วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ผลกระทบการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงในพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้รูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงต่างกัน: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่

Effects of Friction Loss Due to Elongation of Prestressing Strands in Prestressed Concrete Slabs with Different Stand Arrangements: A Case Study of a Large Building Construction Project

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา[1]*, ภาคภูมิ วานิชกมลนันท์[2], กฤษณะ แสงทอง[3], สุนิสา รอดสังวาลย์[4], ประเทือง พละศักดิ์[5] มีฤกษ์ พัสระ[6] และ สุทธิชัย ศรีรัตนวงศ์[7]

Supichart Jenjirapanya[1]*, Parkpoome Vanitkamonnunt[2], Krissana Sangthong[3], Sunisa Rodsungwal[4], Pratueng Palasak[5], Meeterk Passara[6] and Suttichai Srirattanawong[7]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและบริหารงานก่อสร้าง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

[1] Department of Civil Engineering and Construction Management, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

[2] บริษัท เอสเอ็นพี โพส เท็นชั่น จำกัด

[2] SNP Post Tension Company Limited

[3] บริษัท ไทยโทดะ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

[3] Thai Toda Company Limited

[4] บริษัท สแปน จำกัด

[4] SPAN Company Limited

[5] บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)

[5] TPI Polene Public Company Limited

[6] บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด (มหาชน)

[6] TEAM Consulting Engineering and Management Public Company Limited

[7] บริษัท อนันดา ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน)

[7] Ananda Development Public Company Limited

บทคัดย่อ

การสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงเป็นปัญหาสำคัญในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรง โดยเฉพาะในอาคารขนาดใหญ่หรืออาคารสูงที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงทีหลัง การสูญเสียแรงเสียดทานอาจเกิดจากรูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารในระยะยาว การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงที่มีการจัดวางลวดในรูปแบบที่แตกต่างกัน ทำการเปรียบเทียบค่าผลต่างทางทฤษฎีที่คำนวณได้กับค่าที่อ่านได้จริงจากหน้างานและเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐาน ACI 318-19 กำหนดไว้สำหรับงานอาคาร โดยเลือกโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงทีหลัง ที่มีการวางแนวลวดอัดแรงในรูปแบบต่างกันจำนวน 17 รูปแบบ แต่ละรูปแบบของการวางแนวลวดอัดแรงจะคำนวณสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงตามมาตฐาน ACI 423.10R-16 ทำการเปรียบเทียบการสูญเสียแรงเสียดทานและการยืดตัวของลวดอัดแรงจากค่าที่คำนวนทางทฤษฎีกับค่าที่อ่านได้จริงหน้างาน ผลการวิจัยพบว่าการวางแนวลวดอัดแรงที่มีการเบี่ยงเบนในแนวราบส่งผลให้เกิดการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงสูงกว่ารูปแบบที่ไม่มีการเบี่ยงเบน การวางแนวลวดอัดแรงที่มีความยาวมากกว่าจะมีค่าการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงสูงกว่าแนวลวดอัดแรงที่มีความยาวสั้นกว่า และ

** Corresponding author: supichart.j@gmail.com*

***Received**: 5 กันยายน 2567* ***Revised: 1**7 พฤศจิกายน 2567* ***Accepted**: 23 ธันวาคม 2567*

ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่มีรูปแบบการวางแนวต่างกันพบว่าผลต่างระหว่างค่าที่อ่านได้จริงและค่าทางทฤษฎีมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ACI 318-19 ดังนั้นรูปแบบการวางลวดอัดแรงที่เหมาะสมช่วยลดการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรง เพื่อให้โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงมีประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาวได้

สำคัญ: พื้นคอนกรีตอัดแรงดึงทีหลัง การสูญเสียแรงเสียดทาน ลวดอัดแรง การยืดตัว

Abstract

Friction losses due to prestressing strand elongation are a significant concern in prestressed concrete flooring systems, especially in large-scale or high-rise buildings that utilize post-tensioned concrete systems. The losses of friction may result from different arrangements of prestressing strands, therefore affecting the long-term performance and safety of building structures. This research study aims to examine the impact of friction losses caused by elongations of prestressing strands arranged in different arrangements. Compare the different values between calculated theoretical values with actual reading values at the project site, and compare these different values with the values noted in the ACI 318–19 requirements for building work by selecting a large building construction project that utilizes post-tensioned concrete flooring systems, with 17 different alignments of prestressing strands. Each alignment of prestressing tendons will calculate friction losses due to the elongation of prestressing strands, following the guidelines of the ACI 423.10R-16 standard. Compare friction losses and prestressing strand elongations from values calculated theoretically and actual reading values measured on-site. The research findings demonstrate that arrangements of prestressing strands with horizontal deviations result in losses of friction due to the elongation of the prestressing strands, which are greater than in strand arrangements without deviations. The arrangements of long prestressing strands will have higher friction losses due to the elongations of the prestressing strands compared to arrangements with shorter prestressing strands. The elongation values of prestressing strands in different strand layouts indicate that differences between actual readings and theoretical values are lower than values specified in ACI 318-19 standard. Consequently, the proper configuration of prestressing strands will reduce friction losses resulting from the elongation of prestressing strands for prestressed concrete floor structures to be effective for long-term performance.

Keywords: post-tensioned concrete slabs, friction losses, prestressing strands, elongation

1. บทนำ

ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงเป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างที่ได้รับความนิยมมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ (Charalambous, A., et al., 2002) ในการก่อสร้างอาคารจะเป็นระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงทีหลัง (post-tensioned building structures) โดยเฉพาะงานอาคารขนาดใหญ่พิเศษหรืออาคารสูงทั่วไป เนื่องจากการก่อสร้างระบบนี้มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงมีการถ่ายแรงดึงของลวดอัดแรงหลังจากพื้นคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งส่วนมากจะเกิดการสูญเสียแรงเสียดทานตามแนวโค้งโปรไฟล์ในแนวตั้งและแนวราบของลวดอัดแรง การประเมินการสูญเสียแรงเสียดทานในลวดเหล็กอัดแรงสามารถทำได้โดยการวัดการยืดตัวของลวดอัดแรง การสูญเสียแรงเสียดทานตามแนวลวดอัดแรงสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรอย่างง่ายในทางปฏิบัติที่แนะนำโดยมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) โดยใช้ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ถูกวัดเพื่อคำนวณแรงที่เกิดในลวดอัดแรง เพื่อให้มั่นใจว่าแรงที่คำนวณและออกแบบได้ถูกต้อง การยืดตัวของลวดอัดแรงที่วัดได้ที่จริงในงานก่อสร้างต้องใกล้เคียงกับการยืดตัวที่คำนวณได้จากการการคำนวณและออกแบบตามทฤษฎี โดยตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) ระบุให้มีค่าแตกต่างได้ไม่เกินร้อยละ 7 สำหรับระบบคอนกรีตอัดแรงดึงที่หลัง (post-tensioned construction)

การศึกษาและวิจัยที่ผ่านมา พบว่ารูปแบบของการวางลวดอัดแรงที่แตกต่างกันมีผลต่อการสูญเสียแรงเสียดทานในลวดอัดแรง (Eurviriyanukul & Askes, 2011) การจัดวางลวดอัดแรงก็มีผลต่อการกระจายแรงในโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงทีหลังและการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรง (Schokker, et al., 2002 ละ Török, et al., 2018) Hayek และ Kang (2017) ศึกษาค่าการคลาดเคลื่อนของการยืดตัวของเส้นลวดอัดแรงแบบ single stand และลวดอัดแรงแบบ tendons ในอาคารระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงทีหลัง ผลที่ได้ค่าความคลาดเคลื่อนการยืดตัวของ single stand ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว มีค่าแตกต่างกันมากกว่าร้อยละ 7 เมื่อเปรียบเทียบค่าวัดการยืดของลวดอัดแรงจริงกับค่าที่ได้จาการคำนวณ Yuan, et al. (2020) ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดสอบภาคสนาม เพื่อประเมินค่าการสูญเสียแรงเสียดทานและการยืดตัวของลวดอัดแรง สรุปได้ว่าปัจจัยดังกล่าวสำคัญและมีผลต่อการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง และมีการศึกษาประเมินการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงและการยืดตัวของลวดอัดแรงสูงในระบบพื้นไร้คาน (Panyakapo. 2023) ผลของค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่คำนวนและวัดได้จริงในหน้างานก่อสร้างมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนแนววางลวดอัดแรงที่ต่างจากแบบก่อสร้างจริง การวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการศึกษาผลกระทบการสูญเสียแรงเสียดทาน เนื่องจากการวิจัยศึกษาเรื่องนี้ในประเทศไทยยังไม่ปรากฏว่ามีข้อมูลการวิจัยด้านนี้หรือยังมีการวิจัยด้านนี้ไม่เพียงพอหรือครอบคลุมมากพอ ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเลือกการศึกษาผลกระทบการสูญเสียแรงเสียดทานกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ที่ใช้รูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงต่างกัน เช่น รูปแบบการวางเส้นลวดอัดแรง ความยาวลวดอัดแรง ตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์ของลวดอัดแรง และการตรวจสอบการยืดตัวของลวดอัดแรงจากค่าดึงจริงเปรียบเทียบกับค่าการยืดตัวที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) จะช่วยให้เข้าใจผลที่เกิดขึ้นและสามารถนำไปเป็นแนวทางปฏิบัติในการก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบดึงทีหลังให้มีประสิทธิภาพหรือเหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในระยะยาวได้

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงที่มีรูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงต่างกัน โดยเปรียบเทียบค่าที่คำนวนทางทฤษฎีกับค่าที่อ่านได้จริงหน้างาน

2.2 เพื่อศึกษาค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่มีรูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงต่างกันต่อค่าผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและค่าที่ได้จากการอ่านจริงจากหน้างาน โดยเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐาน ACI 318-19 (2019) กำหนดไว้สำหรับงานอาคาร

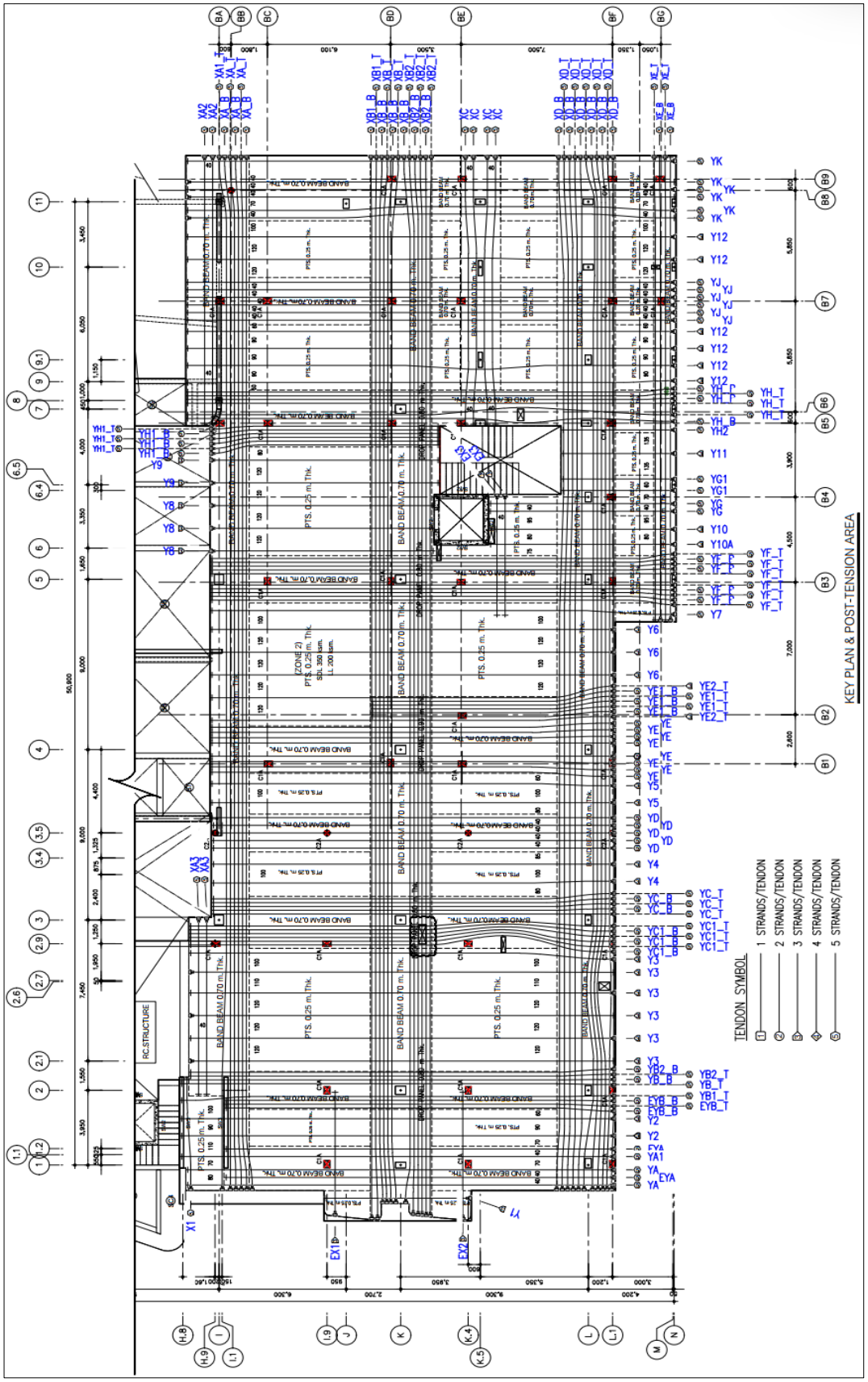
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเลือกรูปแบบการวางเส้นลวดอัดแรงและคุณสมบัติของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา

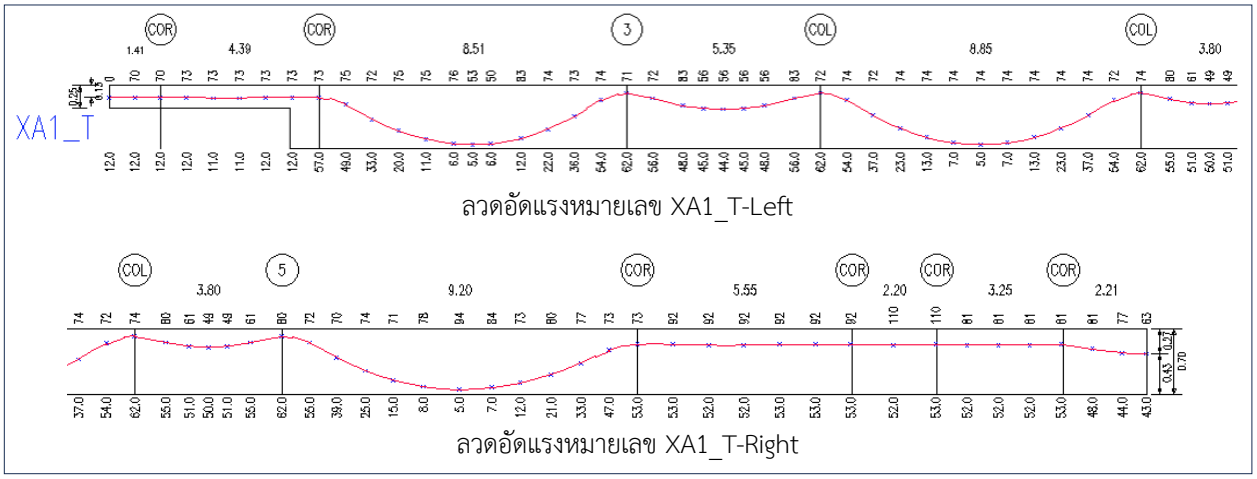
งานวิจัยนี้จะศึกษาโดยใช้กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่แห่งหนึ่งที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงทีหลัง (post-tension concrete slabs) โดยมีแบบแปลนการจัดวางรูปแบบลวดอัดแรงต่างๆ ซึ่งแนว band beam ในโครงการนี้จะมีทั้งในแนวแกน X และแกน Y ดังภาพที่ 1 จากแบบแปลนนี้เลือกรูปแบบการวางเส้นลวดอัดแรงภาคตัด ตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรง จำนวนต่างกัน 17 รูปแบบ มีรายละเอียดแต่ละรูปแบบดังภาพที่ 2-18 เพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบและคำนวณการสูญเสียแรงเสียดทานที่เกิดจากการยืดตัวของลวดอัดแรงในพื้นคอนกรีตอัดแรง ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา โดยลวดเหล็กอัดแรงใช้ชนิด ASTM416 Grade 270 ลวดเกลียวคลายแรงดึงต่ำ 7 เส้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มม. มีกำลังรับแรงดึงประลัยเท่ากับ 1,860 เมกกะปาสกาล โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 195,000 เมกกะปาสกาล ท่อร้อยเป็นท่อโลหะเคลือบสังกะสี มีสัมประสิทธิ์แรงเสียด, μ เท่ากับ 0.20/เรเดียน สัมประสิทธิ์ความคดโค้ง, k เท่ากับ 0.0035/ม. ส่วนกำลังอัดคอนกรีตประลัยที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอกเท่ากับ 31.45 เมกกะปาสกาล หรือ 320 กก./ซม.^{2} สำหรับรายละเอียดของแต่ละรูปแบบการวางลวดอัดแรง 17 รูปแบบ มีรายละเอียดดังตารางที่ 2 ซึ่งระบุการกำหนดสัญลักษณ์กำกับแนวลวดอัดแรง ความยาวของลวดอัดแรง และตำแหน่งสมออยู่เหนือหรือต่ำกว่าจุดศูนย์กลางหน้าตัดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ตามมาตรฐาน ASTM416 Grade 270

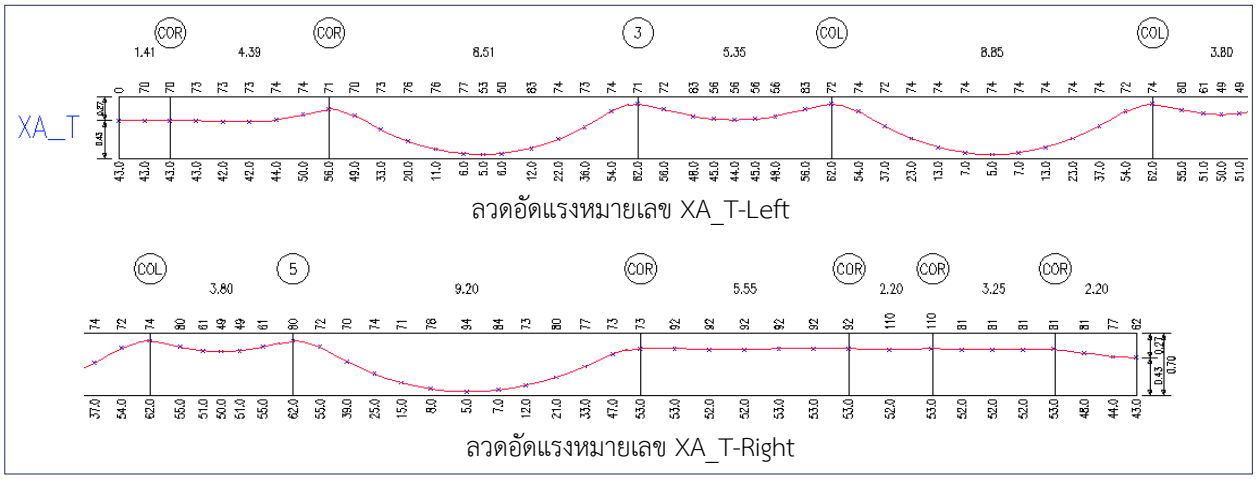
รายการ	คุณสมบัติ
ระบบอัดแรงในพื้นคอนกรีตอัดแรง	Bonded
ชนิดของ PC strand	Low relaxation 7- wire strand
โมดูลัสยืดหยุ่น, เมกกะปาสกาล	195,000
เส้นผ่านศูนย์กลางลวดอัดแรง, มม.^{2}	12.70
กำลังแรงดึงที่จุดคลาก, เมกกะปาสกาล	1,675
กำลังรับแรงดึงประลัย, เมกกะปาสกาล	1,860
สัมประสิทธิ์ความคดโค้ง, k (/ม.)	0.0035
สัมประสิทธิ์แรงเสียดของท่อร้อยเป็นท่อโลหะเคลือบสังกะสี, μ (/เรเดียน)	0.20



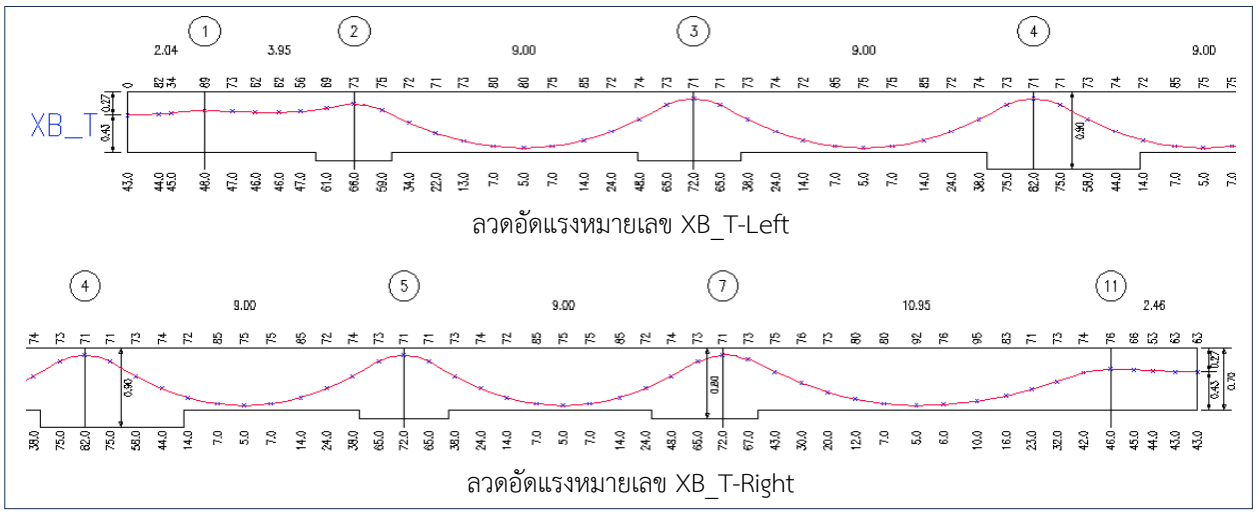
ภาพที่ 1 แปลนการจัดวางรูปแบบลวดอัดแรงของโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่



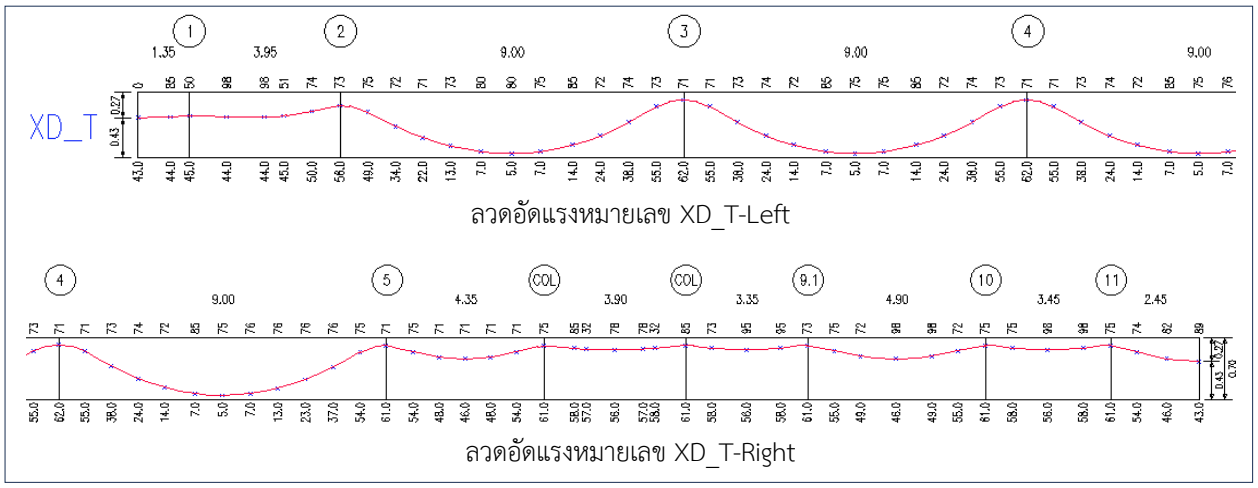
ภาพที่ 2 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XA1_T



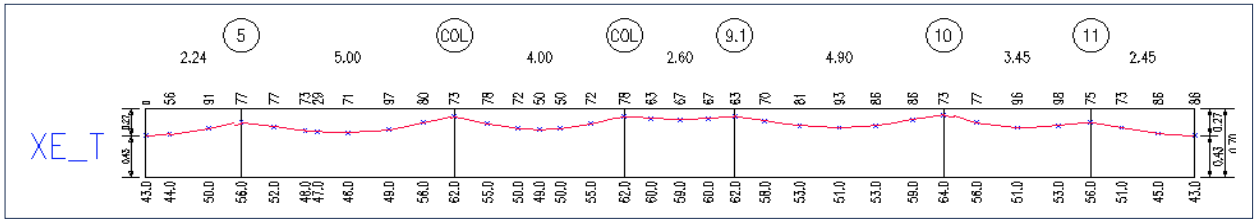
ภาพที่ 3 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XA_T



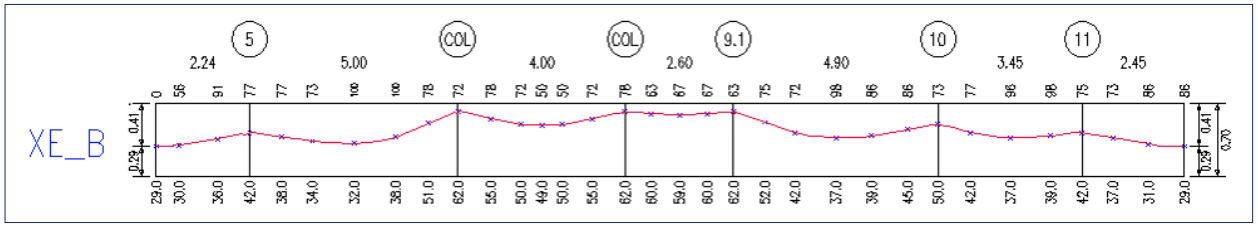
ภาพที่ 4 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XB_T



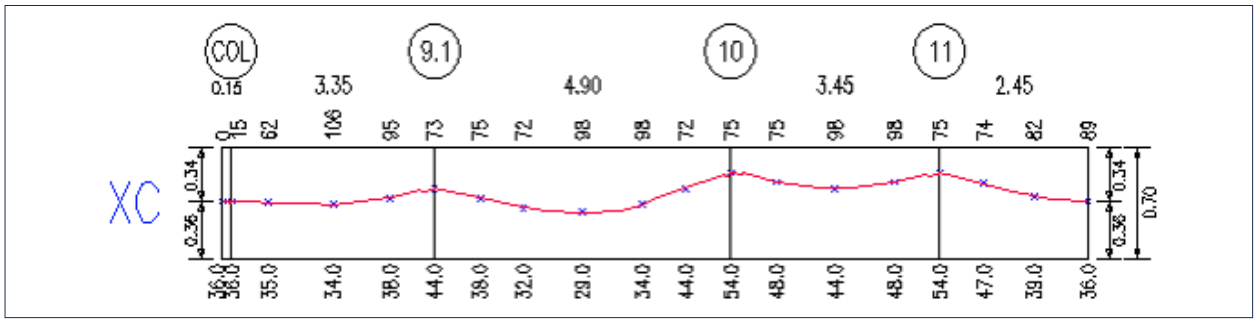
ภาพที่ 5 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XD_T



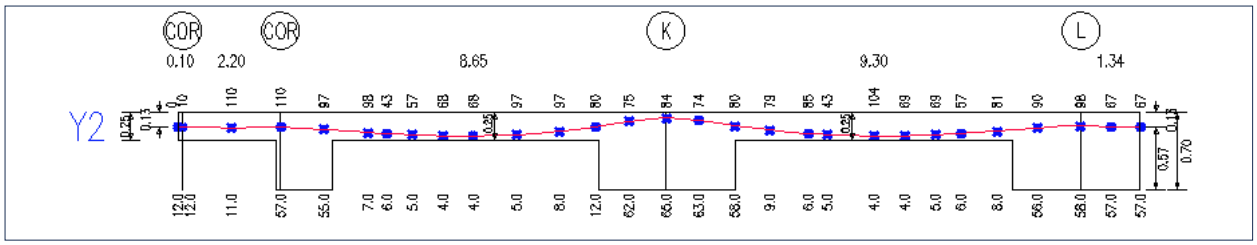
ภาพที่ 6 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XE_T



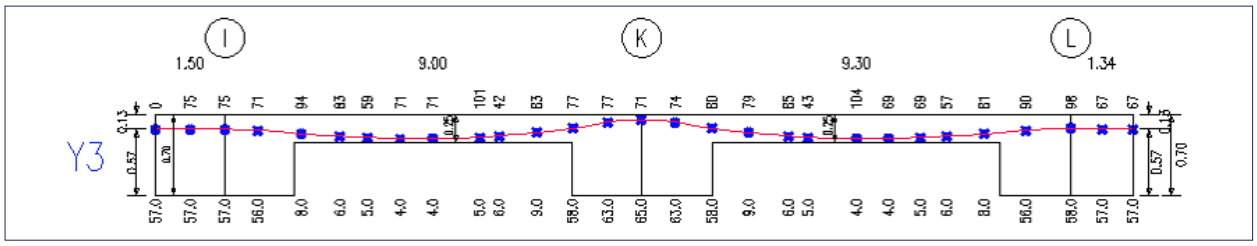
ภาพที่ 7 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XE_B



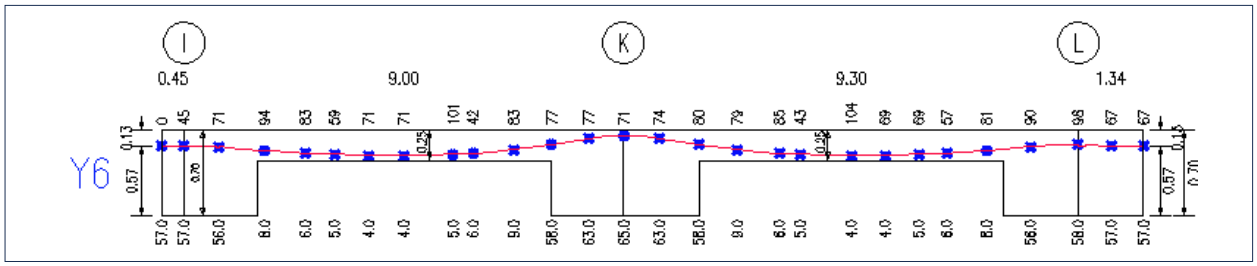
ภาพที่ 8 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XC



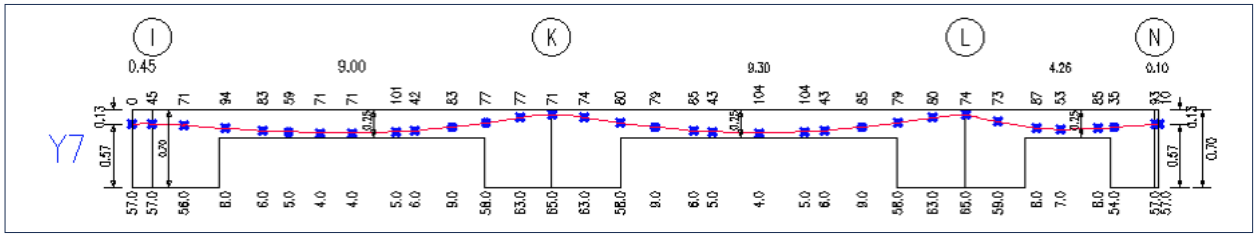
ภาพที่ 9 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข Y2



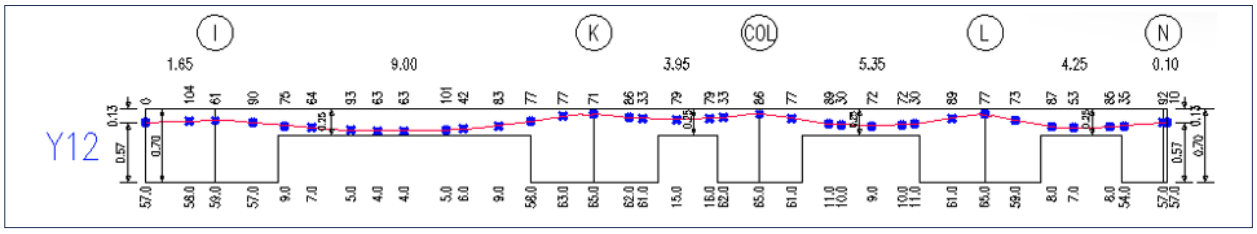
ภาพที่ 10 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข Y3



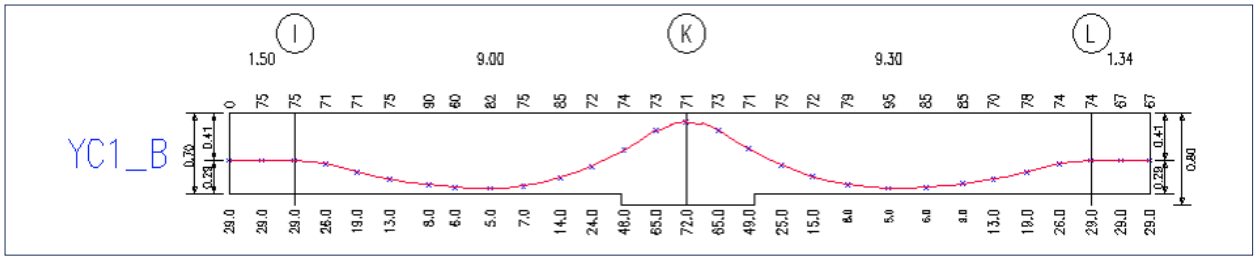
ภาพที่ 11 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข Y6



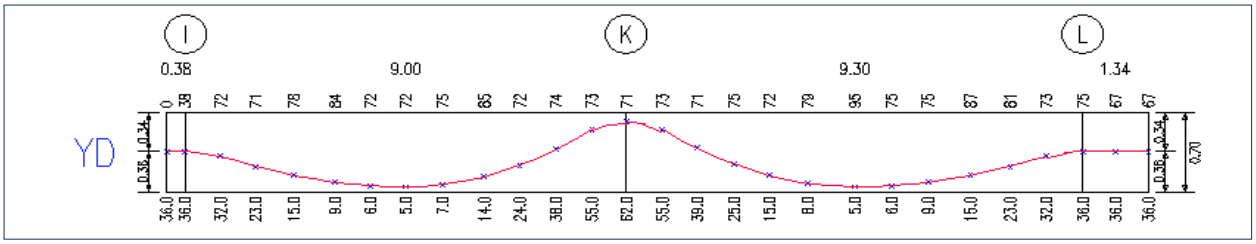
ภาพที่ 12 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข Y7



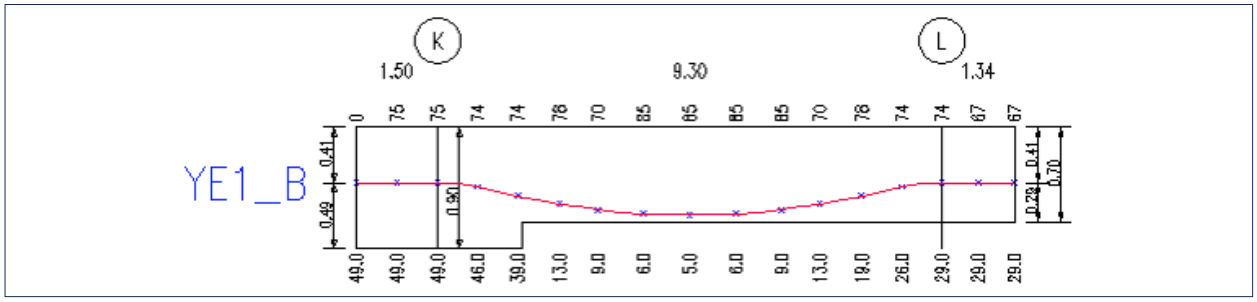
ภาพที่ 13 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข Y12



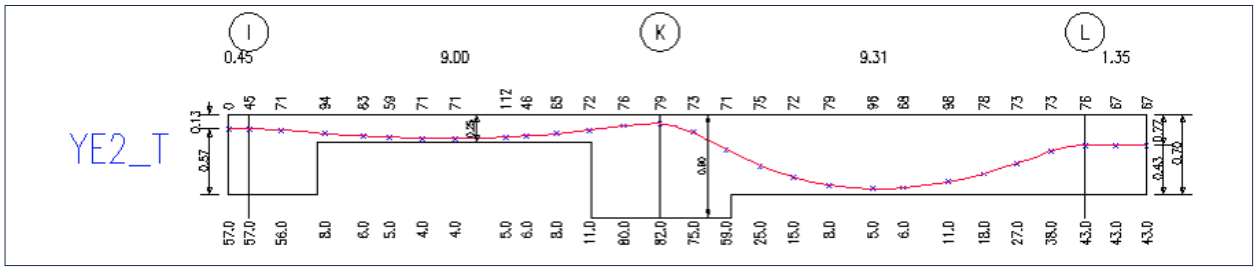
ภาพที่ 14 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YC1_B



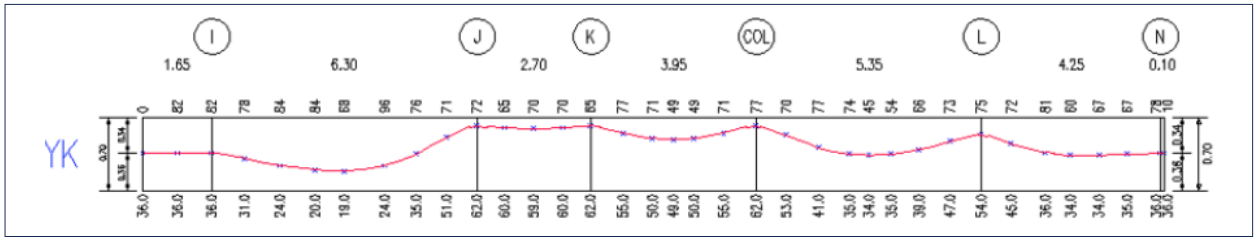
ภาพที่ 15 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YD



ภาพที่ 16 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YE1_B



ภาพที่ 17 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YE2_T



ภาพที่ 18 รูปแบบภาคตัดของการวางตำแหน่งระดับแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YK

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์กำกับแนวลวดอัดแรง ความยาวของลวดอัดแรง และตำแหน่งสมออยู่เหนือหรือต่ำกว่าจุดศูนย์กลางหน้าตัด

รูปแบบการวางลวดอัดแรงที่	สัญลักษณ์กำกับแนวลวดอัดแรง	ความยาวลวดอัดแรง (ม.)	ตำแหน่งสมออยู่เหนือหรือต่ำกว่าจุดศูนย์กลางหน้าตัด (มม.)
1	XA1_T	55.95	บน
2	XA_T	55.90	บน
3	XB_T	56.75	บน
4	XD_T	56.05	บน
5	XE_T	25.15	บน
6	XE_B	25.15	ล่าง
7	XC	14.80	-
8	Y2	22.05	-
9	Y3	21.60	-
10	Y6	20.55	-
11	Y7	23.60	-
12	Y12	24.80	-.
13	YC1_B	21.75	ล่าง
14	YD	20.60	-
15	YE1_B	12.65	ล่าง
16	YE2_T	20.70	บน
17	YK	24.85	-

3.2 การคำนวณสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรง

การสูญเสียแรงเสียดทานในลวดอัดแรงเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับท่อร้อยลวดอัดแรงตาม ACI 423.10R-16 (2016) ดังสมการที่ 1 โดยค่า P_x เป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงที่ระยะ x จากปลายสมอ (Anchorage) P_j เป็นแรงดึงที่ดึงลวดอัดแรงด้วย hydraulic Jack, k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความคดโค้ง หย่อนของเส้นลวดอัดแรง μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อร้อยลวดอัดแรงกับลวดอัดแรง และ α คือผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของมุมของลวดอัดแรงจากปลายสมอยึดจนถึงตำแหน่งที่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งในงานศึกษาวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ADAPT-PT ในการคำนวณและวิเคราะห์

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

การยืดตัวของลวดอัดแรงสามารถคำนวณได้ตาม ACI 423.10R-16 (2016) ดังสมการที่ 2 ซึ่งค่า P_x คือแรงดึงลวดอัดแรงที่ระยะห่าง x จากจุดที่ปลายดึงแรง L คือความยาวลวดอัดแรง Aps คือพื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรง Eps คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของลวดอัดแรงมีค่าประมาณ 195,000 MPa และ ΔA คือค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอที่ปลายดึงแรงซึ่งสามารถวัดค่าได้จากการวัดโดยตรงที่ปลายดึงแรง ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งผลของการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอที่ปลายดึงแรงมีผลต่อค่าการสูญเสียแรงเสียดทานในลวดอัดแรงด้วย Bondy, K.B. (2012)

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

ตารางที่ 3 ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอและการยืดตัวของลวดอัดแรงตามรูปแบบการวางลวดอัดแรงที่คำนวณได้จากทฤษฎีด้วย ADAPT-PT ที่ในการศึกษา

รูปแบบการวางลวดอัดแรงที่	สัญลักษณ์กำกับแนวลวดอัดแรง	ความยาวลวดอัดแรง (strands) (ม.)	ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอ (มม.)	วิธีการดึงลวดอัดแรง
1	XA1_T	55.95	4	แบบดึงสองด้าน
2	XA_T	255.9	4	แบบดึงสองด้าน
3	XB_T	56.75	4	แบบดึงสองด้าน
4	XD_T	56.05	4	แบบดึงสองด้าน
5	XE_T	25.15	2	แบบดึงด้านเดียว
6	XE_B	25.15	2	แบบดึงด้านเดียว
7	XC	14.80	2	แบบดึงด้านเดียว
8	Y2	22.05	2	แบบดึงด้านเดียว
9	Y3	21.60	2	แบบดึงด้านเดียว
10	Y6	20.55	2	แบบดึงด้านเดียว
11	Y7	23.60	2	แบบดึงด้านเดียว
12	Y12	24.80	2	แบบดึงด้านเดียว
13	YC1_B	21.75	2	แบบดึงด้านเดียว
14	YD	20.60	2	แบบดึงด้านเดียว
15	YE1_B	12.65	2	แบบดึงด้านเดียว
16	YE2_T	20.70	2	แบบดึงด้านเดียว
17	YK	24.85	2	แบบดึงด้านเดียว

ในทางปฏิบัติการดึงลวดอัดแรงมีสองลักษณะดังนี้ กรณีความยาวลวดอัดแรงมีความยาวไม่เกิน 35 ม. จะใช้วิธีดึงลวดอัดแรงที่ปลายด้านเดียว ส่วนกรณีลวดอัดแรงมีความยาวมากกว่า 35 ม. ใช้วิธีดึงลวดอัดแรงที่ปลายทั้งสองด้าน โดยทั่วไปค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงจะอ่านค่าจากการดึงด้วยแรงที่ร้อยละ 75 ของค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของลวดอัดแรง กรณีที่ค่าการยืดไม่เป็นไปตามค่าการยืดที่คำนวณได้จากทฤษฎี จะทำการดึงอีกครั้งที่ร้อยละ 80 ของค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของลวดอัดแรงเพื่อให้ได้ค่าตามที่คำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) สำหรับการออกแบบอาคารยอมให้มีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงตามค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีและค่าที่อ่านได้จริงในการก่อสร้าง ยอมให้มีค่าความคลาดเคลื่อนได้ตาม ACI 318-19 (2019) ไม่กินร้อยละ 7

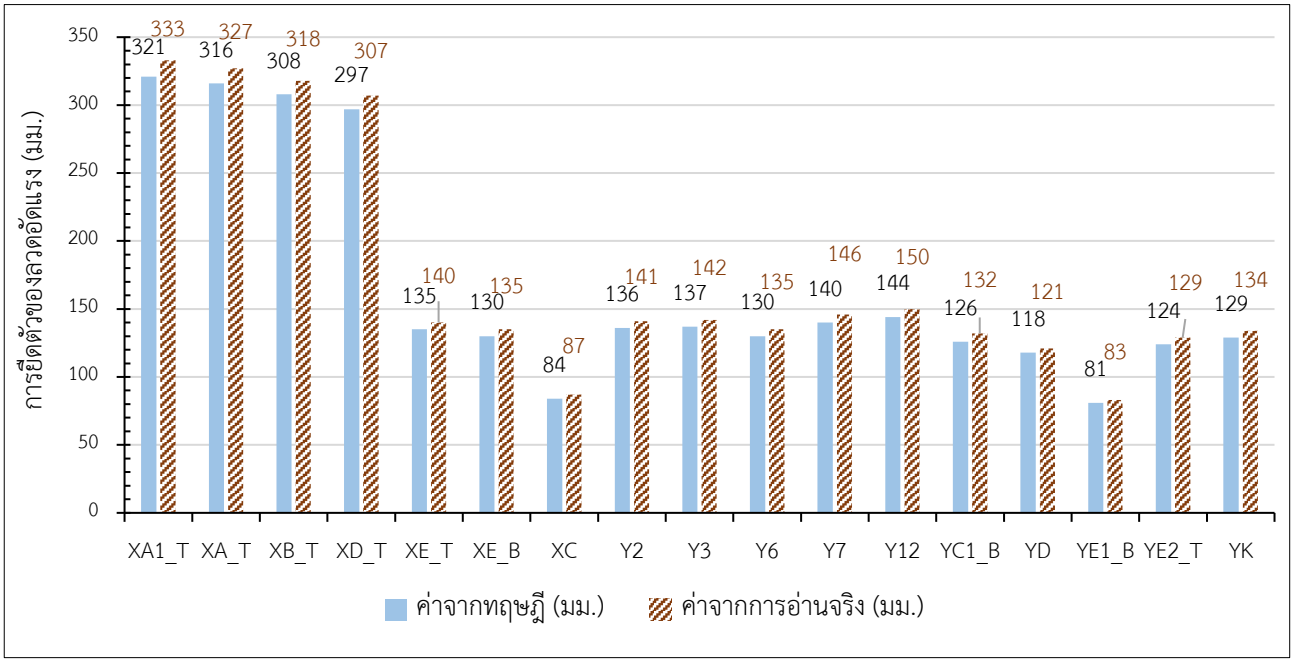
4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยที่แสดงในตารางที่ 4 พบว่าในลวดอัดแรงรูปแบบ XA1_T มีค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎีเท่ากับ 321 มม. ค่าการยืดตัวจากการอ่านจริงเท่ากับ 333 มม. ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎีเท่ากับ 111.80 กิโลนิวตัน และค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากการอ่านจริงเท่ากับ 115.93 กิโลนิวตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าของรูปแบบการวางลวดอัดแรงอื่นๆ

ตารางที่ 4 ผลค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎี ค่าการยืดตัวจากการอ่านได้จริง ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎี และค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากการอ่านได้จริง

รูปแบบการวางลวดอัดแรงที่	สัญลักษณ์กำกับแนวลวดอัดแรง	ความยาวลวดอัดแรง (ม.)	ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงจากทฤษฎี (มม.)	ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงจากการอ่านจริง (มม.)	ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎี (กิโลนิวตัน)	ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากการอ่านจริง (กิโลนิวตัน)
1	XA1_T	55.95	321	333	111.80	115.93
2	XA_T	55.90	316	327	110.18	113.96
3	XB_T	56.75	308	318	105.81	109.20
4	XD_T	56.05	297	307	103.36	106.79
5	XE_T	25.15	135	140	104.84	108.67
6	XE_B	25.15	130	135	101.02	104.84
7	XC	14.80	84	87	111.84	115.74
8	Y2	22.05	136	141	120.45	124.82
9	Y3	21.60	137	142	123.85	128.31
10	Y6	20.55	130	135	123.63	128.31
11	Y7	23.60	140	146	115.81	120.70
12	Y12	24.80	144	150	113.31	117.96
13	YC1_B	21.75	126	132	113.27	118.58
14	YD	20.60	118	121	112.12	114.92
15	YE1_B	12.65	81	83	126.28	129.32
16	YE2_T	20.70	124	129	117.15	121.80
17	YK	24.85	129	134	101.46	105.33

เนื่องจากเส้นแนวลวดอัดแรงรูปแบบมีลักษณะปลายแรงดึงทั้งสองด้านมีการวางแนวลวดอัดแรงเบี่ยงแบนแนวราบมากเพื่อหลบเสา ด้านดึงแรงที่ปลาย grid line 1 เป็น span ช่วงปลายมีระยะ 1.45 ม. และความหนาพื้น 0.25 ม. อีกด้านดึงปลาย grid line 11 มี span ช่วงปลายระยะ 2.20 ม. และความหนาของ band beam หนา 0.70 ม แรงดึงที่ปลายด้านที่มีความหนาน้อยกว่าจะมี stiffness น้อยกว่า ทำให้ต้องใช้แรงดึงที่มากกว่าเพื่อทำให้เส้นลวดอัดแรงตึงก่อนเกิดการยืดตัวของลวดอัดแรง ส่วนแนวลวดอัดแรงรูปแบบ XA_T, XB_T และ XD_T มีความยาวลวดอัดแรงต่างกันเพียง 0.05-0.80 ม. แต่ลวดอัดแรงทั้งสามรูปแบบมี span ช่วงปลายทั้งสองด้านเป็น band beam หนา 0.70 ม. ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎีอยู่ในช่วง 297-316 มม. และจากการอ่านจริงมีค่าในช่วง 307-327 มม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าลวดอัดแรงรูปแบบ XA1_T อย่างมีนัยสำคัญ ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎีและจากการอ่านจริงก็น้อยเช่นกัน เนื่องจากความสอดคล้องกันของสมการ 1 และ 2 ที่ใช้ในการคำนวณ

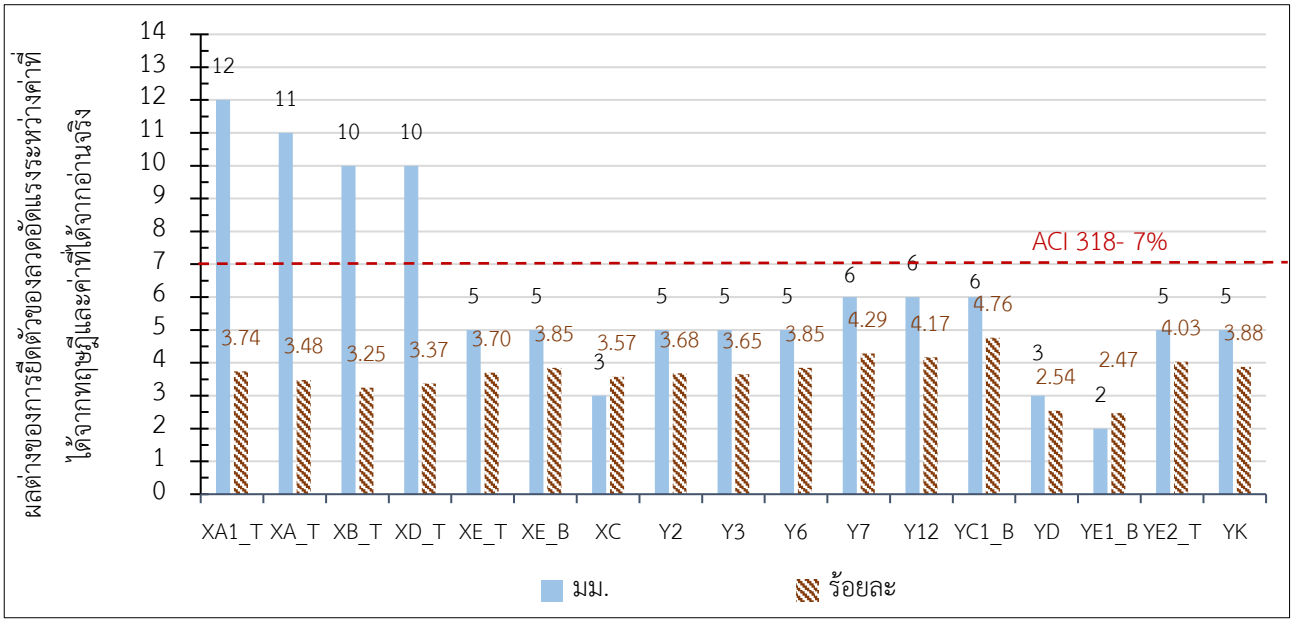


ภาพที่ 19 ผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากอ่านจริงในหน่วย มม. และร้อยละ

ส่วนลวดอัดแรงรูปแบบ YE1_B เป็นลวดอัดแรงที่สั้นที่สุดในการศึกษามีความยาวเท่ากับ 12.65 ม. ผลการศึกษาพบว่าค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎีเท่ากับ 81 มม. และค่าการยืดตัวจากการอ่านจริงเท่ากับ 83 มม. ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎีเท่ากับ 126.28 กิโลนิวตัน และค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากการอ่านจริงก็เท่ากับ 129.32 กิโลนิวตัน ซึ่งน้อยกว่ารูปแบบลวดอัดแรงอื่นที่มีความยาวมากกว่า ดังนั้นความยาวลวดอัดแรงมีผลต่อค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎีและจากการอ่านจริงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Schokker, et al., (2002) และ Török, et al., (2018) จากภาพที่ 19 พบว่าค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากการอ่านจริงสูงกว่าค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้ค่าจากทฤษฎีทุกรูปแบบการวางลวดอัดแรง ซึ่งลวดอัดแรงรูปแบบ XA_T, XB_T และ XD_T ทั้งสามรูปแบบมี span ช่วงปลาย ทั้งสองด้านมีความหนาเป็น band beam หนา 0.70 ม. ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากทฤษฎีอยู่ในช่วง 297-316 มม. และจากการอ่านค่าจริงมีค่า ในช่วง 307-327 มม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าลวดอัดแรงรูปแบบ XA1_T อย่างมีนัยสำคัญ ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานจากทฤษฎีและจากการอ่านจริงก็น้อยเช่นกัน เนื่องจากความสอดคล้องกันของสมการ 1 และ 2 ที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากลวดอัดแรงมีการหย่อนตัวก่อนการดึง สาเหตุมาจากลวดอัดแรงถูกติดตั้งในสภาพหย่อนตัวก่อนการดึง ดังลวดอัดแรงรูปแบบ XA1_T ซึ่งมีส่วนช่วงปลายด้านหนึ่งที่เป็นความหนาเป็น band beam และอีกปลายด้านหนึ่งเป็นเป็นความหนาพื้น ซึ่งจะมีค่า stiffness น้อยกว่าช่วงปลายที่เป็นความหนา band beam จึงทำให้เมื่อใช้แรงดึงช่วงแรกเพื่อดึงให้เส้นลวดอัดแรงให้ตึงก่อนที่เส้นลวดอัดแรงจะยืดจริงมีผลการยืดลวดอัดแรงมากว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการดึงลวดอัดแรงแบบช่วงปลายทั้งสองด้านมีความหนาเป็น band beam

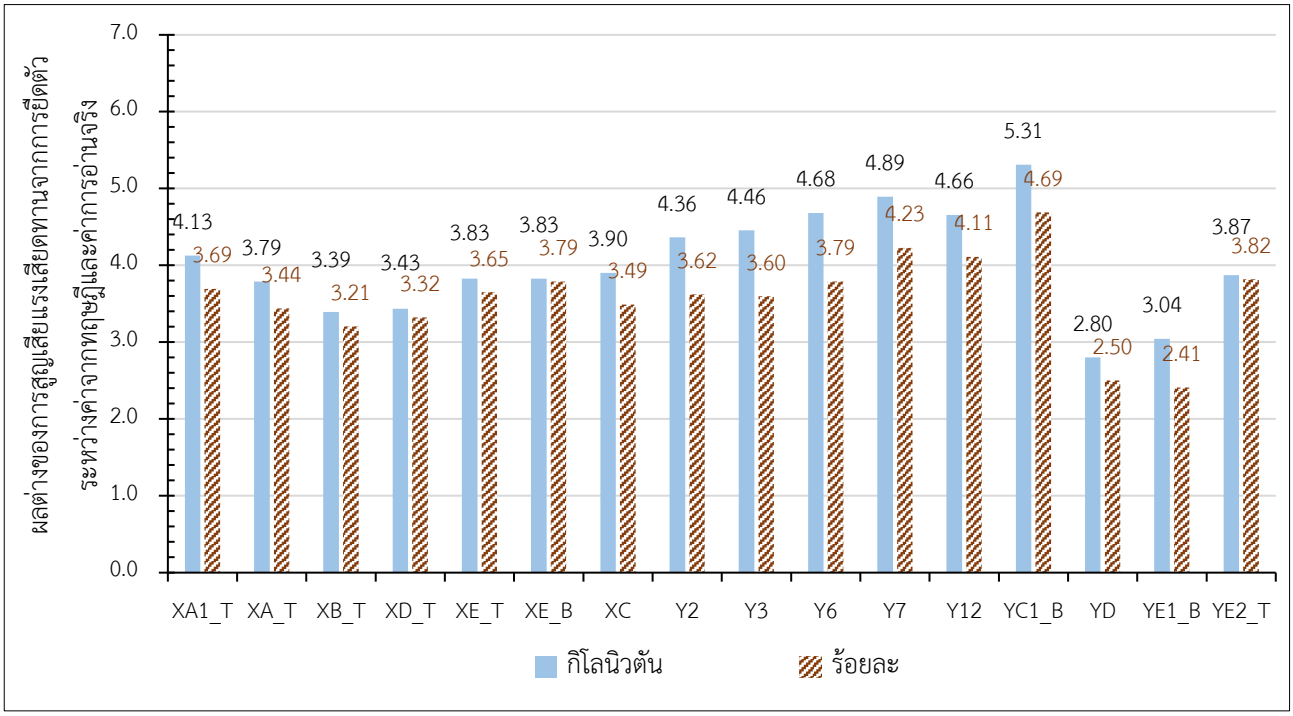
จากภาพที่ 20 แสดงผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงรูปแบบต่างกัน ระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากการอ่านจริงในหน้างาน มีผลที่น่าสนใจดังนี้ ลวดอัดแรงรูปแบบ XC และ YE1_B มีผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากอ่านจริงในหน่วยร้อยละจะมีค่ามากกว่าหน่วยมิลลิเมตร ส่วนลวดอัดแรงรูปแบบอื่นมีผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากอ่านจริงในหน่วยมิลลิเมตร มีค่ามากกว่าหน่วยร้อยละ เมื่อพิจารณาจากรูปแบบภาคตัดของการวางแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข XC ดังภาพที่ 8 และรูปแบบภาคตัดของแนวโปรไฟล์และความยาวของลวดอัดแรงหมายเลข YE1_B ดังภาพที่ 16 พบว่าลวดอัดแรงมีความยาวช่วงสั้นระหว่างความยาว 12.65-14.80 ม. ส่วนลวดอัดแรงที่มีรูปแบบการวางลวดอัดแรงยาวกว่านั้น มีค่าผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าจากการอ่านจริงในหน่วยร้อยละมีค่าน้อยกว่าหน่วย มม. และผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงทุกรูปแบบระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้

จากอ่านจริงในหน่วยร้อยละมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.47-4.76 ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน ACI 318-19 (2019) ที่กำหนดในประเภทงานอาคารระบุไว้ไม่เกินร้อยละ 7



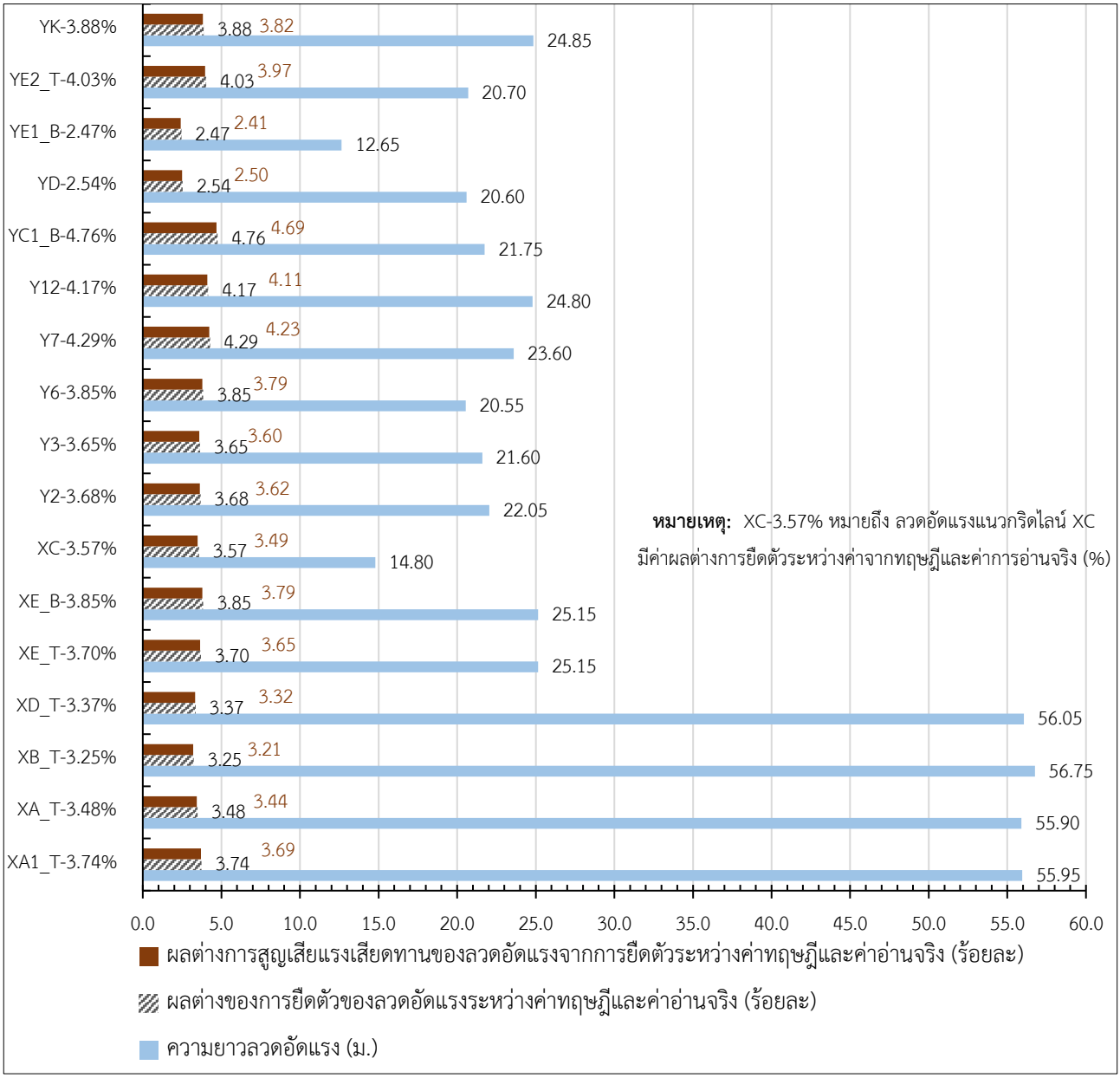
ภาพที่ 20 ผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากอ่านจริงในหน่วยมิลลิเมตรและร้อยละ

ผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและจากการอ่านจริงในหน่วยกิโลนิวตันและมิลลิเมตรของแนวลวดอัดแรงรูปแบบ YC1_B ความยาว 21.75 ม. มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 5.31 กิโลนิวตัน และ 4.69 มม. ตามลำดับ ดังภาพที่ 21 เมื่อพิจารณาจากแปลนการจัดวางรูปแบบลวดอัดแรงดังภาพที่ 1 พบว่ารูปแบบการวางแนวลวดอัดช่วง grid line K-L ยาว 9.30 ม. มีการเบี่ยงเบนของลวดอัดแรงในแนวราบมากเพื่อหลบเสา ทำให้แรงดึงลวดอัดแรงจะเกิดการแตกแรงในทั้งแนวลวดอัดแรงและแนวตั้งฉาก ส่งผลให้ต้องใช้แรงดึงที่ปลายมากขึ้นเพื่อให้ลวดอัดแรงตึงตลอดเส้นก่อนการยืดตัว ในทางกลับกันผลของแนวลวดอัดแรงรูปแบบ YD ที่มีความยาวสองช่วงที่ 9.00 ม. และ 9.30 ม. ซึ่งเป็นแนว Band Beam หนา 0.7 เมตร และมีการวางแนวลวดโค้งแบบพาราโบลาสมมาตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Schokker, et al., 2002 ความมหนาของแผ่นพื้นที่สม่ำเสมอแรงที่เกิดในลวดอัดแรงจะสม่ำเสมอด้วย มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ดังภาพที่ 15 พบว่าผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานต่ำสุดที่ 2.80 กิโลนิวตัน และ 2.50 มม. เนื่องจากการดึงลวดอัดแรงที่ปลายทำให้แนวลวดตึงได้เร็ว และผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและจากการอ่านจริงในหน่วยกิโลนิวตันและมิลลิเมตรของวิธีการดึงลวดอัดแรงแบบสองด้าน จะมีค่าในช่วงระหว่างค่าที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของวิธีการดึงลวดอัดแรงแบบด้านเดียว



ภาพที่ 21 ผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและค่าที่ได้จากอ่านจริง ในหน่วยกิโลนิวตัน และร้อยละ

หากแบ่งกลุ่มลวดอัดแรงตามช่วงความยาวเป็นสามกลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งมีความยาวลวดอัดแรงอยู่ในช่วง 55.90-56.75 ม. กลุ่มที่สองมีความยาวลวดอัดแรงอยู่ในช่วง 20.55-25.15 ม. และกลุ่มที่สามมีความยาวลวดอัดแรงอยู่ในช่วง 12.65-14.80 ม. จากภาพที่ 22 แสดงผลของกลุ่มลวดอัดแรงที่มีความยาวช่วงกลุ่มแรก ที่ใช้วิธีการดึงลวดอัดแรงแบบสองด้าน จะมีผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในช่วงค่าร้อยละ 3.32-3.69 และผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในหน่วยร้อยละในช่วงค่าร้อยละ 3.37-3.74 ลวดอัดแรงที่มีความยาวช่วงกลุ่มที่สอง ใช้วิธีการดึงลวดอัดแรงแบบด้านเดียว มีผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในช่วงค่าร้อยละ 2.50-4.69 และผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในหน่วยร้อยละในช่วงค่าร้อยละ 2.54-4.76 และลวดอัดแรงความยาวกลุ่มที่สาม มีผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในช่วงค่าร้อยละ 2.41-3.49 และผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในหน่วยร้อยละในช่วงค่าร้อยละ 2.47-3.57 ซึ่งผลต่างทั้งการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงและผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในหน่วยร้อยละ มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 รวมทั้งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการสูญเสียแรงเสียดทานจะมีผลสอดคล้องไปในทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญกับค่าการยืดตัวของลวดอัดแรง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ไพบูลย์ ปัญญาคะโป (2564)



ภาพที่ 22 ผลต่างของการสูญเสียแรงเสียดทานจากการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริง ผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าทฤษฎีและค่าอ่านจริงในหน่วยร้อยละ และความยาวลวดอัดแรง (ม.)

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การวางแนวลวดอัดแรงรูปแบบต่างกันมีผลต่อค่าการยืดตัวและการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปแบบที่มีการเบี่ยงเบนแนวราบมากจะทำให้ค่าการยืดตัวและการสูญเสียแรงเสียดทานสูงกว่ารูปแบบที่ไม่เบี่ยงในแนวราบ การวางแนวลวดอัดแรงช่วง span ปลายด้านดึงที่มีความหนาพื้นอัดแรง stiffness ต่ำกว่า จะต้องใช้แรงดึงมากขึ้นเพื่อให้เส้นลวดตึงก่อนการยืดตัว ค่าการสูญเสียแรงเสียดทานและค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่ได้จากการอ่านค่าจริงส่วนใหญ่สูงกว่าค่าที่ได้จากคำนวณทางทฤษฎีในทุกรูปแบบของการวางลวดอัดแรง ความยาวของลวดอัดแรงส่งผลโดยตรงต่อค่าการยืดตัวและการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรง โดยลวดอัดแรงที่มีความยาวน้อยกว่าจะมีค่าการยืดตัวและการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงที่ต่ำกว่าลวดอัดแรงที่มีความยาวมากกว่า ยกเว้นบางรูปแบบการวางแนวลวดอัดที่มีการเบี่ยงเบนมาก จะมีผลค่าการยืดตัวและการสูญเสียแรงเสียดทานที่

สูงกว่ารูปแบบการวางลวดอัดแรงที่ไม่มีการเบี่ยงเบน และวิธีการดึงลวดอัดแรงแบบสองด้านไม่แสดงผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการยืดและการสูญเสียแรงเสียดทานของลวดอัดแรงในการศึกษาวิจัยนี้

5.2 ค่าการยืดตัวของลวดอัดแรงที่มีรูปแบบการวางแนวลวดอัดแรงต่างกัน เช่น ความยาวของลวดอัดแรง การเบี่ยงเบนแนวลวดอัดแรง วิธีการดึงลวดอัดแรง และความหนาของพื้นของช่วง span ปลายดึงแรง มีผลต่างของการยืดตัวของลวดอัดแรงระหว่างค่าที่ได้จากอ่านจริงและค่าจากทฤษฎี โดยมีค่าความต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 7 ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) สำหรับงานอาคาร และมีผลให้ค่าความแตกต่างการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการยืดตัวของลวดอัดแรงทุกรูปแบบค่าไม่เกินร้อยละ 5 เช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท เอสเอ็นพี โพส เท็นชั่น จำกัด และบริษัท อนันดา ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) ในการให้ข้อมูลที่ใช้เป็นกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

ไพบูลย์ ปัญญาคะโป. (2564). *ค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลังของคานสะพานรูปตัวยู.* การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม. ออนไลน์ ครั้งที่ 16. http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/7803

ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete and Commentary (ACI 318-19).* American Concrete Institute. https://www.usb.ac.ir/FileStaff/5526_2020-1-25-11-12-7.pdf

ACI Committee 423. (2016). *Guide to estimating prestress losses (ACI 423.10R-16).* American Concrete Institute. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=4231016&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units

Bondy, K. B.. (2012, February). *Short tendon elongations* (Technical Note No. 16). Post-Tensioning Institute. https://www.usb.ac.ir/FileStaff/5526_2020-1-25-11-12-7.pdf

Charalambous, A., Ashford, P., and Sandie, R. B.. (2002). Post-tensioned concrete floor systems in Australia. *Advances in Building Technology, 2*, 1051-1057. https://doi.org/10.1016/B978-008044100-9/50132-7.

Eurviriyanukul, S., and Askes, H. (2011). Tendon layout optimization through configurational forces equilibration in plane stress analysis of prestressed concrete structures. *Computers & Structures, 89*(17-18), 163-1680. https://doi:10.1016/j.compstruc.2011.04.011.

Hayek, C., and Kang, T. H. K. (2017). Elongation tolerance for short tendons in post-tensioned building structures. *ACI Structural Journal, 221*, https://DOI:10.14359/51689619

Panyakapo, P. (2023). Friction loss and elongation of prestressing steel in post-tensioned flat slab. *2023 SPUC National and International Conference*. Sripatum University at Chonburi. http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/9246

Schokker, A.J., Lee, S.C., and Scanlon, A. (2002). Analytical study of the effects of tendon layout on the performance of post-tensioned two-way slab systems. *CSCE 30th Annual Conference*. Montreal https://www.post- tensioning.org/Portals/13/Files/PDFs/Publications/Reprints/2012%20July/Scanlon%20et%20al_reprint.pdf

Török, I., Puskás, A., and Virág, J. (2018*).* Effects of different arrangement of tendons in post-tensioned flat slabs*. IASS Annual Symposia*. Boston. https://scholar.google.co.th/citations?view_op=view_citation&hl=id&user=bc09Uc8AAAAJ&citation_for_view=bc09Uc8AAAAJ:Tyk-4Ss8FVUC

Yuan, H., Li, Y., Zhou, B., He, S., and Wang, P. (2020). Friction characteristics of post-tensioned tendons of full-scale structures based on-site tests. Advances in Civil Engineering, 2020, 1-10. https://doi.org/10.1155/2020/5916738.