

## ค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังของคานสะพานรูปตัวยู

### ELONGATION OF PRESTRESSING STEEL IN POST-TENSIONED

### U-GIRDER BRIDGE

ไพบูรณ์ ปัญญาคะโป

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

#### บทคัดย่อ

การเสื่อมลดแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังเป็นการเสื่อมลดแรงส่วนที่สำคัญในกระบวนการอัดแรง ในขณะเดียวกัน ค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงอัดประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง ในการก่อสร้างจริง ค่าความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณที่ออกแบบไว้และค่าการวัดจริงในสนามไม่ควรเกินค่าการยืดตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ บทความนี้ นำเสนอการศึกษาค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง ของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยู ตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยเก็บข้อมูลการวางแนวเหล็กเสริมในงานก่อสร้างจริงของคานรูปตัวยูจำนวน 5 ชุด เพื่อนำมาคำนวณค่าการเสื่อมลดแรงอัดของเหล็กเสริมในสนาม เปรียบเทียบกับค่าการเสื่อมลดแรงอัดที่คำนวณออกแบบไว้ และนำไปใช้คำนวณหาค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง ค่าการยืดตัวที่ออกแบบเดิม ค่าการยืดตัวที่วิเคราะห์จากแนวการวางเหล็กเสริมจริง และค่าการยืดตัวที่วัดได้จากเครื่องมือตรวจวัดจริง ผลการศึกษาพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างการยืดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางเหล็กเสริมจริงกับการยืดตัวที่ตรวจวัดได้ในสนามด้วยเครื่องมือตรวจวัด เท่ากับ 3.21 % ค่าความคลาดเคลื่อนในสนามที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวระหว่างการออกแบบและกระบวนการติดตั้ง เท่ากับ 2.31% ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 5.51% เกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ (5.0%) ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนในสนามนี้คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 42% ของค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในสนาม จึงส่งผลกระทบต่อค่าการยืดตัวโดยรวมของเหล็กเสริม ดังนั้นจึงเสนอแนะให้ติดตั้งแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงอย่างระมัดระวังในขั้นตอนการก่อสร้าง

#### ABSTRACT

Friction loss in the prestressing steel of the post-tensioned concrete is the major loss developed under prestressing process. Meanwhile, the elongation resulting from the friction loss is directly proportioned to the effective prestressing force. In the construction, the elongation deviation between the calculated elongation and the measured elongation should not be greater than the allowable limit. This paper presents an investigation of the elongation deviation of prestressing tendon in a post-tensioned U-girder bridge according to the Department of Highway of Thailand. The actual tendon profiles were collected from 5 sets of standard U-girder.

The friction loss of prestressing steel was analysed for the actual tendon profile and the design tendon profile. The resulting prestressing forces were employed to calculate the elongation of tendon. The comparisons among the design elongation, the calculated elongation of the actual profile and the measured value from gauge were conducted. It was found that the average deviation between the actual profile elongation and the measured elongation was 3.21%. The site deviation resulting from the elongation discrepancy between the design and the installation process was 2.31%. This results in the total mean deviation of 5.51%, which is larger than the allowable deviation of 5.0%. This additional site deviation approximately contributed to 42% of the total deviation. Therefore, the site deviation significantly affects the elongation deviation, and it is recommended that the tendon profile should be carefully installed and inspected in the construction process.

**Keywords:** Friction Loss, Elongation, Post-Tension Concrete, Prestressing Steel, U-Girder.

## 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลัง แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวของคาน จะถูกพิจารณาจากการเสื่อมลดแรงอัดของเส้นลวดเนื่องจากแรงเสียดทานจากการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นหลัก ซึ่งการเสื่อมลดแรงอัดตลอดความยาวเส้นลวดสามารถคำนวณได้จากสูตรค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเส้นลวดที่แนะนำโดยมาตรฐานการออกแบบ แรงดึงที่ปลายเส้นลวดอัดแรงด้านที่ไม่ได้ทำการดึงด้วยแม่แรงจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานของเส้นลวดและการเคลื่อนที่ของสมอยึด หลังจากการอัดแรงในเส้นลวด การประเมินแรงดึงในเส้นลวดจะถูกกระทำโดยการวัดค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมที่ปลายคาน เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงดึงประสิทธิผลที่เหลืออยู่ใช้งาน เนื่องจากค่าการยืดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดึงในเส้นลวดอัดแรง ทั้งนี้ วิศวกรผู้ออกแบบคาดว่า ค่าการยืดตัวของเส้นลวดที่วัดได้ในสนามควรจะใกล้เคียงกันกับค่าการยืดตัวที่คำนวณไว้ในช่วงการออกแบบ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินระดับที่ยอมรับได้ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการก่อสร้างในสนามส่งผลกระทบต่อค่าการยืดตัวที่วัดได้จริงในสนาม การวางแนวเส้นลวดที่ผิดพลาดไปจากแบบก่อสร้าง อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดแรงอัดในเส้นลวดมากเกินไป และทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของคานหลักของสะพาน ที่คาดหวังว่าจะต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะขนาดใหญ่จำนวนมากตลอดอายุการใช้งานของสะพาน มาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO (2011) สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลังยอมให้ค่าการยืดตัวที่วัดได้จริงในสนามมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไว้ไม่เกิน 5.0% สำหรับคานช่วงยาวเกินกว่า 15.0 เมตร แต่สำหรับสะพานที่มีช่วงพาดยาวระหว่าง 20.0-30.0 เมตร การวางแนวเส้นลวดที่ยาวมากอาจมีความผิดพลาดไปจากแบบก่อสร้างได้ง่าย อาจทำให้เกิดแรงเสื่อมลดในเส้นลวดได้มากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้น การศึกษาแรงเสื่อมลดและการยืดตัวของเหล็กเสริม และความคลาดเคลื่อนในสนามของเหล็กเสริมอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลังของสะพานที่มีช่วงพาดยาว จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการดำเนินการศึกษา 2 ประการ ได้แก่

(1) เพื่อศึกษาแรงเสียดมดและการยึดตัวของเส้นลวดอัดแรงสำหรับการวางแนวเหล็กเสริมในการก่อสร้างจริงของคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กทีหลังของคานสะพานรูปตัวยู

(2) เพื่อศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนในสนามที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่ออกแบบและค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงจากการก่อสร้างจริง

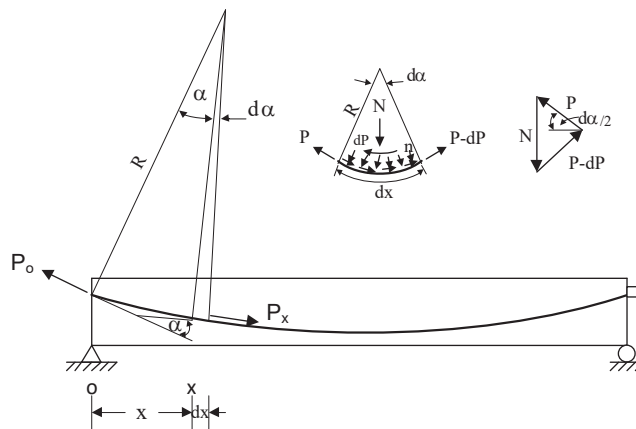
## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 การเสียดมดแรงอัดและการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง

พิจารณาจากรูปที่ 1 แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ตามความยาวของแนวการวางท่อร้อยเส้นลวดคำนวณได้ ดังนี้ (ACI, 2016).

$$P_x = P_o e^{-(kx + \mu\alpha)} \quad (1)$$

เมื่อ  $P_o$  คือ แรงดึงที่แม่แรงของเหล็กเสริมอัดแรง  $P_x$  คือ แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง ณ ตำแหน่งที่พิจารณา  $x$  จากปลายคานด้านแม่แรง  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ความคดที่เป็นความหย่อนของเส้นลวด  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความโค้งในแนวคดที่กำหนดความยาวของเส้นลวด  $\alpha$  คือ มุมที่รองรับส่วนโค้งของแนวการวางเส้นลวดในช่วงความยาว  $x$ .



รูปที่ 1 การเสียดมดแรงอัดเนื่องจากความโค้งของเส้นลวด

ค่าสัมประสิทธิ์  $k$  และ  $\alpha$  มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วงกว้าง ตามค่าที่เสนอแนะในมาตรฐาน ACI (2016) สำหรับท่อร้อยที่มีการอัดฉีดน้ำปูน ค่า  $k$  อยู่ระหว่าง 0.0002 - 0.001 ส่วนค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0.15 - 0.25 ส่วนมาตรฐาน ACI 343R (1995) สำหรับลวดเกลียวขนาด 7 เส้น ค่า  $k$  อยู่ระหว่าง 0.001 - 0.0066 และค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0.05 - 0.15 จากผลงานวิจัยของ Choi และคณะ (2018) ซึ่งศึกษาการเสียดมดแรงอัดของเส้นลวดอัดแรงแบบคิงเหล็กทีหลัง ที่ได้ทำการทดสอบแผ่นผนังคอนกรีตแบบที่มีส่วนโค้งกว้างขนาดใหญ่จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่างพบว่า ค่าการเสียดมดแรงอัดที่วัดได้จริงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสูตรที่แนะนำตามมาตรฐานต่างๆ (ACI-318, 2014; ACI, 2016; AASHTO, 2011; Caltrans, 2004) ในช่วงระหว่าง 38-43% ดังนั้น การใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรง

เสียดทานที่แนะนำโดยมาตรฐานเหล่านี้อาจได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงสำหรับโครงสร้างแผ่นผนังคอนกรีตขนาดใหญ่

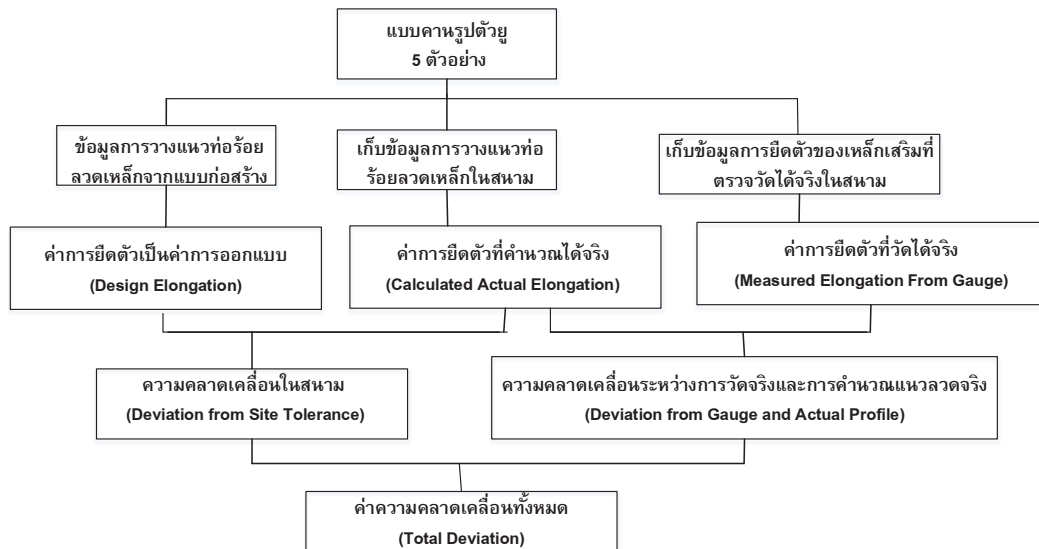
ค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง คำนวณในช่วงความยาว  $L$  ได้จาก

$$\Delta = \int_0^L \frac{P_x}{A_{ps} E_{ps}} dx - \Delta_A \quad (2)$$

เมื่อ  $A_{ps}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง  $E_{ps}$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 195,000 เมกะปาสกาล  $\Delta_A$  คือ ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึดที่ปลายคาน ซึ่งจะทำให้ค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมลดลง และเกิดการเสื่อมลดแรงอัดเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไป การเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึด มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 3-13 มิลลิเมตร จากผลงานวิจัยของ Bondy, K.B. (2012) ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึดจะส่งผลให้ค่าการเสื่อมลดแรงอัดเพิ่มมากขึ้นสำหรับความยาวท่อร้อยในช่วงสั้นไม่เกิน 10.0 เมตร มาตรฐานการออกแบบอาคารขอมให้มีความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม ดังนี้ มาตรฐาน ACI (2016) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 7.0% มาตรฐาน AASHTO (1989) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับแต่ละท่อร้อยที่มีผลการทดสอบการยกออกของวัสดุจริง มาตรฐาน AASHTO (2011) และ CEB-FIP (2010) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับท่อร้อยที่มีความยาวมากกว่า 15.0 เมตร และ 7.0% สำหรับท่อร้อยที่มีความยาว เท่ากับหรือน้อยกว่า 15.0 เมตร มาตรฐาน Eurocode (2009) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับท่อร้อยทั้งหมดในหน้าตัดคาน แต่ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ถึง 15.0% สำหรับท่อร้อยแต่ละเส้นในหน้าตัดคาน เนื่องจาก ในทางปฏิบัติค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวที่ขอมให้ตามที่กำหนดในมาตรฐานเหล่านี้ทำได้ยาก เนื่องจากการทำงานในสนามจริงมีข้อผิดพลาดได้มาก ผลงานวิจัยของ Hayek and Kang (2017) ซึ่งเป็นการศึกษา ค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม สำหรับลวดแบบเดี่ยวและลวดแบบกลุ่มของโครงสร้างอาคารคอนกรีตอัดแรงแบบค้ำเหล็กที่หลัง ได้มีการเสนอว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวที่ขอมให้ระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม ควรพิจารณาจากค่าที่มากกว่าระหว่าง 7.0% และ 9.5 มิลลิเมตร

### 3.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้มีการคัดเลือกคานคอนกรีตอัดแรงแบบค้ำเหล็กที่หลังรูปตัวยู ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยได้มีการเก็บข้อมูลการวางแผนท่อร้อยลวดเหล็กและข้อมูลการตรวจวัดค่าการยึดตัวของลวดเหล็กเสริมในสนามจริง เพื่อมาเปรียบเทียบค่าการยึดตัวจากการคำนวณ โดยใช้เนวการวางแผนจริง และค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดในสนามจริง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

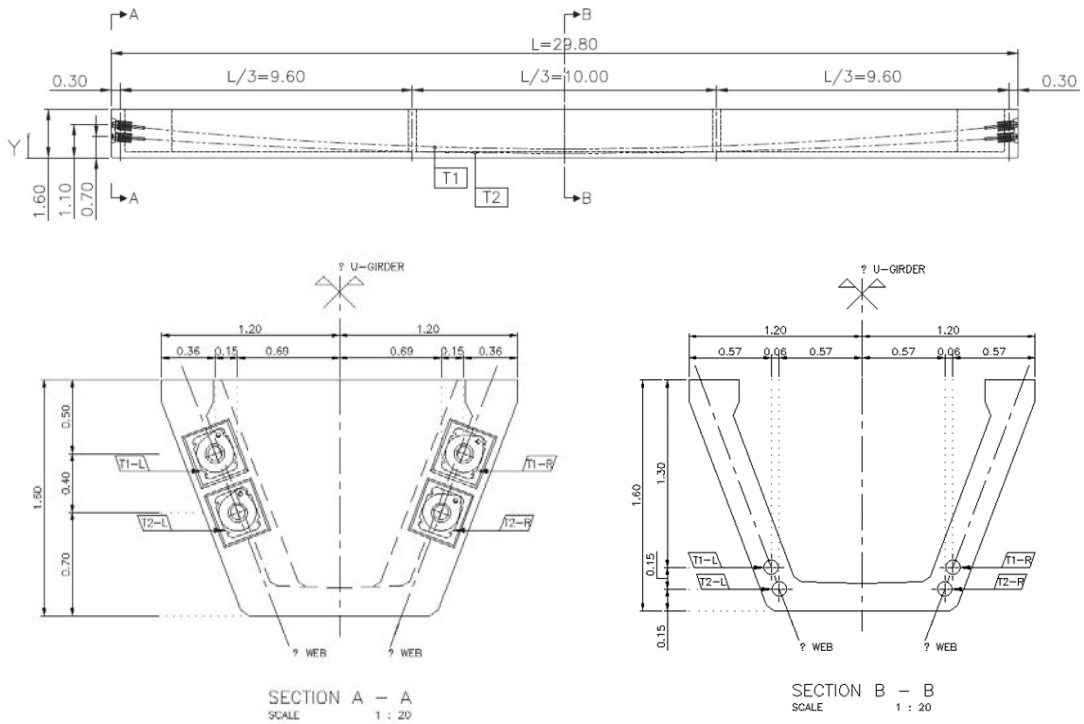
#### 4. วิธีดำเนินการวิจัย

##### 4.1 การคัดเลือกคานตัวอย่าง

คานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยู คัดมาจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวงจำนวน 5 ตัวอย่าง มีแนวการวางท่อน้อยลวดเหล็กและรูปตัดแสดงในรูปที่ 3 โดยมีรายละเอียด ดังนี้ ความยาวช่วงพาดของคาน 29.80 เมตร ท่อน้อยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ T1L และ T1R เป็นกลุ่มส่วนบนด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ T2L และ T2R เป็นกลุ่มส่วนล่างด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก 50 เมกะปาสกาล ลวดเหล็กอัดแรงใช้ชนิดลวดเกลียวคลายแรงดึงต่ำ 7 เส้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.2 มม. จำนวน 15 เส้นต่อกลุ่ม โดยมีหน่วยแรงดึงประลัยเท่ากับ 3,900 กิโลนิวตัน ต่อกลุ่มท่อน้อย โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 195,000 เมกะปาสกาล ท่อน้อยเป็นท่อโลหะเคลือบสังกะสี มีสัมประสิทธิ์ความโค้ง,  $\mu$  เท่ากับ 0.15/เรเดียน สัมประสิทธิ์ความคด,  $k$  เท่ากับ 0.0033/เมตร และแรงดึงแม่แรงของแต่ละกลุ่มท่อน้อยเท่ากับ 3,120 กิโลนิวตัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมในท่อน้อย

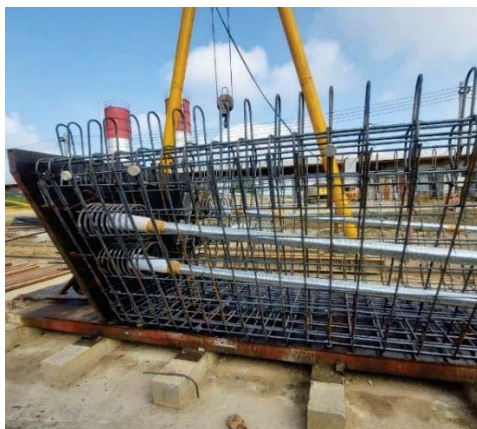
รายการ	คุณสมบัติ
รายการเหล็กเสริม	Low relaxation 7-wire strand
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวน	15 $\phi$ 15.2
- แรงดึงประลัย	3,900 kN/tondon
- โมดูลัสยืดหยุ่น	195,000 MPa
- สัมประสิทธิ์ความโค้ง, $\mu$ (/radian)	0.15
- สัมประสิทธิ์ความคด, $k$ (/m)	0.0033
- แรงดึงแม่แรง	3,120 kN/tondon



รูปที่ 3 แนวการวางลวดและหน้าตัด U-Girder

#### 4.2 การเก็บข้อมูล

ในการดำเนินงานวิจัย ได้ทำการเก็บข้อมูลของการวางแนวลวดเหล็กของคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยูในสนามจริง ซึ่งเป็นการดึงลวดเหล็กเสริมในท่อร้อยด้วยแม่แรงที่ปลายด้านเดียว และใช้ระบบการอัดฉีดน้ำปูนเข้าภายในท่อร้อยภายหลังการดึงลวด การเก็บข้อมูลแนวการวางลวดเหล็กใช้เทปวัดแบบตลับวัดระยะตำแหน่งในแนวตั้งของท่อร้อยแต่ละกลุ่มทุกระยะ 2.0 เมตรตลอดความยาวช่วงคาน 29.8 เมตร แสดงในรูปที่ 4(a) รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 20 กลุ่ม สำหรับการวัดค่าการยึดตัวของลวดเหล็กใช้การวัดด้วยเทปวัดที่เครื่องแม่แรงดึงลวด แสดงในรูปที่ 4(b) ข้อมูลค่าการยึดตัวของลวดเหล็กและค่าการขยับเลื่อนของสมอยึดที่ปลายคานแต่ละด้าน จะมีการบันทึกไว้ในรายงานการดึงลวดอัดแรง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ต่อไป



(a) แนวการวางท่อร้อยลวดเหล็กอัดแรงในสนาม



(b) การวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่แรง

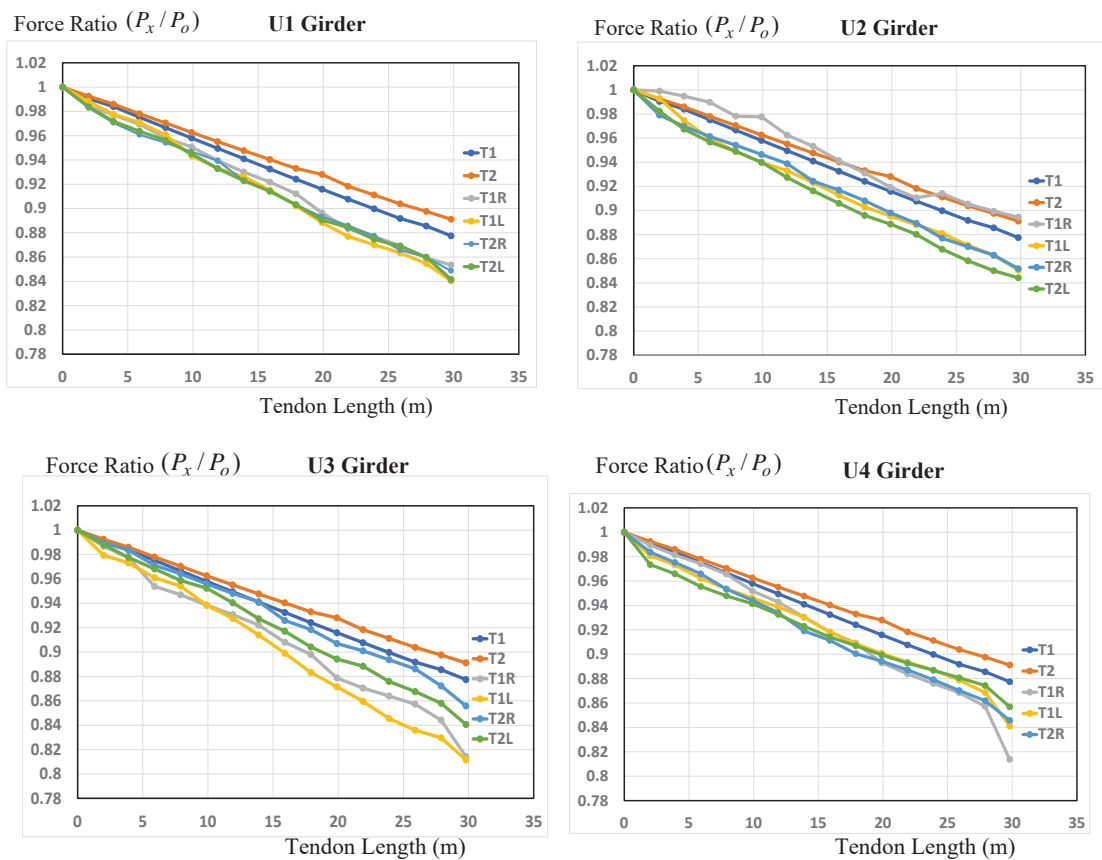
รูปที่ 4 แนวการวางท่อร้อยลวดเหล็กอัดแรงและการวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่แรงในสนาม

#### 4.3 การวิเคราะห์ค่าการเสื่อมลดแรงอัดและค่าการยึดตัวของลวดเหล็ก

จากการเก็บข้อมูลตำแหน่งแนวการวางลวดในแนวคั้งทุกระยะ 2.0 เมตรตลอดความยาวช่วงคาน 29.8 เมตร จึงได้ข้อมูลตำแหน่งลวดจำนวน 15 ชุดต่อกลุ่มท่อร้อย จำนวน 4 กลุ่ม คือ T1L, T1R, T2L และ T2R สำหรับคาน 5 ตัวอย่างคือ U1, U2, U3, U4 และ U5 รวมเป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด 300 ชุด นำไปใช้คำนวณหาค่าการเสื่อมลดแรงอัดของลวดเหล็กโดยใช้สมการที่ (1) และการคำนวณแรงอัดในเส้นลวดแสดงผลในรูปแบบอัตราส่วนแรงอัด (Force Ratio,  $P_x/P_o$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงอัด  $P_x$  ณ ตำแหน่ง  $x$  จากปลายคานด้านแม่แรง และค่าแรงอัดเริ่มต้นที่ด้านแม่แรง  $P_o$  ผลจากการคำนวณค่าอัตราส่วนแรงอัดนี้ นำไปใช้คำนวณค่าการยึดตัวของลวดเหล็กตลอดความยาวทั้งหมดโดยการอินทิเกรตด้วยสมการที่ (2) ตลอดความยาวช่วงคาน แสดงผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบ โดยใช้แนวการวางลวดที่แสดงในรูปแบบก่อสร้างมาคำนวณ และ (2) ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลแนวการวางลวดในสนามที่เก็บได้จริง เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างทั้งสองส่วนนี้ เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม (Site Tolerance)

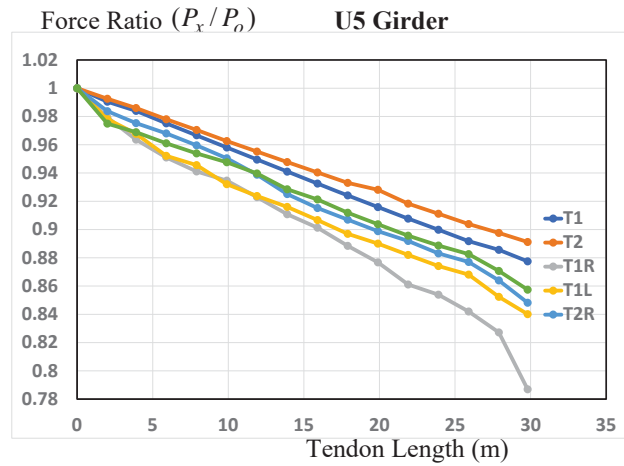
#### 5. ผลการวิจัย

อัตราส่วนแรงอัด ( $P_x/P_o$ ) ของคานรูปตัวยู (U1, U2, U3, U4, U5) แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ออกแบบ (T1, T2) และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง (T1R, T1L, T2R, T2L) แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราส่วนแรงอัดของการออกแบบและการวางแนวลวดจริง





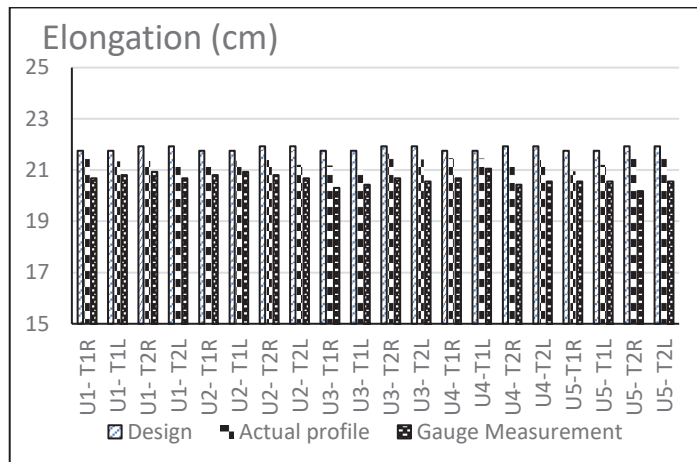
รูปที่ 5 (ต่อ) อัตราส่วนแรงอัดของการออกแบบและการวางแนวลวดจริง

ผลการคำนวณค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม แสดงในตารางที่ 2 สำหรับสดมภ์ที่ (1) เป็นชื่อกลุ่มท่อนร้อย (Tendon No.) สดมภ์ที่ (2) แสดงค่าการยืดตัวที่ออกแบบ (Design Elongations) สดมภ์ที่ (3) แสดงค่าการยืดตัวจากผลการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง (Actual Profile) สดมภ์ที่ (4) แสดงค่าการยืดตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม (Gauge Measurement) สดมภ์ที่ (5) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริงและการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม (Actual Profile and Gauge Measurement) สดมภ์ที่ (6) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม (Site Tolerance) และสดมภ์ที่ (7) แสดงผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Total Deviation) นอกจากนี้ ค่าการยืดตัวในสดมภ์ที่ (2), (3), (4) และ ค่าความคลาดเคลื่อนในสดมภ์ที่ (5), (6), (7) แสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

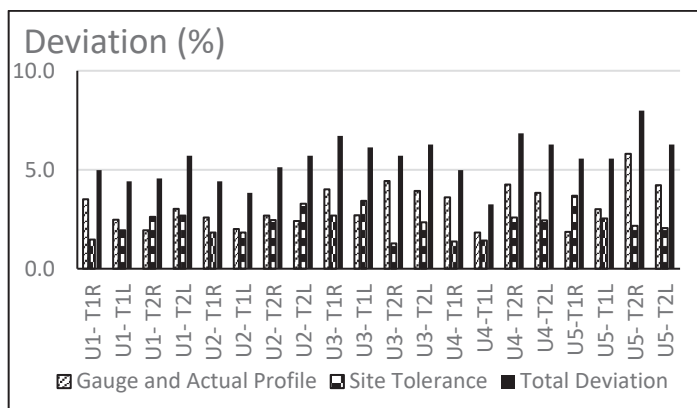
ตารางที่ 2 ค่าการยืดตัว เปรียบเทียบระหว่าง ค่าการออกแบบ ค่าวิเคราะห์จากสนามและค่าการตรวจวัดจริง

(1) กลุ่มท่อ ร้อย	(2) ค่าการยืดตัวที่ ออกแบบ (cm)	(3) ผลการ วิเคราะห์แนว การวางลวดจริง (cm)	(4) ผลการวัด ด้วยเครื่องมือ ตรวจวัดใน สนาม (cm)	(5) ความคลาด เคลื่อน (Actual Profile and Gauge) (%)	(6) ความคลาด เคลื่อนในสนาม (Site Tolerance) (%)	(7) ความคลาด เคลื่อนทั้งหมด (%)
T1	21.759	-	-	-	-	-
T2	21.925	-	-	-	-	-
U1- T1R	21.759	21.440	20.675	3.516	1.466	4.982
U1- T1L	21.759	21.338	20.800	2.473	1.935	4.407
U1- T2R	21.925	21.351	20.925	1.943	2.618	4.561
U1- T2L	21.925	21.338	20.675	3.024	2.677	5.701
U2- T1R	21.759	21.362	20.800	2.583	1.825	4.407
U2- T1L	21.759	21.361	20.925	2.004	1.829	3.833
U2- T2R	21.925	21.387	20.800	2.677	2.454	5.131
U2- T2L	21.925	21.204	20.675	2.413	3.288	5.701
U3- T1R	21.759	21.174	20.300	4.017	2.689	6.705
U3- T1L	21.759	21.013	20.425	2.702	3.428	6.131
U3- T2R	21.925	21.645	20.675	4.424	1.277	5.701
U3- T2L	21.925	21.412	20.550	3.932	2.340	6.271
U4- T1R	21.759	21.461	20.675	3.612	1.370	4.982
U4- T1L	21.759	21.449	21.050	1.834	1.425	3.258
U4- T2R	21.925	21.357	20.425	4.251	2.591	6.842
U4- T2L	21.925	21.390	20.550	3.831	2.440	6.271
U5- T1R	21.759	20.955	20.550	1.861	3.695	5.556
U5- T1L	21.759	21.205	20.550	3.010	2.546	5.556
U5- T2R	21.925	21.449	20.175	5.811	2.171	7.982
U5- T2L	21.925	21.476	20.550	4.223	2.048	6.271
Average	21.842	21.338	20.638	3.207	2.306	5.513





รูปที่ 6 ค่าการยืดตัวที่ออกแบบ การวางลวดจริงและการตรวจวัด



รูปที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวที่ออกแบบ การวางลวดจริงและการตรวจวัด

## 6. อภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแรงอัดแสดงว่า แรงอัดในเส้นลวดลดลงอย่างต่อเนื่องตามความยาวคาน จากด้านแม่แรงไปอีกปลายด้านหนึ่งเนื่องจากแรงเสียดทานเนื่องจากความโค้งและความคดของเส้นลวดตลอดความยาวคาน โดยส่วนใหญ่ ค่าแรงอัดในเส้นลวดของแนวการวางลวดจริง (T1R, T1L, T2R และ T2L) มีค่าต่ำกว่าค่าการออกแบบ เนื่องจากการวางแนวลวดจริงมีความโค้งที่มากกว่าการออกแบบ ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ทำให้การยืดตัวของลวดมีค่าลดต่ำกว่าการออกแบบ ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 2 ยังพบว่า ค่าการยืดตัวจากการตรวจวัดจริงด้วยเครื่องมือในสนาม มีค่าต่ำกว่าการยืดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง อีกด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงในคอลัมน์ที่ (5) ระหว่างการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริงและการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 1.86 – 5.81% ด้วยค่าเฉลี่ย 3.21% ค่าความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามที่แสดงในคอลัมน์ที่ (6) มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 1.28 – 3.69% ด้วยค่าเฉลี่ย 2.31% ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดในคอลัมน์ที่ (7) มีค่าอยู่ในช่วง 3.26 – 7.98% ด้วยค่าเฉลี่ย 5.51%

ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด เกินกว่าค่าที่ยอมรับให้คือ 5.0% สำหรับความยาวช่วงคานมากกว่า 15.0 m ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO (2014) ซึ่งประกอบด้วย U1- T2L, U2- T2R, U2- T2L, U3- T1R, U3-T1L, U3-T2R, U3-T2L, U4-T2R, U4-T2L, U5-T1R, U5-T1L, U5-T2R และ U5-T2L มีค่าความคลาดเคลื่อน

ทั้งหมด 5.70%, 5.13%, 5.70%, 6.70%, 6.13%, 5.70%, 6.27%, 6.84%, 6.27%, 5.55%, 5.55%, 7.98%, 6.27% ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามที่มีส่วนแบ่งสำคัญถึง 42% ของค่าทั้งหมด ดังนั้นการวางแผนงวดในสนามมีบทบาทที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าการยึดตัวของเหล็กเสริม

จากกราฟแท่งในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า การยึดตัวของเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ การยึดตัวที่คำนวณจากแนวการวางลวดจริงในสนาม และการยึดตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม มีค่าต่ำที่สุด จากกราฟค่าความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ผลของความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดเกินกว่าค่าที่ยอมรับให้ 5.0%

## 7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาค่าการสูญเสียแรงอัดและการยึดตัวของเส้นลวดอัดแรงสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยูจำนวน 5 ตัวอย่าง จึงสรุปผลได้ดังนี้

ก) แรงอัดในเส้นลวดลดลงอย่างต่อเนื่องตามความยาวคานเนื่องจากแรงเสียดทานเนื่องจากความโค้งและความคดของเส้นลวดตลอดความยาวคาน โดยส่วนใหญ่ ค่าแรงอัดในเส้นลวดของแนวการวางลวดจริงมีค่าต่ำกว่าค่าการออกแบบ เนื่องจากการวางแนวลวดจริงมีความโค้งที่มากกว่าการออกแบบ ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ทำให้การยึดตัวของลวดมีค่าต่ำกว่าการออกแบบ

ข) ค่าการวัดการยึดตัวของลวดเหล็กด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนามมีค่าที่ต่ำกว่าผลการวิเคราะห์จากแนวการวางลวดจริง ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.21% และค่าความแตกต่างระหว่างการยึดตัวที่ออกแบบและผลการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.31% อันเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม

ค) ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด ซึ่งรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองส่วนข้างต้น คิดเป็น 5.51% ทำให้เกินกว่า ข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบสะพาน 5.0% เนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามมีส่วนสำคัญถึง 42% ของทั้งหมด ดังนั้นการวางแผนงวดในสนามมีบทบาทที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าการยึดตัวของเหล็กเสริม

ง) ข้อเสนอแนะเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวทั้งหมด จึงควรจัดการวางแผนตำแหน่งลวดเหล็กเสริมในสนามให้ถูกต้องตรงกับที่กำหนดในแบบก่อสร้างให้มากที่สุด จากการตรวจสอบแนวการวางลวดที่เก็บข้อมูลในสนาม พบว่า ส่วนใหญ่เกิดจากการวางตำแหน่งแนวลวดในแนวตั้งต่ำกว่าค่าระดับที่กำหนดในแบบก่อสร้าง ทำให้แนวลวดมีรัศมีความโค้งมากกว่าที่กำหนด ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานในเส้นลวดมากและทำให้ค่าแรงดึงในเส้นลวดลดลง และค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมลดลงด้วย ดังนั้น หากตรวจพบว่าตำแหน่งการวางลวดต่ำกว่าที่กำหนดในแบบ จะต้องปรับแก้ไขโดยการปรับยกระดับแนวเส้นลวดให้สูงขึ้น นอกจากนี้ ควรมีการควบคุมการเทคอนกรีตและการใช้เครื่องจักรเข้าคอนกรีตในขณะที่ก่อสร้างไม่ให้กระทบกับเส้นลวดที่จะส่งผลให้เกิดการขยับเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่วางไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคานรับสะพานที่มีช่วงพาดยาว ซึ่งมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณข้อมูลอันมีค่าซึ่งได้รับความเอื้อเฟื้อจากวิศวกร โครงการปรับปรุงทางแยกต่างระดับบางขุนเทียน-เอกชัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

## 9. เอกสารอ้างอิง

- AASHTO (1989, 2011), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI-ASCE Committee 343 (1995), Analysis & Design of Reinforced Concrete Bridge Structures, American Concrete Institute.
- ACI Committee 318 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-14) and Commentary (ACI318R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI (2016), Guide to Estimating Prestress Losses, (ACI 423.10R-16) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Bondy, K.B., (2012), Short tendon elongations, PTI Technical Note 16, Post-Tensioning Manual, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI.
- Caltrans (2004), Bridge Design Specifications, Sacramento, CA: California Department of Transportation.
- Choi, J., Woods, C.R., Hrynyk, T.D., Bayrak, O. (2018) Measuring friction losses of large-angle post-tensioned concrete walls, PCI Convention & National Bridge Conference - Precast/Prestressed Concrete Institute, Colorado Convention Center, Denver, Colorado, Feb 20 - 24.
- CEB-FIP (2010). FIP Model Code for Concrete Structures 2010, Comité Euro-International du Béton, 2013.
- Eurocode (2009) Execution of concrete structures, EN 13670:2009 CEN.
- Hayek, C. and Kang, T.H.K. (2017) Elongation tolerance for short tendons in post-tensioned building structures, *ACI Structural Journal*, 114(4), pp. 795-802.