วิธีอย่างง่ายวิธีใหม่ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สำหรับลวดอัดแรงดึงทีหลัง

A New Simple Method for Post-tension Strands Friction Coefficient Measurement

ฉัตร สุจินดา[1*]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กทม. 10900
E-mail: [1]chatr.su@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลวดอัดแรงชนิดตีเกลียวและท่อร้อยลวด ทั้งแบบที่เกิดจากความคดและความโค้ง โดยการเก็บค่าแรงดึงของลวดที่ปลายที่ดึงลวดและระยะยืดของลวดแต่ละเส้น เพื่อนำมาใช้หาค่าแรงดึงเฉลี่ยตลอดความยาวเส้นลวดจากสมการความสัมพันธ์ของระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเส้นลวดแบบเชิงเส้นไม่ตรง และคำนวณความยาวและความโค้งรวมของลวดแต่ละเส้นจากแบบก่อสร้าง เพื่อให้เหมือนกับการคำนวณในขั้นตอนออกแบบ และได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีการปรับแก้ความเพี้ยนของตำแหน่งการวางลวดเมื่อเทียบกับแบบก่อสร้างไว้แล้ว จากการทดลองวัดและคำนวณค่าดังกล่าวของเส้นลวดอัดแรงที่ใช้ท่อร้อยลวดสำหรับอัดฉีดน้ำปูนเพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวชนิดที่ม้วนตีเกลียวมาจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสีจำนวน 470 เส้น จากสถานที่ก่อสร้างจริง พบว่าได้สัมประสิทธิ์ความคดมีค่าเท่ากับ 0.0035 ต่อฟุต (1.758 ต่อเมตร) และได้ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งมีค่าเท่ากับ 0.536 ต่อเรเดียน ซึ่งค่าทั้งสองมากกว่าที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน ACI318-11 อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, ลวดอัดแรงแบบตีเกลียว, วิธีการวัดค่า

Abstract

This article describes the new method of measuring the friction coefficient between prestressing strands and their conduits which are related to both wobble and curvature. The method requires both measured jacking force and elongation of each strand so the average tension along the entire length can be determined from non-linear stress-strain relationship. The total length and total curvature of each strand were calculated from shop drawing to simulate the friction calculation in the design process. The determined friction coefficients will include the effect due to misplace of the conduit layouts. From the experimental measurement of 470 bonded system strands with spiral galvanized metal sheet conduits from the actual construction site, the wobble coefficient is 0.0035 per foot (1.758 per meter) and the curvature coefficient is 0.536 per radian. Both coefficients are significantly higher than those recommended by ACI318-11 standard.

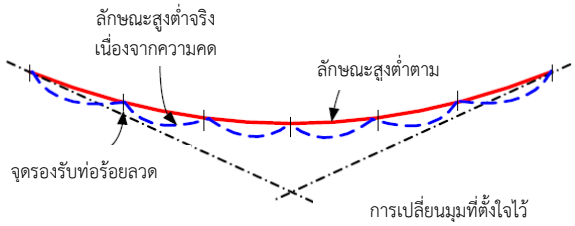
Keywords: Friction coefficient, Prestressing strands, Measurement method

1. คำนำ

การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง จำเป็นจะต้องทราบถึงแรงอัดประสิทธิผล (Effective pre-stress force) ซึ่งเป็นผลมาจากการดึงลวดอัดแรง เพื่อใช้ในการกำหนดจำนวนลวดอัดแรงที่ต้องการให้เพียงพอที่จะไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เกินกว่าค่าที่ยอมให้ ทั้งในสภาวะเริ่มต้น (Initial stage) คือหลังจากที่ดึงลวดเสร็จใหม่ๆ และในสภาวะใช้งาน (Working stage) คือหลังจากที่ดึงลวดไปนานหลายปี จนสิ้นสุดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งค่าแรงอัดประสิทธิผลในคอนกรีตอัดแรงนี้ จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงที่ใช้ในการดึงลวด เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเส้นลวดกับท่อร้อยลวด และที่เกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นๆ เช่นการหดตัวของคอนกรีตในขณะดึงลวด, การลื่นตัวของลิ่มล็อคปลายลวดหลังการดึงลวด (ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกิดขึ้นในขณะดึงลวด) การคลายเกลียวและการคืบของเส้นลวด, การคืบและการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิและการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต (ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกิดขึ้นระยะยาวระหว่างการใช้งาน) ฯลฯ สำหรับการคำนวณค่าแรงเสียดทานตามมาตรฐาน ACI318-11 [1] และมาตรฐานอื่นๆ ที่ผู้ออกแบบนิยมใช้กันทั่วโลก ได้คำนวณด้วยวิธีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความคด (Wobble friction coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 1 และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความโค้ง (Curvature friction coefficient) ค่าของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในมาตรฐาน ACI318-11 [1] ได้แนะนำไว้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุลวดอัดแรงและระบบของท่อร้อยที่ใช้ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองนี้ยังขึ้นอยู่กับ ความเที่ยงตรงและวิธีปฏิบัติในขั้นตอนการวางและดึงลวด ซึ่งหากผู้ออกแบบนำค่าของสัมประสิทธิ์ที่ ACI318-11 [1] แนะนำไว้มาใช้ในการออกแบบ อาจจะไม่เหมาะสม ซึ่งถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้มีค่าต่ำเกินไป อาจจะทำให้ผู้ออกแบบเลือกจำนวนลวดน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งจะทำให้ระดับความปลอดภัยของโครงสร้างน้อยเกินไป แต่ถ้าหากมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงเกินไป ก็จะทำให้ผู้ออกแบบเลือกจำนวนลวดมากกว่าที่ควร ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุ อีกทั้งยังอาจเกิดระยะแคมเบอร์ที่มากเกินควรได้

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้กันนั้น มีขั้นตอนอันเป็นมาตรฐาน แต่เนื่องจากจะต้องคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแยกกันระหว่างที่เกิดจากความคดและความโค้ง จึงต้องการลวดอัดแรงจำนวนหนึ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างเดียว สำหรับใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความคด และต้องการลวดอัดแรงอีกจำนวนหนึ่งที่มีลักษณะ



รูปที่ 1 ลักษณะของการเกิดความคดในลวดอัดแรง

สูงต่ำ เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งหลังจากที่ได้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความคดแล้ว ดังนั้นการวัดค่าดังกล่าวจึงถูกจำกัดแต่โครงสร้างมีการวางแผนและออกแบบมาเพื่อใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์นี้โดยเฉพาะ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์วิธีใหม่ ที่ไม่ต้องการโครงสร้างที่ต้องฝังลวดที่จะต้องวางไว้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์โดยเฉพาะ และมีขั้นตอนในการวัดค่าเหมือนกับขั้นตอนในการดึงลวดโดยปกติ จึงสามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้กับโครงสร้างที่กำลังจะดึงลวดอัดแรง รวมไปถึงโครงสร้างที่ได้รับการดึงลวดไปแล้วแต่มีข้อมูลในระหว่างการดึงลวดและแบบก่อสร้างเก็บไว้อย่างครบถ้วน ทำให้สามารถหาตัวอย่างข้อมูลได้ง่าย และทำให้ได้ข้อมูลปริมาณมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวิธีใหม่สำหรับลวดอัดแรงดึงทีหลังในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง
2. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความคดและความโค้งสำหรับระบบลวดอัดแรงแบบดึงทีหลังชนิดอัดน้ำปูน (Grouted System) ที่ใช้ในประเทศ ตามขั้นตอนการดึงลวดและวิธีปฏิบัติแบบไทย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีใหม่ซึ่งเป็นวิธีอย่างง่ายเพื่อใช้หาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในลวดอัดแรงชนิดดึงทีหลัง โดยใช้วิธีคำนวณแรงที่ปลายลวดที่ไม่ได้ดึงลวดจากระยะยืด (Elongation) ของตัวลวดเอง และใช้สมการถดถอยแบบเชิงเส้นไม่ตรง (Non-linear regression) เพื่อใช้ประมาณค่าหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยจากลวดหลายๆ เส้นที่มีความคดและความโค้งในระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ข้อมูลที่เก็บอยู่แล้วในขั้นตอนมาตรฐานในขณะที่ดึงลวดอัดแรงในโครงสร้างและสถานการณ์จริง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงที่ใช้วัสดุลวดอัดแรงและท่อร้อยในระบบเดียวกันหรือคล้ายกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เก็บข้อมูลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความโค้งที่เกิดขึ้นในตัวลวดและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการวางลวดอัดแรง และค้นคว้าหาข้อมูลทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการดึงลวดเหล็กอัดแรง และพฤติกรรมการเกิดระยะยืดของลวดอัดแรง จากโครงการโรงแรม 5 ชั้น ที่หัวหิน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งใช้ระบบลวดอัดแรงแบบดึงทีหลัง ร้อยในท่อโลหะชุบสังกะสีม้วนขึ้นรูปหน้าตัดเป็นวงรี อัดฉีดน้ำปูนเพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 2 ลักษณะภายนอกของอาคารที่ใช้เก็บข้อมูล (ภาพจำลอง)

รูปที่ 3 ลวดอัดแรงในท่อร้อยที่วางเสร็จแล้วบางส่วน (ภาพจากโครงการจริงที่ศึกษา)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ACI318-11 [1] ได้แนะนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สำหรับลวดอัดแรงชนิดต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามที่ ACI318-11 [1] ได้กล่าวไว้ว่าค่าดังกล่าวเป็นเพียงค่าเริ่มต้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่จะใช้จริงในการคำนวณออกแบบจะต้องหามาจากผู้ผลิตลวดอัดแรงสำหรับแบบนั้นๆ และจะต้องระบุค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ไว้ในแบบก่อสร้างด้วย การประมาณค่าแรงเสียดทานต่ำเกินจริงสามารถนำไปสู่ระยะแคมเบอร์ที่ไม่เหมาะสมหรือค่าอัดแรงที่ไม่เพียงพอ ส่วนการประมาณค่าแรงเสียดทานที่สูงเกินจริงสามารถนำไปสู่ระยะแคมเบอร์ที่มากเกินไปและการหดตัวที่มากเกินไปในชิ้นส่วนโครงสร้างได้ หากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่หาได้จริงมีค่าต่ำกว่าค่าที่สมมุติในตอนออกแบบอาจสามารถปรับแรงดึงในขณะดึงลวดในส่วนที่วิกฤติในโครงสร้างได้ตามความต้องการของการออกแบบ

ผู้วิจัยเคยทำงานอยู่ในบริษัทก่อสร้างรับเหมาช่วงเฉพาะทาง PT System of Georgia ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งบริษัทนี้รับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ผลิตแบบก่อสร้าง (Shop Drawing) รวมไปถึงจัดส่งและดึงลวดอัดแรงทั้งในระบบที่มีและไม่มีการอัดน้ำปูน โดยทางเจ้าของโครงการ สามารถเลือกให้บริษัทหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉพาะสำหรับอาคารในโครงการนั้นๆได้ ซึ่งมีขั้นตอนตามมาตรฐานบริษัทดังนี้

1. กำหนดให้ลวดจำนวนหนึ่งในโครงสร้างที่ต้องการจะวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งจะต้องเป็นลวดอัดแรงดึงที่ปลายด้านใด

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับลวดอัดแรงชนิดต่างๆ ACI318-11 [1]

			Wobble coefficient, per foot	Curvature coefficient, per radian
Grouted tendons in metal sheathing		Wire tendons	0.0010-0.0015	0.15-0.25
		High-strength bars	0.0001-0.0006	0.08-0.30
		7-wire strands	0.0005-0.0020	0.15-0.25
Unbounded Tendon	Mastic coated	Wire tendons	0.0010-0.0020	0.05-0.15
		7-wire strands	0.0010-0.0020	0.05-0.15
	Pre-greased	Wire tendons	0.0003-0.0020	0.05-0.15
		7-wire strands	0.0003-0.0020	0.05-0.15

ด้านหนึ่งเท่านั้น โดยให้ลวดชุดแรกไม่มีความสูงต่ำในแนวดิ่ง คือจัดวางให้ตำแหน่งของลวดอยู่ที่กึ่งกลางของความลึกของแผ่นพื้น สำหรับลวดชุดแรกจะต้องมีความยาวในแนวราบที่เท่ากัน และให้ลวดชุดที่สองมีความสูงต่ำในแนวดิ่ง สำหรับลวดชุดที่สองจะต้องมีลักษณะความสูงต่ำที่เหมือนกันและความยาวของลวดในแนวราบเท่ากัน แต่ไม่จำเป็นต้องเท่ากับของชุดแรก

2. ทำการวางลวดทั้งสองชุดในโครงสร้างจริงหรือโครงสร้างที่จัดขึ้นไว้พิเศษเพื่อใช้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เทคอนกรีตและรอให้คอนกรีตมีกำลังอัดประลัยตามที่ระบุ f'_{ci} สำหรับปลายด้านที่ไม่มีการดึงลวดติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าแรงดึงเข้ากับเส้นลวด P_{px} และทำการดึงลวดที่ปลายอีกด้านหนึ่งจนได้ตามค่าที่กำหนด P_{pj} (โดยปกติที่ 80% ของกำลังประลัยของเส้นลวด)

3. สำหรับลวดชุดที่ไม่มีความสูงต่ำในแนวดิ่ง แสดงว่าลวดชุดนี้มีแต่ความคดแต่ไม่มีความโค้ง ซึ่งลวดชุดนี้ต้องมีความยาวในแนวราบ l_{px} เท่ากันทุกเส้น จึงสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดเนื่องจากความคด K ได้ จากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของแรงในลวดที่ปลายที่ไม่ได้ดึงต่อแรงในลวดที่ปลายที่กำลังดึงของลวดชุดที่ไม่มีความสูงต่ำ ดังในสมการที่ (1)

$$\left(\frac{P_{px}}{P_{pj}}\right)_{\text{เฉลี่ยของลวดชุดที่ไม่มีความสูงต่ำ}} = e^{-(Kl_{px})} \quad (1)$$

4. สำหรับลวดชุดที่มีความสูงต่ำในแนวดิ่ง ซึ่งลวดชุดนี้ต้องมีความยาวในแนวราบ l_{px} เท่ากันทุกเส้น (แต่ไม่จำเป็นต้องมีความยาวเท่ากับของลวดชุดแรกก็ได้) ซึ่งแสดงว่าลวดชุดนี้มีทั้งความคดและความโค้ง ให้คำนวณความโค้งรวมตลอดความยาวเส้นลวด α_{px} จากแบบก่อสร้าง ดังนั้นเมื่อทราบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเนื่องจากความคด K จากสมการที่ (1) แล้ว จึงสามารถนำมาใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดเนื่องจากความโค้ง μ_p ได้จากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของแรงในลวดที่ปลายที่ไม่ได้ดึงต่อแรงในลวดที่ปลายที่ถูกดึง ของลวดชุดที่มีความสูงต่ำดังในสมการที่ (2)

$$\left(\frac{P_{px}}{P_{pj}}\right)_{\text{เฉลี่ยของลวดชุดที่มีความสูงต่ำ}} = e^{-(Kl_{px}+\mu_p\alpha_{px})} \quad (2)$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความคด K และสัมประสิทธิ์ความโค้ง μ_p ซึ่งเป็นค่ากลางสำหรับลวดชุดดังกล่าว

Ning Ming-zhe and Li De-jian [2] ได้แนะนำวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความคดและความโค้ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องกำหนดให้มีลวดชุดที่ไม่มีความสูงต่ำในแนวดิ่ง และไม่จำเป็นต้องวัดค่าของแรงในเส้นลวดในปลายที่ไม่ได้ดึงลวด แต่ประมาณค่าแรงดึงที่ปลายที่ไม่ได้ดึงลวดจากระยะยืดของลวดแทน ซึ่งวิธีใหม่มีขั้นตอนดังนี้

1. คัดเลือกรูปร่างความสูงต่ำของลวดมา 3 แบบที่แตกต่างกัน (ยิ่งแตกต่างกันมากได้ยิ่งดี) คำนวณค่าระยะยืดของการดึงลวดสำหรับแรงดึงที่ 80% ตามข้อกำหนดของการออกแบบ จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความคด K และความโค้ง μ_p ที่ใช้ในการออกแบบ

2. ดึงลวดที่ปลายด้านหนึ่ง โดยการดึงลวดที่ 15% ของแรงดึง

3. ที่ลวดปลายที่ถูกดึง ติดตั้งเครื่องวัดการเปลี่ยนระยะแบบเข็ม (Dial Gauge) อย่างระมัดระวัง และขีดตำแหน่งของเข็มชี้เริ่มต้น (เพื่อใช้วัดค่าระยะยืดไม่เกิน 50 mm. ของค่าตามทฤษฎี ควรจะใช้เข็มวัดจอขนาดใหญ่ ส่วนสำหรับค่าระยะยืดตามทฤษฎีระหว่าง 50-200 mm. ให้เปลี่ยนไปใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ที่มีสเกลไม้บรรทัดละเอียดถึงระดับ 0.5 mm.)

4. ดึงลวดจนถึงระดับ 95% ของค่าออกแบบ โดยแบ่งการดึงออกเป็นระยะ 2-5 ช่วง อ่านค่าแรงที่ดึงและระยะยืดในแต่ละช่วง จนสิ้นสุดการวัด

5. ทำขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 ซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของระยะยืดที่วัดได้

สำหรับลวดทุกๆ เส้นที่ทำการวัด ทำขั้นตอนที่ 2-5 แล้วนำค่าที่วัดได้ไปแทนในสมการที่ (3) (ขั้นตอนนี้สามารถใช้ MATLAB ในการช่วยคำนวณได้)

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{d}(\Delta \mathrm{L}_1) = \dfrac{\partial \mathrm{f}_1}{\partial \alpha_\mathrm{a}}\mathrm{d}\alpha_\mathrm{a} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_1}{\partial \mathrm{k}}\mathrm{dk} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_1}{\partial \mu}\mathrm{d}\mu \\ \mathrm{d}(\Delta \mathrm{L}_2) = \dfrac{\partial \mathrm{f}_2}{\partial \alpha_\mathrm{a}}\mathrm{d}\alpha_\mathrm{a} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_2}{\partial \mathrm{k}}\mathrm{dk} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_2}{\partial \mu}\mathrm{d}\mu \\ \mathrm{d}(\Delta \mathrm{L}_3) = \dfrac{\partial \mathrm{f}_3}{\partial \alpha_\mathrm{a}}\mathrm{d}\alpha_\mathrm{a} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_3}{\partial \mathrm{k}}\mathrm{dk} + \dfrac{\partial \mathrm{f}_3}{\partial \mu}\mathrm{d}\mu \end{Bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\Delta \mathrm{L} = \mathrm{f}(\alpha_\mathrm{a}, \mathrm{k}, \mu) = \frac{\mathrm{F_{ae}L}}{\mathrm{E_pA_p}} \times \frac{\left[1 - \mathrm{e}^{-(\mu\theta + \mathrm{kx})}\right]}{(1 + \alpha_\mathrm{a})(\mu\theta + \mathrm{kx})} \quad (4)$$

$$\alpha_\mathrm{a} = \frac{\mathrm{F_{ae}} - \mathrm{F_{ai}}}{\mathrm{F_{ai}}} \quad (5)$$

จากการศึกษาที่ผ่านมาทั้งหมด ที่เกี่ยวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน หากไม่ใช้ค่าตามที่มาตรฐานแนะนำ (ซึ่งผู้ออกมาตรฐานก็ไม่ได้รับรองความถูกต้องแต่อย่างใด) ก็ต้องมีการสร้างโครงสร้างหรือลวดตัวอย่างพิเศษ สำหรับวัดค่าแรงดึงและแรงที่ปลายด้านที่ไม่ได้ดึงลวด หรือไม่ก็ต้องวัดค่าระยะยืดที่มีขั้นตอนซับซ้อน ซึ่งนำมาใช้ประมาณแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายด้านที่ไม่ได้ดึงลวดจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเส้นลวดแบบเส้นตรง แต่ยังไม่มีวิธีการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวิธีใด (เท่าที่ผู้แต่งค้นคว้ามาได้) ที่ใช้แต่ค่าที่เก็บได้ในขณะการดึงลวดโดยปกติ โดยวัดจากลวดอัดแรงเส้นที่จะต้องดึงอยู่แล้วในการก่อสร้างจริง และใช้การหาแรงที่ปลายด้านที่ไม่ได้ดึงลวดจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวแบบเส้นไม่ตรงที่ได้จากการทดสอบลวดอัดแรงจริง และมีขั้นตอนการดึงลวดที่ไม่ซับซ้อนหลายขั้นตอน ดังนั้นผลของงานวิจัยนี้จึงจะเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้างคอนกรีตอัดแรงทั้งในประเทศและต่างประเทศต่อไป

3. ขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

1. ในขณะขั้นตอนการดึงลวดอัดแรง บันทึกค่าแรงดึงจากเก็จวัดแรงดันน้ำมันที่ติดตั้งอยู่ที่อุปกรณ์ที่ใช้ดึงลวด สำหรับอาคารที่เก็บตัวอย่างนี้เป็นผู้รับเหมาได้ตั้งเกณฑ์ให้ดึงลวดทั้งหมด 4 ระดับ (พบว่าผู้รับเหมาของแต่ละบริษัทมีรายละเอียดของขั้นตอนที่แตกต่างกัน) คือ ระดับแรกเป็นการดึงเพื่อขยับให้ลวดเข้าที่ ส่วนระดับที่สองถึงสี่ เป็นการดึงลวดให้ได้ตามเป้าหมาย ซึ่งในระดับที่สองนั้น ช่างผู้ดึงลวดจะทดลองดึงที่ 75.8% ของกำลังดึงประลัยของลวดตามที่ระบุดูก่อน จากนั้นหากค่าระยะยืดที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรเกิน 5% จะต้องดึงลวดต่อไปอีกที่ระดับที่สามคือที่ 77.5%, และสุดท้ายในระดับที่สี่คือที่ 80% และจะต้องจดบันทึกค่าแรงดึงครั้งสุดท้าย $F_{jacking}$ และระยะยืดของลวดเส้นนั้น Δ_{ps} ครั้งสุดท้ายไว้ด้วย

2. จากแบบก่อสร้าง (Shop drawings) ซึ่งแสดงระยะสูงต่ำ (Profile) ของลวดอัดแรง คำนวณค่าเปลี่ยนการเปลี่ยนมุมรวม (หน่วยเป็นเรเดียน) α_p ที่เกิดจากความโค้ง (Curvature) และความยาวในแนวราบ l_p ดังแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 4 เพื่อนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในขั้นตอนต่อไป

3. ใช้สมการความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเส้นลวดตีเกลียว ดังแสดงที่สมการที่ (6) ซึ่งได้มาจากการทดสอบดึงลวดจริง [3] กรณี $f_{py}/f_{pu} = 0.85$ และ $f_\mathrm{pu} = 270\mathrm{ksi}$ มีค่าคงที่ในสมการคือ A=756, B=27244, C=117.3, และ D=6.598

$$f_{ps} = \varepsilon_{ps}\left[A + \frac{B}{\left\{1 + \left(C\varepsilon_{ps}\right)^D\right\}^{1/D}}\right] \le f_{pu} \quad (6)$$

4. จากระยะยืด Δ_{ps} คำนวณหน่วยการยืดตัว $\varepsilon_{ps} = \frac{\Delta_{ps}}{l_p}$ และหาค่าหน่วยแรงในเส้นลวด f_{ps} เฉลี่ยตลอดความยาวของเส้นลวด จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) และคำนวณค่าแรงดึงเฉลี่ยจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด A_ps จาก $F_{avg} = A_{ps}f_{ps}$ และประมาณค่าแรงดึงที่ปลาย Dead End หรือ $F_{dead\ end}$ จาก $F_{avg} = \frac{F_{jacking} + F_{dead\ end}}{2}$ และจากสมการแรงเสียดทานในเส้นลวด [1] สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์เชิงเส้นไม่ตรงได้ดังสมการที่ (7)

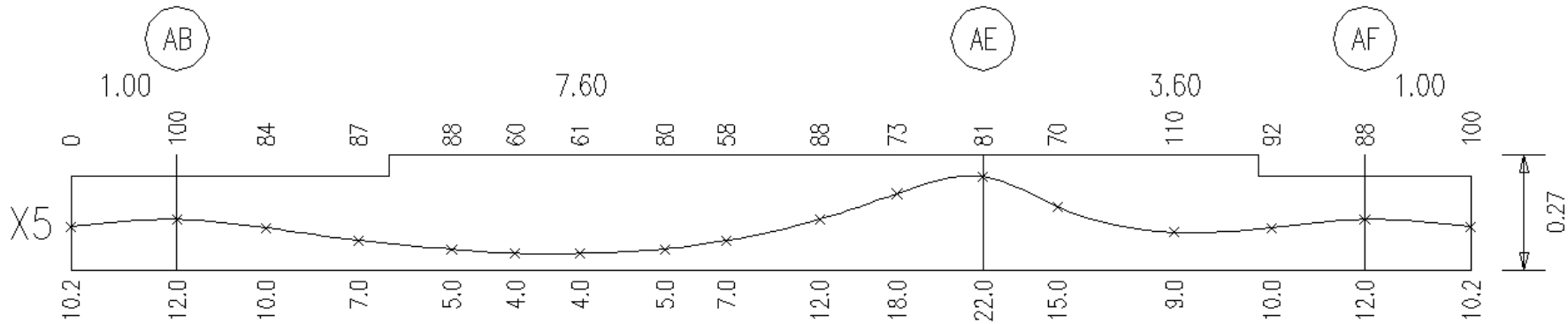
$$\frac{F_{dead\ end}}{F_{jacking}} = \mathrm{e}^{-(\mathrm{Kl_p} + \mu_\mathrm{p}\alpha_\mathrm{p})} \quad (7)$$

จากนั้นแปลงสมการที่ (7) ให้เป็นสมการเชิงเส้นตรงดังสมการที่ (8)

$$ln\left(\frac{F_{jacking}}{F_{dead\ end}}\right) = \mathrm{Kl_p} + \mu_\mathrm{p}\alpha_\mathrm{p} \quad (8)$$

5. หาค่าคงที่ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรงจากตัวแปรต้น l_p, $\propto_\mathrm{p}$ และตัวแปรตาม $ln\left(\frac{F_{jacking}}{F_{dead\ end}}\right)$ ของลวดทุกเส้น โดยใช้โปรแกรมที่สามารถหาสมการถดถอยเชิงเส้นตรงหลายตัวแปรได้อย่างเช่น Microsoft Excel Analysis Tool Pack Add-ins จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความคด (Wobble Coefficient) K และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความโค้ง (Curvature Coefficient) μ_p แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน ACI318-11 [1]

จะเห็นได้ว่าวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามขั้นตอนที่นำเสนอในบทความนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากลวดอัดแรงที่มีความยาวและลักษณะสูงต่ำของลวดที่เหมือนกันแต่อย่างใด ในทางตรงกันข้ามหากใช้ข้อมูลของลวดที่มียาวและลักษณะสูงต่ำของลวดที่มีความแตกต่างกันมากเท่าใด ก็ยิ่งส่งผลทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความเชื่อมั่นที่สูงมากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเป็นการสุ่มเก็บตัวอย่างที่หลากหลายมากขึ้น



Profile ลวด X5: มีส่วนยื่นซ้าย-ขวา และช่วงภายในอีก 2 ช่วง สำหรับส่วนยื่นด้านซ้าย $L = 1.00$เมตร $h = (12.0$ซม $- 10.2$ซม$) = 1.8$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*1.8\text{ซม}}{100\text{ซม}} = 0.07200$เรเดียน ช่วงภายในอันแรกครึ่งซ้าย $L = 3.80$เมตร $h = (12.0$ซม $- 4.0$ซม$) = 8.0$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*8.0\text{ซม}}{3800\text{ซม}} = 0.008421$เรเดียน ครึ่งขวา $L = 3.80$เมตร $h = (22.0$ซม $- 4.0$ซม$) = 18.0$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*18.0\text{ซม}}{3800\text{ซม}} = 0.018947$เรเดียน ช่วงภายในอันที่สองครึ่งซ้าย $L = 1.80$เมตร $h = (22.0$ซม $- 9.0$ซม$) = 13.0$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*13.0\text{ซม}}{1800\text{ซม}} = 0.028889$เรเดียน ครึ่งขวา $L = 1.80$เมตร $h = (12.0$ซม $- 9.0$ซม$) = 3.0$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*3.0\text{ซม}}{1800\text{ซม}} = 0.006667$เรเดียน และส่วนยื่นด้านขวา $L = 1.00$เมตร $h = (12.0$ซม $- 10.2$ซม$) = 1.8$ซม $\propto = \frac{4h}{L} = \frac{4*1.8\text{ซม}}{100\text{ซม}} = 0.07200$เรเดียน

ลวดที่ใช้ *Profile* นี้มีความยาวรวม $l_p = (1.0 + 7.6 + 3.6 + 1.0) = 13.2$เมตร $\propto_p = (0.007200 + 0.008421 + 0.018947 + 0.0288889 + 0.006667 + 0.007200) = 0.206924$เรเดียน

รูปที่ 4 ตัวอย่างรายละเอียดการคำนวณความยาว และการเปลี่ยนมุม ของลวดในแนว X5 ชั้น 3 โซน A

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

Multiple R=0.910718954 R Square=0.829409014 Adjusted R Square=0.826907751 Standard Error=0.122023181 Observations=470

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	33.87998497	16.93999248	1137.702018	3.0325*E*-180
Residual	468	6.968359342	0.014889657		
Total	470	40.84834431			

Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower *95%*	Upper *95%*	Lower *95.0%*	Upper *95.0%*	
Intercept *0*	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
X Variable *1*	*0.003487354*	*0.000173258*	*20.12815032*	*2.26924*E-*65*	*0.003146895*	*0.003827813*	*0.003146895*	*0.003827813*
X Variable *2*	0.535759267	0.095102048	5.633519744	3.05203*E*-08	0.348879389	0.722639145	0.348879389	0.722639145

รูปที่ 5 ผลการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเส้นลวดอัดแรง 470 เส้น

4. ผลการศึกษา

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลการดึงลวดซึ่งรวมไปถึงค่าแรงที่ใช้ดึงลวดว่าอยู่ในระดับ 75.8%, 77.5% หรือ 80% ของแรงดึงประลัยที่ระบุ (270 ksi หรือ 19,000 ksc) และค่าระยะยืดของเส้นลวด (Elongation) ของการดึงลวดครั้งสุดท้ายของลวดแต่ละเส้น และได้นำแบบ Shop drawing ที่แสดงถึงระยะสูงต่ำของลวด (Profile) และความยาวของแต่ละช่วง (Span) มาใช้คำนวณค่าความยาวรวม และการเปลี่ยนมุมรวมของลวดแต่ละเส้น รวมทั้งหมด 470 เส้น และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากโปรแกรม Microsoft Excel Analysis Tool Pack Add-ins โดยกำหนดให้ค่าตัดแกน (Intercept) เท่ากับศูนย์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5

5. สรุป

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากสมการถดถอย ได้ค่า $R^2 = 0.829$ ซึ่งแสดงถึงว่ามีสัมพันธ์อยู่ในระดับที่ดีและได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความคด (Wobble coefficient) $K = 0.0035$ ต่อฟุต (หรือ 1.758 ต่อเมตร) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าบนที่แนะนำไว้ใน ACI318-11 [1] กรณี Grouted tendons in metal sheathing คืออยู่ในช่วง $0.0005 - 0.0020$ ไปบ้าง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานความโค้ง (Curvature Coefficient) $\mu_p = 0.536$ ต่อเรเดียน ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าบนที่แนะนำไว้ใน ACI318-11 [1] คืออยู่ในช่วง $0.15 - 0.25$ ต่อเรเดียนไปเกินสองเท่า

ค่าสัมประสิทธิ์ที่หามาได้ทั้งสองนี้มีค่าที่สูงกว่าค่าที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน ACI318-11 [1] ซึ่งเป็นข้อมูลที่เก็บในประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้นอาจเป็นไปได้อยู่อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างคือ (1) ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวเป็นการวัดโดยอ้างอิงจากการสมมุติว่าความคดอาจเกิดขึ้นได้ในเส้นลวดที่ตั้งใจจะวาง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของท่อร้อยลวดว่า เมื่อถูกเหยียบหรือทับแล้วเกิดการแอ่นตัวมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงแสดงว่าการวางลวดในโครงการที่ศึกษามีค่าความคดโดยเฉลี่ยมากกว่าของข้อมูลจากประเทศสหรัฐอเมริกา และ (2) วัสดุที่ใช้ทำท่อร้อยลวดและเส้นลวดอัดแรง อาจมีผิวสัมผัสหรือมีรูปร่างลักษณะที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่าที่ใช้ในการวัดค่าของประเทศสหรัฐอเมริกา หรืออาจมีเศษหินเศษปูนติดอยู่ในท่อร้อยลวดในปริมาณที่มากกว่าจึงมีผลทำให้เกิดแรงเสียดทานในระดับที่สูงกว่า ซึ่งทางมาตรฐาน ACI318-11 [1] ก็ไม่ได้รับประกันถึงความเที่ยงตรง และแนะนำให้ใช้ค่าของผู้ผลิตระบบลวดอัดแรงนั้นๆ แทน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ออกแบบ

6. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษานี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่หามาได้ มีค่าแตกต่างจากที่มาตรฐานแนะนำอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำว่าองค์กรวิศวกรรมควบคุม ควรจะออกข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบให้ผู้ผลิตลวดอัดแรงและระบบท่อร้อย รวมไปถึงบริษัทผู้รับเหมาวางลวดอัดแรง หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับใช้เฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแต่ละบริษัทอาจใช้วัสดุและมีขั้นตอนมาตรฐานในการควบคุมงานที่แตกต่างกัน โดยมีผู้เชี่ยวชาญอิสระคอยตรวจสอบดูแลขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 318, 2011. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-11) and Commentary (ACI318R-11). Farmington Hill, Michigan : American Concrete Institute.

[2] Ning Ming-zhe and Li De-jian, “A New Measuring Method of Friction Losses of Prestressed Tendon in Post-tensioning”, Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011, 15-17 July 2011, pp. 6300-6303.

[3] Devalapura, R. K. and Tadros, M. K., “Stress-Strain Modeling of 270 ksi Low-Relaxation Presrtressing Strands”, PCI Journal, Mar-Apr 1992, pp. 100-109.