



IDENTIFICATION OF FORCE IN TENSION STRUCTURES OF BANGKOK ARENA
STADIUM ROOF DURING CONSTRUCTIONS

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

การหาค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาระหว่างการก่อสร้าง
IDENTIFICATION OF FORCE IN TENSION STRUCTURES OF BANGKOK ARENA STADIUM
ROOF DURING CONSTRUCTIONS

รุ่งโรจน์ เทศนา¹ และนคร ภู่วโรดม²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทร. 0-2564-3001-9 โทรสาร. 0-2564-3010

E-mail: rungrojt@bangkok.go.th and pnakhorn@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การหาค่าแรงที่ถูกต้องสำหรับชิ้นส่วนรับแรงดึงในโครงสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งในขั้นตอนการก่อสร้างและการบำรุงรักษาภายหลัง อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดค่าแรงโดยตรงในภาคสนามมีความยุ่งยากเนื่องจากต้องถอดที่ยึดของปลายชิ้นส่วนออกเพื่อติดตั้งเครื่องอ่านค่าแรง วิธีที่สามารถประยุกต์แทนได้คือการคำนวณค่าแรงจากความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งบทความนี้นำเสนอผลการหาแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงจากการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติและคำนวณจากทฤษฎีการสั่นอิสระในช่วงเชิงเส้นของเคเบิลสำหรับหลังคาสนามบางกอกอารีนาในช่วงขั้นตอนการก่อสร้างต่างๆ ลักษณะของหลังคาคือมีความยาวช่วงกว่า 110 เมตร ถูกดึงด้วยชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ทำจากแท่งเหล็กที่ยึดปลายด้านบนกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนค่าแรงดึงในชิ้นส่วนหนึ่งๆ ที่เป็นผลจากการปรับค่าแรงที่ชิ้นส่วนอื่นในขั้นตอนก่อสร้าง จากค่าแรงดึงในขั้นตอนสุดท้ายแสดงว่าประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักหลังคาทั้งหมดถูกรองรับด้วยชิ้นส่วนรับแรงดึง และพบว่าในบางชิ้นส่วนมีค่าแรงดึงที่แตกต่างจากค่าที่ออกแบบไว้ถึงมากกว่าร้อยละ 30 และค่าแรงดึงที่ตรวจวัดได้เหล่านี้สามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงในการใช้งานระยะยาวหรือแผนการบำรุงรักษาได้ต่อไป

คำสำคัญ: โครงสร้างรับแรงดึง, สนามบางกอกอารีนา, การตรวจวัดความถี่

ABSTRACT

The correct in-situ determination of force is important in construction and maintenance of tension structures. However, field investigation by direct measurement of force which requires removal of support and installation of force gauge is rather difficult to be implemented. Therefore, determination of tension from natural frequencies of the tension structures serves as a more practical mean. This paper presents results of force identification of tension structure by frequency measurement and analysis by the linear theory of free vibrations of a cable for the Bangkok Arena Stadium roof during several construction stages. The roof, with span larger than 110 m, is supported by tension members made by steel rods attached to concrete pylons. The changes of tension resulted from adjusting of force in other members were examined and indicated. The results of the final tension show that about 50% of the total dead weight is carried by the tension structures. In some members, significant difference of tension from the design value in the order of 30% or higher was observed. The measured tensions at the current condition can be used as reference values for comparison of the long-term service or maintenance plan.

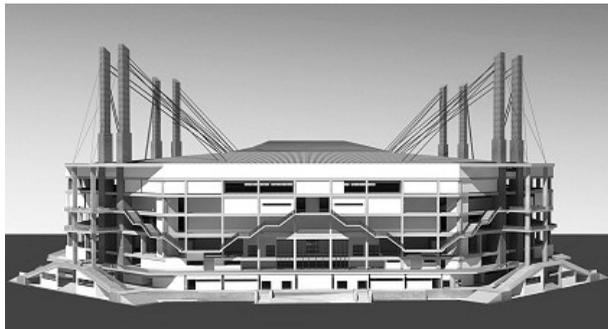
KEYWORDS: tension structures, Bangkok Arena Stadium, frequency measurement

Rungroj Tissanah¹ and Nakhorn Poovarodom²

^{1,2}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Khlongluang Pathumthani 12120

1. บทนำ

กรุงเทพมหานครได้ดำเนินการออกแบบและก่อสร้างสนามกีฬาในร่มขนาดใหญ่ โดยใช้เป็นสนามฟุตบอลที่จุผู้ชมได้มากถึง 12,000 ที่นั่ง ชื่อ “บังกอกอารีนา (Bangkok Arena)” ในพื้นที่รวมกว่า 50 ไร่ ณ ศูนย์ฝึกอบรมสถาบันพัฒนาข้าราชการ กรุงเทพมหานคร เขตหนองจอก โดยมีลักษณะอาคารคือ กว้าง 116 เมตร ยาว 112 เมตร อัฒจันทร์ที่นั่งชมกีฬา 5 ระดับชั้น โครงสร้างหลังคาเป็นโครงถักเหล็กและไม่มีเสากลางมีน้ำหนักรวมกว่า 2,000 ตัน ระดับหลังคาสูง 34 เมตรจากพื้นดินและมีโครงสร้างรับแรงดึง (Tension Rod) รองรับโครงถักหลังคาซึ่งยึดเข้ากับเสา Pylon ที่มีความสูง 56 เมตร จำนวน 8 ต้น ที่มุม 4 ด้านของหลังคา ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองสนามบังกอกอารีนา

ในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างรับแรงดึง จำเป็นต้องมีการคำนวณค่าแรงดึงของแต่ละชั้นส่วนในขั้นตอนการออกแบบ และทำการให้แรงดึงด้วยค่าที่สอดคล้องกันเมื่อทำการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม สำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะซับซ้อนเช่นอาคารนี้ ขั้นตอนการก่อสร้างจึงถูกกำหนดให้มีหลายขั้นตอนย่อย โดยมีการให้แรงดึงกับชั้นส่วนในแต่ละชั้นตอนย่อยเพียงบางส่วนเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ แล้วเปลี่ยนไปให้แรงที่ส่วนอื่นในขั้นตอนต่อมา ซึ่งทำให้เกิดการปรับสมดุลใหม่ในโครงสร้างและอาจมีผลเปลี่ยนค่าแรงดึงจากที่มีการดึงก่อนหน้านี้ การตรวจสอบค่าแรงดึงของชั้นส่วนรับแรงดึงให้มีค่าถูกต้องตามค่าที่ออกแบบไว้จึงมีความสำคัญเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างขั้นสุดท้ายก่อนการใช้งาน และสามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อการบำรุงรักษาโครงสร้างดังกล่าวในอนาคต

การตรวจค่าแรงดึงในชั้นส่วนรับแรงดึงหลังจากการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ไม่สามารถใช้เครื่องมืออ่านค่าแรงดึงโดยตรงเช่นที่ใช้ในระหว่างการก่อสร้างได้เนื่องจากได้ยึดชั้นส่วนกับฐานรองไปแล้ว การหาค่าแรงสามารถทำได้ด้วยวิธีอื่นที่ไม่ต้องถอดที่ยึดชั้นส่วนได้ คือการประยุกต์หลักพลศาสตร์โดยการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของชั้นส่วนแล้วคำนวณเป็นค่าแรงดึงด้วยทฤษฎีการสั่นของเคเบิล [1] การวิจัยด้านนี้ต่อโครงสร้างวิศวกรรมโยธาได้แก่ Sriwongkham (1997) [2] ที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับแท่งเหล็กรับแรงดึงและมีผลจากความแข็งเชิงดัด (bending rigidity) โดยสามารถใช้การวัดความถี่ธรรมชาติและคำนวณค่าแรงดึงได้อย่างแม่นยำ ตฤณ (2554) [3] ทำการประยุกต์วิธีการหาแรงดึงจากการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติกับ Tendon ในสะพานคอนกรีตอัดแรงระบบคานชั้นส่วน โดยแสดงผลที่สอดคล้องกันอย่างดีของผลจาก (ก) การทดลองในห้องปฏิบัติการ (ข) การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ และ (ค) การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการสั่นของเคเบิลที่คำนึงถึงความแข็งเชิงดัด

ลักษณะของชั้นส่วนรับแรงดึงในโครงสร้างหลังคาสนามบังกอกอารีนามีลักษณะเป็นเส้นที่มีความขรุขระมาก และสามารถประยุกต์ทฤษฎีการสั่นของเคเบิลสำหรับการหาค่าแรงดึงจากค่าความถี่ธรรมชาติจากการตรวจวัดภาคสนามได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อทำการสำรวจค่าแรงดึงในชั้นส่วนรับแรงดึงในระหว่างการก่อสร้าง เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการก่อสร้าง และใช้เป็นค่าอ้างอิงที่สำคัญสำหรับการใช้งานในระยะยาว หรือในช่วงระยะเวลาการบำรุงรักษาต่อไป

2. การวิเคราะห์หาค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติ

จากหลักการของทฤษฎีเชิงเส้นของการสั่นแบบอิสระของสายเคเบิลหรือลวดตึง ค่าแรงดึงในชั้นส่วนรับแรงดึงมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติ ความยาว และมวล สำหรับการสั่นในระนาบ (เช่น การสั่นในแนวตั้งสำหรับชั้นส่วนของหลังคาอาคารนี้) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงกับความถี่ธรรมชาติจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (ก) การสั่นในรูปแบบการสั่นไหว (โหนด) เลขคี่ ได้แก่ โหนด 1, 3, 5, ... ซึ่งเป็นโหนดสมมาตรในระนาบ และ(ข) การสั่นในโหนดเลขคู่ ได้แก่ โหนด 2, 4, 6, ... ซึ่งเป็นโหนดไม่สมมาตรในระนาบ โดยที่การคำนวณแรงดึงจากความสัมพันธ์สำหรับโหนดเลขคี่ มีความซับซ้อนและมีความคลาดเคลื่อนได้สูง เนื่องจากต้องใช้ค่าระยะตกท้องข้างรวมถึงโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ รวมทั้งรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน [1] ส่วนการคำนวณแรงดึงจากความสัมพันธ์สำหรับโหนดเลขคู่อยู่ในรูปแบบที่สามารถคำนวณได้อย่างสะดวก ดังสมการที่ (1)

$$T = 4mL^2f_n^2/n^2 \quad (1)$$

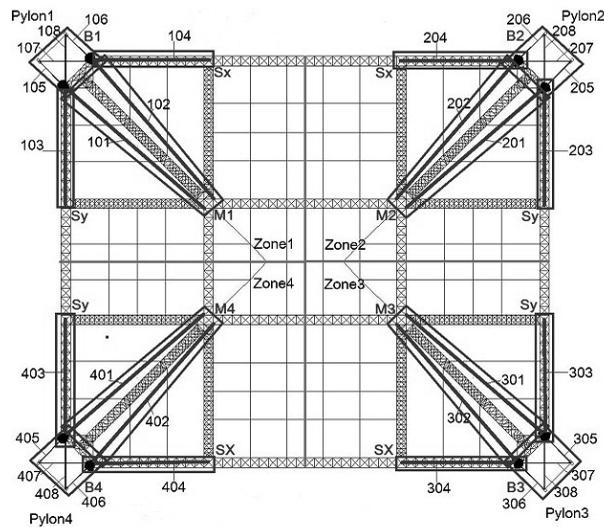
โดยที่ T คือแรงดึง (นิวตัน) m คือมวลต่อความยาว (กิโลกรัมต่อเมตร) L คือความยาวช่วง (เมตร) f_n คือความถี่ธรรมชาติ (Hz) ของโหนด n ซึ่งเป็นเลขคู่ จากสมการที่ (1) สามารถเขียนได้เป็น $f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$ ซึ่งพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของโหนดที่ 4 มีค่าเป็น 2 เท่าของโหนดที่ 2 และเป็นในลักษณะเดียวกันของโหนดสูงขึ้นไปในกลุ่มโหนดเลขคู่ แต่ในโหนดเลขคี่ไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้ ดังนั้นการใช้ความถี่ธรรมชาติจากโหนดเลขคู่จึงสามารถยืนยันค่าที่ถูกต้องจากค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าหนึ่งโหนดได้โดยง่าย

3. วิธีการศึกษา

3.1 ลักษณะของโครงสร้างรับแรงดึง

โครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาใช้วัสดุเป็นท่อนเหล็กหน้าตัดกลม มีค่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 700 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร จำนวนทั้งสิ้น 128 เส้นโดยจัดเป็นกลุ่มต่าง ๆ กลุ่มละ 4 เส้น ซึ่งระหว่างเสากับหลังคาซึ่งประกอบด้วยด้านหน้าเสาที่รับช่วงกลางหลังคา ด้านข้างเสา และด้านหลังเสา โดยมีผังแสดงในรูปที่ 2 และข้อมูลของแต่ละกลุ่ม ที่รวมถึงค่าแรงดึงที่ใช้ในการออกแบบ (T_D) แสดงในตารางที่ 1

ในการเก็บข้อมูลศึกษา ได้ดำเนินการตรวจวัดเฉพาะกลุ่มด้านหน้า (main) และด้านข้างเสา (side) รวมทั้งสิ้น 64 เส้น ประกอบด้วย (อ้างอิงกับรูปที่ 2) กลุ่มด้านหน้าเสา Pylon 1 (M1) จำนวน 8 เส้น, กลุ่มด้านหน้าเสา Pylon 2 (M2) จำนวน 8 เส้น, กลุ่มด้านหน้าเสา Pylon 3 (M3) จำนวน 8 เส้น, กลุ่มด้านหน้าเสา Pylon 4 (M4) จำนวน 8 เส้น, กลุ่มด้านข้างเสา Pylon 1-4 ทางแกน Y (Sy) จำนวน 16 เส้น และกลุ่มด้านข้างเสา Pylon 1-4 ทางแกน X (Sx) จำนวน 16 เส้น โดยที่ในกลุ่มด้านหน้าเสา Pylon 1-4 (B1-B4) จำนวน 64 เส้นนั้น ไม่ได้ทำการตรวจวัด แต่มีการปรับค่าแรงดึงในชั้นตอนก่อสร้าง การปรับแรงดึงในแต่ละครั้งทำด้วยเครื่องดึงแบบแจ๊คไฮดรอลิกและอ่านค่าแรงดึงจาก Gauge โดยผู้รับเหมา ซึ่งมีการทำงานรวม 9 ชั้นตอน แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งโครงสร้างรับแรงดึงของกลุ่มต่างๆ

ตารางที่ 1 ลักษณะของโครงสร้างรับแรงดึง

| Group | Diameter | Location | T_D (kN) |
|--|----------|----------|------------|
| 101, 102, 201, 202, 301, 302, 401, 402 | 64 mm | Main | 1,542 |
| 103, 203, 303, 403 | 39 mm | Side | 687 |
| 104, 204, 304, 404 | 49 mm | Side | 1,050 |
| 105, 205, 305, 405 | 95 mm | Back | 3,567 |
| 106, 206, 306, 406 | 95 mm | Back | 3,726 |
| 107, 207, 307, 407 | 60 mm | Back | 1,280 |
| 108, 208, 308, 408 | 49 mm | Back | 930 |

ตารางที่ 2 รายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้าง

| ขั้นตอน | รายละเอียด |
|---------|---|
| 1 | ติดตั้งโครงสร้างรับแรงดึงทั้งหมด 128 เส้น |
| 2 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B3 ด้านหลังเสา Pylon 3 |
| 3 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B4 ด้านหลังเสา Pylon 4 |
| 4 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B2 ด้านหลังเสา Pylon 2 |
| 5 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B1 ด้านหลังเสา Pylon 1 |
| 6 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม M2,4 ด้านหน้าเสา Pylon 2,4 |
| 7 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม M1,3 ด้านหน้าเสา Pylon 1,3 |
| 8 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม Sy ด้านข้างเสา Pylon 1-4 |
| 9 | ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม Sx ด้านข้างเสา Pylon 1-4 |

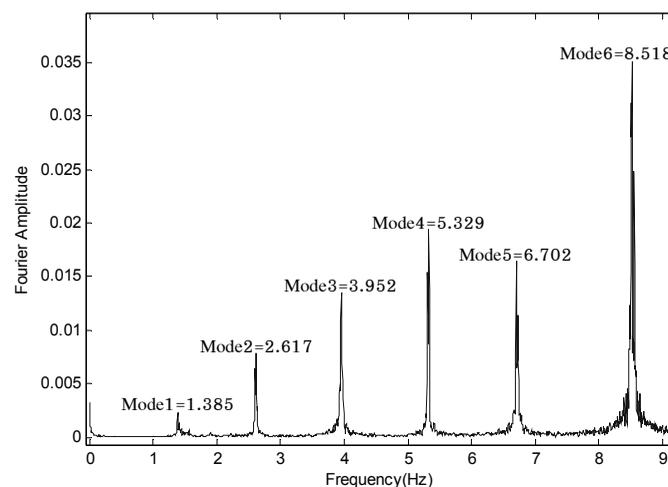
3.2 การตรวจวัดความถี่ธรรมชาติ

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจวัดภาคสนาม ประกอบด้วย (ก) หัววัดความเร่ง เพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนในรูปของความเร่ง

(ข) Sensor Interface เพื่อการแปลงสัญญาณและรับส่งข้อมูล (ค) คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมและบันทึกข้อมูล ขั้นตอนการตรวจวัดคือติดตั้งหัววัดความเร่งไวบนแผ่นเหล็กประกบซึ่งจับยึดแน่นกับโครงสร้างรับแรงดึงเพื่อตรวจวัดการสั่นในแนวตั้ง (หรือการสั่นในระนาบ) ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นใช้ค้อนยางเคาะเพื่อกระตุ้นการสั่นให้สัญญาณมีความชัดเจนขึ้น แล้วทำการบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 1000 Hz และระยะเวลาในการบันทึก 5 นาที ซึ่งข้อมูลที่ได้มีจำนวน 300,000 ค่าต่อครั้ง ข้อมูลที่ตรวจวัดได้นี้มาทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยการแปลงฟูเรียร์ โดยตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ของโครงสร้างรับแรงดึงเส้น 101A ที่ชั้นตอนที่ 9 แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจวัดภาคสนาม



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยการแปลงฟูเรียร์ของโครงสร้างรับแรงดึงเส้น 101A ที่ชั้นตอนที่ 9

จากรูปที่ 4 พบว่าค่า Fourier Amplitude แสดงยอดแหลมชัดเจนที่ความถี่ต่างๆ จำนวนมาก ซึ่งแสดงถึงความถี่ของการสั่นหลักของโครงสร้างและหมายถึงความถี่ธรรมชาติที่โหมดต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย โหมดแบบสมมาตรในระนาบ (Symmetric in-plane modes) หรือโหมดที่เป็นเลขคี่ (1, 3, 5, ...) และโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบ (Antisymmetric in-plane modes) หรือโหมด

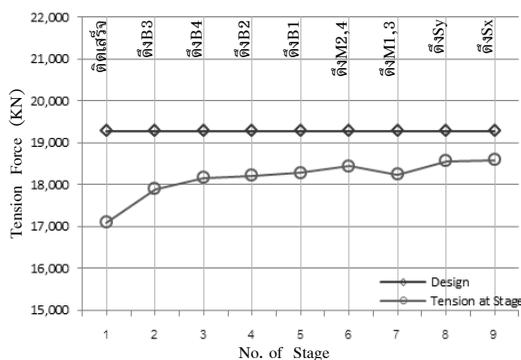
ที่เป็นเลขคู่ (2, 4, 6, ...) จากรูปที่ 4 ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ 1, 3 และ 5 มีค่าเท่ากับ 1.385, 3.952 และ 6.702 Hz ตามลำดับ และสำหรับค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2, 4 และ 6 มีค่าเท่ากับ 2.617, 5.329 และ 8.518 Hz ตามลำดับ ซึ่งตามทฤษฎีเส้นลวดตึง (String Theory) ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ n ต้องมีค่าเป็น n เท่าของค่าของโหมดที่ 1 โดยที่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความถี่ธรรมชาติในระนาบระหว่างโหมดที่ 2 และโหมดที่ 1 (2.617/1.385) มีค่าเท่ากับ 1.890 ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎีเส้นลวดตึง เนื่องจากได้รับผลกระทบจากระยะตึงที่งอซึ่งเกิดขึ้น ส่วนโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบ ค่าอัตราส่วนความถี่ธรรมชาติระหว่างโหมดที่ 4 และโหมดที่ 2 (5.329/2.617) เท่ากับ 2.036 ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีเส้นลวดตึง ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติต่อไปนี้เป็นการใช้ค่าของโหมดที่ 2 และคำนวณด้วยสมการที่ 1

4. ผลการตรวจวัดภาคสนาม

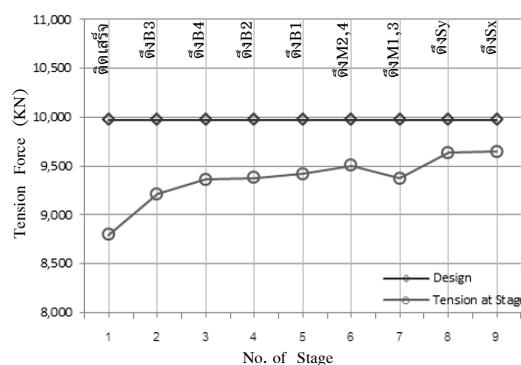
ผลการศึกษาแสดงเป็นค่าแรงดึงในแต่ละชั้นส่วนที่ทำการตรวจวัดด้วยค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งค่าความยาวและมวลที่ใช้ประกอบการคำนวณใช้ค่าจากการออกแบบ ค่าแรงดึงที่ใช้ในการอภิปรายต่อไปนี้เป็น แรงดึงที่ตรวจวัดได้ในระหว่างการก่อสร้าง (T_i) แรงดึงที่ตรวจวัดได้ในขั้นตอนสุดท้ายของการก่อสร้าง (T_f) แรงดึงที่บันทึกได้ระหว่างก่อสร้างจาก gauge โดยผู้รับเหมา (T_G) และแรงดึงที่ใช้ในการออกแบบ (T_D)

4.1 ผลรวมค่าแรงดึงทั้งหมด

ค่าผลรวมของค่า T_i ถูกแสดงและเปรียบเทียบกับค่าผลรวมของ T_D ทุกเส้นที่ทำการตรวจวัด ในระหว่างขั้นตอนก่อสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 5(ก) สำหรับผลรวมของแรงในแนวของแต่ละเส้น และรูปที่ 5(ข) สำหรับเฉพาะองค์ประกอบในแนวตั้งของแต่ละเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงรวมที่ใช้ในการรองรับหลังจากจากขั้นตอนเริ่มต้นที่ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 12% และจากการก่อสร้างในขั้นตอนต่างๆ ได้มีการปรับให้แรงดึงรวมเพิ่มขึ้นจนถึงค่าใกล้เคียงกับค่าออกแบบในขั้นตอนสุดท้าย ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 4% ซึ่งผลค่าแรงในแนวตั้งทั้งหมดของโครงสร้างรับแรงดึงนี้มีค่าประมาณ 50% ของน้ำหนักหลังคาทั้งหมดที่มีมวลทั้งสิ้น 1,980 ตัน โดยที่น้ำหนักส่วนที่เหลือถูกถ่ายลงเสาโดยตรง



(ก) ผลรวมค่าแรงดึงทั้งหมดในแนวเอียง



(ข) ผลรวมค่าแรงดึงทั้งหมดในแนวตั้ง

รูปที่ 5 ผลรวมค่าแรงดึงทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัดและการออกแบบ

4.2 ค่าแรงดึงของแต่ละกลุ่มระหว่างการก่อสร้าง

เพื่อเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดึงในแต่ละกลุ่มระหว่างการก่อสร้าง ผลของแรงดึงเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม (4 เส้นต่อกลุ่ม) แสดงไว้ในตารางที่ 3 ในรูปของค่า % ที่แตกต่างไปจาก T_D ของกลุ่ม โดยพบถึงแนวโน้มที่ค่าแรงดึงเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มที่เปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าที่ออกแบบมากขึ้นในขั้นตอนหลัง และควรสังเกตว่า ภายหลังจากที่ได้มีการปรับค่าแรงดึงในกลุ่มนั้นไปแล้ว

ค่าแรงดึงยังเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้อีกภายหลังจากการปรับค่าแรงดึงในกลุ่มอื่น อันเป็นผลจากการปรับสมดุลใหม่ในโครงสร้าง ดังนั้นการทราบถึงผลที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและควรได้รับการพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบ

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงเฉลี่ยแต่ละกลุ่มที่ได้จากการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติและการออกแบบ(% Difference)

| No | Group | %Difference of T_i from T_D | | | | | | | | | | T_D (kN) |
|------------|-------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|---------------|
| | | Stage | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 101 | -23 | -17 | -19 | -19 | -19 | -21 | -13 | -13 | -15 | 1,542 | |
| 2 | 102 | -12 | -8 | -9 | -9 | -1 | -3 | -4 | -4 | -5 | 1,542 | |
| 3 | 103 | +2 | +4 | +3 | +2 | +3 | 0 | -1 | +8 | +8 | 687 | |
| 4 | 104 | -5 | +2 | +3 | +2 | +5 | +7 | +3 | +4 | +7 | 1,050 | |
| 5 | 201 | -9 | -10 | -10 | -5 | -5 | -1 | -5 | -6 | -6 | 1,542 | |
| 6 | 202 | +4 | +2 | +3 | +4 | +4 | +3 | +1 | +1 | 0 | 1,542 | |
| 7 | 203 | -28 | -30 | -27 | -21 | -20 | -21 | -21 | -16 | -13 | 687 | |
| 8 | 204 | -3 | 0 | -1 | -2 | -2 | -1 | -5 | -4 | -1 | 1,050 | |
| 9 | 301 | -12 | -2 | -3 | -3 | -4 | -3 | -1 | -3 | -6 | 1,542 | |
| 10 | 302 | -11 | -4 | -6 | -6 | -6 | -5 | -1 | -1 | -5 | 1,542 | |
| 11 | 303 | -39 | -29 | -29 | -31 | -29 | -27 | -33 | -6 | -6 | 687 | |
| 12 | 304 | -6 | +1 | -1 | 0 | -1 | +1 | -3 | -6 | 0 | 1,050 | |
| 13 | 401 | +1 | +5 | +10 | +10 | +7 | +8 | +5 | +6 | +7 | 1,542 | |
| 14 | 402 | -16 | -12 | -4 | -5 | -7 | -3 | -7 | -5 | -9 | 1,542 | |
| 15 | 403 | -18 | -27 | -15 | -11 | -12 | -9 | -15 | -10 | -8 | 687 | |
| 16 | 404 | -26 | -14 | -7 | -13 | -13 | -14 | -13 | -13 | -3 | 1,050 | |
| Max in bar | | +23 | +28 | +33 | +33 | +30 | +28 | +24 | +40 | +39 | | |
| Min in bar | | -75 | -69 | -69 | -70 | -69 | -68 | -72 | -29 | -30 | | |

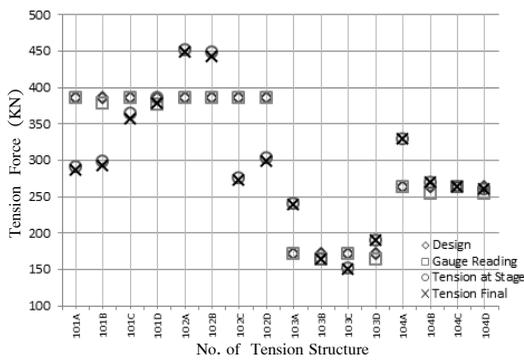
ผลของค่าที่แตกต่างสูงสุดในแต่ละเส้นแสดงไว้ในท้ายตาราง สำหรับค่าแตกต่างแบบบวกและลบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีค่าสูงถึงกว่า 30% ที่ขั้นตอนสุดท้าย และเมื่อนำมาพิจารณาในรูปของค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (ร้อยละ 60 ของค่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากของวัสดุ) พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 20.12% ถึง 41.56% ของค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้

4.3 การเปรียบเทียบค่าแรงดึงจากการวัดกับค่าที่ใช้ออกแบบ

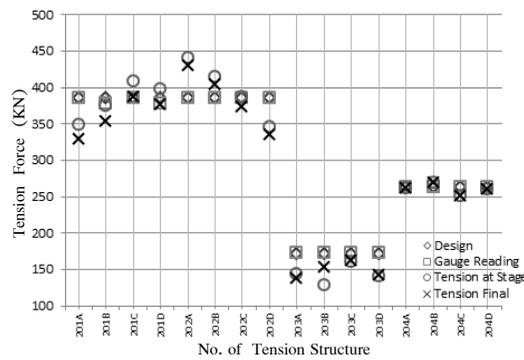
ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ตรวจวัดได้ในระหว่างการก่อสร้างหลังจากปรับแรงที่เส้นนั้น (T_i) แรงดึงที่ตรวจวัดได้ในขั้นตอนสุดท้ายของการก่อสร้าง (T_F) แรงดึงที่บันทึกได้ระหว่างการก่อสร้างจากผู้รับเหมา (T_G) และแรงดึงที่ใช้ในการออกแบบ (T_D) แสดงดังรูปที่ 6 สำหรับแต่ละเส้นสำหรับเสาทั้ง 4 มุมหลังคาตามลำดับ โดยมีผลที่สำคัญดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงค่า T_i เป็น T_F ที่เกิดจากการปรับสมดุลใหม่ของโครงสร้าง ตัวอย่างผลที่ชัดเจนคือรูปที่ 6(ง) สำหรับเส้น 401B 401C และ 401D

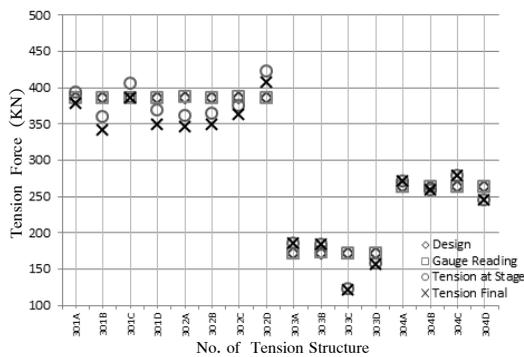
- ค่า T_G และ T_D มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย นั่นคือในขั้นตอนการก่อสร้างมีการปรับแรงให้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ แต่อย่างไรก็ตาม T_G เป็นค่าจาก Gauge ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีความคลาดเคลื่อนได้สูงระหว่างการดำเนินงาน ทำให้ค่าแรงดึงที่แท้จริงอาจแตกต่างจากค่าที่ออกแบบได้
- ค่า T_F อาจมีความแตกต่างอย่างมากกับ T_D ในบางเส้น ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 6(ก) โดยค่า T_F มีค่าสูงกว่าในเส้น 102A 102B 103A 104A เป็นต้น แต่มีค่าต่ำกว่าในเส้น 101A 101B 102C 102D เป็นต้น



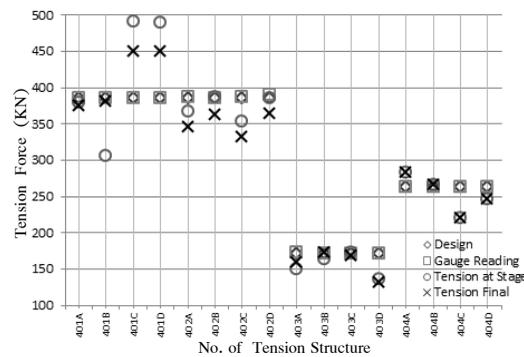
(ก) ค่าแรงดึงของเส้น No.101A-104D



(ข) ค่าแรงดึงของเส้น No.201A-204D



(ค) ค่าแรงดึงของเส้น No.301A-304D



(ง) ค่าแรงดึงของเส้น No.401A-404D

รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงในแต่ละเส้น

5. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมของโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาระหว่างการก่อสร้างจากการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติและวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเส้นลาดตั้ง โดยวิธีที่ใช้ศึกษามีประสิทธิภาพในแง่ความสะดวกและถูกต้อง ซึ่งให้ผลแรงดึงในสภาพของโครงสร้างปัจจุบัน อันเป็นประโยชน์ต่อการทำนายพฤติกรรมและการวางแผนบำรุงรักษาโครงสร้างต่อไป ผลจากการศึกษาที่สำคัญสรุปดังนี้

ก) ผลรวมของแรงในโครงสร้างรับแรงดึงทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดในการออกแบบประมาณ 4% และพบว่าประมาณ 50% ของน้ำหนักหลังคาทั้งหมดถูกรองรับด้วยองค์ประกอบในแนวตั้งของแรงในโครงสร้างรับแรงดึง

ข) จากขั้นตอนการก่อสร้างที่มีการปรับแรงดึงในชิ้นส่วนหนึ่ง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงในชิ้นส่วนอื่นด้วย เนื่องจากการปรับสมดุลใหม่ของระบบโครงสร้าง ผลที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นสิ่งที่สำคัญและควรได้รับการพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบ

ให้ถูกต้อง

ค) ค่าแรงดึงที่ตรวจวัดได้ในขั้นตอนสุดท้ายในบางเส้น มีค่าต่างจากค่าที่กำหนดในการออกแบบถึงมากกว่า 30% และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ตรวจพบมีค่าประมาณ 40% ของหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ ทั้งนี้ยังไม่รวมผลจากแรงอื่น เช่น น้ำหนักบรรทุกจร และแรงลม ดังนั้น การตรวจสอบกำลังของโครงสร้างสามารถดำเนินการต่อไปได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยข้อมูลของแรงดึงในสภาพที่ทำการตรวจวัดนี้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. M. Irvine, 1981, Cable Structures, MIT Press, Cambridge, MA.
- [2] A. Sriwongkham, 1997, Dynamic identification of axial force in short metallic cables, M. Eng thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [3] ตฤณ บุญงาม, 2554, การหาค่าแรงดึงของลวดอัดแรงในระบบคานชั้นส่วนโดยการตรวจวัดเชิงพลศาสตร์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์