



การวิเคราะห์แรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนา

ANALYSIS OF FORCE IN TENSION STRUCTURES OF BANGKOK ARENA STADIUM ROOF

รุ่งโรจน์ เทศนา¹ และนคร ภู่วโรดม²

¹วิศวกรโยธา สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร 10400

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12120

E-mail: rungroj.tessanah@gmail.com and pnakhorn@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการประเมินค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาด้วยแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ โดยค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงได้จากการคำนวณด้วยความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดระหว่างการก่อสร้าง และนำข้อมูลค่าแรงดึงที่ได้จากการตรวจวัดในขั้นต่าง ๆ ถึงขั้นตอนสุดท้ายมาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างค่าแรงดึงที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองโครงสร้างและจากการตรวจวัดในแต่ละเส้นมีค่าประมาณ 9% แต่ผลรวมแรงดึงของทุกเส้นในแต่ละขั้นตอนมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่เกิน 2% และเมื่อนำแบบจำลองโครงสร้างนี้ไปวิเคราะห์ในกรณีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร และกรณีการเพิ่มแรงกดของแรงลมกระทำกับแบบจำลองโครงสร้างจะส่งผลให้ค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงในแต่ละเส้นมีค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 2% และ 3% ตามลำดับ และสำหรับกรณีการเพิ่มแรงยกของแรงลมกระทำกับแบบจำลองโครงสร้างจะส่งผลให้ค่าแรงดึงในแต่ละเส้นมีค่าลดลงจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 7% ซึ่งสามารถนำแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิตินี้ไปใช้สำหรับการทำนายพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างรับแรงดึงในกรณีเนื่องจากแรงอื่น ๆ ได้ต่อไป

คำสำคัญ: โครงสร้างเคเบิล, สนามบางกอกอารีนา, แบบจำลองโครงสร้าง, ความถี่ธรรมชาติ

ABSTRACT

This paper presents analysis results of force in tension structures of Bangkok Arena Stadium roof using three-dimensional structural models. The tension in cable was determined from the measurement of natural frequencies during the construction. The identified forces from several stages of construction were used to calibrate the model for analysis. It was found that the maximum difference between the tension in a single cable from analysis and measurement was about 9% and the difference of the summation of tension in all investigated cables was about 2%. The study also examined on the additional effects of live load, wind pressure and wind suction by analyzing the structural model with the final tension. The increment of tension in each member was about 2% and 3% due to live load and wind pressure, respectively. It was also observed that the decrement of tension in each member was about 7% or less due to wind suction. Finally, this 3D structural model can be used for examination of load-carrying behavior of the structure from other load cases.

KEYWORDS: Cable Structures, Bangkok Arena Stadium, Structure Models, Natural Frequency

1. บทนำ

กรุงเทพมหานครได้ดำเนินการออกแบบและก่อสร้างสนามบางกอกอารีนา ณ เขตหนองจอก โดยลักษณะอาคาร มีความกว้าง 112 เมตร ยาว 116 เมตร โครงสร้างหลังคาเป็นโครงถักเหล็ก ไม่มีเสากลางและมีโครงสร้างรับแรงดึง (Pre-tensional bar) รองรับโครงถักหลังคาซึ่งยึดเข้ากับ pylon ที่มุม 4 ด้านของหลังคา และถ่ายแรงกลับไปยังช่วงหลังด้วยเสารับแรงดึงด้านหลัง pylon ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สนามบางกอกอารีนา

ในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างรับแรงดึง สำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะซับซ้อนเช่นอาคารนี้ มีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งได้กำหนดให้มีขั้นตอนย่อยจำนวน 9 ขั้นตอน โดยมีการให้แรงดึงกับชิ้นส่วนในแต่ละขั้นตอนย่อยเพียงบางส่วน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ แล้วเปลี่ยนไปให้แรงที่ส่วนอื่นในขั้นตอนต่อมา ซึ่งทำให้เกิดการปรับสมดุลใหม่ในโครงสร้าง และอาจมีผลเปลี่ยนค่าแรงดึงจากที่มีการดึงไว้ในขั้นตอนก่อน

ในงานวิจัยก่อนหน้า รุ่งโรจน์ (2557) [1] ได้ทำการหาค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาระหว่างการก่อสร้างด้วยการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติและคำนวณค่าแรงดึงจากทฤษฎีเชิงเส้นของการสั่นแบบอิสระของสายเคเบิล โดยผลจากการศึกษาที่สำคัญสรุปดังนี้ (ก) จากขั้นตอนการก่อสร้างที่มีการปรับแรงดึงในชิ้นส่วนโครงสร้างหนึ่ง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงในชิ้นส่วนอื่นด้วย เนื่องจากการปรับสมดุลใหม่ของระบบโครงสร้าง ซึ่งตรวจพบได้จากวิธีที่ใช้ศึกษา (ข) ผลรวมของแรงในโครงสร้างรับแรงดึงทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดในการออกแบบประมาณ 4% และ (ค) ค่าแรงดึงที่ตรวจวัดได้ในขั้นตอนสุดท้ายในบางเส้น มีค่าต่างจากค่าที่กำหนดในการออกแบบถึงมากกว่า 30% และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ตรวจพบมีค่าไม่เกิน 25% ของหน่วยแรงที่จุดคราก อย่างไรก็ตามผลการศึกษาก่อนยังขาดการวิเคราะห์ศึกษาแบบจำลองโครงสร้างเพื่อการตรวจสอบพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนักบรรทุกอื่น ๆ และสำหรับการบำรุงรักษาในอนาคต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อสร้างแบบจำลองของโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาที่ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการประเมินค่าแรงดึงจากการตรวจวัดในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง และทำการประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน

2. การวิเคราะห์หาค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติ

จากทฤษฎีเชิงเส้นของการสั่นแบบอิสระของสายเคเบิล สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามทิศทางการสั่น [2] กล่าวคือ การสั่นในแนวอนนอกระนาบ (out of plane) และการสั่นในระนาบ (in plane) ที่สั่นในแนวตั้งสำหรับชิ้นส่วนของหลังคาอาคารนี้ คือการสั่นในระนาบ ซึ่งหาความถี่ธรรมชาติในแต่ละประเภทการสั่นได้ดังนี้

2.1 การสั่นนอกระนาบ (out-of-plane motion)

สำหรับการสั่นแบบนอกระนาบของสายเคเบิล ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและสมบัติต่าง ๆ ของสายเคเบิลมีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ (1)

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1)$$

โดยที่ T คือแรงตึง (นิวตัน) m คือมวลต่อความยาว (กิโลกรัมต่อเมตร) L คือความยาว (เมตร) f_n คือความถี่ธรรมชาติ (รอบต่อวินาที หรือ Hz) ของโหมด n

2.2 การสั่นในระนาบ (in-plane motion)

สำหรับการสั่นแบบในระนาบของสายเคเบิล แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบการสั่นไหว (โหมด) ได้แก่ โหมดเลขคู่และโหมดเลขคี่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) โหมดเลขคู่ ได้แก่โหมด 2, 4, 6, ... ซึ่งเป็นโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบ ความถี่ธรรมชาติและสมบัติต่าง ๆ ของสายเคเบิลมีความสัมพันธ์เหมือนกับการสั่นนอกระนาบ ดังสมการที่ (2)

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2)$$

โดยที่ n เป็นโหมดเลขคู่ของความถี่ธรรมชาติ

ข) โหมดเลขคี่ ได้แก่โหมด 1, 3, 5, ... ซึ่งเป็นโหมดแบบสมมาตรในระนาบ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและสมบัติต่าง ๆ ของสายเคเบิล แสดงไว้ในสมการที่ (3)

$$f_n = \frac{\omega_*}{2\pi L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (3)$$

โดยที่ ω_* คำนวณจากสมการที่ (4), (5) และ (6)

$$\tan \frac{\omega_*}{2} = \frac{\omega_*}{2} - \frac{4}{\lambda_*^2} \left(\frac{\omega_*}{2} \right)^3 \quad (4)$$

$$\lambda_*^2 = (mgL \cos \theta / T)^2 L / (TL_{e^*} / EA) \quad (5)$$

$$L_{e^*} = L \left\{ 1 + (mgL \cos \theta / T)^2 / 8 \right\} \quad (6)$$

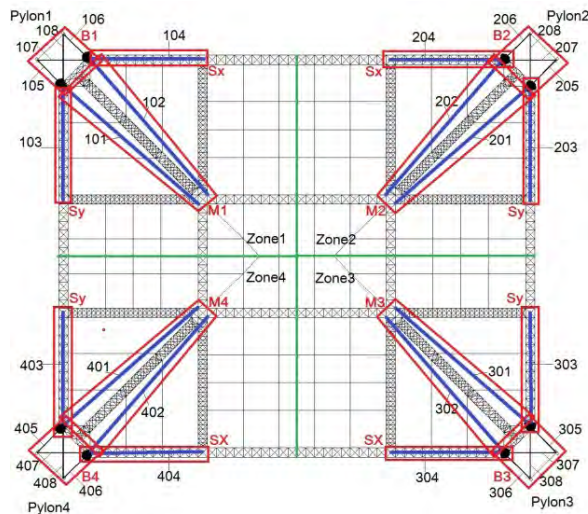
และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) E คือโมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตันต่อตารางเมตร) A คือพื้นที่หน้าตัดของเคเบิล (ตารางเมตร) และ θ คือมุมของสายเคเบิลวัดจากแนวนอน

3. วิธีการศึกษา

3.1 ลักษณะของโครงสร้างรับแรงดึง

โครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนา ใช้วัสดุเป็นท่อนเหล็กหน้าตัดกลม โดยแต่ละแนวมีจำนวน 4 เส้นค้ำกำลังแรงดึงที่จุดคราก (F_y) เท่ากับ 700 MPa ซึ่งการดำเนินการวิจัยได้ทำการตรวจวัดและคำนวณค่าแรงดึงเฉพาะกลุ่มด้านหน้า pylon และด้านข้าง pylon รวม 64 เส้น (อ้างอิงกับรูปที่ 2) โดยที่ในกลุ่มด้านหลัง pylon จำนวน 64 เส้นนั้นไม่ได้ทำการศึกษา ในขั้นตอน

การก่อสร้างมีการมีการปรับค่าแรงดึงทั้งหมด 9 ขั้นตอน แสดงในตารางที่ 1



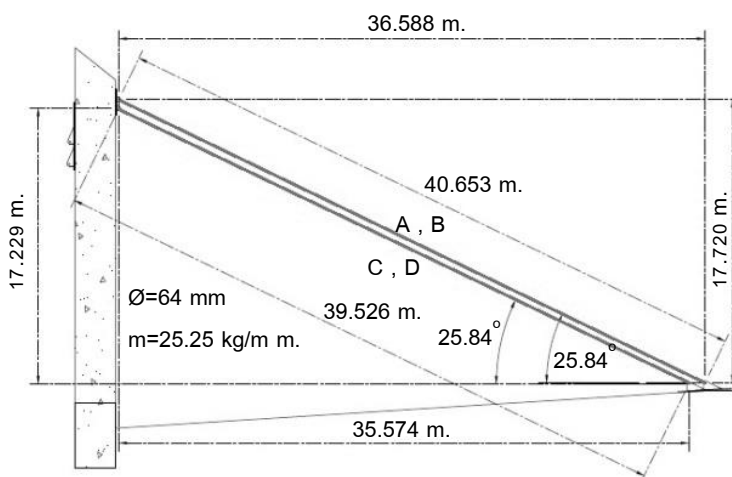
รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งโครงสร้างรับแรงดึงของกลุ่มต่างๆ

ตารางที่ 1 รายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้าง

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ติดตั้งโครงสร้างรับแรงดึงทั้งหมด 128 เส้น
2	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B3 ด้านหลัง pylon 3
3	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B4 ด้านหลัง pylon 4
4	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B2 ด้านหลัง pylon 2
5	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม B1 ด้านหลัง pylon 1
6	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม M2,4 ด้านหน้า pylon 2,4
7	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม M1,3 ด้านหน้า pylon 1,3
8	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม Sy ด้านข้าง pylon 1-4
9	ปรับค่าแรงดึงกลุ่ม Sx ด้านข้าง pylon 1-4

3.2 การคำนวณค่าแรงดึงจากการตรวจวัด

การหาค่าแรงดึงในขั้นตอนต่างๆ ของการก่อสร้างได้จากการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของเคเบิลแต่ละเส้น และคำนวณด้วยทฤษฎีในหัวข้อที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงเส้น 101A ที่มีลักษณะตามรูปที่ 3 และข้อมูลการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติ (ระหว่างในขั้นตอนที่ 1) แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 ต่อโหมดที่ 1 สำหรับการสั่นในระนาบ มีค่าต่างจากค่า 2.0 อย่างมาก แต่อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติแบบอื่นๆ ที่แสดงในตารางมีค่าประมาณ 2.0 แสดงถึงพฤติกรรมการสั่นที่แตกต่างของการสั่นแบบสมมาตรในระนาบ



รูปที่ 3 รายละเอียดของโครงสร้างรับแรงดึงกลุ่ม 101

ตารางที่ 2 ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างรับแรงดึงเส้น 101A ในขั้นตอนที่ 1 ที่ได้จากการตรวจวัด (Hz)

free vibration	mode					remark	
	1	2	3	4	5	f2/f1	f4/f2
out-of-plane	1.171	2.361	3.586	4.841	6.123	2.016	2.050
in-plane	1.316	2.323	3.532	4.753	6.031	1.765	2.046

ก) ค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติของการสั่นแบบนอกระนาบของเส้น 101A คำนวณจากสมการที่ (1) ได้ดังนี้

$$T = (4 \times 25.25 \times 40.653^2 \times 1.171^2 / 1^2) / 1,000 = 228.887 \text{ kN}$$

ข) ค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติของโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบของเส้น 101A คำนวณจากสมการที่ (2) ได้ดังนี้

$$T = (4 \times 25.25 \times 40.653^2 \times 2.323^2 / 2^2) / 1,000 = 225.188 \text{ kN}$$

ค) ค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติของโหมดแบบสมมาตรในระนาบของเส้น 101A คำนวณจากสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$E = 209.186 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$A = 0.003217 \text{ m}^2$$

$$L_e^* = 40.661 \text{ m}$$

$$\lambda_e^2 = 4.840$$

$$\tan \frac{\varpi_*}{2} = \frac{\varpi_*}{2} - \frac{4}{4.840} \left(\frac{\varpi_*}{2} \right)^3$$

จาก Trial and Error ได้ $\varpi_* = 3.706$

$$T = 207.734 \text{ kN}$$

ง) ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงจากความถี่ธรรมชาติของเส้น 101A ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงของเส้น 101A ในขั้นตอนที่ 1

out-of-plane	in-plane		% difference	
	antisymmetric	symmetric	(To-Ta)/To	(Ta-Ts)/Ta
To (kN)	Ta (kN)	Ts (kN)	(To-Ta)/To	(Ta-Ts)/Ta
228.887	225.188	207.734	1.62	7.75

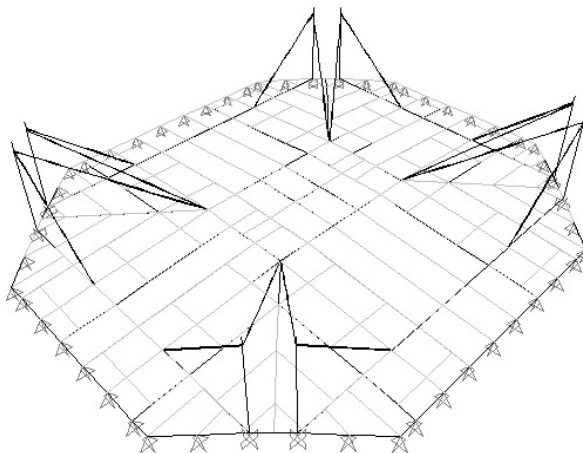
จากตารางที่ 3 ค่าแรงดึงที่ได้จากโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบมีความแตกต่างกับที่ได้จากการสั่นนอกระนาบเพียงเล็กน้อย ประมาณ 1.62% และค่าแรงดึงที่ได้จากโหมดแบบสมมาตรในระนาบมีความแตกต่างกับที่ได้จากโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบ ประมาณ 7.75% อาจเนื่องมาจากค่า m , E , และ θ ที่ไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องในภาคสนามได้

สำหรับการหาค่าแรงดึงให้มีความถูกต้อง คำนวณได้ง่าย และใช้ตัวแปรเพื่อการคำนวณน้อย ควรเลือกใช้การหาค่าแรงดึงที่คำนวณจากความถี่ธรรมชาติของการสั่นนอกระนาบหรือโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบ โดยค่าแรงดึงที่นำมาสร้างแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติในการศึกษา ใช้ค่าแรงดึงที่ได้จากโหมดแบบไม่สมมาตรในระนาบระหว่างขั้นตอนที่ 5-9 ดังแสดงในตารางที่ 4

3.3 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ

แบบจำลองโครงสร้างหลังคาและโครงสร้างรับแรงดึงสนามบางกอกอารีนาสร้างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติ SAP2000 [3] ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้โคนเสา pylon มีจุดรองรับแบบยึดแน่น ส่วนที่ปลายเสาที่อยู่โดยรอบหลังคาใช้เป็นจุดรองรับแบบยึดหมุน สำหรับโครงสร้างรับแรงดึงใช้เป็นชิ้นส่วนประเภทเคเบิล ส่วนน้ำหนักจากแป วัสดุผนังหลังคาและทางเดินใต้หลังคา ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างเปลือกบาง (shell) ที่มีค่า 1.024 kN/m^2 กระจายเต็มพื้นที่หลังคา

ในการสร้างโครงสร้างรับแรงดึงของแบบจำลองโครงสร้างด้วยเคเบิลนั้น ต้องกำหนดลักษณะรูปร่างของเคเบิล(cable geometry) ให้ถูกต้องตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้น โดยการเลือกใช้รูปแบบเคเบิลชนิดที่ทราบค่าแรงดึง ณ ตำแหน่งเริ่มต้น (cable-tension at i-end) และค่าพารามิเตอร์ของเคเบิลต่างๆ ที่ต้องกำหนดเพิ่มเติมได้แก่ จำนวนชิ้นส่วนย่อยในเคเบิลกำหนดเป็น 32 ชิ้นส่วน เพื่อความละเอียดในการคำนวณ และค่าแรงดึงของเคเบิลที่ตำแหน่งเริ่มต้นให้ใช้ค่าแรงดึงที่ได้จากการตรวจวัดในขั้นตอนที่ 5 ของแต่ละเส้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่กำหนดเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของแบบจำลองโครงสร้าง



รูปที่ 4 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ

ตารางที่ 4 ค่าแรงดึงเฉลี่ยแต่ละกลุ่มในชั้นตอนที่ 5 ถึงชั้นตอนสุดท้ายที่ได้จากการตรวจวัด [1]

group	stage5	stage6	stage7	stage8	stage9
	T_i (kN)	T_i (kN)	T_i (kN)	T_i (kN)	T_F (kN)
101	311.112	304.920	334.454	335.171	328.548
102	381.522	375.274	369.660	370.738	365.250
103	177.015	171.119	170.856	186.035	185.310
104	274.956	281.072	270.032	273.370	280.939
201	364.924	382.186	367.094	364.291	361.990
202	399.162	397.170	390.405	387.622	385.378
203	137.266	135.785	135.552	143.543	148.780
204	256.621	260.742	249.758	253.156	260.555
301	371.203	373.489	381.791	375.435	363.453
302	363.462	368.066	380.776	380.260	366.253
303	121.357	124.706	115.335	162.220	161.162
304	259.380	264.238	255.382	247.447	263.308
401	414.098	416.637	404.992	410.099	414.033
402	358.999	373.777	359.297	366.482	351.271
403	151.765	155.674	146.723	155.521	158.294
404	228.579	226.550	228.589	227.991	253.987
Total	18,286	18,446	18,243	18,558	18,594

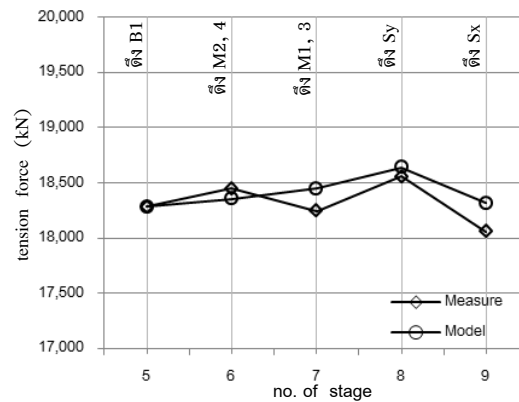
4. ผลจากแบบจำลองโครงสร้าง

ผลการศึกษาแสดงเป็นค่าแรงดึงในแต่ละชั้นส่วนที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้าง ค่าแรงดึงที่ใช้ในการอภิปรายต่อไปนี้เป็นค่าแรงดึงจากการตรวจวัดภาคสนามในระหว่างการก่อสร้าง (T_i) แรงดึงที่ตรวจวัดได้ในชั้นตอนสุดท้าย (T_F) แรงดึงที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระหว่างการก่อสร้าง (T_M) แรงดึงที่ได้จากแบบจำลองในชั้นตอนสุดท้าย (T_{MF}) แรงดึงที่ได้จากแบบจำลองที่รวมผลจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร (T_{LL}) แรงดึงที่ได้จากแบบจำลองที่รวมผลจากแรงกดของแรงลม (T_{WC}) และแรงดึงที่ได้จากแบบจำลองที่รวมผลจากแรงยกของแรงลม (T_{WU})

4.1 ผลการเปรียบเทียบแรงจากการวิเคราะห์และการตรวจวัด

ค่าผลรวมของค่า T_M ได้รับการเปรียบเทียบกับค่าผลรวมของ T_i ทุกเส้นที่ทำการตรวจวัดในระหว่างชั้นตอนที่ 5-9 ดังรูปที่ 5 สำหรับผลรวมของแรงในแนวของแต่ละเส้น ซึ่งค่าความแตกต่างแบบบวกและลบสูงสุดของผลรวมแรงดึงทั้งหมดระหว่างชั้นตอนที่ 5-9 มีค่าประมาณ -0.01% -0.49% +1.11% +0.43% และ +1.42% ตามลำดับ ตามแสดงในท้ายตารางที่ 5

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้าง ได้นำค่าแรงดึงที่ได้จากการตรวจวัดในชั้นตอนที่ 5-9 มาเป็นข้อมูลของการสร้างแบบจำลอง ผลของแรงดึงเฉลี่ยจากแบบจำลองในแต่ละกลุ่ม (4 เส้นต่อกลุ่ม) ระหว่างชั้นตอนที่ 5-9 แสดงไว้ในตารางที่ 5 ในรูปของค่าความแตกต่างไปจาก T_i ของกลุ่ม



รูปที่ 5 ผลรวมค่าแรงดึงทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัด

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงเฉลี่ยแต่ละกลุ่มที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัด (% difference)

group	% difference of T_M from T_i				
	stage5	stage6	stage7	stage8	stage9
101	-0.006	+2.016	-0.010	-2.595	-0.625
102	-0.007	+1.651	+0.003	-0.286	+1.204
103	-0.003	+3.447	-2.196	-0.003	+0.394
104	-0.005	-2.181	+3.985	+2.723	0
201	-0.002	-0.011	+4.087	+3.331	+3.992
202	-0.005	0	+1.726	+2.452	+2.726
203	-0.002	-4.237	-4.053	-0.004	-3.520
204	-0.004	-1.211	+3.125	+1.754	-0.001
301	-0.004	-0.624	-0.004	-3.353	-0.172
302	-0.014	-1.272	-0.005	+0.132	+2.498
303	-0.004	-2.649	+1.550	-0.009	+0.660
304	-0.010	-1.830	-1.861	+1.301	-0.004
401	-0.002	-0.002	+2.864	+1.097	+0.134
402	-0.006	-0.007	+4.016	+1.977	+2.454
403	-0.002	-3.215	+2.744	-0.001	-1.739
404	-0.005	-2.348	-3.201	-2.934	-0.009
Max in Bar	-0.002	+3.730	+4.673	+5.077	+8.799
Min in Bar	-0.025	-5.160	-4.728	-8.138	-6.287
Total	-0.005	-0.485	+1.113	+0.430	+1.420

ผลของค่าที่แตกต่างสูงสุดในแต่ละเส้นแสดงไว้ในท้ายตารางสำหรับค่าแตกต่างแบบบวกและลบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งในแต่ละเส้นระหว่างขั้นตอนที่ 5-9 นั้น มีค่าประมาณ -0.03% -5.16% -4.73% -8.13% และ +8.80% ตามลำดับ

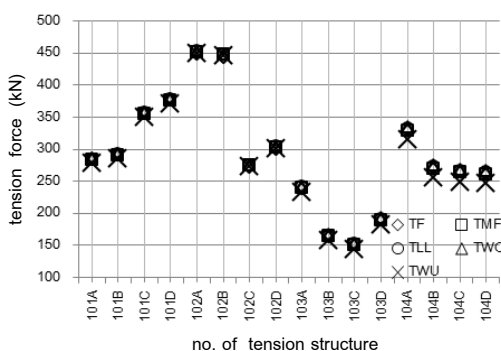
4.2 การทำนายพฤติกรรมโครงสร้างรับแรงดึงจากแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ได้จากกรณีต่าง ๆ (T ต่าง ๆ) แสดงดังรูปที่ 6 สำหรับแต่ละเส้นสำหรับเสาทั้ง 4 มุมหลังคาตามลำดับ โดยมีผลที่สำคัญดังนี้

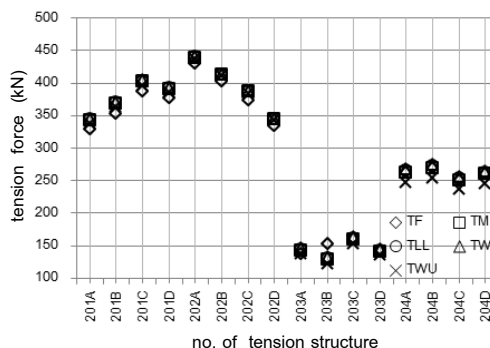
- ในขั้นตอนการก่อสร้างสุดท้าย ค่าแรงจากการตรวจวัด T_F ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองการวิเคราะห์ T_{MF} นั่นคือแบบจำลองที่สร้างสามารถทำนายพฤติกรรมแรงดึงได้อย่างค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม ค่า T_{MF} อาจมีความแตกต่างกับ T_F ในบางเส้น ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 6(ง) โดยค่า T_F มีค่าสูงกว่าในเส้น 401B แต่มีค่าต่ำกว่าในเส้น 401C และ 401D เป็นต้น ซึ่งอาจเนื่องจากสภาพของโครงสร้างจริงที่แตกต่างไปจากแบบจำลอง

- ค่า T_{LL} และ T_{WC} มีค่ามากกว่า T_{MF} ของแต่ละเส้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.09%–1.31% และ 0.14%–2.09% ตามลำดับ นั่นคือเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (+50 kg/m²) หรือแรงกดของแรงลม (+80 kg/m²) กระทบกับแบบจำลองโครงสร้างจะส่งผลให้ค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงมีค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 2% และ 3% ตามลำดับ และพบว่าแต่ละเส้นมีค่าหน่วยแรงดึงอยู่ในช่วงระหว่าง 12.23%–28.84% และ 12.23%–28.94% ของค่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก ตามลำดับ

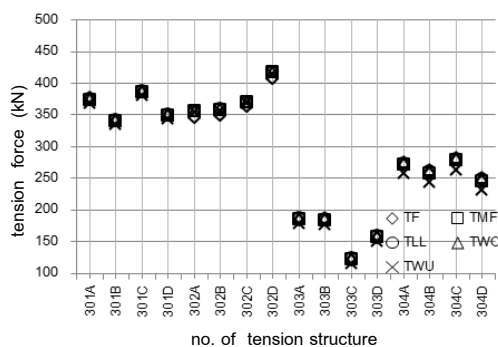
- ค่า T_{WU} มีค่าน้อยกว่า T_{MF} ของแต่ละเส้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.44%–6.53% นั่นคือเมื่อมีการเพิ่มแรงยกของแรงลม (-250 kg/m²) กระทบกับแบบจำลองโครงสร้างจะส่งผลให้ค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงมีค่าแรงดึงลดลงจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 7% และมีค่าหน่วยแรงดึงอยู่ในช่วงระหว่าง 12.13%–27.86% ของค่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก



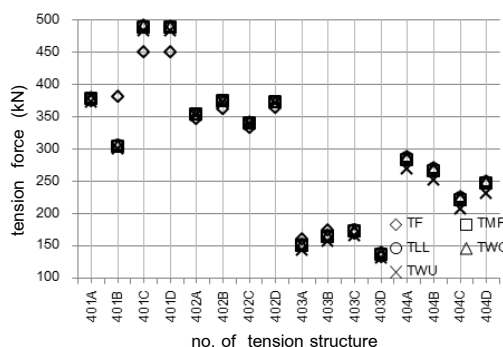
(ก) ค่าแรงดึงของเส้น no.101A-104D



(ข) ค่าแรงดึงของเส้น no.201A-204D



(ค) ค่าแรงดึงของเส้น no.301A-304D



(ง) ค่าแรงดึงของเส้น no.401A-404D

รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงในแต่ละเส้น

5. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนอผลการประเมินค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาจากแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ เพื่อประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมและการวางแผนบำรุงรักษาโครงสร้างต่อไป ผลจากการศึกษาที่สำคัญสรุปดังนี้

ก) ค่าแรงที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างระหว่างขั้นตอนที่มีการปรับค่าแรงดึงและการตรวจวัดโดยตรง (ขั้นตอนที่ 5-9) ในบางเส้นมีความแตกต่างจากการตรวจวัดสูงสุดประมาณ 9% แต่เมื่อพิจารณาผลรวมแรงดึงทั้งหมดของแต่ละขั้นตอนนั้น พบว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่เกิน 2%

ข) จากแบบจำลองโครงสร้าง เมื่อนำไปวิเคราะห์ในกรณีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (50 kg/m^2) และกรณีการเพิ่มแรงกดของแรงลม (80 kg/m^2) ส่งผลให้ค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงในแต่ละเส้นนั้น มีค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 2% และ 3% ตามลำดับ สำหรับกรณีการเพิ่มแรงยกของแรงลม (250 kg/m^2) ส่งผลให้ค่าแรงดึงของโครงสร้างรับแรงดึงในแต่ละเส้นนั้น มีค่าแรงดึงลดลงจากขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิน 7% โดยทุกเส้นมีหน่วยแรงไม่เกิน 30% ของค่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

ค) วิธีการวิเคราะห์ที่แสดงสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนค่าแรงในชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างดีและสามารถนำแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ นี้ไปใช้สำหรับการทำนายพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างรับแรงดึงในกรณีเนื่องจากมีแรงอื่น ๆ มากกระทบกับโครงสร้างได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] รุ่งโรจน์ เทศนา และ นคร ภู่วโรดม (2557). การหาค่าแรงในโครงสร้างรับแรงดึงของหลังคาสนามบางกอกอารีนาระหว่างการก่อสร้าง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 25, ฉบับที่ 4, 35-43.
- [2] H. M. Irvine, 1981, Cable Structures, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 87-101.
- [3] Computers and Structures, Inc., "CSI Analysis Reference Manual" Berkeley, California, 2011.