ห้องสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีและวิธีการออกแบบ

การเลือกออกแบบคานหลักของสะพานคอนกรีตอัดแรงเป็นแบบช่วงต่อเนื่อง มีข้อได้เปรียบหลายประการต่อคานหลักแบบช่วงเดี่ยว กล่าวคือ ช่วยลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ช่วยเพิ่มค่าสติฟเนส (Stiffness) ช่วยลดการโก่งตัวและการสั่นสะเทือน ต้องการสมอยึดน้อยกว่าและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการอัดแรง อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าอันเป็นผลเนื่องจากมีโมเมนต์โท (Secondary Moment) ในระบบการอัดแรงมาเกี่ยวข้อง

3.1 สมมุติฐานในการออกแบบ

1. ความเค้นในเหล็กและคอนกรีตเกิดขึ้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับระยะความลึกของหน้าตัดคานหลักจากแนวแกนสะเทินตลอดทุกขั้นตอนของการรับน้ำหนักบรรทุก
2. หน่วยแรงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเค้น ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าว
3. หลังเกิดการแตกร้าว กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะไม่ถูกนำมาพิจารณา
4. ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายหน่วยงานแรงอัดและความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สภาวะประลัย

3.2 ความยาวและจำนวนช่วงของสะพาน

ความยาวช่วงสะพาน ซึ่งโดยทั่วไปมักขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตอม่อ แต่ถ้าสามารถเลือกความยาวช่วงได้อย่างอิสระ ควรให้ความยาวช่วงของสะพานช่วงนอกหรือช่วงปลาย (Exterior or End Span) น้อยกว่าความยาวสะพานช่วงใน (Interior Span) เพื่อช่วยลดค่าแตกต่างของโมเมนต์ระหว่างช่วงสะพานและที่จุดรองรับ สำหรับอัตราส่วนความยาวช่วงของสะพานช่วง

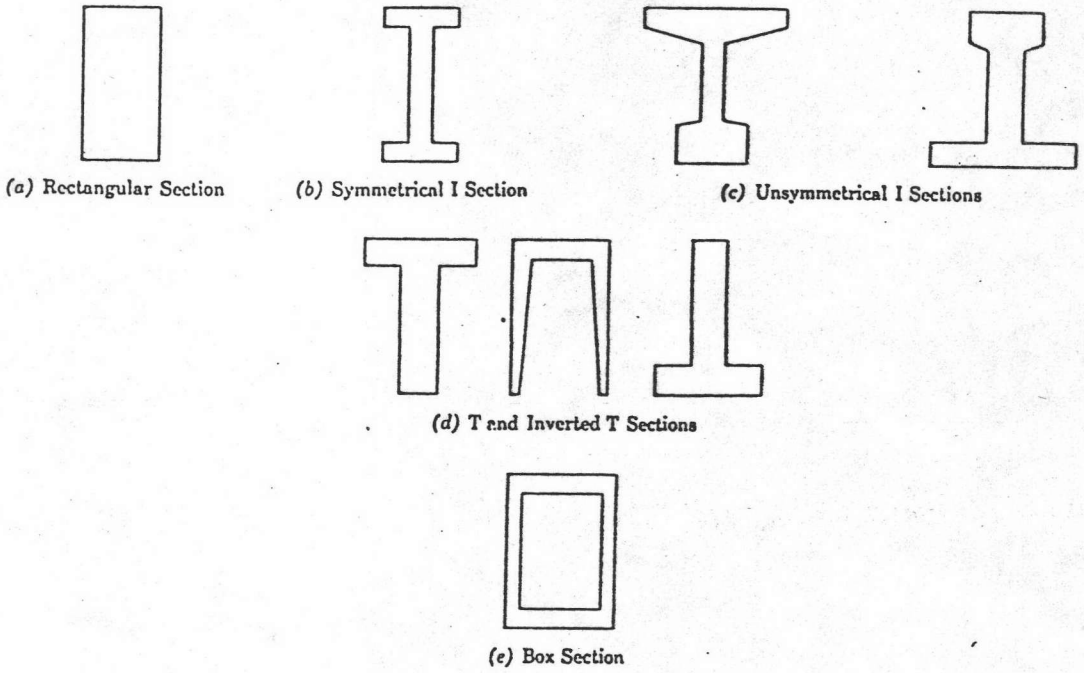
ในต่อสะพานช่วงนอกมีค่าประมาณ 1.20 ถึง 1.40 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของคานหลักและความยาวช่วงนอกของสะพานที่กำหนดขึ้น

จำนวนช่วงสะพาน กรณีแบบช่วงต่อเนื่องจะมีจำนวนช่วงตั้งแต่ 2 ช่วงขึ้นไป แต่ปกติจำนวนช่วงสูงสุดที่ใช้ออกแบบไม่ควรเกิน 5 ช่วง เพื่อลดปัญหายุ่งยากเกี่ยวกับแรงเนื่องจากการขยายตัว (Expansion) และแรงกระทำตามแนวยาว (Longitudinal Force) ต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) โดยทั่วไปมักกำหนดจำนวนช่วงเท่ากับ 3 ช่วง สำหรับช่วงต่อเนื่อง 2 ช่วงจะช่วยประหยัดค่าก่อสร้างได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบสะพานที่มีสภาพรองรับช่วงเดียว (Simple Span)

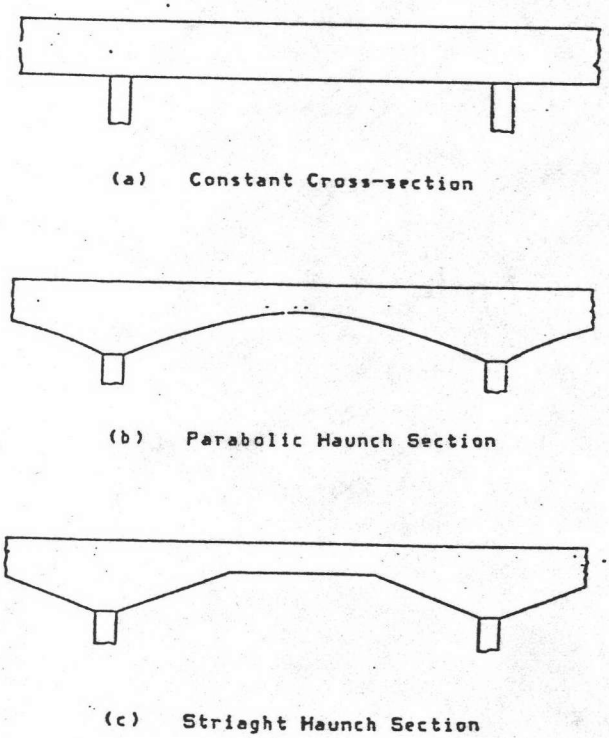
3.3 รูปร่างหน้าตัดของคานหลัก

รูปร่างหน้าตัดของคานหลักมีอยู่หลายแบบ แบ่งเป็นรูปร่างหน้าตัดตามแนวขวาง ได้แก่ หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) หน้าตัดรูปตัว "ไอ" (I-section) หน้าตัดรูปตัว "ที" (T-section) และหน้าตัดรูปกล่อง (Box-section) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับกรณีรูปร่างหน้าตัดตามแนวยาวได้แก่ แบบขนาดหน้าตัดคงที่ (Constant Cross-section) ขนาดหน้าตัดเปลี่ยนแปลงเป็นแนวเส้นตรงและแนวโค้งพาราโบลา (Striaght and Parabolic Haunch) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 รูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ตามแนวขวางคานหลัก



รูปที่ 3.2 รูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ตามแนวยาวของคานหลัก

3.4 การวิเคราะห์แรงในโครงสร้าง(11,12)

การวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงอีลาสติกของคานต่อเนื่องมีอยู่หลายวิธี ในที่นี้จะใช้วิธี Mement Distribution ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการใช้วิเคราะห์โครงสร้างพวกที่มีจุดต่อแบบยึดรั้ง (Rigid) วิธีนี้เป็นการแก้สมการ Simultaneous ในวิธี Slope-Deffection(13) โดยใช้วิธีหาค่าอย่างประมาณ (Successive Approximate) ค่าผลลัพท์ที่ได้จะละเอียดมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการกระจายโมเมนต์ โดยใช้หาสติฟเนสของคานหลักและกำหนดให้แรงขนาด 1 หน่วยกระทำที่จุดต่างของช่วงสะพาน ก็จะได้อินฟลูเอ็นซไลน์ของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน และเมื่อแรง 1 หน่วยกระทำครบทุกจุดบนช่วงสะพาน ก็เสมือนเป็นน้ำหนักแผ่ (Uniform Load) กระทำ ทำให้สามารถหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรได้ สำหรับกรณีมีการทรุดตัวของจุดรองรับ ซึ่งไม่มีแรงกระทำภายนอกจึงอาศัยเพียงค่าสติฟเนสของคานหลักดังกล่าวข้างต้น ประกอบกับวิธีการกระจายโมเมนต์ก็จะสามารถหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

3.4.1 วิธีการของ Moment Distribution

การทำ Moment Distribution คือการ "ยึดจุดต่อ" (Lock Joint) และ "ปล่อยจุดต่อ" (Unlock Joint) สลับกันไปทุก ๆ จุดต่อในโครงสร้าง เริ่มแรกยึดจุดต่อทุกจุดไม่ให้หมุน ทำให้โครงสร้างแต่ละส่วนเหมือนคานที่มีปลายเอ็นยึดแน่นทั้งสองข้าง ต่อไปก็ปล่อยจุดต่อเพียงจุดเดียว โมเมนต์ต้านที่เกิดขึ้นตรงปลายของทุกส่วนของโครงสร้างใกล้จุดต่อนี้ จะมีค่าแตกต่างกันตามส่วนความแข็งแรงของแต่ละชิ้นส่วน หรือตามค่าของ Distribution Factor ในขณะเดียวกัน โมเมนต์ต้านเหล่านี้จะถ่ายไปยังปลายตรงข้ามของชิ้นส่วนนั้น ซึ่งจะถ่ายไปเท่าใดขึ้นอยู่กับค่า Carry-over Factor ของชิ้นส่วนนั้น การยึดและปล่อยจุดต่อในโครงสร้างจะกระทำสลับกันไป แต่ต้องทำทีละจุดไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เพื่อต้องการถ่ายโมเมนต์ให้จุดต่ออื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงได้

3.4.2 สมการ Slope-Deflection

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าวิธี Moment Distribution จะอาศัยการแก้สมการ Slope Deflection สำหรับกำหนดค่า Factor ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ ซึ่งสมการดังกล่าว

แสดงไว้ดังต่อไปนี้คือ (พิจารณารูปที่ 3.3 ประกอบ)

1. กรณีค่า EI คงที่ในความยาวช่วงคานใด ๆ ($I = I_c$ = constant)

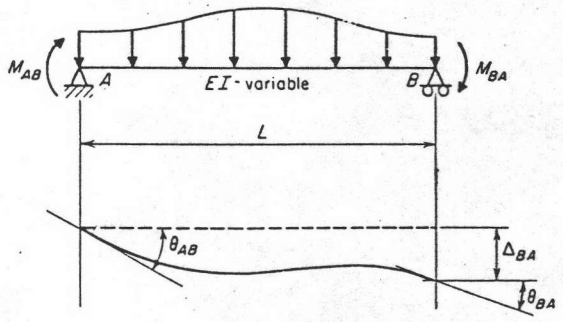
$$M_{AB} = \frac{2EI_c}{L}[2\theta_{AB} + \theta_{BA} + 3\psi_{AB}] + M_{FAB} \quad (3.1)$$

$$M_{BA} = \frac{2EI_c}{L}[\theta_{AB} + 2\theta_{BA} + 3\psi_{AB}] + M_{FBA} \quad (3.2)$$

2. กรณีค่า EI เปลี่ยนแปลงในความยาวช่วงคานใด ๆ ($I = I_c . i$)

$$M_{AB} = \frac{2EI_c}{L}[k_{AA}\theta_{AB} + k_{AB}\theta_{BA} - (k_{AA} + k_{AB})\psi_{AB}] + M_{FAB} \quad (3.3)$$

$$M_{AB} = \frac{2EI_c}{L}[k_{AB}\theta_{AB} + k_{BB}\theta_{BA} - (k_{AB} + k_{BB})\psi_{AB}] + M_{FBA} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.3 คานช่วงในของคานต่อเนื่อง

เมื่อ M_{AB} และ M_{BA} เป็นโมเมนต์ดัดชนิดบวก (หมุนตามเข็มนาฬิกา) กระทำต่อที่ปลาย A และ B ของช่วงคาน AB ตามลำดับ

θ_{AB} และ θ_{BA} เป็นมุมการหมุนของเส้นสัมผัสกับโค้งอีลาสติก ที่ปลาย A และ B จะคิดเป็นบวกเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกา

ψ_{AB} เป็นการหมุนของคอร์ดที่เชื่อมระหว่างจุดรองรับทั้งสองเนื่องจากการทรุดตัวของจุดรองรับ (Δ_{BA}) โดยคิดเป็นบวกถ้าหมุนตามเข็มนาฬิการโดยที่

$$\psi_{AB} = \Delta_{BA}/L \qquad (3.5)$$

i เป็นค่าอัตราส่วนของโมเมนต์อินเนอร์เชียที่ตำแหน่งใด ๆ บนความยาวช่วงคาน (I) ต่อโมเมนต์อินเนอร์เชียต่ำสุดของหน้าตัดคาน (I_c)

E เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของคอนกรีต

$$k_{AA} = \frac{p_{22}}{p_{11}p_{22} - p_{12}^2} \qquad (3.6)$$

$$k_{AB} = \frac{p_{12}}{p_{11}p_{22} - p_{12}^2} \qquad (3.7)$$

$$k_{BB} = \frac{p_{11}}{p_{11}p_{22} - p_{12}^2} \qquad (3.8)$$

โดยที่

$$p_{11} = \frac{1}{L}\sum \frac{\Delta x}{i}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2 \qquad (3.9)$$

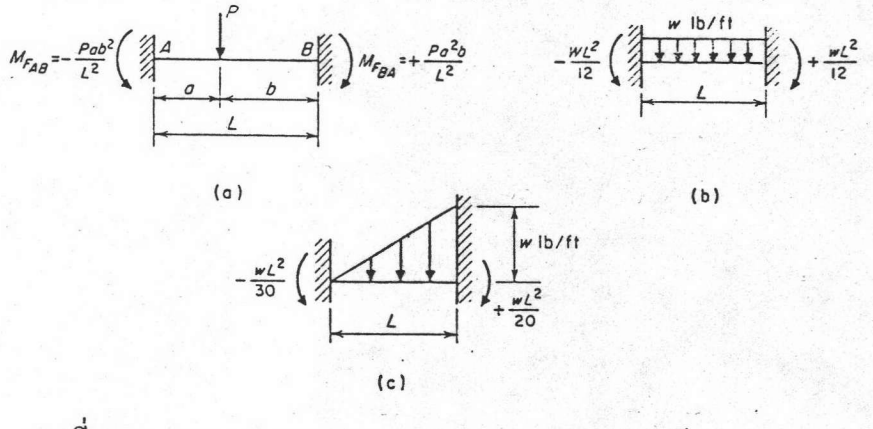
$$p_{12} = \frac{1}{L}\sum \frac{\Delta x}{i}\left(\frac{L-x}{L}\right)\left(\frac{x}{L}\right) \qquad (3.10)$$

$$p_{22} = \frac{1}{L}\sum \frac{\Delta x}{i}\left(\frac{x}{L}\right)^2 \qquad (3.11)$$

เมื่อ Δx เป็นระยะแบ่งย่อยบนความยาวช่วงคาน

x เป็นระยะจากปลายคาน A ไปยังหน้าตัดคานที่ทำการพิจารณา

M_{FAB} และ M_{FBA} เป็นค่า Fixed-end Moment ที่ปลาย A และปลาย B ตามลำดับ มีค่าเป็นบวกเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกา สำหรับกรณีค่า EI คงที่ ค่า Fixed-end Moment แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงค่า Fixed-end Moment สำหรับกรณีแรงต่าง ๆ กระทำ

ส่วนกรณี EI ของคานเปลี่ยนแปลงค่า M_{FAB} และ M_{FBA} หาได้จากสมการ 3.12 และ 3.13 ดังนี้

$$M_{FAB} = -\frac{EI_C}{L} k_{AA} \sum M_0 \left(\frac{L-x}{L}\right) \frac{\Delta x}{EI} + \frac{EI_C}{L} k_{AB} \sum M_0 \left(\frac{x}{L}\right) \frac{\Delta x}{EI} \qquad (3.12)$$

$$M_{FBA} = -\frac{EI_C}{L} k_{AB} \sum M_0 \left(\frac{L-x}{L}\right) \frac{\Delta x}{EI} + \frac{EI_C}{L} k_{BB} \sum M_0 \left(\frac{x}{L}\right) \frac{\Delta x}{EI} \qquad (3.13)$$

เมื่อ M_o เป็นโมเมนต์ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำเพียงอย่างเดียว

3.4.3 <u>การวิเคราะห์คานมีโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคงที่</u>

1. การหาค่า Stiffness Factor (K) ของช่วงคานใด ๆ ทำได้ดังสมการ 3.14

$$K = 4EI_c / L \qquad (3.14)$$

2. การหาค่า Distribution Factor ที่จุดต่อของคานทำได้โดยหาค่า Relative Stiffness แล้วใช้สมการ 3.15

$$DF = K / \Sigma K \qquad (3.15)$$

3. การหาค่า Carry-over Factor ในคานที่มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียคงที่ตลอดจะเท่ากับ 0.5 กล่าวคือค่า Carry-over Moment มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ Distribution Moment

4. การหาค่า Fixed-end Moment หาได้จากสมการ Slope-Deffection หรือใช้ค่าตามรูปที่ 3.2 และเมื่อมีการทรุดตัวของจุดรองรับ (Settlement) ค่า Fixed-end Moment ที่เพิ่มขึ้นจะพิจารณาจากสมการ 3.1 และ 3.2 ได้ว่า

$$M_{FAB} = M_{FBA} = 6EI_c \psi_{AB} / L \qquad (3.16)$$

3.4.4 <u>การวิเคราะห์คานมีโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดเปลี่ยนแปลง</u>

1. การหาค่า Stiffness Factor (K) ของช่วงคานใด ๆ ทำได้ดังนี้

$$K = EI_c k / L \qquad (3.17)$$

เมื่อ k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ Stiffness หาได้จากสมการ 3.6 และ 3.8

2. การหาค่า Distribution Factor กระทำได้เช่นเดียวกันกับกรณีโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคานคงที่

3. การหาค่า Carry-over Factor ที่ปลายทั้งสองของคาน ทำได้ดังนี้

$$COF_{AB} = k_{AB} / k_{AA} \qquad (3.18)$$

$$COF_{BA} = k_{AB} / k_{BB} \qquad (3.19)$$

เมื่อค่า k_{AA}, k_{AB}, k_{BB} หาได้จากสมการ 3.6 , 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

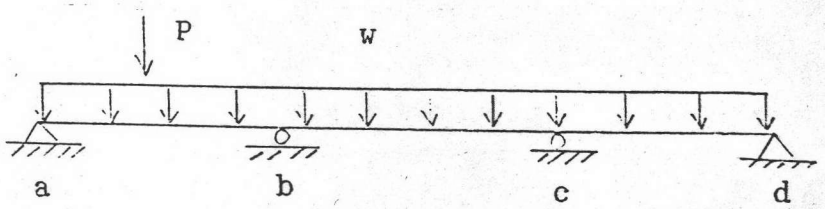
4. การหาค่า Fixed-end Moment หาได้จากสมการ 3.12 และ 3.13 ส่วนกรณีมีการทรุดตัวของจุดรองรับ ค่า Fixed-end Moment ที่เพิ่มขึ้น จะพิจารณาจากสมการ 3.1 และ 3.2 ได้ว่า

$$M_{FAB} = \frac{EI_c}{L} \cdot (k_{AA} + k_{AB})\, \phi_{AB} \qquad (3.20)$$

และ

$$M_{FBA} = \frac{EI_c}{L} \cdot (k_{AB} + k_{BB})\, \phi_{AB} \qquad (3.21)$$

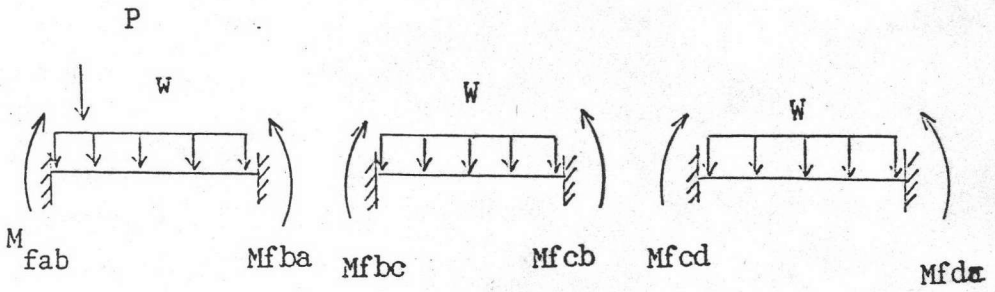
3.4.5 <u>สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Moment Distribution</u>



รูปที่ 3.5 แสดงรูปแบบของน้ำหนักกระทำต่อคาน

1. เปรียบเทียบค่า Stiffness Factor (K) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในโครงสร้างเพื่อหาค่า Distribution Factor ของข้อต่อต่าง ๆ ในโครงสร้าง

2. หาค่า Fixed-end Moment ของแต่ละชิ้นส่วนตามรูปที่ 3.6



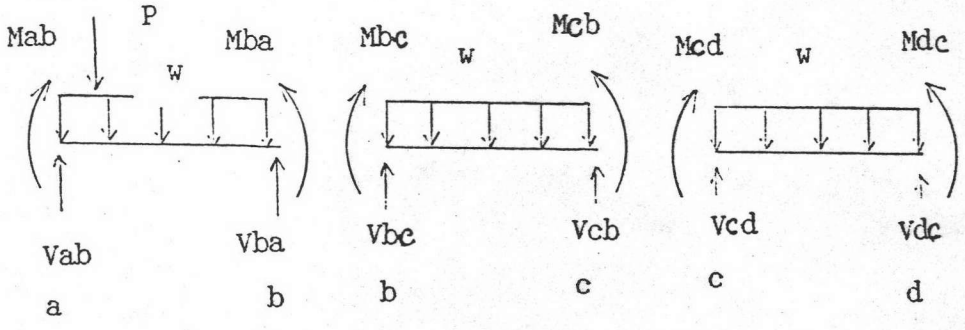
รูปที่ 3.6 แสดงการแบ่งแยกชิ้นส่วนของคาน

3. หาค่าแรงดัดไม่สมดุลย์ในแต่ละจุดต่อ แล้วกระจายแรงดัดออกไปขึ้นอยู่กับค่าของ Distribution Factor แรงดัดที่กระจายออกไปนี้เรียกว่า Distribution Moment

4. ถ่าย Distribution Moment ไปยังอีกปลายข้างหนึ่งของชิ้นส่วนโดยใช้ตามค่า Carry-Over Factor ซึ่งแรงดัดที่ถ่ายไปนี้เรียกว่า Carry-Over Moment

5. เริ่มทำจุดอื่น ๆ ตามข้อ 3 และ 4 ใหม่ เพื่อให้จุดต่าง ๆ ในโครงสร้างมีค่าแรงดัดไม่สมดุลย์ใกล้ศูนย์

6. จากข้อ 1 ถึงข้อ 5 จะทำให้ได้ค่าแรงตามรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงผลของการคิดค่าแรงดัด

7. จากรูปที่ 3.7 ดังกล่าวจะสามารถหาค่า Moment และ Shear ที่ระยะใด ๆ ช่วง ab, bc, cd สามารถสร้าง Moment Diagram และ Shear Diagram

8. ทำตามขั้นตอนที่ข้อ 1 ถึงข้อ 7 แต่ให้ เคลื่อนที่ไปเป็นระยะต่าง ๆ บนแต่ละช่วง ab, bc, cd คล้ายกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ คำนวณหาค่า Moment และ Shear

9. จากการทำในข้อ 8 จะได้ค่าระยะที่น้ำหนัก P กระทำแล้ว ทำให้เกิด Maximum Moment และ Maximum Shear ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบต่อไป

3.5 การจัดวางแนวของเหล็กอัดแรงตามความยาวของคานหลัก

โดยทั่วไปการเลือกแนวของเหล็กอัดแรงจะพิจารณาจากลักษณะของน้ำหนักบรรทุกกระทำ กล่าวคือ ถ้ามีน้ำหนักแผ่กระทำ แนวของเส้นอัดแรงควรจะเป็นแนวโค้งพาราโบลา และจะเป็นแนวเส้นตรงสำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเป็นจุด

ในกรณีคานต่อเนื่อง การเปลี่ยนมุมลาดเอียงของแนวเหล็กอัดแรงอย่างฉับพลันนั้นจะทำให้การเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานสูงมากที่บริเวณจุดรองรับช่วงใน (Interior Support) ดังนั้นจึงควรใช้แนวเหล็กอัดแรงแบบโค้งพาราโบลา ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปโค้งคว่ำบริเวณจุดรองรับช่วงใน และระยะเปลี่ยนแปลงความโค้งขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดคาน ความยืดหยุ่นของเหล็กอัดแรงและท่อร้อยเหล็ก (Duct) โดยปกติจะเป็นระยะในช่วงระหว่าง 10 ถึง 20 เปอร์เซนต์ของความยาวช่วงสะพาน

จุดต่ำสุดและสูงสุดของแนวเหล็กอัดแรงแบบโค้งพาราโบลา จะขึ้นอยู่กับระยะคลุมเหล็กซึ่งจะต้องกำหนดให้เหมาะสม ในกรณีที่ใช้จำนวนเหล็กอัดแรงหลายเส้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของโมเมนต์ไดอะแกรม ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 40 ถึง 50 เปอร์เซนต์ของความยาวช่วงสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด และเกิดขึ้นที่บริเวณจุดรองรับช่วงในสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุด

3.6 การคำนวณหาการเสื่อมสูญแรงอัด

ในงานคอนกรีตอัดแรงการเสื่อมสูญแรงอัดเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มดึงเหล็กจนถึงตลอดอายุของโครงสร้าง การคำนวณหาค่าเสื่อมสูญแรงอัดมีความสำคัญต่อกำลังของโครงสร้างอย่างมากจึงควรพิจารณาให้ได้ค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด เพื่อจะให้ได้รับประโยชน์จากการอัดแรงตามความมุ่งหมาย อย่างไรก็ตามเป็นการยากยิ่งที่จะคำนวณให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำเพราะมีปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อการเสื่อมสูญแรงอัด เช่น รายละเอียดและขั้นตอนในการก่อสร้าง สภาพแวดล้อม สภาพใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งเป็นการยากที่จะกำหนดข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกต้องในระหว่างการออกแบบ

การเสื่อมสูญแรงอัดสามารถจัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

3.6.1 <u>การเสื่อมสูญแรงอัดทันทีที่มีการถ่ายแรง</u> (Immedialety Loss) เกิดขึ้นเนื่องจาก

1. แรงเสียดทานของท่อ (Duct Friction Loss)
2. การเลื่อนตัวของสมอยึด (Slip of Anchorage)
3. การหดตัวแบบอีลาสติคของคอนกรีต (Elastic Shortening)

3.6.2 <u>การเสื่อมสูญแรงอัดตามอายุการใช้งาน</u> (Time-Dependent Loss) เกิดขึ้นเนื่องจาก

1. การหย่อนตัวของเหล็กอัดแรง (Steel Relaxation)
2. การล้าของคอนกรีต (Creep of Concrete)
3. การหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage of Concrete)

ในการคำนวณหาการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5.1 สำหรับกรณีการเลื่อนตัวของสมอยึด หาได้ดังนี้คือ

$$\Delta f = 2dX/L \qquad (3.22)$$

เมื่อ Δf เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการเลื่อนตัวของสมอยึด

d เป็นค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ

X เป็นระยะซึ่งการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากการเลื่อนตัวของสมอยึดครอบคลุมถึง

L เป็นระยะจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งทราบปริมาณการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ

โดยที่ $X = \sqrt{E(\Delta L)L / d}$ (3.23)

เมื่อ E เป็นค่าอีลาสติคโมดูลัสของเหล็กอัดแรง มีหน่วยเดียวกับ d

ΔL เป็นระยะการเลื่อนตัวของสมอยึด มีหน่วยเดียวกับ L

สำหรับการคำนวณหาค่าการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากสาเหตุอื่น ๆ ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5.2 หรืออาจใช้ค่าโดยประมาณจากตารางที่ 2.2

3.7 โมเมนต์เอกและโมเมนต์โท(14)

โมเมนต์เอก (Primary Moment) ในงานคอนกรีตอัดแรง เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าแรงอัดกับระยะเยื้องสูงของเหล็กอัดแรง ที่ตำแหน่งใด ๆ ตามแนวยาวของคานหลัก ในกรณีคานหลักแบบช่วงต่อเนื่อง นอกจากจะหาค่าโมเมนต์เอกแล้ว ยังต้องพิจารณาหาค่าโมเมนต์โทซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เอกและความไม่ต่อเนื่องของความชันของเหล็กอัดแรงบนจุดรองรับช่วงใน โดยที่โมเมนต์เอกทำให้คานหลักโก่งตัวขึ้น แต่เนื่องจากถูกยึดบริเวณจุดรองรับ แรงปฏิกิริยาบริเวณจุดรองรับนั้น ๆ จะทำให้เกิดโมเมนต์โทขึ้น

การคำนวณหาค่าโมเมนต์โทจะใช้หลักการของ Conjugate Beam และนำค่าโมเมนต์เอกที่กระทำมาเปรียบเทียบหาค่า Fixed End Moment ที่แต่ละจุดต่อของจุดรองรับ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนของวิธีการกระจายโมเมนต์ต่อไป

สำหรับค่าโมเมนต์ทั้งหมดที่นำไปใช้ในการออกแบบจะเป็นผลรวมของโมเมนต์เอกและโมเมนต์โทที่ทุก ๆ ตำแหน่งตามแนวยาวของคานหลักที่ทำการพิจารณา

3.8 หน่วยแรงดัดในช่วงอีลาสติก

ข้อกำหนดที่สำคัญประการหนึ่งในการวิเคราะห์ออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงในช่วงอีลาสติกก็คือ หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงที่ยอมให้ทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึง ส่วนผลรวมของหน่วยแรงดัดปลายสุดหน้าตัด (Extreme Fiber Stresses) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

3.8.1 ตอนถ่ายแรง (At Transfer)

$$f_{to} = \frac{P_{so}}{A_c} + \frac{P_{so}e}{Z_t} + \frac{M_d + M_{sec}}{Z_t} \qquad (3.24)$$

$$f_b = \frac{P_{so}}{A_c} + \frac{P_{so}e}{Z_b} + \frac{M_d + M_{sec}}{Z_b} \qquad (3.25)$$

3.8.2 ตอนใช้งาน (At Service)

$$f_{to} = \frac{P_{se}}{A_c} + \frac{P_{se}e}{Z_t} + \frac{M_d + M_{sec} + M_l + M_{set}}{Z_t} \quad (2\text{-}26)$$

$$f_b = \frac{P_{se}}{A_c} + \frac{P_{se}e}{Z_b} + \frac{M_d + M_{sec} + M_l + M_{set}}{Z_b} \quad (2\text{-}27)$$

เมื่อ f_{to} เป็น Top Fiber Stress (แรงอัดเป็นเครื่องหมาย "+")

f_b เป็น Bottom Fiber Stress (แรงอัดเป็นเครื่องหมาย "+")

P_{so} เป็นขนาดแรงอัดเริ่มต้น

P_{se} เป็นขนาดแรงอัดประสิทธิผล

A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดขวางคอนกรีตของคาน

e เป็นระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กอัดแรง มีเครื่องหมาย "+" เมื่ออยู่เหนือแกนสะเทิน (Neutral Axis)

Z_t, Z_b เป็นโมดูลัสหน้าตัดบนและล่าง (Top and Bottom Section Modulus) ของคานในช่วงถ่ายแรง (+, -)

M_d เป็นค่าโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

M_{set} เป็นค่าโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวของจุดรองรับ

M_l เป็นค่าโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

M_{sec} เป็นค่าโมเมนต์โท

3.9 การตรวจสอบที่สภาวะประลัย

หลังจากได้ตรวจสอบหน่วยแรงรวมในช่วงอีลาสติคแล้ว ควรจะทำการตรวจสอบกำลังดัดและกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะประลัยควบคู่กันไปด้วย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัยในทุกช่วงของการรับน้ำหนักบรรทุก

การคำนวณกำลังดัดประลัยมีอยู่หลายวิธี ในที่นี้ใช้วิธี Approximate ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 และเมื่อได้ค่ากำลังดัดประลัยแล้วก่อนจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดัดประลัย จะต้องคูณด้วยสัมประสิทธิ์ ϕ เพื่อลดความบกพร่อง

ของคุณภาพวัสดุและการก่อสร้าง ค่า ø ที่ใช้ประมาณ 0.9 -0.95 ส่วนค่าแรงดัดประลัยที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกนั้นได้จากการคูณแรงดัดในช่วงใช้งานด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ตามประเภทของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐานของ AASHTO

เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ในกรณีที่แรงดัดประลัยมีค่ามากกว่ากำลังดัดประลัย เราอาจจะเพิ่มเหล็กเสริมธรรมดาสำหรับช่วยเพิ่มกำลังดัด โดยค่าผลรวมดัชนีการเสริมเหล็กของหน้าตัดคานจะต้องไม่เกิน 0.3 เพื่อลดอันตรายเนื่องจากการพังทลายโดยไม่มีลักษณะเตือนภัยล่วงหน้าของโครงสร้าง

การคำนวณกำลังรับแรงเฉือน ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.7 สำหรับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จะต้องคูณด้วยสัมประสิทธิ์ ø ก่อนที่จะนำไปเปรียบเทียบกับแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกซึ่งต้องคูณเพิ่มแรงเฉือนด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ตามประเภทของน้ำหนักบรรทุกเช่นเดียวกัน ซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐานของ AASHTO ส่วนค่า ø ที่ใช้ประมาณ 0.85-0.90 สำหรับการคำนวณหาพื้นที่เหล็กเสริมหรือเหล็กปลอกและระยะช่วงจัดเหล็ก ให้ใช้วิธีตามหัวข้อ 2.7 เช่นกัน

3.10 สรุปขั้นตอนการออกแบบ

ขั้นตอนการออกแบบคานหลักของสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงต่อเนื่อง สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. กำหนดข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบ เช่น มิติต่าง ๆ ของตัวสะพาน คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กอัดแรง ความยาวช่องสะพาน ขนาดหน้าตัดและคำนวณคานหลัก น้ำหนักบรรทุกจร ค่าการทรุดตัวของจุดรองรับ ฯลฯ

2. คำนวณหาขนาดน้ำหนักบรรทุกคงที่และกระจายขนาดน้ำหนักบรรทุกจรต่อหนึ่งคานหลักตามมาตรฐานของ AASHTO

3. วิเคราะห์คานหลัก โดยจัดแบ่งความยาวช่วงคานเป็นชิ้นส่วนย่อย แล้วหาค่าออร์ดิเนทของอินฟลูเอ็นซไลน์โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสำหรับทุกตำแหน่งที่แรงขนาดหนึ่งหน่วยกระทำในแต่ละชิ้นส่วนย่อย

4. หาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก สำหรับนำไปใช้คำนวณหาหน่วยแรงดัดที่ปลายผิวบนสุดและล่างสุดของคานหลัก

5. กำหนดระยะและตำแหน่งของเหล็กอัดแรงเป็นแนวโค้งพาราโลลา แล้วคำนวณหาผลการเสื่อมสูญแรงอัดเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เพื่อกำหนดหน่วยแรงอัดเริ่มต้นและสุดท้ายของแรงอัดในเหล็กอัดแรง

6. คำนวณหาค่าโมเมนต์เอกและโมเมนต์โทเนื่องจากการอัดแรง แล้วนำไปใช้คำนวณหาหน่วยแรงดัดที่ปลายผิวบนสุดและล่างสุดของคานหลัก

7. ออกแบบหาขนาดแรงอัดที่ใช้ โดยนำค่าหน่วยแรงในข้อ (6) และ (8) มารวมกันตามเครื่องหมาย และเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่หน้าตัดใด ๆ ของคานหลัก แล้วนำค่าแรงอัดที่ได้ไปใช้หาปริมาณเหล็กอัดแรง

8. ตรวจสอบค่าหน่วยแรงดัดรวมของน้ำหนักบรรทุกและการอัดแรงในช่วยการถ่ายแรงและช่วงการใช้งาน โดยจะต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO

9. ตรวจสอบกำลังดัดประลัยและกำลังรับแรงเฉือน รวมทั้งออกแบบเหล็กปลอกในตัวคาน

10. แสดงผลของการออกแบบ