการ 2.32 ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 เท่าของความลึกทั้งหมดของคาน

2.7.2 <u>กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมตัวคาน</u> (V_s) จะพิจารณาเมื่อกำลังแรงเฉือนของคอนกรีตไม่เพียงพอที่จะต้านทานหน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก โดยจะหาได้จากสมการ 2.33 และต้องมีค่าไม่เกิน $8\sqrt{f'_c}\, b'd$

$$V_s = A_v f_{sy} d/s \qquad (2.33)$$

เมื่อ A_v เป็นพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตัวคานหรือเหล็กปลอกและหาได้จากสมการ 2.34

$$A_v = (V_u - V_c)s/2f_{sy}jd \qquad (2.34)$$

แต่ต้องไม่น้อยกว่า $100\, b's/f_{sy}$

โดยที่ f_{sy} จะต้องไม่เกิน 60,000 ปอนด์/นิ้ว (4,220 กก./ซม.^{2})

สำหรับค่าระยะช่วงสูงสุด (Spacing - s) ของการใช้เหล็กเสริมตัวคานจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.75 เท่าของความลึกทั้งหมดของคาน หรือ 24 นิ้ว (0.610 เมตร) แล้วแต่ว่าค่าใดจะน้อยกว่า แต่ถ้าหากค่า V_s มากกว่า $4\sqrt{f'_c}\, b'd$ ระยะช่วงสูงสุดของเหล็กเสริมจะลดลงครึ่งหนึ่งของระยะช่วงดังกล่าวข้างต้น ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนในคอนกรีต (V_c) จะใช้ค่าที่ตำแหน่งของ V_{ci} และ V_{cw} ในหัวข้อ 2.7.1 หรือหาได้จากสมการ 2.35

$$V_c = 0.06 f'_c b'jd \quad (2.35)$$

แต่จะต้องไม่มากกว่า 180b′jd

2.7.3 <u>หน่วยแรงเฉือนในแนวราบ</u> ในคานประกอบ (Composite Beam) ซึ่งคิดรวมหน้าตัดพื้นสะพาน และคานเข้าด้วยกัน ในการรับหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจะมีแรงเฉือนกระทำในแนวราบ (Horizontal Shear) จึงต้องออกแบบใช้เหล็กเสริมจากตัวคานเข้าไปยึดพื้นสะพาน เพื่อป้องกันการแยกตัวออกจากกัน สำหรับค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยในแนวราบหาได้ดังนี้

$$v = \frac{V_u Q}{Ib} \quad (2.36)$$

สำหรับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสหยาบของคานประกอบจะเท่ากับ 300 ปอนด์/นิ้ว^2 เมื่อปริมาณของเหล็กเสริมยึดในแนวตั้ง (Vertical Ties) มีพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดต่อความยาวเป็นฟุตของช่วงสะพานไม่น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้น No. 3 จำนวน 2 เส้นวางในระยะช่วง 12 นิ้ว (0.305 เมตร)

สำหรับระยะช่วงของเหล็กเสริมยึดในแนวตั้งจะต้องมีค่าไม่เกิน 4 เท่าของความหนาเฉลี่ยของปีกคานประกอบ (Composite Flange) หรือไม่เกิน 24 นิ้ว (0.610 เมตร)

2.8 <u>ระยะคลุมและระยะช่วงของเหล็กเสริม</u>

2.8.1 <u>ระยะคลุมเหล็กเสริม</u> (Cover of Steel) ค่าระยะต่ำสุดของคอนกรีตที่ใช้คลุมเหล็กเสริมธรรมดาและเหล็กอัดแรง มีดังต่อไปนี้

(1) สำหรับเหล็กอัดแรงและเหล็กเสริมหลักในคาน....1.5 นิ้ว (38.2 มม.)

(2) สำหรับเหล็กเสริมพื้นสะพาน

- เหล็กเสริมด้านบน ....1.5 นิ้ว (38.2 มม.)
- เหล็กเสริมด้านล่าง ....1 นิ้ว (25.4 มม.)
- เหล็กปลอกและเหล็กยึด ....1 นิ้ว (25.4 มม.)

2.8.2 <u>ระยะช่วงเหล็กเสริม</u> (Spacing of Steel)

(1) ระยะช่วงต่ำสุดของเหล็กอัดแรงที่ปลายคานมีดังต่อไปนี้

- เหล็กอัดแรงแบบดึงก่อน : จะใช้ค่าที่มากกว่าของระยะ 3 เท่า

ของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กหรือ 1.33 เท่าของขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

- ท่อใส่เหล็กอัดแรงแบบดึงที่หลัง : จะใช้ค่าที่มากกว่าของระยะ 1.5 นิ้ว หรือ 1.5 เท่าของขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

(2) ระยะช่วงสูงสุดของเหล็กอัดแรงในพื้นสะพาน จะต้องไม่มากกว่า 1.5 เท่าของความหนาทั้งหมดของ Composite Slab หรือไม่เกิน 18 นิ้ว

2.8.3 การรวมกลุ่มเหล็กอัดแรง (Bundling)

(1) ในเหล็กอัดแรงที่หลังที่มีการจัดวางเป็นเส้นโค้ง ท่อใส่เหล็กจะถูกรวมมัดเป็นกลุ่ม ๆ ละไม่เกิน 3 ท่อ โดยมีระยะช่วงตามที่ระบุไว้ในหัวข้อ 2.8.2 ในระยะจากปลายคานเท่ากับ 3 ฟุต (0.914 เมตร)

(2) เมื่อเหล็กอัดแรงแบบดึงก่อนถูกมัดรวมเป็นกลุ่ม ทุกกลุ่มจะถูกมัดในช่วงคานระยะ 1/3 ของความยาวคานและจะต้องพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงที่จุดดัดกลับของเหล็กอัดแรง

2.8.4 ขนาดของท่อ (Ducts)

(1) สำหรับเหล็กลวดกำ (Tendon) ที่ทำจากกลุ่มลวดเหล็ก กลุ่มเหล็กเส้นอัดแรงหรือกลุ่มเหล็กตีเกลียว ขนาดของพื้นที่หน้าตัดท่อจะต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดสุทธิของเหล็กอัดแรงดังกล่าว

(2) สำหรับเหล็กลวดกำที่ทำจากเส้นเดี่ยวของลวดเหล็ก เหล็กเส้นอัดแรงหรือเหล็กตีเกลียว ขนาดของพื้นที่หน้าตัดท่อจะต้องมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กอัดแรงดังกล่าวอย่างน้อยเท่ากับ 1/4 นิ้ว (6.4 มม.)