

## การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ACI 423.10R และมาตรฐาน AASHTO Comparison of Prestress loss according to ACI 423.10R and AASHTO standards

ประทีป กล้าอำ\* และ ทรงพล จารุวิศิษฐ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: prateep.kl@ku.th

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 423.10R ซึ่งมาตรฐาน ACI-318 ที่ใช้สำหรับการออกแบบอาคาร ค.ส.ล. ได้กล่าวอ้างอิงถึงเนื่องจากมาตรฐาน ACI-318 ไม่ได้ระบุถึงการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงไว้ในรายละเอียด และเปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียแรงดึงกับการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AASHTO-LRFD (2012) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับงานสะพานแต่อาจไม่เหมาะสมสำหรับงานอาคาร โดยการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีตัวอย่างจำนวน 8 รูปแบบ ประกอบด้วยโครงสร้างระบบอัดแรงก่อน 4 กรณีและระบบอัดแรงภายหลัง 4 กรณี เพื่อเปรียบเทียบผลค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงแต่ละรูปแบบ อีกทั้งยังได้พิจารณาลดทอนปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจากการสมมติว่าเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอัดแรงตั้งแต่ 0-50% และวิเคราะห์หาค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดที่ลดลงสำหรับตัวอย่างสุดท้ายของสะพานจริงในประเทศไทยซึ่งใช้คานกล่องต่อเนื่องชนิดอัดแรงภายหลังเปรียบเทียบกันระหว่างมาตรฐานทั้งสอง ผลการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์มาตรฐาน ACI ให้ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจากเฉลี่ยสูงกว่าการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AASHTO ประมาณ 3.84 % และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอัดแรงทำให้เหล็กเสริมอัดแรงที่เหลืออยู่ต้องรับแรงดึงเพิ่มมากขึ้นทำให้ต้องการกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัดเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยกับเหล็กเสริมที่ถูกกัดกร่อนหายไปตามลำดับ

คำสำคัญ: การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง, มาตรฐาน ACI 423.10R, มาตรฐาน AASHTO, การกัดกร่อน, สะพาน

### Abstract

This study compares the calculation of prestress loss in prestressing steel according to the ACI 423.10R (the standard referred by ACI-318 for RC building design as ACI-318 has no calculation details of prestress loss) with the calculation using AASHTO-LRFD (2012) which is the standard mostly used for Bridge design but may not appropriate for buildings. The study analyzed the prestress loss in prestressing steel of 8 examples including 4 cases of Pretension structures and 4 cases of Post-tension structures. Moreover, reduction of prestressing steel area in structure from 0-50% for assuming corrosion in structure has been considered in calculation. Comparison of the moment capacity between using both different standards has been calculated for the last example of the real bridge in Thailand

using a post-stressed continuous box girder. The results show that calculation using ACI standard gives higher prestressing loss than using the AASHTO standard for about 3.84%. Moreover, the corrosion of the prestressing steel causes increasing of the tensile stress in the remained prestressing steel which results in more flexural strength requires in the section to compensate for the corroded steel area.

Keywords: Prestress loss, ACI 423.10R standard, AASHTO standard, Corrosion, Bridge

### 1. คำนำ

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและการกัดกร่อนเหล็กเสริมอัดแรง ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังของชิ้นส่วนอัดแรงลดลง ในประเทศไทยการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงส่วนใหญ่อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO [1] อย่างไรก็ตามอาจไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอาคารที่อ้างอิงมาตรฐาน ACI เป็นหลัก ซึ่งต่อมาได้ปรับปรุงให้มีเนื้อหาครอบคลุมการคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงของโครงสร้างอาคารคอนกรีตอัดแรงในมาตรฐาน ACI 423.10R [2] ให้เหมาะสมกับงานอาคาร โดยคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา กำลังรับแรงอัด อายุคอนกรีต การหดตัวและการคืบของคอนกรีต การผ่อนคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอัดแรง

ในอดีตมีงานศึกษาวิจัยโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงมากมาย อาทิ งานวิจัยพฤติกรรมโครงสร้างที่การออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO อาจไม่เพียงพอ เช่น การคืบและการหดตัวของคอนกรีตที่ทำให้เกิดการโก่งตัวระยะยาวมากเกินไป [3-4], แรงเฉือนในคานที่เกินค่ากำลังเฉือนของคานตามข้อกำหนด AASHTO (2014) [5], ผลของการกัดกร่อนเส้นลวดอัดแรงที่มีต่อการแตกร้าวในคอนกรีต [6] และผลกระทบจากความร้อนที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสูงกว่าที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงค่าความเค้นสูงในผนังคานเนื่องจากการกดทับของเส้นลวดอัดแรงในปีกคานด้านล่างของสะพาน [7] และการวิเคราะห์สะพาน Budan bridge รูปแบบคานกล่องต่อเนื่องโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา [8] เป็นต้น

การออกแบบชิ้นส่วนคานคอนกรีตอัดแรงให้เหมาะสมต้องทำการประเมินแรงอัดที่ถ่ายแรงสู่คอนกรีตจากเหล็กเสริมอัดแรง โดยการระบุแรงเริ่มต้นหรือความเค้นที่เหล็กเสริมอัดแรงควรได้รับแรงดึง จากนั้นจึงประเมินความเค้นในเหล็กเสริมอัดแรงที่จะสูญเสียไปตามเวลา รวมถึงการเสียรูปจากการสูญเสียแรงอัด โดยค่าการสูญเสียแรงอัดในคอนกรีตจะใช้ในการประเมินความเค้นในคอนกรีตที่ส่วนต่างๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว และประเมินการเสียรูปของคาน ความแม่นยำ และการประมาณค่าการสูญเสีย

แรงอัดจะต้องมีความสมดุล เพื่อให้แน่ใจว่าความปลอดภัย และใช้งานได้ในเชิงเศรษฐกิจ โดยหากประเมินการสูญเสียแรงดึงต่ำไป จะทำให้เกิดความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงมากกว่าที่มีอยู่จริง ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกหักในสภาวะใช้งาน และสูญเสียความทนทานต่อการกัดกร่อน แต่หากประเมินการสูญเสียแรงดึงมากเกินไปอาจนำไปสู่การออกแบบที่ไม่ประหยัด

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงด้วยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 และมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) รวมถึงผลจากการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอัดแรง โดยพิจารณาตัวอย่างกรณีศึกษา 8 รูปแบบ จากตัวอย่างการออกแบบชิ้นส่วนชนิดอัดแรงก่อนและอัดแรงภายหลังอย่างละ 4 ตัวอย่าง

## 2. การคำนวณการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (Prestress Losses)

โดยทั่วไปข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO และ ACI [1-2] พิจารณาการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเป็น 2 ประเภท คือ 1.การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีหลังจากถ่ายแรง (Instantaneous Loss) ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตหรือการก่อสร้าง ประกอบด้วย การหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต (Elastic Shortening Loss), การเข้าที่ของสมอยิต (Anchorage Loss) และจากความผิดของเหล็กเสริมอัดแรง (Friction Loss) โดยการเสื่อมลดของแรงดึงจากการเข้าที่ของสมอยิตและจากความผิดของเหล็กเสริมอัดแรงมีเฉพาะในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงภายหลังเท่านั้น ซึ่งใช้วิธีการคำนวณเหมือนกันทั้ง 2 มาตรฐาน (มาตรฐาน ACI และ AASHTO) 2.การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (Time-Dependent Loss) ประกอบด้วย การคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (Relaxation Loss) การคืบ (Creep Loss) และการหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (Shrinkage Loss) ซึ่งคำนวณแตกต่างกันในแต่ละมาตรฐานดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

### 2.1 การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงจากความผิดและการเข้าที่ของสมอยิต ซึ่งเหมือนกันในทั้ง 2 มาตรฐาน

#### 2.1.1 การสูญเสียแรงดึงจากความผิดของเหล็กเสริมอัดแรง (Friction Loss), $\Delta f_{pF}$

เกิดเฉพาะในระบอบอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned Concrete) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง, ชนิดของท่อร้อย (Duct), เหล็กเสริมอัดแรง, การวางเหล็กเสริมอัดแรง (Profile) ตามความยาวสะพาน, มุมรวมของการเปลี่ยนแนวหลอดอัดแรง, ระยะห่างจากปลายที่แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง โดยสามารถคำนวณค่าการสูญเสียได้จาก

$$\Delta f_{pF} = f_{pj} (1 - e^{-(\mu\alpha + kx)}) \quad (1)$$

โดย  $f_{pj}$  คือหน่วยแรงดึงที่ปลายที่กระทำต่อเหล็กเสริมอัดแรง,  $k$  คือสัมประสิทธิ์ของความคด,  $\mu$  คือสัมประสิทธิ์ของความผิด,  $x$  คือระยะตามแนวราบจากปลายที่แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงถึงตำแหน่งที่พิจารณา และ  $\alpha$  คือผลรวมทั้งหมดของมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากปลายที่แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงถึงตำแหน่งที่พิจารณา

#### 2.1.2 การสูญเสียแรงดึงจากการเข้าที่ของสมอยิต (Anchorage Loss)

เกิดในระบอบอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned Concrete) ค่าการสูญเสียได้จาก

$$L_{anc} = \sqrt{\frac{2A_s E_s \Delta s}{\theta_{anc}}} \quad (2)$$

$$\Delta P_{anc} = \theta_{anc} L_{anc} \quad (3)$$

$$\Delta P_x = \theta_{anc} x = \theta_{anc} (L_{anc} - L') \quad (4)$$

โดย  $L_{anc}$  คือความยาวของสมอยิต,  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง,  $E_s$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง,  $\Delta s$  คือระยะเข้าที่ของสมอยิต,  $\theta_{anc}$  คือมุมระหว่างเส้น Friction Loss กับเส้น Anchorage Loss,  $\Delta P_{anc}$  คือความต่างการสูญเสียแรงดึงระหว่าง Friction Loss กับ Anchorage Loss ที่จุดให้แรง,  $\Delta P_x$  คือค่าความต่างการสูญเสียแรงดึงระหว่าง Friction Loss กับ Anchorage Loss ที่ระยะ  $x$ ,  $x$  คือระยะจากจุดตัดเส้น Friction Loss กับเส้น Anchorage Loss ถึงตำแหน่ง  $\Delta P_x$  และ  $L'$  คือความต่างความยาวของสมอยิตหักด้วยระยะ  $x$

### 2.2 การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI-423.10R-16

#### 2.2.1 ค่าการสูญเสียเริ่มต้น (Initial losses) ของระบบอัดแรงก่อนประกอบด้วย

- การสูญเสียแรงดึงจากการหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต (elastic shortening),  $\Delta f_{pES}$  คำนวณได้จาก 4 วิธีคือ

##### 1) Gross section approximation

$$f_{cir} = K_{cir} \left( \frac{P_j}{A_g} + \frac{P_j}{I_g} e^2 \right) - M_g \frac{e}{I_g} \quad (5)$$

โดย  $f_{cir}$  คือความเค้นของคอนกรีตที่แนวจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงภายหลังการปล่อยแรงทันที,  $K_{cir} = 0.9$  แนะนำโดย Zia et al. (1979) [9],  $P_j$  คือแรงดึงที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง,  $A_g$  คือพื้นที่หน้าตัด,  $I_g$  คือโมเมนต์ความเฉื่อย,  $e$  คือระยะเยื้องศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงจากจุดศูนย์กลางหน้าตัด และ  $M_g$  คือโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักคาน และคำนวณค่าการสูญเสียของการหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีตได้จาก

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir} \quad (6)$$

##### 2) Gross section with iteration

$$K_{cir} = \frac{\text{stress after transfer}}{\text{jacking stress}} = \frac{\text{jacking stress} - \Delta f_{pES}}{\text{jacking stress}} \quad (7)$$

โดย  $K_{cir}$  คืออัตราส่วนของความเค้นภายหลังถ่ายแรงกับความเค้นของแรงดึงที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง จากนั้นแทนค่า  $K_{cir}$  ใน (5) เพื่อคำนวณหาค่า  $f_{cir}$  และคำนวณค่า  $\Delta f_{pES}$  ในสมการที่ (6) ใหม่และวนซ้ำเพื่อตรวจสอบค่า  $K_{cir}$  จนเท่ากันจะได้ค่า  $K_{cir}$  และ  $\Delta f_{pES}$  ที่ละเอียดขึ้น

##### 3) Closed form of iterative method

$$\Delta f_{pES} = \frac{eM_g A_g - A_{ps} f_{pbt} (I_g + e^2 A_g)}{A_{ps} (I_g + e^2 A_g) + A_g I_g / n_p} \quad (8)$$

##### 4) Transformed section method

$$A_t = A_g + A_{ps} (n_p - 1) \quad (9)$$

$$cg1 = \frac{A_g y_g + A_{ps} (n_p - 1) y_{ps}}{A_t} \quad (10)$$

$$I_t = I_g + A_g (y_g - cg1)^2 + A_{ps} (n_p - 1) (y_{ps} - cg1)^2 \quad (11)$$

$$f_{cir} = \left( \frac{P_j}{A_t} + \frac{P_j}{I_t} e^2 \right) - M_t \frac{e}{I_t} \quad (12)$$

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir} = n_p f_{cir} \quad (13)$$

โดย  $A_t$  คือพื้นที่หน้าตัดแปลง,  $A_g$  คือพื้นที่หน้าตัด,  $A_{ps}$  คือพื้นที่เหล็กเสริมอัดแรง,  $n_p$  คืออัตราส่วนมอดุลัสยืดหยุ่นเหล็กเสริมอัดแรงต่อมอดุลัสยืดหยุ่นคอนกรีตขณะถ่ายแรง,  $cg_1$  คือระยะจุดศูนย์ถ่วงหน้าตัดแปลงจากด้านล่าง,  $y_g$  คือระยะจุดศูนย์ถ่วงจากด้านล่าง,  $y_{ps}$  คือความต่างระยะจุดศูนย์ถ่วงกับระยะเอียงศูนย์เหล็กเสริมอัดแรง,  $I_g$  คือโมเมนต์ความเฉื่อย,  $I_t$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง,  $P_j$  คือแรงดึงที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง,  $e$  คือระยะเอียงศูนย์เหล็กเสริมอัดแรงจากจุดศูนย์ถ่วง,  $\Delta f_{pES}$  คือค่าการสูญเสียของการหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต,  $E_p$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง,  $E_{ci}$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ  $f_{cir}$  คือความเค้นของคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงภายหลังการปล่อยแรงทันที

### 2.2.2 การสูญเสียเริ่มต้น (Initial losses) ของระบบอัดแรงภายหลังประกอบด้วย

- การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงจากความผิด ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.1
- การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงจากการเข้าที่ของสมอยืด ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.2 และ
- การหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต (elastic shortening),  $\Delta f_{pES}$  คำนวณได้จาก

$$f_{cpa} = f_{pa} (A_{ps} / A_g) \quad (14)$$

$$\Delta f_{pES} = K_{es} (E_p / E_{ci}) f_{cpa} \quad (15)$$

โดย  $K_{es} = 0.5$  สำหรับการอัดแรงเหล็กเสริมอัดแรงภายหลังตามลำดับของการอัดแรง และ  $K_{es} = 0$  ถ้าการอัดแรงกระทำพร้อมกัน,  $E_p$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง,  $E_{ci}$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง,  $f_{pa}$  คือความเค้นเหล็กเสริมอัดแรงที่ตำแหน่งปลายสมอยืด และ  $f_{cpa}$  คือความเค้นคอนกรีตจากความเค้นเฉลี่ยภายหลังการเข้าที่ของสมอยืดที่ตำแหน่งปลายสมอยืด

### 2.2.3 การสูญเสียระยะยาว (Long-term losses)

การสูญเสียระยะยาวจากน้ำหนักอื่นกระทำเพิ่มขึ้นส่วนอัดแรงที่ประกอบด้วยการสูญเสียจากการคืบของคอนกรีต, การสูญเสียจากการหดตัวของคอนกรีตและการผ่อนคลายของเหล็กเสริมอัดแรง

- 1) การสูญเสียจากการคืบของคอนกรีต,  $\Delta f_{pCR}$

$$\Delta f_{pCR} = K_{cr} (f_{cir} - f_{cds}) (E_p / E_c) \quad (16)$$

$$f_{cds} = -M_{sd} (e_p / I_g) \quad (17)$$

โดย  $K_{cr} = 1.6$ ,  $f_{cds}$  คือความเค้นคอนกรีตจากน้ำหนักอื่นกระทำเพิ่ม และ  $M_{sd}$  คือโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักอื่นกระทำเพิ่ม

- 2) การสูญเสียจากการหดตัวของคอนกรีต,  $\Delta f_{pSH}$

$$\Delta f_{pSH} = K_{sh} E \left( 1 - 0.0024 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) (8.2 \times 10^{-6}) \quad (18)$$

$$\Delta f_{pSH} = K_{sh} E \left( 1 - 0.06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) (8.2 \times 10^{-6}) \quad (19)$$

โดยสมการ (18) สำหรับ  $V/S$  ในหน่วย มม. และสมการ (19) สำหรับ  $V/S$  ในหน่วยนิ้ว,  $K_{sh} = 0.85$ ,  $V/S$  คืออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดกับเส้นรอบรูป และ  $RH$  คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์

- 3) การสูญเสียจากการผ่อนคลายของเหล็กเสริมอัดแรง,  $\Delta f_{pRE}$

$$\Delta f_{pRE} = (K_{re} - J (\Delta f_{pSH} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pES})) C \quad (20)$$

$$C = \left( \frac{f_{pi}}{f_{pu}} / 0.21 \right) \left( \frac{f_{pi}}{f_{pu}} / 0.90 - 0.55 \right) \quad \text{เมื่อ } \frac{f_{pi}}{f_{pu}} \geq 0.54 \quad (21)$$

$$C = \left( \frac{f_{pi}}{f_{pu}} \right) / 4.25 \quad \text{เมื่อ } \frac{f_{pi}}{f_{pu}} \leq 0.54 \quad (22)$$

โดย  $f_{pi}$  คือความเค้นเฉลี่ยภายหลังการเข้าที่ของสมอยืด,  $f_{pu}$  คือความเค้นประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง,  $K_{re}$  คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง,  $J$  คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง

### 2.3 การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012)

- 2.3.1 การสูญเสียเริ่มต้น (Initial losses) ของระบบอัดแรงก่อน วิธี Refined estimate ประกอบด้วย

- การสูญเสียแรงดึงจากการหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต (elastic shortening),  $\Delta f_{pES}$  คำนวณจาก

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \quad (23)$$

โดย  $f_{cgp}$  คือความเค้นคอนกรีตภายหลังหล่อคอนกรีตทับหน้า (เทียบเท่ากับ  $f_{cir}$  ตามมาตรฐาน ACI) คำนวณจาก

$$f_{cgp} = \left( \frac{P_j}{A_g} + \frac{P_j}{I_g} e^2 \right) - M_g \frac{e}{I_g} \quad (24)$$

- 2.3.2 การสูญเสียเริ่มต้น (Initial losses) ของระบบอัดแรงภายหลัง วิธี Refined estimate ประกอบด้วย

- การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงจากความผิด,  $\Delta f_{pF}$ , ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.1.1

- การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงจากการเข้าที่ของสมอยืด,  $\Delta f_{pA}$ , ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.2 และ

- การหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต (elastic shortening),  $\Delta f_{pES}$  คำนวณได้จาก

$$\Delta f_{pES} = \left( \frac{N-1}{2N} \right) \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \quad (25)$$

โดย  $N$  คือจำนวนของเหล็กเสริมอัดแรง กรณี  $N$  เท่ากับ 1 คำนวณค่า  $\Delta f_{pES}$  จากสมการที่ (23) คูณด้วย 0.5

- 2.3.3 การสูญเสียตามเวลา (Time-Dependent Loss),  $\Delta f_{pLT}$ , วิธี Refined estimate

เป็นวิธีการคำนวณค่าการสูญเสียทั้งหมดแบบประมาณ โดยใช้อายุคอนกรีตที่ 1, 90 วัน และที่สิ้นสุดการใช้งาน ซึ่งแบ่งการสูญเสียตามเวลาเป็น 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงแรกตั้งแต่หลังจากการถ่ายแรงจนวางพื้นสะพาน (deck placement) (id) และ ช่วงหลังจากการวางพื้นสะพานจนถึงสิ้นสุดการใช้งาน (df) การคืบของคอนกรีตคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การคืบจาก

$$\Delta f_{pLT} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id} + (\Delta f_{pSD} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pSS})_{df} \quad (26)$$

โดยแต่ละองค์ประกอบคำนวณดังนี้

$$1) \text{ การสูญเสียจากการหดตัวของคอนกรีต, } \Delta f_{pSR}$$

$$\Delta f_{pSR} = \varepsilon_{shb}(t_d) E_p K_{id} \quad (27)$$

$$K_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_{ps}}{E_{ci} A_g} \left(1 + \frac{A_g}{I_g} e^2\right) (1 + 0.7 \phi_b(t_f, t_i))} \quad (28)$$

โดย  $\varepsilon_{shb}(t_d)$  คือการหดตัวของคอนกรีตที่เวลา 90 วัน คำนวณจาก

$$\varepsilon_{sh} = k_s k_{hs} k_f k_{id} (0.48 \times 10^{-3}) \quad (29)$$

$$k_s = 1.45 - 0.13(V/S), \quad k_{hs} = 2.00 - 0.014RH$$

$$\text{นิยาม } \phi_b(t_f, t_i) = \phi(\infty, 1)$$

โดยเมื่อ  $\phi(t, t_i)$  คือค่าสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตคำนวณจาก

$$\phi(t, t_i) = 1.9 k_s k_{hs} k_f k_{id} t_i^{-0.118} \quad (30)$$

$t_i$  คืออายุคอนกรีต 1 วัน,  $t$  คืออายุคอนกรีต  $\leq 90$  วัน

$$k_{hc} = 1.56 - 0.008RH,$$

$$k_f = \frac{5}{1 + f'_{ci}}, \quad k_{id} = \frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t}$$

และที่อายุคอนกรีตมากกว่า 90 วันขึ้นไป

$$k_{hc} = 2.00 - 0.014RH$$

$$k_f = \frac{5}{1 + f'_c}, \quad k_{id} = \frac{t}{61 - 4f'_c + t}$$

$$2) \text{ การสูญเสียจากการคืบคอนกรีตในช่วงแรก, } \Delta f_{pCR1}$$

$$\Delta f_{pCR1} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \phi(t_d, t_i) K_{id} \quad (31)$$

โดย  $f_{cgp}$  คือความเค้นคอนกรีตภายหลังหล่อคอนกรีตทับหน้า

$$\text{และ } \phi(t_d, t_i) = \phi(90, 1)$$

$$3) \text{ การสูญเสียจากการผ่อนคลายของเหล็กเสริมอัดแรงในช่วงแรก, } \Delta f_{pR1}$$

$$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pt}}{K_L} \left( \frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (32)$$

โดย  $K_L = 30$  สำหรับ low-relaxation strands,

$$f_{pt} = f_{pJACK} - \Delta f_{pES} \text{ และ } f_{py} \text{ คือความเค้นจุดครากของเหล็กเสริม}$$

อัดแรง

$$4) \text{ การสูญเสียจากการหดตัวของคอนกรีต, } \Delta f_{pSD}$$

$$\Delta f_{pSD} = \varepsilon_{bdf} E_p K_{df} \quad (33)$$

โดย  $\varepsilon_{bdf} = \varepsilon_{sh}(\infty) - \varepsilon_{sh}(90)$  และ  $K_{df} = K_{id}$

$$5) \text{ การสูญเสียจากการคืบคอนกรีตในช่วงหลัง, } \Delta f_{pCD}$$

$$\Delta f_{pCD} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} (\phi_b(t_f, t_i) - \phi_b(t_d, t_i)) K_{df} + \frac{E_p}{E_{ci}} \Delta f_{cd} \phi(t_f, t_d) K_{df} \quad (34)$$

โดย  $f_{cgp}$  คือความเค้นคอนกรีตจากเหล็กเสริมอัดแรง,

$$\phi_b(t_f, t_i) = \phi(\infty, 1), \quad \phi_b(t_d, t_i) = \phi(90, 1),$$

$$\phi(t_f, t_d) = \phi(\infty, 90),$$

$$\Delta f_{cd} = \Delta f_{pid} \frac{A_p}{A_g} + \Delta f_{pid} \frac{A_p}{I_g} e_p^2 - M_{sdl} \frac{e_p}{I_g} \text{ และ}$$

$$\Delta f_{pid} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id} \quad (35)$$

$$6) \text{ การสูญเสียจากการผ่อนคลายของเหล็กเสริมอัดแรงในช่วงหลัง, } \Delta f_{pR2}$$

$$\text{โดย } \Delta f_{pR2} = \Delta f_{pR1}$$

2.3.4 การคำนวณค่าการสูญเสียทั้งหมดด้วยวิธี Stepwise method

เป็นวิธีคำนวณที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธี Refined estimate

โดยคิดที่ละลำดับชั้นเวลาของอายุคอนกรีตตั้งแต่ 10, 30, 90, 100, 5000

และ 20000 วันตามลำดับ โดยเริ่มการคำนวณด้วยการหาความเค้นใน

เหล็กเสริมอัดแรงภายหลังการหดตัวยืดหยุ่นคอนกรีต,  $f_{pe}$  ได้จาก

$$f_{pe} = f_{pJACK} - \Delta f_{pES} \quad (36)$$

และคำนวณสัมประสิทธิ์การหดตัวและการคืบของคอนกรีต ณ เวลาต่าง ๆ ที่ละลำดับ และหาค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงได้ดังนี้

$$1) \text{ การสูญเสียจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต}$$

$$\varepsilon_{sh}(t) = k_s k_{hs} k_f k_{id} (0.48 \times 10^{-3}) \quad (37)$$

$$\varepsilon_{cr}(t) = \frac{f_{cgp}}{E_{ci}} \Delta \phi \quad (38)$$

$$\Delta f_{pCR+SH} = E_p (\varepsilon_{sh} + \varepsilon_{cr}) \quad (39)$$

$$2) \text{ การสูญเสียจากการผ่อนคลายของเหล็กเสริมอัดแรง, } \Delta f_{RE}$$

$$\Delta f_{RE} = \left( \frac{f_{pe}}{45} \right) \log \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \left( \frac{f_{pe}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (40)$$

ซึ่งจะคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจากจุดเวลาที่พิจารณา

หน้าทีละลำดับ ซึ่งจะสามารถคิดค่าหน่วยแรงดึงประสิทธิผลที่เหลืออยู่ใน

เหล็กเสริมอัดแรงในชั้นตอนสุดท้ายทีละลำดับดังนี้

ค่าการสูญเสียในชั้นตอนนี้,  $\Delta f_{ps, gross}$ , คำนวณจาก

$$\Delta f_{ps, gross} = \Delta f_{pCR+SH} + \Delta f_{RE} \quad (41)$$

$$\Delta f_{c, loss} = \Delta f_{ps, gross} \left( \frac{A_{ps}}{A_g} + \frac{A_{ps}}{I_g} e^2 \right) \quad (42)$$

ทำให้เกิดแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง,  $\Delta f_{p, rebound}$

$$\Delta f_{p, rebound} = \Delta f_{c, loss} \frac{E_p}{E_{ci}} \quad (43)$$

รวมเกิดการสูญเสียทั้งหมดชั้นตอนนี้,  $\Delta f_{ps}$

$$\Delta f_{ps} = \Delta f_{ps, gross} - \Delta f_{p, rebound} \quad (44)$$

ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้น,  $\Delta f$

$$\Delta f = \Delta f_{ps} \frac{A_{ps}}{A_g} + \Delta f_{ps} \frac{A_{ps}}{I_g} e^2 \quad (45)$$

และจะได้ค่าความเค้นในคอนกรีต,  $f_{cgp}$ , ค่าใหม่เพื่อไปคำนวณ ณ จุด

เวลาถัดไปที่ละลำดับจาก

$$f_{cgp} = f_{cgp} - \Delta f \quad (46)$$

และความเค้นในเหล็กเสริมอัดแรงที่คงเหลือ,  $f_{ps, remain}$

$$f_{ps, remain} = f_{pe, new} = \Delta f_{pe} - \Delta f_{ps} \quad (47)$$

ซึ่งค่า  $f_{ps, remain}$  หรือ  $f_{pe, new}$  นี้จะนำมาเป็นค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตั้งต้นใหม่ในการคำนวณ ณ จุดเวลาถัดไปที่ละลำดับ

### 3. กำลังดัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงรับแรงดัด

ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงรับแรงดัดหรือกำลังระบุของโมเมนต์ (nominal strength),  $M_n$  คำนวณได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ  $C-T$  โดย  $C$  คือแรงอัดลัพธ์ในหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง  $= 0.85f'_c ab$  ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง,  $T = A_{ps}f_{ps}$  ทำให้สามารถคำนวณค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของโครงสร้างได้ว่า  $M_n = C(d_p - (a/2)) = T(d_p - (a/2))$  ซึ่งกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยนี้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ (required strength),  $M_u$

ค่า  $f_{ps}$  คือหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติหรือสภาวะประลัยคำนวณได้จาก

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left( \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right) \right) \quad (48)$$

### 4. กรณีศึกษาตัวอย่างในการคำนวณ

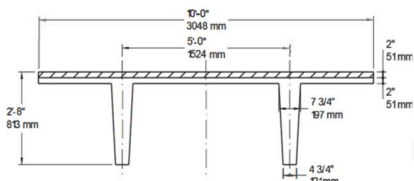
โครงการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีตัวอย่าง 8 รูปแบบ โดยคำนวณการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (Prestress Losses) อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI แล้วคำนวณเปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO พร้อมทั้งพิจารณาผลของการกัดกร่อนที่เกิดจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดรับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตั้งแต่ 0% จนถึง 50%

ตัวอย่างศึกษาประกอบด้วยชิ้นส่วนชนิดอัดแรงก่อนและชนิดอัดแรงภายหลังอย่างละ 4 ตัวอย่าง โดยอ้างอิงจากคู่มือการประมาณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI-423.10R-16 [2] และตำราการออกแบบคอนกรีตอัดแรงของ นเรศ พันธราธร [10] และสำหรับกรณีศึกษาตัวอย่างสุดท้าย ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 พร้อมตรวจสอบกำลังรับแรงดัดของโครงสร้าง ดังนี้

#### 4.1 ตัวอย่างที่ 1 คานสะพานดับเบิลทีชนิดอัดแรงก่อน (Pretensioned double-tee beam) [2]

เป็นคานช่วงเดียว ความยาว 70 ฟุต ดังรูปที่ 1 ไม่มีน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมกระทำนอกจากคอนกรีตที่หน้าความหนา 2 นิ้ว, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 75% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $A_g = 615 \text{ in}^2$ ,  $I_g = 59720 \text{ in}^4$ ,  $y_{bot} = 21.98 \text{ in}$ ,  $V/S = 1.69 \text{ in}$ ,  $f'_c = 5000 \text{ psi}$ ,  $E_c = 2900000 \text{ psi}$ ,  $f'_{ci} = 3500 \text{ psi}$ ,  $E_{ci} = 2400000 \text{ psi}$  และเหล็กเสริมอัดแรงชนิด Low-relaxation 12- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 270000 \text{ psi}$ ,  $A_{ps} = 1.836 \text{ in}^2$ ,  $E_p = 28500000 \text{ psi}$ ,  $f_{jack} = 0.75f_{pu} = 202500 \text{ psi}$ ,  $f_{py} = 243000 \text{ psi}$ ,  $e_p = 17.55 \text{ in}$ ,  $K_{cir} = 0.9$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 1.0$ ,  $K_{re} = 5000 \text{ psi}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 1.0$ ,  $K_L = 30$

ค่าการเสื่อมลดแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน ACI, มาตรฐาน AASHTO ด้วยวิธี Refined estimate และมาตรฐาน AASHTO ด้วยวิธี Stepwise method แสดงในตารางที่ 1-3 ตามลำดับ



รูปที่ 1 คานคอนกรีตอัดแรง double-tee beam

ตารางที่ 1 การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 (Simplified method) ของ double-tee beam

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$f_{jack} = 0.75 f_{pu}$	202500 psi
$M_{sd} = 0.12 w l^2$	1764000 in-lb
$f_{cir} = K_{cr} \left( \frac{P_j}{A_g} + \frac{P_j}{I_g} e^2 \right) - M_g \frac{e}{I_g}$	1251 psi
$\Delta f_{pES} = (E_p / E_{ci}) f_{cir}$	14900 psi
$f_{cds} = (M_{sd} / I_g) e_p$	518 psi
$\Delta f_{pCR} = K_{cr} (f_{cir} - f_{cds}) (E_p / E_c)$	11500 psi
$\Delta f_{pSH} = K_{sh} E_p \left( 1 - 0.06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) (8.2 \times 10^{-6})$	5300 psi
$\Delta f_{pRE} = (K_{re} - J (\Delta f_{pSH} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pES})) C$	3700 psi
$\Delta f_{pLT} = \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} + \Delta f_{pRE}$	20500 psi
$\Delta f_p = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT}$	35400* psi
$f_p = f_{pi} - \Delta f_p$	167100 psi

\* ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ตารางที่ 2 การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) ของ double-tee beam

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$f_{jack} = 0.75 f_{pu}$	202500 psi
$M_{sd} = 0.12 w l^2$	1764000 in-lb
$f_{cir} = K_{cr} \left( \frac{P_j}{A_g} + \frac{P_j}{I_g} e^2 \right) - M_g \frac{e}{I_g}$	1251 psi
$\Delta f_{pES} = (E_p / E_{ci}) f_{cir}$	14900 psi
$k_s = 1.45 - 0.13 (V/S)$	1.23
$k_{hc} = 1.56 - 0.008 RH$	0.96
$k_f = 5 / (1 + f'_c)$	1.11
$k_{td} = t / (61 - 4 f'_c + t)$	0.657
$\phi(90, 1) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	1.636
$\phi(\infty, 1) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	2.490
$k_{td} = t / (61 - 4 f'_c + t)$	1.00
$k_f = 5 / (1 + f'_c)$	0.833
$\phi(\infty, 90) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	1.100
$k_{hc} = 2.00 - 0.014 RH$	0.95
$\epsilon_{sh}(90) = k_s k_{hs} k_f k_{td} (0.48 \times 10^{-3})$	$0.409 \times 10^{-3}$
$\epsilon_{sh}(\infty) = k_s k_{hs} k_f k_{td} (0.48 \times 10^{-3})$	$0.623 \times 10^{-3}$
$K_{td} = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_{ps}}{E_{ci} A_g} \left( 1 + \frac{A_g}{I_g} e^2 \right) (1 + 0.7 \phi_i(t_j, t_i))}$	0.720
$\Delta f_{pSR} = \epsilon_{shb}(90) E_p K_{td}$	8400 psi

ตารางที่ 2 (ต่อ) การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) ของ double-tee beam

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$\Delta f_{pCR1} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{csp} \phi(t_d + t_i) K_{id}$	17500 psi
$f_{pi} = f_{pJACK} - \Delta f_{pES}$	187600 psi
$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pi}}{K_L} \left( \frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$	1388 psi
$\Delta f_{pid} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id}$	27288 psi
$\epsilon_{bdf} = \epsilon_{sh}(\infty) - \epsilon_{sh}(90)$	$0.214 \times 10^{-3}$
$\Delta f_{pSD} = \epsilon_{bdf} E_p K_{df}$	4400 psi
$\Delta f_{cd} = \Delta f_{pid} \frac{A_p}{A_g} + \Delta f_{pid} \frac{A_p}{I_g} e_p^2 - M_{sdl} \frac{e_p}{I_g}$	-858 psi
$\Delta f_{pCD} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{csp} (\phi(t_j, t_i) - \phi(t_d, t_i)) K_{jf} + \frac{E_p}{E_{ci}} \Delta f_{id} \phi(t_j, t_d) K_{jf}$	2456 psi
$\Delta f_{pR2} = \Delta f_{pR1}$	1388 psi
$(\Delta f_{pSD} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pSS})_{df}$	8244 psi
$f_{cSDL} = -M_{sdl} (e_p / I_g)$	-518 psi
$\Delta f_{pSDL} = (E_p / E_{ci}) \Delta f_{cSDL}$	-5090 psi
$\Delta f_{pLT} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id} + (\Delta f_{pSD} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pSS})_{df}$	35532 psi
$\Delta f_p = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} + \Delta f_{pSDL}$	45342* psi
$f_p = f_{pi} - \Delta f_p$	157158 psi

\* ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ตารางที่ 3 การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงวิธี Stepwise method ที่อายุคอนกรีต 10, 30, 90, 100, 5000 และ 20000 วัน

สูตรคำนวณ	อายุคอนกรีต (วัน)					
	10	30	90	100	5000	20000
$\Delta f_{pES}$ psi	-					
$f_{csp}$ psi	4900 <sup>(1)</sup>					
$f_{pe} = f_{pJACK} - \Delta f_{pES}$ หรือ $f_{pe, new}$ psi	87600	81317	77021	61119	60410	49565
$k_s = 1.45 - 0.13(V/S)$	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
$k_{hc} = 1.56 - 0.008RH$ for $t \leq 90$ days $k_{hc} = 2.00 - 0.014RH$ for $t > 90$ days	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95
$k_j = \frac{5}{1+f'_{ci}}$ for $t \leq 90$ days $k_j = \frac{5}{1+f'_c}$ for $t > 90$ days	1.11	1.11	1.11	0.833	0.833	0.833
$k_{id} = \frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t}$ for $t \leq 90$ days $k_{id} = \frac{t}{61 - 4f'_c + t}$ for $t > 90$ days	0.175	0.390	0.657	0.680	0.991	0.998

ตารางที่ 3 (ต่อ) การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงวิธี Stepwise method ที่อายุคอนกรีต 10, 30, 90, 100, 5000 และ 20000 วัน

สูตรคำนวณ	อายุคอนกรีต (วัน)					
	10	30	90	100	5000	20000
$\epsilon_{sh}(t) = k_s k_{hc} k_j k_{id} (0.48 \times 10^{-3})$	-109	-134	-166	-15	-194	-4
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
$\phi(t, 1) = 1.9 k_s k_{hc} k_j k_{id} t_i^{-0.118}$	0.436	0.972	1.636	1.695	0.972	0.972
$\epsilon_{cr}(t) = \frac{f_{csp}}{E_{ci}} \Delta \phi$	-227	-262	-293	-14	-263	-5
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
$\Delta f_{pCR+SH} = E_p (\epsilon_{sh} + \epsilon_{cr})$	-9576	11286	13082	-827	13025	-257
$\Delta f_{RE} = \left( \frac{f_{pe}}{45} \right) \left( \log \left( \frac{t_j}{t_i} \right) \right) \left( \frac{f_{pe}}{f_{py}} - 0.55 \right)$	2203	377	288	19	667	131
$\Delta f_{ps, gross} = \Delta f_{pCR+SH} + \Delta f_{RE}$	-7373	10909	12794	-808	12358	-126
$\Delta f_{c, loss} = \Delta f_{ps, gross} \left( \frac{A_{ps}}{A_g} + \frac{A_{ps}}{I_g} e^2 \right)$	92	136	159	10	154	2
$\Delta f_{p, rebound} = \Delta f_{c, loss} \frac{E_p}{E_{ci}}$	1090	1613	1892	99	1513	15
$\Delta f_{ps} = \Delta f_{ps, gross} - \Delta f_{p, rebound}$	-	-	-	-	-	-
	6283 <sup>(2)</sup>	6296 <sup>(3)</sup>	6092 <sup>(4)</sup>	709 <sup>(5)</sup>	6845 <sup>(6)</sup>	6111 <sup>(7)</sup>
$\Delta f = \Delta f_{ps} \frac{A_{ps}}{A_g} + \Delta f_{ps} \frac{A_{ps}}{I_g} e^2$	78	116	136	9	135	1
$f_{csp} = f_{csp} - \Delta f$ psi	-1173	-1057	-921	-912	-777	-776
$f_{ps, remain} = f_{pe, new} - \Delta f_{ps}$	81317	77021	61119	60410	49565	49454

(1)-(7) ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 4 ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของ double-tee beam

มาตรฐาน	ค่าการสูญเสีย	% การสูญเสีย
ACI (Simplified method)	35400 psi	17.48
AASHTO (Refined estimate)	45342 psi	22.39
AASHTO (Stepwise method)	53046* psi	26.20

\* ผลรวมค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (1) ถึง (7) จากตารางที่ 3

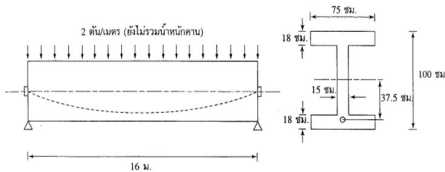
ตารางที่ 5 ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะประลัยภายใต้สภาวะเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมอัดแรงกรณี double-tee beam

% การกัดกร่อน	$\rho_p$	$f_{ps}$ (psi)	$\omega_p$
10	0.0050	244800	0.245
25	0.0042	248832	0.209
50	0.0028	255888	0.143

ตารางที่ 4 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการคำนวณการเสื่อมลดแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI และ AASHTO ของกรณีศึกษาตัวอย่างที่ 1 ส่วนตารางที่ 5 แสดงค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะประลัยภายใต้สภาวะเกิดการกัดกร่อนโดยสมมุติว่าเกิดการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมอัดแรงเป็นปริมาณตั้งแต่ 0% เพิ่มขึ้นทีละ 5% จนถึง 50% โดยนำเสนอผลเพียงบางค่าเนื่องจากความยาวบทความจำกัด

4.2 ตัวอย่างที่ 2 คานสะพาน H-beam ชนิดอัดแรงก่อน (Pretensioned H-beam) [10]

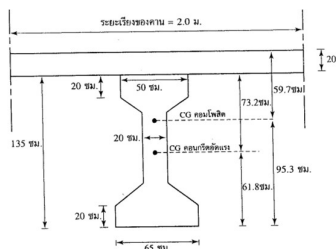
เป็นคานช่วงเดียวยาว 16 m แสดงในรูปที่ 2 ไม่มีน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 70% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $A_g = 3660 \text{ cm}^2$ ,  $I_g = 4939280 \text{ cm}^4$ ,  $y_{bot} = 50.00 \text{ cm}$ ,  $V/S = 77.87 \text{ mm}$ ,  $f'_c = 350 \text{ ksc}$ ,  $E_c = 299102 \text{ ksc}$ ,  $f'_{ci} = 240 \text{ ksc}$ ,  $E_{ci} = 247537 \text{ ksc}$  และเหล็กเสริมอัดแรงชนิด Low-relaxation 20- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 18982 \text{ ksc}$ ,  $A_{ps} = 19.74 \text{ cm}^2$ ,  $E_p = 1970000 \text{ ksc}$ ,  $f_{jack} = 0.8f_{pu} = 15185.6 \text{ ksc}$ ,  $f_{py} = 17083.8 \text{ ksc}$ ,  $e_p = 30.00 \text{ cm}$ ,  $K_{cir} = 0.941$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 1.0$ ,  $K_{re} = 346.7 \text{ ksc}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 1.29$



รูปที่ 2 คานคอนกรีตอัดแรง H-beam

4.3 ตัวอย่างที่ 3 คานสะพาน I-beam ชนิดอัดแรงก่อน (Pretensioned I-beam) [10]

เป็นคานช่วงเดียวยาว 24 m ดังรูปที่ 3 และมีน้ำหนักคงที่ (superimposed dead load) กระทำเพิ่มนอกจากความหนาพื้นบน 0.20 m ด้วยแอสฟัลต์ความหนา 0.05 m, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 70% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $A_g = 4931 \text{ cm}^2$ ,  $I_g = 10180000 \text{ cm}^4$ ,  $y_{bot} = 61.80 \text{ cm}$ ,  $V/S = 11.853 \text{ cm}$  (4.667 in),  $f'_c = 350 \text{ ksc}$  (5000 psi),  $E_c = 299102 \text{ ksc}$ ,  $f'_{ci} = 240 \text{ ksc}$  (3500 psi),  $E_{ci} = 247537 \text{ ksc}$  และเหล็กเสริมอัดแรงชนิด Low-relaxation 21- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 18982 \text{ ksc}$ ,  $A_{ps} = 20.727 \text{ cm}^2$ ,  $E_p = 1970000 \text{ ksc}$ ,  $f_{jack} = 0.8f_{pu} = 15186.6 \text{ ksc}$ ,  $f_{py} = 17083.8 \text{ ksc}$ ,  $e_p = 51.80 \text{ cm}$ ,  $K_{cir} = 0.949$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 1.0$ ,  $K_{re} = 346.7 \text{ ksc}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 1.29$

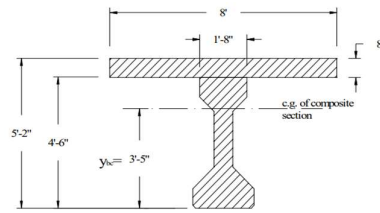


รูปที่ 3 คานคอนกรีตอัดแรง I-beam

4.4 ตัวอย่างที่ 4 คานพื้นคอนกรีตอัดแรง I-Beam ชนิดอัดแรงก่อน (Pretensioned) [10]

เป็นคานช่วงเดียวยาว 110 ฟุต ดังรูปที่ 4 มีน้ำหนักคงที่ที่กระทำเพิ่มนอกจากคอนกรีตทับหน้าความหนา 8 นิ้ว ด้วยแอสฟัลต์หนา 1.50 in, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 60% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคาน  $A_g = 788.4 \text{ in}^2$ ,  $I_g = 260403 \text{ in}^4$ ,  $y_{bot} = 24.75 \text{ in}$ ,  $V/S = 4.738 \text{ in}$ ,  $f'_c = 4000$

psi,  $E_c = 2900000 \text{ psi}$ ,  $f'_{ci} = 2800 \text{ psi}$ ,  $E_{ci} = 2400000 \text{ psi}$ , คุณสมบัติหน้าตัดคานพื้น  $A_c = 1556.4 \text{ in}^2$ ,  $I_c = 694599.5 \text{ in}^4$ ,  $y_{bot} = 41.157 \text{ in}$ ,  $e_c = 19.29 \text{ in}$  และเหล็กเสริมอัดแรงชนิด Low-relaxation 52- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 270000 \text{ psi}$ ,  $A_{ps} = 7.956 \text{ in}^2$ ,  $E_p = 28500000 \text{ psi}$ ,  $f_{jack} = 0.75f_{pu} = 202500 \text{ psi}$ ,  $f_{py} = 243000 \text{ psi}$ ,  $e_p = 18.73 \text{ in}$ ,  $K_{cir} = 0.852$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 1.0$ ,  $K_{re} = 5000 \text{ psi}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 1.0$

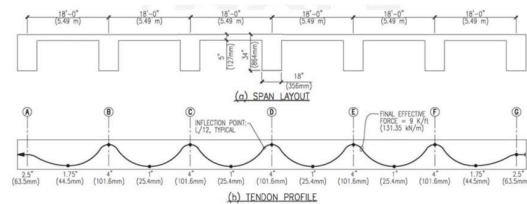


รูปที่ 4 คานคอนกรีตอัดแรง I-beam

เนื่องด้วยตัวอย่างที่ 2-4 เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างอัดแรงก่อนประเภทเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ดังนั้นจึงคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามขั้นตอนเดียวกับที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 โดยได้ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงสรุปผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 9

4.5 ตัวอย่างที่ 5 แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned) [2]

เป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงยาว 108 ฟุต ดังรูปที่ 5, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 80% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $f'_c = 4000 \text{ psi}$ ,  $E_c = 3605000 \text{ psi}$ ,  $f'_{ci} = 3000 \text{ psi}$ ,  $E_{ci} = 3122000 \text{ psi}$ ,  $V/S = 2.5 \text{ in}$ , อัดแรงด้านเดียวและเหล็กเสริมอัดแรงชนิด Low-relaxation 1- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 270000 \text{ psi}$ ,  $A_{ps} = 0.153 \text{ in}^2$ ,  $E_p = 28500000 \text{ psi}$ ,  $f_{jack} = 0.8f_{pu} = 216000 \text{ psi}$ ,  $f_{py} = 243000 \text{ psi}$ ,  $K_{es} = 0.5$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 0.85$ ,  $K_{re} = 5000 \text{ psi}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 0.857$ ,  $\mu = 0.07 \text{ rad}^{-1}$ ,  $k = 0.001 \text{ ฟุต}^{-1}$ ,  $\Delta_s = 0.25 \text{ in}$



รูปที่ 5 รูปตัดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

เนื่องด้วยเป็นตัวอย่างชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีอัดแรงทีหลัง จึงต้องคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงจากความผิดและการเข้าที่ของสมอยึดดังนี้ ค่าเยื้องศูนย์แต่ละช่วงที่ตำแหน่งจุดรองรับและจุดดัดกลับ  $L/12$

$$(18/12 = 1.5 \text{ ฟุต}) \text{ จาก } e_i = \frac{e_{i-1}(x_{i+1} - x_i) + e_{i+1}(x_i - x_{i-1})}{(x_{i+1} - x_{i-1})}$$

$$\text{ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมย่อย, } \theta_j = \tan^{-1} \left( 2 \frac{(e_j - e_v)}{(x_j - x_v)} \right)$$

ค่าแรงดึงจาก  $P_x = P_e e^{-(\mu\alpha + kx)}$  โดย  $\theta_j = \alpha$  จะได้ความเค้นที่จุดให้แรงดึง,  $f_{pi} = 216.0 \text{ ksi}$ , จุดยึดจริงที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง,  $f_L = 178.0$

ksi, ค่าการสูญเสียแรงดึงจากความผิด,  $d = f_{pi} - f_L = 38.0$  ksi, ความ

$$\text{ยาวสมอยึด, } x_s = \sqrt{\left(\frac{E_p L \Delta_s}{d}\right)} = 493.0 \text{ in (หรือ 41.1 ฟุต)}$$

คำนวณค่าการสูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงจากการเข้าที่สมอยึด,

$$\Delta f_{pA} = 2 \sqrt{\left(\frac{E_p d \Delta_s}{L}\right)} = 28.9 \text{ ksi คงเหลือความเค้นภายหลังการเข้าที่}$$

สมอยึดที่จุดให้แรงดึง,  $f = f_{pi} - \Delta f_{pA} = 187.1$  ksi,

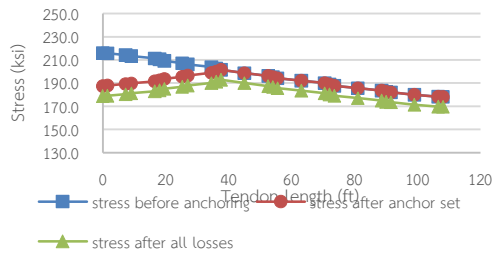
ความเค้นสูงสุดภายหลังการเข้าที่สมอยึด,  $f_{max} = f_{pi} - \Delta f_{pA} / 2 =$

201.6 ksi และผลต่างการสูญเสีย,  $\Delta f = d - \Delta f_{pA} = 9.1$  ksi นำไปสร้าง

เส้นความเค้นภายหลังการสูญเสียดังรูปที่ 6 และจากความเค้นเฉลี่ย

ภายหลังการเข้าที่ของสมอยึด,  $f_{pa} = 194.3$  ksi, ระยะห่างของเหล็กเสริม

อัดแรง 3 ฟุต คำนวณความเค้นในคอนกรีต,  $f_{cpa}$  ได้ดังตารางที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ความเค้นในเหล็กเสริมอัดแรงของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

ตารางที่ 6 การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$f_{pi} = 0.8 f_{pu}$	216000 psi
$f_{cpa} = f_{pa} A_{ps} / A_g$	165 psi
$\Delta f_{pES} = K_{es} (E_p / E_{ci}) f_{cpa}$	753 psi
$f_{eds} = M_{sd} e_p / I_g$	0 psi
$\Delta f_{pCR} = K_{cr} (E_p / E_c) (f_{cpa} - f_{eds})$	2087 psi
$\Delta f_{pSH} = K_{sh} E_p \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) (8.2 \times 10^{-6})$	3377 psi
$\Delta f_{pRE} = \left(K_{re} - J (\Delta f_{pSH} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pES})\right) C$	4072 psi
$\Delta f_{pLT} = \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} + \Delta f_{pRE}$	9536 psi
$\Delta f_p = d + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT}$	47489* psi
$f_p = f_{pi} - \Delta f_p$	168511 psi

\* ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ตารางที่ 7 การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$f_{cpa} = f_{pa} A_{ps} / A_g$	495 psi
$\Delta f_{pES} = 0.5 (E_p / E_{ci}) f_{cpa}$	2259 psi

ตารางที่ 7 (ต่อ) การคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

สูตรคำนวณ	ค่าการคำนวณ
$k_s = 1.45 - 0.13 (V / S)$	1.12
$k_{hc} = 1.56 - 0.008 RH$	0.92
$k_f = 5 / (1 + f'_c)$	1.21
$k_{td} = t / (61 - 4 f'_c + t)$	0.551
$\phi(90, 1) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	1.305
$\phi(\infty, 1) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	2.369
$k_{td} = t / (61 - 4 f'_c + t)$	1.00
$k_f = 5 / (1 + f'_c)$	1.086
$\phi(\infty, 90) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$	1.250
$k_{hc} = 2.00 - 0.014 RH$	0.88
$\epsilon_{sh}(90) = k_s k_{hs} k_f k_{td} (0.48 \times 10^{-3})$	$315 \times 10^{-3}$
$\epsilon_{sh}(\infty) = k_s k_{hs} k_f k_{td} (0.48 \times 10^{-3})$	$572 \times 10^{-3}$
$K_{td} = \frac{1}{1 + \frac{E_p A_{ps}}{E_{ci} A_g} \left(1 + \frac{A_g}{I_g} e^2\right) (1 + 0.7 \phi_k(t_f, t_i))}$	0.983
$\Delta f_{pSR} = \epsilon_{shb}(90) E_p K_{td}$	8825 psi
$\Delta f_{pCR1} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \phi(t_d, t_i) K_{td}$	5797 psi
$f_{pt} = f_{pMACK} - \Delta f_{pES}$	213741 psi
$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pt}}{K_L} \left(\frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55\right)$	2348 psi
$\Delta f_{pid} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id}$	16970 psi
$\epsilon_{bdf} = \epsilon_{sh}(\infty) - \epsilon_{sh}(90)$	$257 \times 10^{-3}$
$\Delta f_{pSD} = \epsilon_{bdf} E_p K_{df}$	7200 psi
$\Delta f_{cd} = \Delta f_{pid} \frac{A_p}{A_g} + \Delta f_{pid} \frac{A_p}{I_g} e_p^2 - M_{sdl} \frac{e_p}{I_g}$	-21 psi
$\Delta f_{pCD} = \frac{E_p}{E_c} f_{cgp} (\phi(t_f, t_i) - \phi(t_d, t_i)) K_{df} + \frac{E_p}{E_c} \Delta f_{cd} \phi(t_f, t_d) K_{df}$	4490 psi
$\Delta f_{pR2} = \Delta f_{pR1}$	2348 psi
$(\Delta f_{pSD} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pSS})_{df}$	14038 psi
$f_{cSDDL} = -M_{sdl} (e_p / I_g)$	0 psi
$\Delta f_{pSDDL} = (E_p / E_c) \Delta f_{cSDDL}$	0 psi
$\Delta f_{pLT} = (\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR1} + \Delta f_{pR1})_{id} + (\Delta f_{pSD} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pSS})_{df}$	31008 psi
$\Delta f_p = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} + \Delta f_{pSDDL}$	33267* psi
$f_p = f_{pi} - \Delta f_p$	191076 psi

\* ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ตารางที่ 6 และ 7 แสดงรายละเอียดการคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI และ AASHTO ตามลำดับ และนำผลค่าการสูญเสียแรงดึงที่คำนวณได้มาสรุปแสดงในตารางที่ 8 และได้



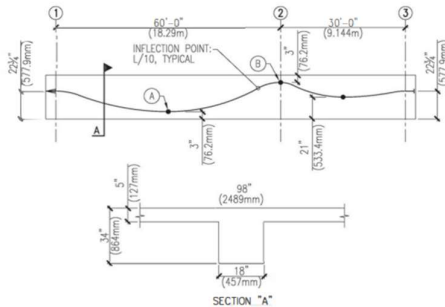
คำนวณค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะประลัยภายใต้สภาวะถูกกดกร่อนตั้งแต่ 0-50% ขึ้นตอนเดียวกับที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1

ตารางที่ 8 ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงทั้งหมดของแผ่นพื้น

มาตรฐาน	ค่าการสูญเสีย	การสูญเสีย(%)
Simplified method	47489 psi	21.98
AASHTO LRFD (2012) Refined estimate	33267 psi	15.40

4.6 ตัวอย่างที่ 6 คาน T-beam ชนิดอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned) [2]

เป็นคาน T-beam 2 ช่วงยาว 90 ฟุต ดังรูปที่ 7, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 60% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $A_g = 1012 \text{ in}^2$ ,  $I_g = 110648 \text{ in}^4$ ,  $y_{bot} = 22.73 \text{ in}$ ,  $f'_c = 5000 \text{ psi}$ ,  $E_c = 4030000 \text{ psi}$ ,  $f'_{ci} = 3000 \text{ psi}$ ,  $E_{ci} = 3122000 \text{ psi}$ ,  $V/S = 3.984 \text{ in}$ , อัดแรงด้านเดียวและใช้เหล็กเสริมอัดแรง Low-relaxation 12- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 270000 \text{ psi}$ ,  $A_{ps} = 1.836 \text{ in}^2$ ,  $E_p = 28500000 \text{ psi}$ ,  $f_{jack} = 0.8f_{pu} = 216000 \text{ psi}$ ,  $f_{py} = 243000 \text{ psi}$ ,  $K_{es} = 0.5$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 0.85$ ,  $K_{re} = 5000 \text{ psi}$ ,  $J = 0.04$ ,  $C = 0.857$ ,  $\mu = 0.25 \text{ rad}^{-1}$ ,  $k = 0.0002 \text{ ฟุต}^{-1}$ ,  $\Delta_s = 0.375 \text{ in}$ , จุดดัดกลับ  $L/10 = 6.0 \text{ ฟุต}$



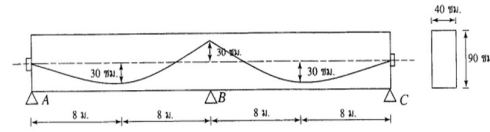
รูปที่ 7 รูปตัดของคาน T-beam

เนื่องด้วยเป็นโครงสร้างกรณีอัดแรงทีหลัง จึงคำนวณการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.5 โดยจะได้ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงสรุปผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 9

4.7 ตัวอย่างที่ 7 คานคอนกรีตอัดแรง 2 ช่วงชนิดอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned) [10]

เป็นคานคอนกรีตอัดแรง 2 ช่วงยาว 32 m แสดงในรูปที่ 8 รั้งน้ำหนักบรรทุกจร 2000 kg/m, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 75% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคาน  $A_g = 3600 \text{ cm}^2$ ,  $I_g = 2430000 \text{ cm}^4$ ,  $y_{bot} = 45.00 \text{ cm}$ ,  $V/S = A_g / L = 13.846 \text{ cm}$  (5.451 in),  $f'_c = 350 \text{ ksc}$  (5000 psi),  $E_c = 299102 \text{ ksc}$ ,  $f'_{ci} = 240 \text{ ksc}$  (3500 psi),  $E_{ci} = 247537 \text{ ksc}$ , การอัดแรงด้านเดียวและเหล็กเสริมอัดแรง Low-relaxation 12- 1/2 in dia.,  $f_{pu} = 18982 \text{ ksc}$ ,  $A_{ps} = 11.84 \text{ cm}^2$ ,  $E_p = 1970000 \text{ ksc}$ ,  $f_{py} = 17084 \text{ ksc}$ ,  $K_{es} = 0.5$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 0.85$ ,  $K_{re} = 346.7 \text{ ksc}$  (34 MPa),  $J = 0.04$ ,  $C = 1.29$ ,  $\mu = 0.25 \text{ rad}^{-1}$ ,  $k = 0.004 \text{ m}^{-1}$ ,  $\Delta_s =$

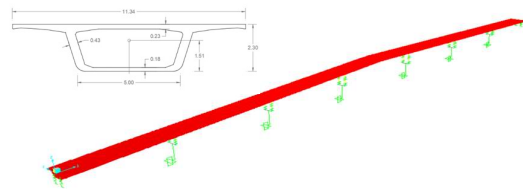
0.952 cm, จุดดัดกลับ  $L/10 = 1.6 \text{ m}$  และแสดงผลสรุปการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 9



รูปที่ 8 รูปตัดคานคอนกรีตอัดแรง 2 ช่วง

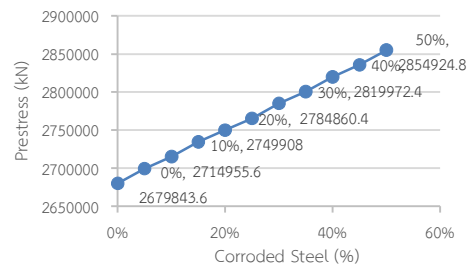
4.8 ตัวอย่างที่ 8 คานกล่องต่อเนื่องชนิดอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned)

เป็นคานต่อเนื่องยาว 310 m แสดงในรูปที่ 9 รั้งน้ำหนักบรรทุกจร 2000 kg/m, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 75% โดยคุณสมบัติหน้าตัดคานคือ  $A_g = 55626 \text{ cm}^2$ ,  $I_g = 385950000 \text{ cm}^4$ ,  $y_{bot} = 151.00 \text{ cm}$ ,  $V/S = A_g / L = 14.42 \text{ cm}$ ,  $f'_c = 510 \text{ ksc}$ ,  $E_c = 361052 \text{ ksc}$ ,  $f'_{ci} = 350 \text{ ksc}$ ,  $E_{ci} = 298807 \text{ ksc}$  และเหล็กเสริมอัดแรง Low-relaxation 19-15.2 mm dia.,  $f_{pu} = 18960 \text{ ksc}$ ,  $A_{ps} = 26.60 \text{ cm}^2$ ,  $E_p = 1990000 \text{ ksc}$ ,  $f_{py} = 17064 \text{ ksc}$ ,  $e_p = 112.00 \text{ cm}$ ,  $K_{es} = 0.5$ ,  $K_{cr} = 1.6$ ,  $K_{sh} = 0.85$ ,  $K_{re} = 346.7 \text{ ksc}$  (34 MPa),  $J = 0.04$ ,  $C = 1.29$ ,  $\mu = 0.20 \text{ rad}^{-1}$ ,  $k = 0.0016 \text{ m}^{-1}$ ,  $\Delta_s = 0.48 \text{ cm}$ , จุดดัดกลับ  $L/10 = 4.0 \text{ m}$

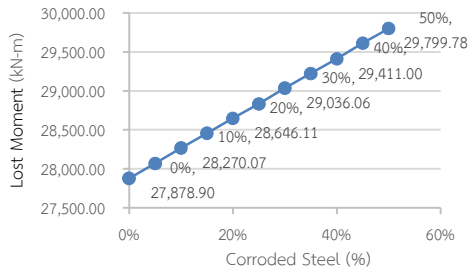


รูปที่ 9 รูปตัดขวางและแบบจำลองของคานกล่องต่อเนื่อง

เป็นกรณีศึกษาสะพานที่ก่อสร้างจริง บริเวณ กม.24+125 สะพานข้ามทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง สายบางใหญ่ - ภาณุพนบุรี จังหวัดนครปฐม ขนาด 2 ช่องจราจร เติร์ดทิศทางเดียว ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นประเภทเดียวกับตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.5-4.7 สรุปผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 9



รูปที่ 10 แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (การกัดกร่อน 0-50%)



รูปที่ 11 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่หายไป (การกัดกร่อน 0-50%)

สำหรับกรณีศึกษาตัวอย่างที่ 8 นี้ ได้ทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม SAP2000 ดังในรูปที่ 9 เพื่อศึกษาค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในคานกล่องต่อเนื่องภายใต้สภาวะเกิดการกัดกร่อน 0-50% โดยโครงสร้างสะพานตัวอย่างนี้มีความลึกคานคงที่ตลอดความยาวและได้รับการออกแบบเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกจรโดยพิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกทุกชนิด HS 20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO โดยได้ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและปริมาณกำลังรับโมเมนต์ดัดที่หายไปของคานกล่องต่อเนื่องแสดงดังในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจาก 8 ตัวอย่างกรณีศึกษา

ตัวอย่างกรณีศึกษา	ACI 423.10R-16		AASHTO LRFD (2012)	
	ค่าการสูญเสีย	% การสูญเสีย	ค่าการสูญเสีย	% การสูญเสีย
Example 1 (psi)	35400	17.48	45342	22.39
Example 2 (ksc)	2492	16.41	1833	12.07
Example 3 (ksc)	1554	10.23	1229	8.09
Example 4 (psi)	44522	21.99	39264	19.39
Example 5 (psi)	47489	21.98	33267	15.40
Example 6 (psi)	58240	26.96	35453	16.41
Example 7 (ksc)	5813	38.28	4444	29.26
Example 8 (ksc)	2224	14.66	2153	14.19
ค่าเฉลี่ย	-	20.99%	-	17.15%
มาตรฐาน ACI 423.10R-16 > มาตรฐาน AASHTO LRFD = 3.84%				

## 5. ผลการวิเคราะห์ผลและบทสรุป

สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยการคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) จากกรณีศึกษา 8 ตัวอย่าง แสดงผลดังตารางที่ 9 การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 เปรียบเทียบกับการคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO-LRFD (2012) พบว่าการคำนวณตามมาตรฐาน ACI 423.10R-16 (Simplified method) ให้ค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงมากกว่าการคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2012) (Refined estimate) ในเกือบทุกกรณีศึกษาตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีตัวอย่างที่ 1) โดยมาตรฐาน ACI ให้ค่าการเสื่อมลดลงสูงกว่าประมาณ 4% ดังนั้นสำหรับการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในอาคาร

เพื่อให้เป็นการคำนวณออกแบบเชิงปลอดภัยไว้ก่อนควรใช้มาตรฐาน ACI 423.10R-16 ซึ่งน่าจะมีความเหมาะสมกว่ามาตรฐาน AASHTO

นอกจากนี้ยังควรต้องพิจารณาผลของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอัดแรงประกอบด้วยเพื่อความปลอดภัย เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอัดแรงทั้ง 8 กรณีตัวอย่าง พบว่าการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เหล็กเสริมอัดแรงที่เหลืออยู่ต้องรับแรงเพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชยกับปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงที่ถูกกัดกร่อนหายไป และโมเมนต์ดัดประลัยหรือกำลังระบุของโมเมนต์,  $M_n$  ที่คำนวณได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบจะมีค่าลดลงตามการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้หน้าตัดคานต้องการกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดชดเชยเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงที่ถูกกัดกร่อนหายไป ทำให้โครงสร้างรับแรงดัดที่ออกแบบไว้ไม่เพียงพอได้ จึงต้องหมั่นตรวจสอบบำรุงรักษาโครงสร้างเมื่อมีการกัดกร่อนเกิดขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทรงพล จารุวิศิษฐ์ ที่กรุณาสละเวลาอ่านเอกสารการศึกษา ตลอดจนให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นความรู้ที่มีประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO LRFD, (2012). *Bridge Design Specifications*. 6th Edition, Washington, DC, USA.
- [2] ACI 423.10R-16, (2016). *Guide to Estimating Prestress Loss*. Joint ACI-ASCE Committee 423.
- [3] Hui-Sheng Chiu et al., (1996). Long-term deflection control in cantilever prestressed concrete bridges. I: Control Method. *Journal of Engineering Mechanics*, 122, pp. 489-494.
- [4] Hui-Sheng Chiu et al., (1996). Long-term deflection control in cantilever prestressed concrete bridges. II: Experimental Verification. *Journal of Engineering Mechanics*, 122, pp. 495-501.
- [5] Lama Baali, (2009). Self-consolidating concrete for Precast, Prestressed concrete bridge elements. Master's thesis of McGill University, Canada.
- [6] Lei Wang et al. (2019). Concrete cracking prediction under combined prestress and strand corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*, DOI: 10.1080/15732479.2018.1550519.
- [7] Richard Malm and Håkan Sundquist, (2010). Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges. *Journal of Engineering Structures*, 32, pp. 1038-1045.
- [8] Sevket Ates, (2011). Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages. *Applied Mathematical Modelling*, 35, pp. 3809-3820.
- [9] Zia et al., (1979). *Estimating Prestress Loss*. *Concrete International*.
- [10] นเรศ พันธธรร, (2562). *การออกแบบคอนกรีตอัดแรง*. พิมพ์ครั้งที่ 5, โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัดเอ็ม แอนด์ เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์.