

พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานพระรามเก้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นาย วรวัฒน์ ยี่งม โนกิจ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

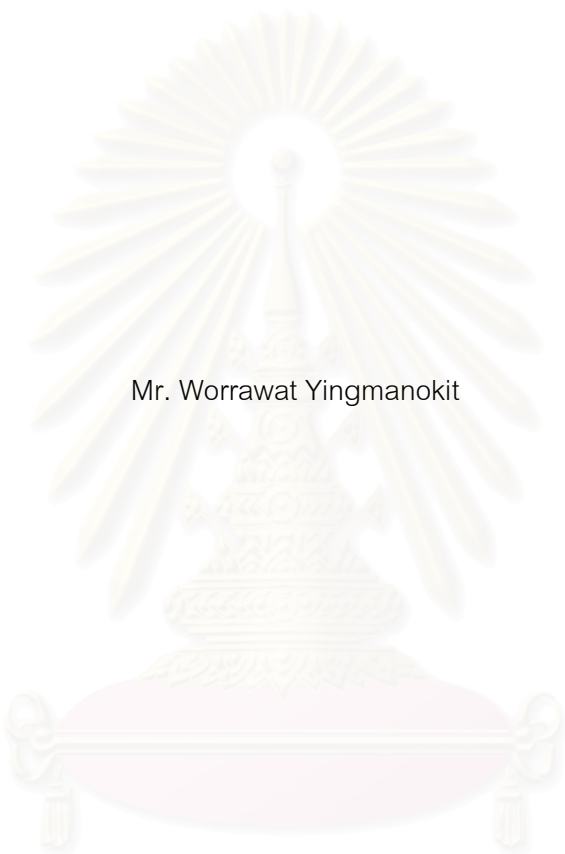
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRUCTURAL BEHAVIOR OF RAMA IX BRIDGE BY FINITE ELEMENT METHOD



Mr. Worrawat Yingmanokit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

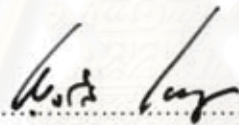
Copyright of Chulalongkorn University

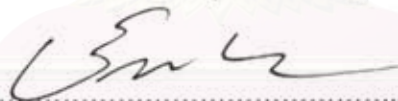
หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานพระรามเก้า โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	นาย วรวัฒน์ ชัยมโนกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชีรพงศ์ เสนจันทร์ไชย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... กณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พุฒศักดิ์ เพียรสุสม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีรพงศ์ เสนจันทร์ไชย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสนัจ อุดมวรรธน์)

นาย วรวัฒน์ ยิ้มโนกิจ : พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานพระรามเก้าโดยวิธีไฟไนต์เอล
เมนต์. (STRUCTURAL BEHAVIOR OF RAMA IX BRIDGE BY FINITE ELEMENT METHOD)
อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ชีรพงศ์ แสนจันทร์ภูมิไชย, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ฉัตรพันธ์
จินตนาภักดี, 71 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานพระรามเก้าโดยวิธีไฟไนต์เอล
เมนต์ โดยพฤติกรรมของสะพานพระรามเก้าจะถูกจำลองด้วยโปรแกรม SAP2000 การสร้าง
แบบจำลองมีขั้นตอนเริ่มจากการกำหนดพิกัดของจุดต่อของชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง
จากนั้นกำหนดการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนต่างๆและกำหนดคุณสมบัติของแต่ละชิ้นส่วนให้มีลักษณะ
ตามแบบรายละเอียดที่ได้จากผู้ออกแบบ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
โดยการตรวจสอบนี้ จะตรวจสอบสถานะสมดุลของแรง เปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์และ
แรงในสายเคเบิลในแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการตรวจวัดในภาคสนามและแบบจำลองของ
บริษัท AES Group และ บริษัท IMMS การเปรียบเทียบค่าความเครียดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใน
ส่วนของชิ้นส่วนรับแรงดึงจากแบบจำลองกับค่าจากการตรวจวัดจริง จากการตรวจสอบความ
ถูกต้องดังกล่าวพบว่า มีความคลาดเคลื่อนในค่าแรงดึงในสายเคเบิลและคุณสมบัติทางพลศาสตร์
ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความไวของคุณสมบัติของโครงสร้างต่อรายละเอียดในการสร้างแบบจำลอง
เพื่อทำการปรับแก้แบบจำลองให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการปรับแก้จะคำนึงถึงสาเหตุที่อาจทำ
ให้โครงสร้างจริงคลาดเคลื่อนจากแบบรายละเอียดของผู้ออกแบบซึ่งได้แก่การเพิ่มความหนาของ
แอสฟัลต์และการปรับแรงดึงในเคเบิล จึงได้ทำการปรับแก้รายละเอียดดังกล่าวในแบบจำลองเพื่อให้
แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES จากนั้นทำการ
ตรวจสอบแบบจำลองที่ปรับแก้แล้วอีกครั้ง โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลองที่ไม่ได้มี
การปรับแก้และที่ปรับแก้แล้วกับผลการตรวจวัดภาคสนาม จากนั้นนำแบบจำลองที่ปรับแก้แล้วซึ่ง
น่าจะมีความถูกต้องมากขึ้น ไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของ โครงสร้างสะพานพระรามเก้า
ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ จากการวิเคราะห์พบว่า ความเค้นในชิ้นส่วนรับแรงดึงเนื่องจาก
น้ำหนักบรรทุกคานตัวและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO มีค่ามากที่สุด
ประมาณ 1,783 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่บริเวณช่วงสะพานด้านข้าง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิติ..... กรวิวัฒน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4770437921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: BRIGDE/ RAMA IX / FINITE ELEMENT / CABLE / SAP 2000

WORRAWAT YINGMANOKIT: STRUCTURAL BEHAVIOR OF RAMA IX BRIDGE
BY FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
TEERAPONG SENJUNTICHAH Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF.
CHATPAN CHINTANAPAKDEE Ph.D., 71 pp.

This research is to study structural behavior of the Rama IX Bridge by utilizing the finite element method and SAP2000 software in order to monitor and perform necessary bridge maintenance. The mathematical model was constructed by first specifying coordinates of all joints and connecting joints by appropriate structural elements. Then, properties of all elements were assigned according to designer drawing. The model was then verified by checking equilibrium of forces, comparing dynamic characteristics and cable tension forces against field measurement by AES and IMMS companies, and comparing tensile strain in a tension tube due to a truck load test predicted by the model and the field measurement. It is found that the bridge model is in equilibrium and tensile strain in a tension tube can be accurately predicted, but the natural periods of vibration modes and cable tension forces from the model are slightly different from the field measurements. Sensitivity analysis was performed in an attempt to adjust the model to better match the field measurements by considering possible variations of actual construction from designer drawing such as thickness of the asphalt pavement and pre-tensioning of cables. The model was then adjusted for these effects, and the characteristics of the adjusted model were again verified and compared to the original model. The adjusted model, supposedly more accurate model, was used in structural analysis to determine the internal forces and stresses to evaluate the bridge for necessary strengthening and repair. It was found that the maximum stress in tension tubes due to dead loads and AASHTO live loads is about 1783 kg/cm^2 in back-span region.

Department : Civil Engineering
Field of study : Civil Engineering
Academic year : 2007

Student's signature : *Worrawat*
Advisor's signature : *Teerapong*
Co-advisor's signature : *Chatpan*

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ที่อบรม สั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนจนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชา พื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากการให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการศึกษาและการ แก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ โดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ดิไชย และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี หากปราศจากความกรุณา รับประทานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยรองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุขสม และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. พิเศษ อุดมวรรรัตน์ ในความกรุณารับประทานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านความรู้ คำแนะนำต่างๆจนถึงอนุญาตให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การทาง พิเศษแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ติดต่อประสานงาน ขอขอบคุณพี่ๆที่บริษัท IMMS ทุก ท่านที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือด้านข้อมูลในหลายๆส่วนและการต้อนรับเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิศวกรรมโยธา คุณ วรรณมา ช้างเกิด ชูการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยประสานงานด้านระเบียบการจบ การศึกษา คุณ สุจรรยา จินดาวาษ์ บรรณารักษ์ห้องสมุดภาควิศวกรรมโยธา และหน่วยงาน บรรณารักษ์ประจำห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการ สืบค้นข้อมูลในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท และปริญญาเอก รุ่นพี่และรุ่นน้อง สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกคนที่ร่วมศึกษาเล่าเรียนด้วยกันมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	7
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	11
บทที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	
3.1 การตรวจสอบสภาพสมดุลของแรง.....	25
3.2 การเปรียบเทียบแรงภายในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุก.....	26
3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์.....	29
3.4 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในส่วนของชิ้นส่วนรับแรงดึง.....	34
บทที่ 4 การปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
4.1 ความไวของแรงในชิ้นส่วนต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ในโครงสร้างสะพานพระรามเก้า.....	40
4.2 การตรวจสอบสภาพสมดุลของแรงหลังจากการปรับแก้แบบจำลอง.....	48
4.3 การเปรียบเทียบแรงภายในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกหลังจากการ ปรับแก้แบบจำลอง.....	52

4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์หลังการปรับแก้แบบจำลอง.....	53
4.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงหลังการปรับแก้แบบจำลอง.....	54
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานพระรามเก้า	
5.1 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึง.....	60
5.2 ความเค้นในชิ้นส่วนรับแรงดึง.....	63
5.3 แรงในเคเบิล.....	66
5.4 แรงปฏิกิริยาที่ฐาน.....	67
บทที่ 6 สรุปผล.....	68
รายการอ้างอิง.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9..... 6

ตารางที่ 1.2 ผลการปรับแก้สุดท้ายของตัวแปรจากกระบวนการปรับแก้
ของบริษัท IMMS.....6

ตารางที่ 2.1 การกำหนดคุณสมบัติของเคเบิล.....18

ตารางที่ 2.2 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 1.....20

ตารางที่ 2.3 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 2.....21

ตารางที่ 2.4 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 3.....22

ตารางที่ 2.5 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 4.....23

ตารางที่ 3.1 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของแบบจำลอง.....26

ตารางที่ 3.2 แรงดึงของเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว.....28

ตารางที่ 3.3 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9.....30

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กับคาบธรรมชาติ.....41

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กับคาบธรรมชาติโดยเทียบเป็นร้อยละ.....42

ตารางที่ 4.3 คาบธรรมชาติที่ได้ก่อนและหลังจากการปรับคุณสมบัติของจุดต่อ
และแรงดึงในเคเบิล.....44

ตารางที่ 4.4 แรงปฏิกิริยาที่ได้ก่อนและหลังจากการปรับคุณสมบัติของจุดต่อ
และแรงดึงในเคเบิล.....47

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ใช้ในการใส่ค่าความเครียดให้กับแบบจำลองหลังการปรับแก้.....48

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวก่อน
และหลังปรับแก้แบบจำลองกับ บริษัท AES, IMMS.....49

ตารางที่ 4.7 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของแบบจำลองหลังการปรับแก้.....52

ตารางที่ 4.8 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9
หลังการปรับแก้.....53

ตารางที่ 5.1 แรงมากที่สุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ.....62

ตารางที่ 5.2 ความเค้นที่มีค่ามากที่สุดแต่ละสถานะ.....65

ตารางที่ 5.3 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของแบบจำลองเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก.....67

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1(ก) ภาพของสะพานพระรามเก้า.....	1
รูปที่ 1.1(ข) แบบจำลองโครงสร้างสะพานพระราม9.....	1
รูปที่ 1.2 การตรวจสอบสภาพหาความเสียหายชิ้นส่วน 1 BUE-2 Joint 2 ของ สะพานพระรามเก้า.....	2
รูปที่ 1.3 การแปลงสัญญาณจากความเร็วกับเวลา.....	4
รูปที่ 1.4 ตำแหน่งของการติดตั้งหัววัดความเร็ว.....	4
รูปที่ 2.1 ระดับชั้นความเร็วของชิ้นส่วนแบบเฟรม.....	11
รูปที่ 2.2 ระดับชั้นความเร็วของชิ้นส่วนแบบแผ่น โคง (shell element).....	12
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของสะพานพระรามเก้า.....	13
รูปที่ 2.4 จุดกำเนิดของแบบจำลองโครงสร้างสะพานพระราม 9.....	14
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการระบุชื่อของจุดต่อ.....	14
รูปที่ 2.6 การกำหนดชื่อของจุดต่อ.....	14
รูปที่ 2.7 การกำหนดชื่อของชิ้นส่วนแบบคาน.....	15
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการแสดงชื่อของชิ้นส่วนแบบคาน.....	15
รูปที่ 2.9 การกำหนดชื่อชิ้นส่วนแบบแผ่น โคง.....	16
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการกำหนดชื่อชิ้นส่วนแบบแผ่น โคง.....	16
รูปที่ 2.11 การระบุชื่อและตำแหน่งของเคเบิล.....	17
รูปที่ 2.12 ชนิดของหน้าตัดของคานขวาง.....	19
รูปที่ 2.13 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 1.....	20
รูปที่ 2.14 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 2.....	21
รูปที่ 2.15 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 3.....	22
รูปที่ 2.16 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 4.....	0.....23
รูปที่ 2.17 หน้าตัดแปลงแอสฟัลต์เป็นเหล็ก.....	24
รูปที่ 3.1 ชื่อจุดต่อที่ฐานของโครงสร้างสะพาน.....	25
รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลแต่ละเส้นจากแบบจำลอง.....	27
รูปที่ 3.3 การเคลื่อนตัวของสะพานในแต่ละรูปร่างของโหมด.....	30
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของชิ้นส่วนที่ทำการวิเคราะห์หาแรงภายใน.....	34
รูปที่ 3.5 จุดต่อที่ใช้ในแบบจำลองและตำแหน่งที่รถบรรทุกวิ่ง.....	35
รูปที่ 3.6 ภาพขยายน้ำหนักบรรทุก 1 กิโลกรัมกระทำต่อสะพานผ่านแนวจุดที่ 1.....	35

รูปที่ 3.7 เส้นอิทธิพลของแรงส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแรง กระทำแนวจุดต่อที่ 1.....	36
รูปที่ 3.8 เส้นอิทธิพลของแรงส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแรง กระทำแนวจุดต่อที่ 2.....	36
รูปที่ 3.9 เส้นอิทธิพลของแรงส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแรง กระทำแนวจุดต่อที่ 4.....	37
รูปที่ 3.10 การถ่ายแรงเข้าสู่จุดต่อตามยาวของสะพาน โดยใช้โปรแกรม SAP2000.....	37
รูปที่ 3.11 การถ่ายแรงเข้าสู่จุดต่อตามขวางของสะพาน โดยใช้โปรแกรม SAP2000.....	38
รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง).....	38
รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง).....	39
รูปที่ 4.1 การปรับสัมประสิทธิ์ตัวคูณน้ำหนักและมวลของพื้น.....	41
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงในสายเคเบิลที่มีการปรับคุณสมบัติของจุดต่อและ ปรับแรงดึงในเคเบิล.....	45
รูปที่ 4.3 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่มีการปรับคุณสมบัติของจุดต่อ.....	46
รูปที่ 4.4 แรงในสายเคเบิลก่อนและหลังการปรับแก้แบบจำลอง AES และ IMMS.....	51
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE หลังปรับแก้แบบจำลอง (กำหนด ความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง).....	54
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE หลังปรับแก้แบบจำลอง (กำหนด ความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง).....	55
รูปที่ 5.1 น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่ตามมาตรฐาน AASHTO ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	57
รูปที่ 5.2 น้ำหนักบรรทุกแบบจุดมาตรฐาน AASHTO ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	57
รูปที่ 5.3 การถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุก 26 ตัน ลงแต่ละเพลลา.....	58
รูปที่ 5.4 การแบ่งกรณีที่น้ำหนักบรรทุกทุกวงในในแต่ละช่องทางจราจร.....	59
รูปที่ 5.5 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกตัวและน้ำหนัก บรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO.....	60
รูปที่ 5.6 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงในสถานะภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกหนัก 26 ตัน.....	61

รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของแรงในชั้นรับแรงดึง.....62
หน้า

รูปที่ 5.8 ความเค้นในชั้นรับแรงดึงภายใต้น้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนัก
บรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO.....63

รูปที่ 5.9 ความเค้นในชั้นรับแรงดึงในสภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกหนัก
26 ตัน.....64

รูปที่ 5.10 แรงในเคเบิลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกจรตาม
มาตรฐาน AASHTO.....66



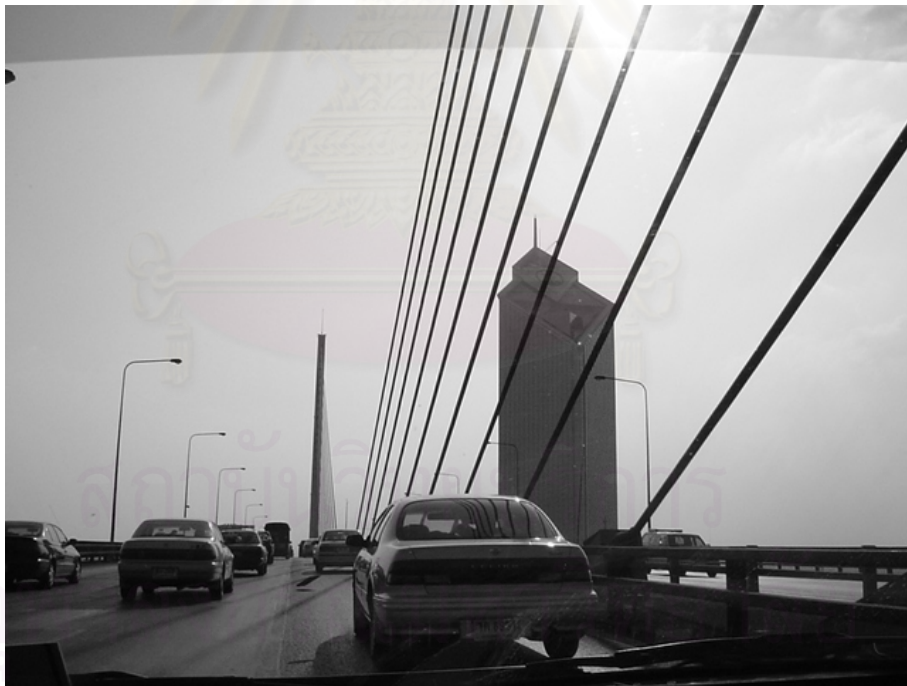
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

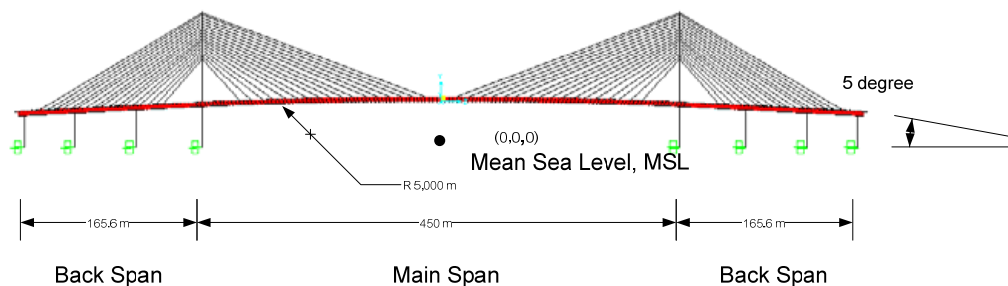
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

สะพานพระรามเก้าเป็นสะพานที่สร้างขึ้นเพื่อการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างฝั่งกรุงเทพมหานครกับธนบุรี (บริเวณเขตพระราม 3 และเขตราษฎร์บูรณะ) รองรับช่องจราจรได้ 6 ช่องจราจร โครงสร้างหลักของสะพานเป็นสะพานขึง 3 ช่วง โดยมีระยะช่วงกลาง (main span) ยาว 450 เมตร และมีระยะด้านข้างทั้งสองข้าง (back span) ยาวข้างละ 165.6 เมตร ดังรูปที่ 1.1(ก) และรูปที่ 1.1(ข) โครงสร้างดิ่งที่กล่าวมาจะถูกยึดไว้ด้วยระบบเคเบิลที่เรียกว่า สะพานขึงระนาบเดียว (single plane cable-stayed) ยึดในแนวกึ่งกลางของสะพาน โดยอีกปลายข้างหนึ่งของเคเบิลจะถูกยึดไว้กับเสาขึง (pylon) แต่ละข้างของเสาขึงมีสายเคเบิล (cable) ยึดอยู่ 17 เส้น (ทั้งหมด 68 เส้น)



รูปที่ 1.1(ก) ภาพของสะพานพระรามเก้า



รูปที่ 1.1(ข) แบบจำลองโครงสร้างสะพานพระราม 9

เนื่องจากปัจจุบันสะพานพระรามเก้าถูกใช้เป็นเส้นทางหลักในการจราจร และจากการใช้งานสะพานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจเกิดความชำรุดเสียหายในบางชิ้นส่วน ดังนั้นจึงต้องมีการบำรุงรักษาและซ่อมแซมสะพาน ซึ่งส่วนหนึ่งในการซ่อมแซมสะพานนี้จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของสะพานขึ้นมาเพื่อจะทำได้ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมและทราบค่าแรงในชิ้นส่วนต่างๆจึงจะทำให้สามารถทำการซ่อมแซมสะพานนั้นได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1.2 การตรวจสอบสภาพหาความเสียหายชิ้นส่วน 1 BUE-2 Joint 2 ของสะพานพระรามเก้า

รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นว่าจากการตรวจสอบสะพานหาความเสียหายในชั้นส่วนรับแรงดึง ชั้นส่วนนี้คือชั้นส่วนที่ 1BUE-2 จุดต่อที่ 2 ของสะพานพระรามเก้า ดังนั้นหากเราทราบแรงในบริเวณดังกล่าวจะทำให้เราทราบได้ว่า บริเวณนั้นเกิดหน่วยแรงที่สูงเกินไปหรือไม่ หากเกิดความบกพร่องอันเนื่องมาจากการรับแรงจริงจะได้ดำเนินการซ่อมแซมได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

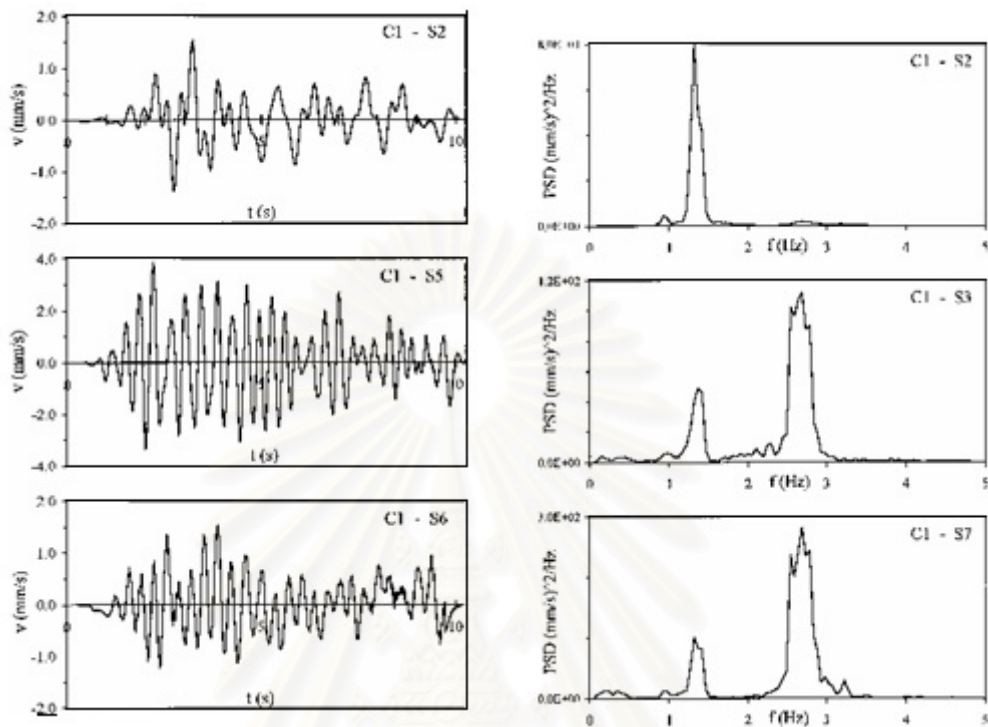
ในการศึกษาเพื่อซ่อมแซมสะพานมีความจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานจริง และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลงานวิจัยที่เคยทำมาที่ใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานจริง

Xu และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษารวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน Tsing Ma bridge เพื่อต้องการจะทราบคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน โดยทำการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง เพื่อต้องการจะออกแบบและทราบแรงในชั้นส่วนต่างๆของสะพาน

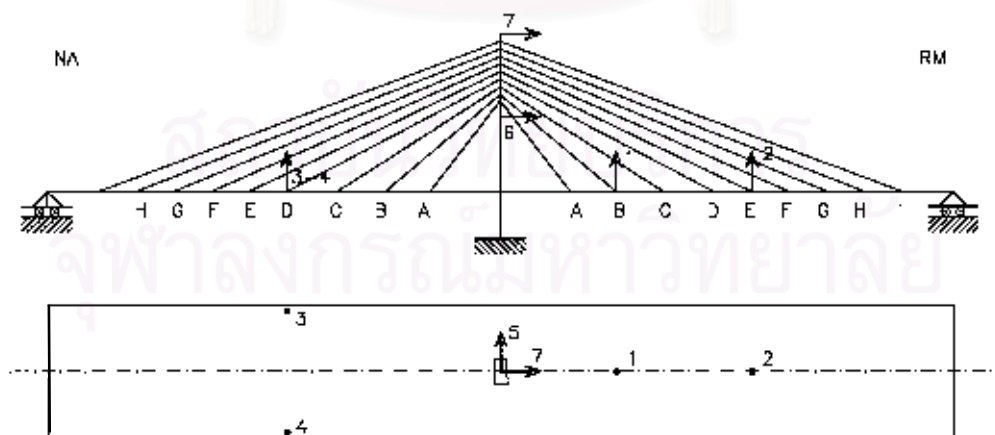
Ko และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษารวิเคราะห์แบบจำลองสะพานจริงในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง โดยสะพานที่ทำการศึกษาคือสะพาน Tsing Ma bridge เนื่องจากสะพานนี้อยู่ในเขตพายุไต้ฝุ่น ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง จึงได้เริ่มวิเคราะห์แบบจำลองโดยเริ่มจากแบบจำลองที่มีแค่ช่วงข้าง (side span), เสาจริง (pylon) และสายเคเบิล (cable) จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มแผ่นพื้น (deck) ที่ช่วงกลาง (main span) ไปเรื่อยๆจนแบบจำลองสมบูรณ์ โดยมีการตรวจสอบในภาคสนามด้วยการสั่นสะเทือนรอบข้าง (ambient vibration) ควบคุมไปด้วย ผลที่ได้คือ ระหว่างที่ทำการก่อสร้างจะมีโอกาสเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากลมได้มากกว่าหลังจากที่ก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

Clemente และคณะ (1998) ได้ทำแบบจำลองสะพาน Garigliano cable-stayed bridge (ประเทศอิตาลี) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาให้ทราบถึงลักษณะทางด้านพลศาสตร์ของ The Garigliano cable-stayed bridge ตัวอย่างเช่น ความถี่สั่นพ้อง (resonance frequencies) รูปร่างโหมดของแบบจำลอง (mode shapes) และ อัตราส่วนความหน่วง ทั้งนี้ผลลัพธ์จากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับผลสรุปของการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนัก

บรรทุก (service load) การวิเคราะห์หาความถี่สั่นพ้องใช้การแปลงสัญญาณของหัววัดความเร็ว (sensors) จากความเร็วกับเวลาเป็น power spectral density (PSD) กับความถี่



รูปที่ 1.3 การแปลงสัญญาณจากความเร็วกับเวลา (Clement, 1998)



รูปที่ 1.4 ตำแหน่งของการติดตั้งหัววัดความเร็ว (Clement, 1998)

จากรูปที่ 1.3 ภาพบนสุดเป็นการแปลงสัญญาณที่ตรวจวัดได้บริเวณกึ่งกลางของสะพานในแนวตั้ง (vertical) ภาพกลางเป็นการแปลงสัญญาณที่ตรวจวัดได้บริเวณขอบสะพานในแนวตั้ง (vertical) ส่วนภาพล่างสุดคือการแปลงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ บริเวณยอดเสาข้าง (pylon) ในแนวตั้งจากกับสะพานในแนวนอน (ดังแสดงในรูปที่ 1.4)

จากการเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้อง ผลที่ได้ระหว่างแบบจำลองกับการตรวจสอบพบว่ามี ความใกล้เคียงกัน ฉะนั้นหากต้องการจะรู้ผลถึงพฤติกรรมของสะพานจะใช้แบบจำลองเป็นตัวบอก ถึงพฤติกรรม จึงเป็นประโยชน์ในการเข้าถึงโครงสร้างที่ซับซ้อนได้

Ren และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาสะพาน Qingzhon cable-stayed bridge ใน Fuzhou ประเทศจีน โดยมี span ยาว 605 เมตร การวิเคราะห์แบบจำลองกระทำโดยการพิจารณาเป็น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความถี่ธรรมชาติ และ รูปร่าง ของโหมด (mode shape) โดยเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติระหว่างแบบจำลองและการตรวจวัดการ สั่นสะเทือนรอบข้าง (ambient vibration test) โดยความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนรอบข้าง จะ ได้จากจุดยอดของ PSD งานวิจัยนี้เป็นการแสดงวิธีการวิเคราะห์และทดลองการวิเคราะห์ แบบจำลองโดยให้ความเข้าใจ การศึกษาด้านพลศาสตร์ (dynamic) ของสะพาน จากการศึกษา พบว่าการตรวจวัดการสั่นสะเทือนรอบข้างมีความสะดวก รวดเร็ว ถูก และสามารถบอกรูปร่างของ โหมดที่สำคัญๆ ได้ และจากการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติมีความใกล้เคียงกันหมายความว่า แบบจำลองสะพานที่ถูกต้อง ผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถบอกคุณสมบัติเบื้องต้นพลศาสตร์

Macdonald และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสะพานขึง Second Severn Crossing cable-stayed bridge โดยเพื่อต้องการทราบพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีผลกระทบด้าน พลศาสตร์โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนรอบข้าง ได้แก่ รูปร่างของโหมด และ ความถี่ธรรมชาติ โดยหลักการพิจารณาจะคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจาก แรงลม และอุณหภูมิด้วย งานวิจัยนี้พบว่าความถี่ธรรมชาติไม่ได้มีผลกระทบมาจากอุณหภูมิ แต่จะมี ผลกระทบมาจากความแรงลมเท่านั้น

บริษัท AES Group, Kinematics and OPAC (2001) และบริษัท Infrastructure Monitoring and Management System หรือ IMMS (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของสะพานพระรามเก้า ในการสร้างแบบจำลองนั้นทั้งสองบริษัทก็มีลักษณะคล้ายๆกัน คือสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ก่อน จากนั้นก็ทำการสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ และแบบจำลองจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองด้วยคาบธรรมชาติของแบบจำลองและจากการตรวจวัดจริงในภาคสนามดังตารางที่ 1.1 ซึ่งทางบริษัท IMMS ได้มีการปรับแบบจำลองเพื่อให้คาบธรรมชาติของแบบจำลองใกล้เคียงกับ

คาบธรรมชาติจากการตรวจวัดจริง โดยในการปรับแก้นี้จะอาศัยกระบวนการปรับแก้ ซึ่งใช้ค่าปรับแก้ในแต่ละส่วนไม่เกินร้อยละ 30 จากแบบของผู้ออกแบบดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9 ของบริษัท AES และ IMMS (AES, 2001 และ IMMS 2004)

รูปร่าง ของ โหมด	ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่	ลักษณะการเคลื่อนที่	คาบธรรมชาติ (วินาที)				
			ผลจากการ ตรวจวัด		ผลจากการ ตรวจวัดของ		
			ของ AES	แบบ จำลอง ของ AES	IMMS	แบบ จำลอง ของ IMMS	
1	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	3.13	3.03	3.13	3.13
2	เสาข้าง	ด้านข้าง	สมมาตร	2.86	2.70	-	-
3	เสาข้าง	ด้านข้าง	ปฏิสมมาตร	2.86	2.70	-	-
4	แผ่นพื้น	ด้านข้าง	สมมาตร	2.50	2.22	-	-
5	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	ปฏิสมมาตร	2.08	2.05	-	-
6	แผ่นพื้น	บิด	สมมาตร	1.49	1.45	-	-
7	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	1.47	1.43	1.47	1.37

ตารางที่ 1.2 ผลการปรับแก้สุดท้ายของตัวแปรจากกระบวนการปรับแก้ของบริษัท IMMS (IMMS, 2004)

รายละเอียดการปรับแก้	ร้อยละของการปรับแก้แบบจำลองจากแบบก่อสร้าง
1. สติเฟนสของแผ่นพื้นช่วงข้าง	+12.14
2. สติเฟนสของแผ่นพื้นช่วงกลาง	+28.72
3. มวลของแผ่นพื้นช่วงข้าง	+4.22
4. มวลของแผ่นพื้นช่วงกลาง	+15.53
5. คุณสมบัติของหน้าตัดเคเบิล	-2.46 to -11.12
6. สติเฟนสและมวลของเสาข้าง	-4.53

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อให้มีแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ถูกต้อง และสามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานพระรามเก้าได้

1.3.2 เพื่อศึกษาความไวของแรงในชิ้นส่วนต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโครงสร้างสะพานพระรามเก้า

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 โครงสร้างสะพานจะถูกจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SAP2000

1.4.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม และเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วน โครงสร้าง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่วิเคราะห์โดยแบบจำลองกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนาม

1.4.3 แบบจำลองจะไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากแรงลม และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องทราบสมการพื้นฐานของกลศาสตร์ หลักการวิเคราะห์ปัญหาชนิดต่างๆ ขั้นตอนการวิเคราะห์ รวมทั้งการประมวลผลและการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ดังจะกล่าวต่อไป

2.1.1 สมการพื้นฐานของกลศาสตร์

2.1.1.1 สมการสถานะสมดุล (equilibrium equations) โครงสร้างทุกชนิดจะต้องอยู่ภายใต้สถานะสมดุลของแรงทั้งแรงภายนอกและแรงภายใน โดยผลรวมของแรงภายนอกต้องเท่ากับแรงภายในที่ทุกๆจุดต่อ (joint) ของโครงสร้าง

$$\sum F_x = 0; \quad \sum F_y = 0; \quad \sum F_z = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum M_x = 0; \quad \sum M_y = 0; \quad \sum M_z = 0 \quad (2.2)$$

2.1.1.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด (stress strain relationship) โดยทางปฏิบัติถูกสมมติให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear stress-strain relationship) โดยเรียกอีกอย่างว่ากฎของฮุก (Hook's law) สามารถถูกเขียนให้อยู่ในรูปสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (modulus of elasticity, E) ค่าอัตราส่วนพัวซอง (Poisson's ratio, ν) และค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหดตัวภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (coefficient of thermal expansion and contraction, α) ดังสมการที่ 2.3

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} + \alpha \Delta T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.1.1.3 สมการความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสภาพเงื่อนไขขอบ (compatibility and boundary conditions) คือข้อกำหนดของความต่อเนื่องกัน (compatibility requirement) เช่น การเคลื่อนที่ของจุดต่อ (nodal displacement) จะเคลื่อนที่ไปด้วยระยะเท่ากันและไปในทิศทางเดียวกัน ในการกำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) จะต้องกำหนดให้สอดคล้องกับความเป็นจริง เช่น จุครองรับแบบจุดหมุน (hinge support) จุครองรับแบบสปริง (spring support) เป็นต้น หากผู้ทำการวิเคราะห์ใช้พฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมระหว่างแบบจำลองกับโครงสร้างจริง จะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง

2.1.2 หลักการวิเคราะห์แบบสถิต (static analysis)

การวิเคราะห์แบบสถิตสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.4

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (2.4)$$

โดยที่ \mathbf{K} = เมทริกซ์สติฟเนส
 \mathbf{R} = เวกเตอร์ของน้ำหนักบรรทุก
 \mathbf{u} = เวกเตอร์ของการกระจัดสถิต

2.1.3 หลักการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (dynamic analysis)

การวิเคราะห์ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) จะใช้ในการปรับแก้แบบจำลองให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงจากการตรวจวัดคุณสมบัติของโหมคการสั่นไหวตามธรรมชาติจากภาคสนาม

การวิเคราะห์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector analysis) คือการคำนวณหารูปร่างของโหมค (mode shapes) ของการสั่นโดยอิสระแบบไม่มีความหน่วง (undamped) และความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบซึ่งคือการหาคำตอบจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทั่วไป ดังสมการที่ 2.5

$$[\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M}] \phi = 0 \quad (2.5)$$

โดยที่ \mathbf{K}	คือ เมทริกซ์สติฟเนส
\mathbf{M}	คือ เมทริกซ์มวล
Ω^2	คือ เมทริกซ์มวลของค่าลักษณะเฉพาะ ω_n^2
ϕ	คือ เมทริกซ์ของเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (รูปร่างของโหมค)

สมการความสัมพันธ์ของความถี่และความคาบธรรมชาติมีดังนี้

$$T_n = \frac{1}{f_n} \quad \text{และ} \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

2.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.4.1 การเลือกใช้ชนิดของชิ้นส่วน (element) จะต้องเลือกชนิดของชิ้นส่วนให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริง โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด เช่น ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element) แทนพื้นของสะพาน (deck) ใช้ชิ้นส่วนแบบคาน (beam element) แทนคานหลัก (girder) ของสะพาน เป็นต้น

2.1.4.2 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อย โดยแต่ละชิ้นส่วนจะเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนข้างเคียงที่จุดขอบของชิ้นส่วนซึ่งเรียกว่าจุดต่อ บริเวณที่มีส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรูจำเป็นจะต้องแทนด้วยชิ้นส่วนขนาดเล็กเพื่อที่จะวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ

2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

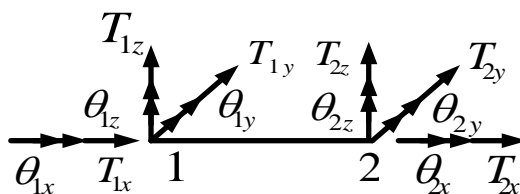
โครงสร้างสะพานพระรามเก้า เป็นโครงสร้างที่สลับซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ ในการวิเคราะห์หาแรงภายใน จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อใช้กับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรม ซึ่งการวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้โปรแกรม SAP2000 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างสะพานพระรามเก้า จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างเป็นชิ้นส่วน รูปแบบของชิ้นส่วนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้มีดังต่อไปนี้

2.2.1 รูปแบบชิ้นส่วนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องมีการระบุชนิดของชิ้นส่วน เช่น ชิ้นส่วนแบบคาน ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง จะต้องเลือกชนิดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริงที่ทำการวิเคราะห์ โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด รายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานพระรามเก้า มีดังนี้

2.2.1.1 ชิ้นส่วนแบบเฟรม (frame element)

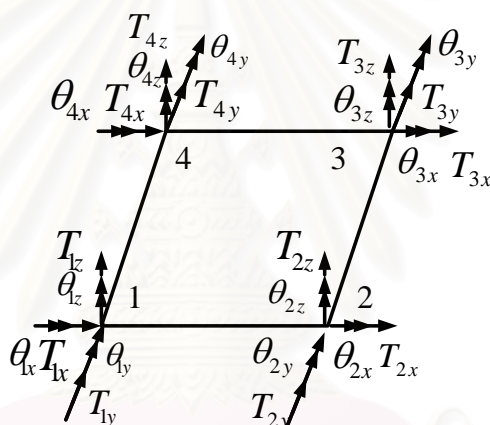
ชิ้นส่วนแบบเฟรมเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นเส้น มีจุดเชื่อมต่อ (node) 2 จุด มีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) เท่ากับ 12 ในการวิเคราะห์แบบสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ ทั้งการเคลื่อนที่และการหมุนในระนาบ x, y และ z ของทั้ง 2 จุดเชื่อมต่อ ลักษณะของชิ้นส่วนแบบนี้จะใช้เพื่อจำลองเสาตอม่อ (pier) โครงแนวขวาง (cross frame) ท่อรับแรงดึง (tension tube) ซึ่งในส่วนของเคเบิลนี้ผู้วิจัยได้จำลองเป็นชิ้นส่วนแบบเฟรมด้วยเนื่องจากบริษัท AES ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสะพานพระรามเก้าที่ได้จำลองเคเบิลเป็นชิ้นส่วนเฟรมและชิ้นส่วนแบบเคเบิลซึ่งผลจากการวิเคราะห์ไม่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงเลือกกำหนดเป็นชิ้นส่วนแบบเฟรมโดยทำการปลดระดับขั้นความเสรีของชิ้นส่วนที่จำลองเป็นเคเบิล การหมุนและการบิดออกเพื่อให้สามารถรับแต่แรงในแนวแกนและแรงเฉือนในระนาบของแรงแนวแกนเท่านั้น



รูปที่ 2.1 ระดับชั้นความเสรีของชิ้นส่วนแบบเฟรม

2.2.1.2 ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element)

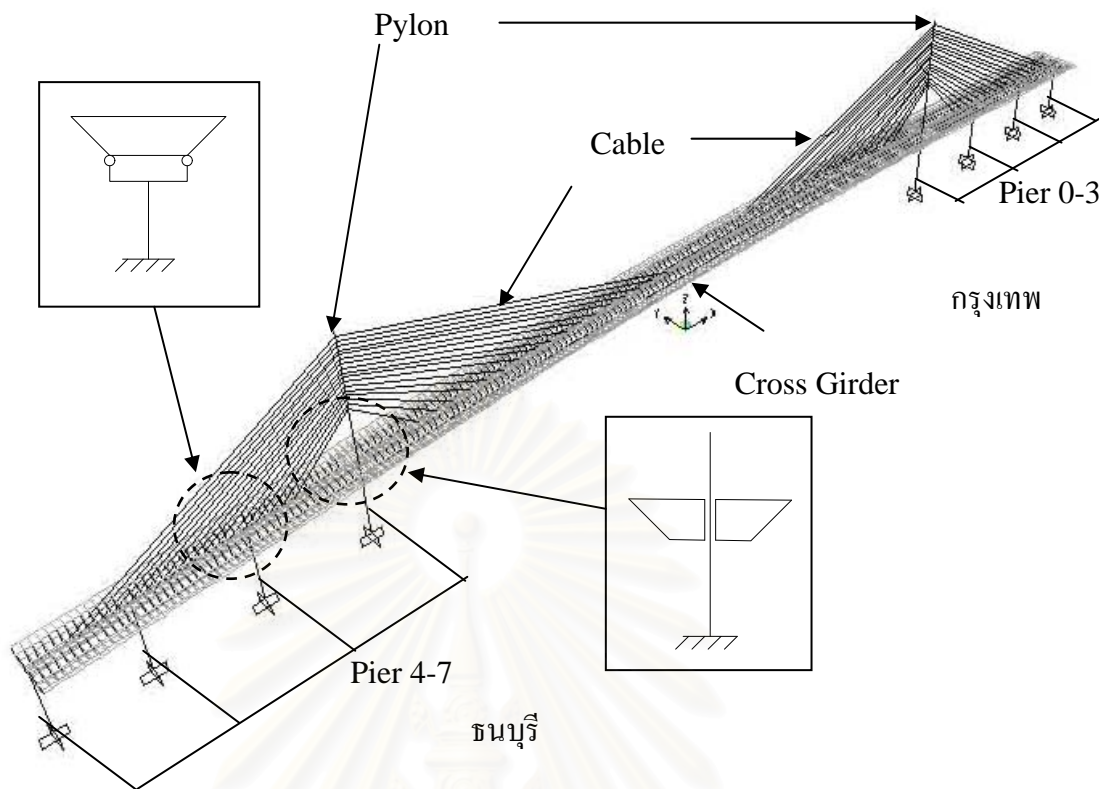
เป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีจุดเชื่อมต่อ 4 จุด มีระดับชั้นความเสรี เท่ากับ 24 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือทั้งการเคลื่อนที่และการหมุนในระนาบ x, y และ z ของทั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ ลักษณะของชิ้นส่วนแบบนี้จะใช้เพื่อจำลองพื้น และผนัง ของสะพานพระราม เก้า



รูปที่ 2.2 ระดับชั้นความเสรีของชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element)

2.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะทำการกำหนดขนาดและคุณสมบัติต่างๆ ของแบบจำลอง โดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้างของสะพาน เพื่อให้พฤติกรรมของแบบจำลองใกล้เคียงกับพฤติกรรมของโครงสร้างจริงให้มากที่สุดดังรูปที่ 2.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองนี้จะเริ่มจากการเตรียมค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับโปรแกรม SAP2000 ลงในโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (MS Excel) ให้เรียบร้อยก่อนที่จะนำข้อมูลทั้งหมดเข้าไปยังโปรแกรม SAP2000 โดยได้แบ่งขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเป็นดังนี้



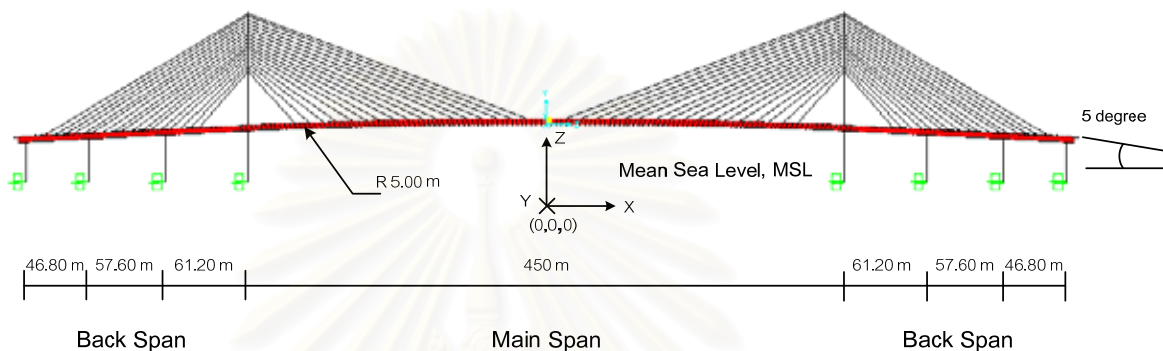
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของสะพานพระรามเก้า

จุดรองรับของแบบจำลองสะพานพระรามเก้าถูกจำลองเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (fix support) ส่วนการเชื่อมต่อของตอม่อจะเชื่อมต่อกับคานหลักยกเว้นตอม่อที่ตรงกับตำแหน่งของเสา ซึ่ง ผู้วิจัยได้จำลองให้ตอม่อถ่ายแรงกับเสาซึ่งแบบยึดแน่นและไม่ถ่ายแรงให้กับคานหลัก ดังรูปที่ 2.3

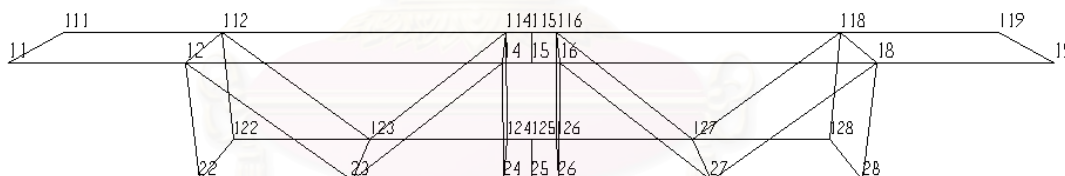
2.2.2.1 การกำหนดพิกัดจุด (coordinate)

การกำหนดพิกัดจุดของแบบจำลองโครงสร้างสะพานพระราม เก้า นั้นจะทำการกำหนด แกนอ้างอิงสำหรับพิกัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาซึ่ง (pylon) ที่ระดับผิวน้ำทะเลปานกลางเป็น พิกัด (0, 0, 0) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และคำนวณหาพิกัดของจุดต่อ (node) ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้สร้าง แบบจำลอง โดยคำนวณตามลักษณะของสะพานคือ ช่วงกลางสะพาน (main span) จะมีความยาว 450 เมตร และมีรัศมีโค้งเท่ากับ 5,000 เมตร และช่วงด้านข้าง (back span) ความยาวด้านละ 165.6 เมตร จะมีความลาดชันเท่ากับ 5 องศา แต่ละช่วงของโครงขาง (cross frame) ห่างกัน 3.6 เมตร ถัดมาจึง เริ่มทำการหาพิกัดของจุดต่อและกำหนดชื่อจุดต่อทุกๆ จุด ตามระยะห่างของแต่ละจุดต่อ (ดูตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.5)

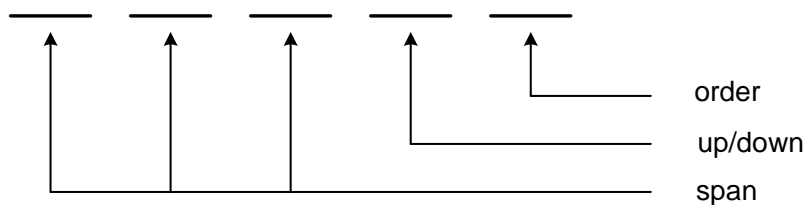
การกำหนดชื่อของพิกัดจุดต่อจะทำการแบ่งออกเป็น 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยตัวเลขสามตำแหน่งแรกจะเป็นตัวเลขที่ใช้บอกลำดับของช่วง (span) มีตั้งแต่ 000 - 217 ส่วนตัวเลขตำแหน่งที่ 4 ถ้าเป็น 1 จะแทนตำแหน่งพิกัดจุดต่อที่อยู่ส่วนบนของคานหลัก (girder) และถ้าเป็น 2 จะแทนตำแหน่งพิกัดจุดต่อที่อยู่ส่วนล่างของคาน ส่วนตัวเลขสุดท้ายระบุตำแหน่งของจุดต่อ โดยการเรียงลำดับของจุดต่อจากซ้ายไปขวา



รูปที่ 2.4 จุดอ้างอิงของแบบจำลอง โครงสร้างสะพานพระราม ๕



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการระบุชื่อของจุดต่อ

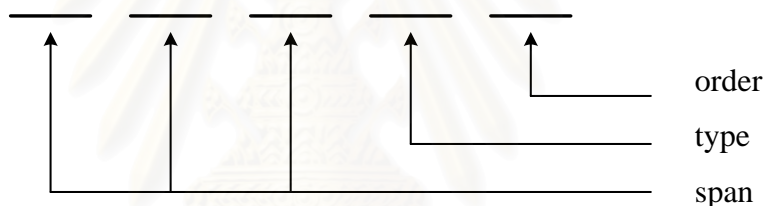


รูปที่ 2.6 การกำหนดชื่อของจุดต่อ

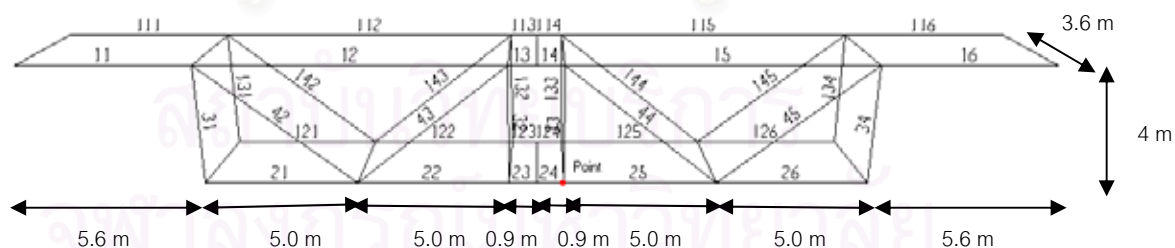
2.2.2.2 การกำหนดการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนกับจุดต่อ (member connectivity)

การกำหนดการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนนั้น คือการเชื่อมต่อจุดต่อต่างๆ ด้วยชิ้นส่วนต่างๆ มีทั้งชิ้นส่วนแบบคาน และชิ้นส่วนแผ่นโค้ง เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่ยุ่งยากแก่การตรวจสอบจึงจำเป็นต้องระบุชื่อของชิ้นส่วนต่างๆ ให้เป็นระบบ

การระบุชื่อของชิ้นส่วนแบบคาน จะแบ่งออกเป็น 5 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 2.7 โดยตัวเลขสามตำแหน่งแรกจะเป็นตัวเลขที่ใช้บอกลำดับของช่วง (span) มีตั้งแต่ 000 - 217 ส่วนตัวเลขตำแหน่งที่ 4 ถ้าเป็น 1 จะแทนชิ้นส่วนที่อยู่ด้านบนของคาน (top chord) ถ้าเป็น 2 จะแทนชิ้นส่วนที่อยู่ส่วนล่างของคาน (bottom chord) ถ้าเป็น 3 จะแทนชิ้นส่วนที่ตั้งตรง (vertical chord) ถ้าเป็นเลข 4 จะแทนชิ้นส่วนที่เอียง (diagonal chord) ส่วนตัวเลขสุดท้ายจะเรียงลำดับชิ้นส่วนแบบคานจากจากซ้ายมาขวา ตัวอย่างการกำหนดชื่อของชิ้นส่วนของคานลำดับที่ 000 และ 001 ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การกำหนดชื่อของชิ้นส่วนแบบคานและแผ่นโค้ง



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการแสดงผลชื่อของชิ้นส่วนแบบคาน

การกำหนดชื่อของชิ้นส่วนแผ่นโค้ง จะแบ่งออกเป็น 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยตัวเลขสามตำแหน่งแรกจะเป็นตัวเลขที่ใช้บอกลำดับของช่วง (span) มีตั้งแต่ 000 - 217 ส่วนตัวเลข

ตำแหน่งที่ 4 ถ้าเป็น 1 จะแทนชิ้นส่วนที่อยู่ด้านบนของคาน (top chord) ถ้าเป็น 2 จะแทนชิ้นส่วนที่อยู่ส่วนล่างของคาน (bottom chord) ถ้าเป็น 3 จะแทนชิ้นส่วนที่ตั้งตรง (vertical chord) ถ้าเป็นเลข 4 จะแทนชิ้นส่วนที่เอียง (diagonal chord) ส่วนตัวเลขสุดท้ายจะเรียงลำดับชิ้นส่วนแผ่นโค้งจากซ้ายมาขวา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการกำหนดชื่อชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง

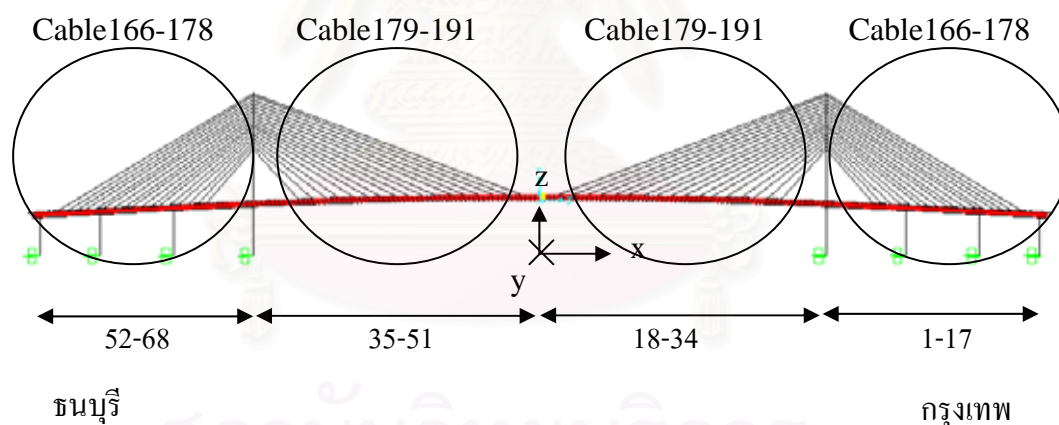
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2.3 การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วน

กำหนดคุณสมบัติต่างๆ โดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้างจริงเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.10-2.13 ในแบบจำลองโครงสร้างสะพานโดยให้ชิ้นส่วนรับแรงดึง เคเบิล เสาขึง (pylon) ตอม่อ (pier) เป็นชิ้นส่วนแบบคาน และให้พื้นเป็นชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง รายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างมีดังนี้

- คุณสมบัติของเคเบิล (cable properties)

การระบุตำแหน่งของเคเบิลนั้น จะเริ่มต้นจากเส้นที่ 1-68 เส้นแรกจะอยู่ในช่วงด้านข้างของสะพานการกำหนดคุณสมบัติของเคเบิลจะระบุขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง และพื้นที่ของสายเคเบิล คุณสมบัติของเคเบิลมีความสมมาตรกัน ดังนั้นการกำหนดคุณสมบัติจึงกำหนดให้สมมาตรกันดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การระบุชื่อและตำแหน่งของเคเบิล

ตารางที่ 2.1 การกำหนดคุณสมบัติของเคเบิล

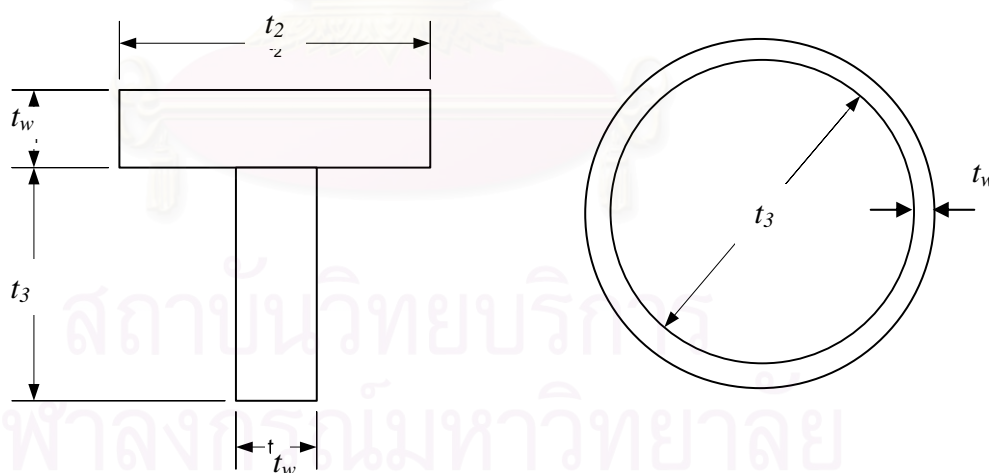
ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่างหน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
CABLE166	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE167	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE168	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE169	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE170	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE171	เหล็ก	วงกลม	0.15748	0.01948
CABLE172A	เหล็ก	วงกลม	0.13096	0.01347
CABLE172B	เหล็ก	วงกลม	0.13096	0.01347
CABLE173A	เหล็ก	วงกลม	0.13096	0.01347
CABLE173B	เหล็ก	วงกลม	0.13096	0.01347
CABLE174A	เหล็ก	วงกลม	0.12746	0.01276
CABLE174B	เหล็ก	วงกลม	0.12746	0.01276
CABLE175	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE176	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE177A	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE177B	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE178	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE179	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE180	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE181	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE182	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE183	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE184	เหล็ก	วงกลม	0.15054	0.01780
CABLE185A	เหล็ก	วงกลม	0.12746	0.01276
CABLE185B	เหล็ก	วงกลม	0.12746	0.01276
CABLE186A	เหล็ก	วงกลม	0.12746	0.01276
CABLE186B	เหล็ก	วงกลม	0.11764	0.01087
CABLE187A	เหล็ก	วงกลม	0.11764	0.01087

ตารางที่ 2.1 การกำหนดคุณสมบัติของเคเบิล (ต่อ)

ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่างหน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
CABLE187B	เหล็ก	วงกลม	0.11764	0.01087
CABLE188	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE189	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE190A	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE190B	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989
CABLE191	เหล็ก	วงกลม	0.11221	0.00989

- คุณสมบัติของคานขวาง (cross beam properties)

การกำหนดคุณสมบัติของคานขวางของสะพานพระรามเก้า จะแยกออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะรูปร่างของหน้าตัด คือ หน้าตัดรูปตัวที (T-section) และหน้าตัดท่อกลม (pipe) ดังรูปที่ 2.11 และคุณสมบัติต่างๆ ของหน้าตัดแสดงในตารางที่ 2.2-2.5

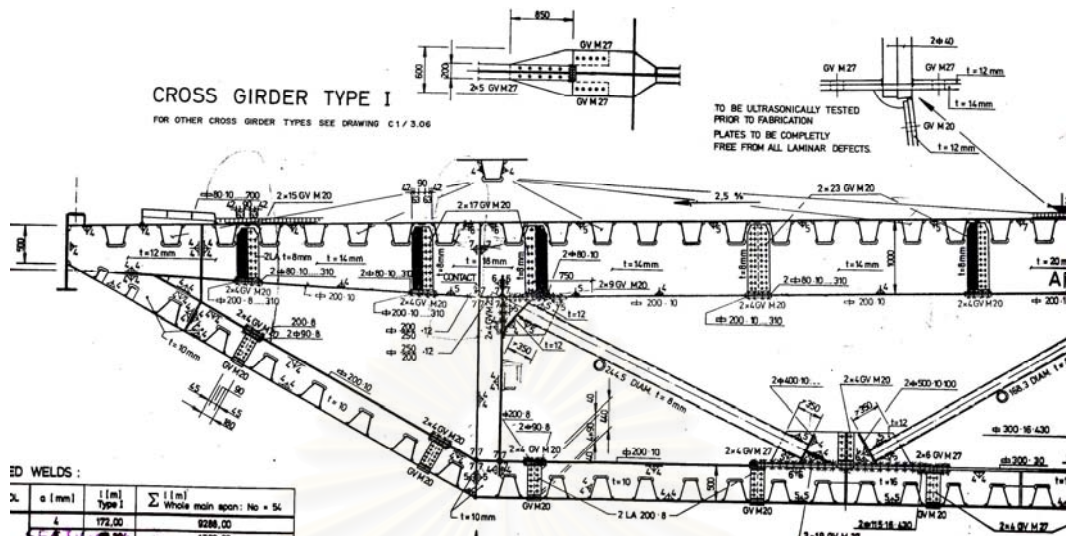


(ก) หน้าตัดรูปตัวที

(ข) หน้าตัดท่อกลม

รูปที่ 2.11 ชนิดของหน้าตัดของคานขวาง

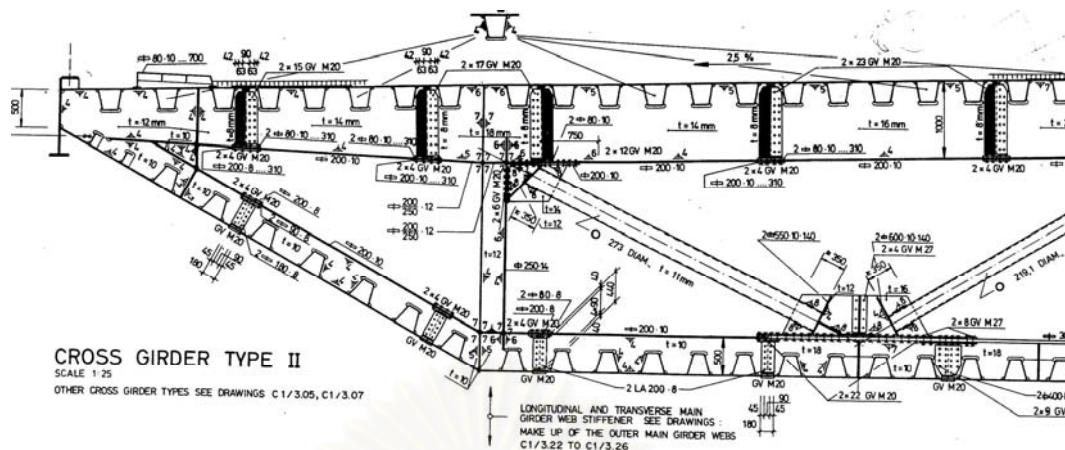
หน้าตัดรูปตัวทีถูกกำหนดที่โครงเฟรมแทบทุกชิ้นส่วนของคานขวาง ยกเว้นส่วนที่เป็นชิ้นส่วนรับแรงดึงจะมีลักษณะเป็นหน้าตัดท่อกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.12-2.15



รูปที่ 2.12 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 1

ตารางที่ 2.2 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 1

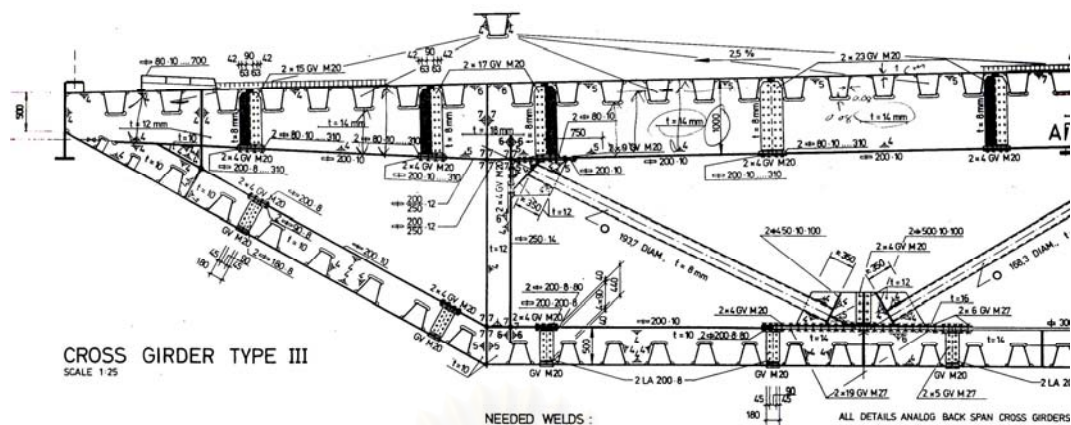
ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่างหน้าตัด	t_3 (เมตร)	t_2 (เมตร)	t_f (เมตร)	t_w (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
G1B1	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.2	0.01	0.01	0.0069
G1B2	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.03	0.016	0.01652
G1B3	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.03	0.016	0.01652
G1D1	เหล็ก	ตัวที	0.45	0.2	0.01	0.01	0.0064
G1D2	เหล็ก	ทอกลม	0.2445			0.008	0.005944
G1D3	เหล็ก	ทอกลม	0.1683			0.0088	0.00441
G1T1	เหล็ก	ตัวที	0.75	0.2	0.01	0.014	0.01236
G1T2	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.01	0.014	0.01586
G1T3	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.012	0.012	0.014256
G1V1	เหล็ก	ตัวที	0.35	0.25	0.014	0.012	0.007532
G1V2	เหล็ก	ตัวที	0.65	0.2	0.012	0.01	0.00878



รูปที่ 2.13 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 2

ตารางที่ 2.3 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 2

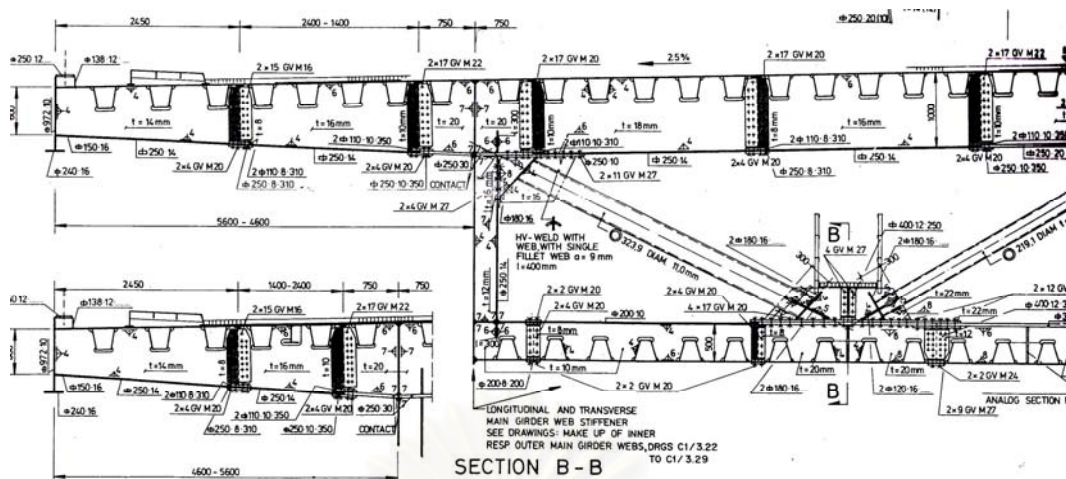
ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่างหน้าตัด	t_3 (เมตร)	t_2 (เมตร)	t_f (เมตร)	t_w (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
G2B1	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.2	0.01	0.014	0.00886
G2B2	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.04	0.018	0.02028
G2B3	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.04	0.018	0.02028
G2D1	เหล็ก	ตัวที	0.45	0.2	0.01	0.01	0.0064
G2D2	เหล็ก	ทอกกลม	0.273			0.011	0.009054
G2D3	เหล็ก	ทอกกลม	0.2191			0.0088	0.005814
G2T1	เหล็ก	ตัวที	0.75	0.2	0.01	0.013	0.01162
G2T2	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.01	0.017	0.01883
G2T3	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.012	0.012	0.014256
G2V1	เหล็ก	ตัวที	0.35	0.25	0.014	0.012	0.007532
G2V2	เหล็ก	ตัวที	0.625	0.2	0.015	0.011	0.00971



รูปที่ 2.14 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 3

ตารางที่ 2.4 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 3

ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่าง หน้าตัด	t_3 (เมตร)	t_2 (เมตร)	t_f (เมตร)	t_w (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
G3B1	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.2	0.01	0.012	0.00788
G3B2	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.02	0.014	0.01272
G3B3	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.3	0.02	0.014	0.01272
G3D1	เหล็ก	ตัวที	0.45	0.2	0.01	0.01	0.0064
G3D2	เหล็ก	ท่อกลม	0.1937			0.008	0.004667
G3D3	เหล็ก	ท่อกลม	0.1683			0.0071	0.003596
G3T1	เหล็ก	ตัวที	0.75	0.2	0.01	0.013	0.01162
G3T2	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.01	0.016	0.01784
G3T3	เหล็ก	ตัวที	1	0.2	0.012	0.012	0.014256
G3V1	เหล็ก	ตัวที	0.35	0.25	0.014	0.012	0.007532
G3V2	เหล็ก	ตัวที	0.625	0.2	0.012	0.01	0.00853



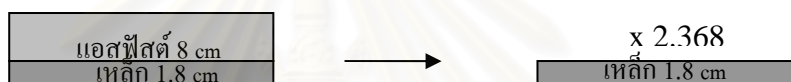
รูปที่ 2.15 แบบก่อสร้างของคานตามขวางแบบที่ 4

ตารางที่ 2.5 การกำหนดคุณสมบัติของคานตามขวางแบบที่ 4

ชื่อหน้าตัด	วัสดุ	รูปร่างหน้าตัด	t_3 (เมตร)	t_2 (เมตร)	t_f (เมตร)	t_w (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
G4B1	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.2	0.01	0.015	0.00935
G4B2	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.38	0.04	0.02	0.0244
G4B3	เหล็ก	ตัวที	0.5	0.38	0.04	0.02	0.0244
G4D2	เหล็ก	ท่อกลม	0.3239			0.011	0.010813
G4D3	เหล็ก	ท่อกลม	0.2191			0.01	0.006569
G4T1	เหล็ก	ตัวที	0.8	0.25	0.014	0.015	0.01529
G4T2	เหล็ก	ตัวที	1	0.25	0.014	0.019	0.022234
G4T3	เหล็ก	ตัวที	1	0.35	0.02	0.016	0.02268
G4V1	เหล็ก	ตัวที	0.3	0.25	0.014	0.012	0.006932
G4V2	เหล็ก	ตัวที	0.625	0.2	0.015	0.011	0.00971

- คุณสมบัติของแผ่นพื้น (Deck)

จากแบบจากผู้ออกแบบของค้ประกอบของสะพานจะมีวัสดุที่ใช้ทำพื้นถนนเป็นแอสฟัลต์ เพื่อความสะดวกในการสร้างแบบจำลองผู้วิจัยได้ทำการแปลงแอสฟัลต์ดังกล่าวให้น้ำหนักและมวล ไปอยู่กับตัวพื้นที่เป็นเหล็ก (ดังแสดงในรูปที่ 2.16) การแปลงน้ำหนักแอสฟัลต์ต่างๆ ทำโดยนำ ความหนาของแอสฟัลต์คูณด้วยน้ำหนักจำเพาะของแอสฟัลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.4 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรหารด้วยน้ำหนักจำเพาะของเหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลลัพธ์ ที่ได้เป็นค่าที่แปลงน้ำหนักและมวลของแอสฟัลต์เป็นเหล็กเพื่อที่จะใช้ในการคิดค่าสัมประสิทธิ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทำการวิเคราะห์ได้จากความหนาของเหล็กเดิมรวมกับความหนาของแอสฟัลต์ที่ แปลงเป็นเหล็กดังที่ได้กล่าวไปแล้วหารด้วยความหนาของเหล็กเดิม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่า สัมประสิทธิ์เท่ากับ 2.368 ที่ใช้ในแบบจำลองสะพานพระรามเก้า



รูปที่ 2.16 หน้าตัดแปลงแอสฟัลต์เป็นเหล็ก

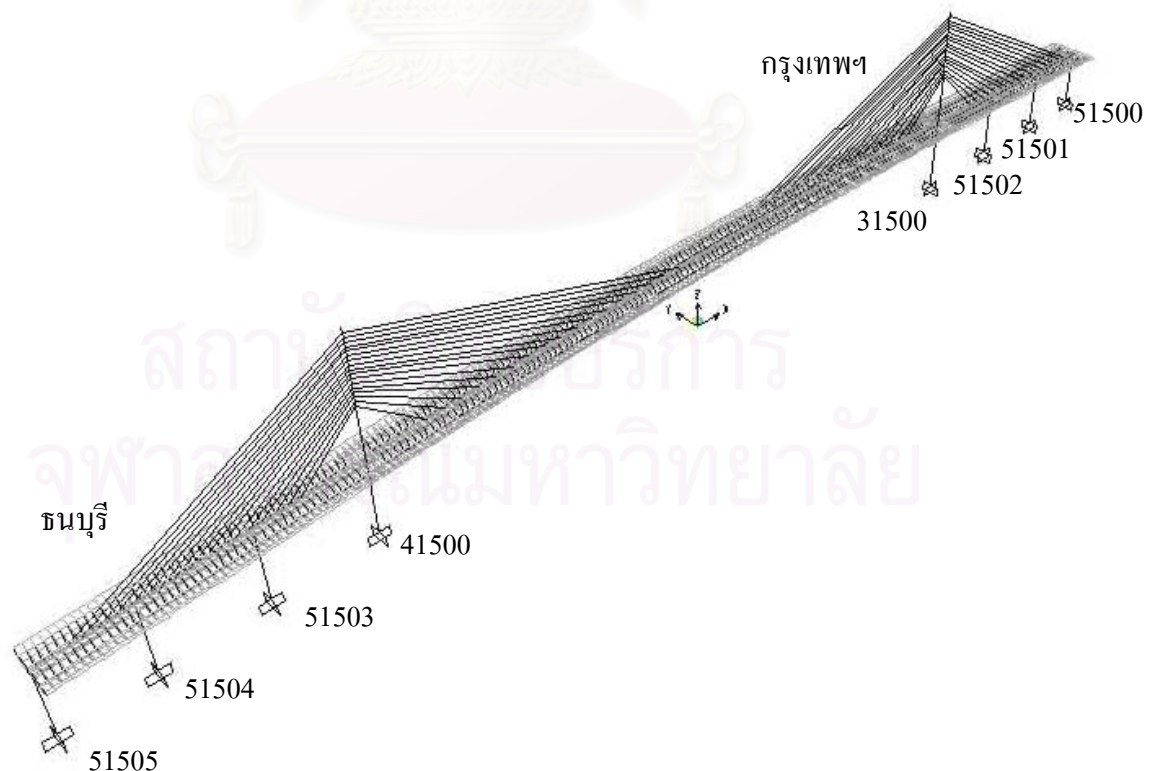
บทที่ 3

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานพระราม 9 จะทำโดยการเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจากรายงานการตรวจสภาพปีที่ 10 ของบริษัท AES Group และรายงานการตรวจจัดแรงดึงในเคเบิลของสะพานพระราม 9 ซึ่งจัดทำโดยบริษัท IMMS จำกัด เมื่อปี พ.ศ. 2547 โดยนำผลการวิเคราะห์ของทั้งสองบริษัทมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากบทที่ 2

3.1 การตรวจสอบสภาพสมดุลของแรง (static equilibrium)

ในการตรวจสอบสภาพสมดุลนั้น จะคำนวณหาแรงปฏิกิริยาจากแบบจำลองภายใต้น้ำหนักของโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าแรงปฏิกิริยาในแนวแกน X และ Y มีค่าเท่ากับ 0 ส่วนแรงปฏิกิริยาในแนวแกน Z กับน้ำหนักของโครงสร้างที่โปรแกรม SAP2000 คำนวณได้คือเท่ากับ 63,805 ตัน



รูปที่ 3.1 ชื่อจุดต่อที่ฐานของโครงสร้างสะพาน

ตารางที่ 3.1 แรงปฏิกิริยาพื้นฐานของแบบจำลอง

ตำแหน่ง	แรงในแนวแกน X (ตัน)	แรงในแนวแกน Y (ตัน)	แรงในแนวแกน Z (ตัน)
31500	-791	-4	17,838
41500	791	-3	17,855
51500	0	0	4,963
51501	0	-2	4,205
51502	0	6	4,888
51503	0	5	4,887
51504	0	-2	4,206
51505	0	0	4,963
ผลรวม	0	0	63,805

จากตารางที่ 3.1 พบว่าเกิดแรงขึ้นในแนวแกน X ขึ้นเนื่องมาจากน้ำหนักของสะพานบริเวณกลางสะพานมีน้ำหนักมากกว่าด้านข้าง ส่งผลให้เสาซึ่งถูกคั่นออกไปด้านข้าง แรงปฏิกิริยาในแนวแกน X จึงเกิดขึ้นเพื่อพ่วงความสมดุลของโครงสร้างไว้ ส่วนแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y เกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณของโปรแกรม SAP2000 โดยผลรวมของแรงในแนวแกน X และแกน Y มีผลรวมของแรงเท่ากับ 0 ซึ่งตรงกับหลักทฤษฎีสถิตยศาสตร์ ส่วนผลรวมของแรงในแนวแกน Z มีค่าเท่ากับน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างทั้งหมด

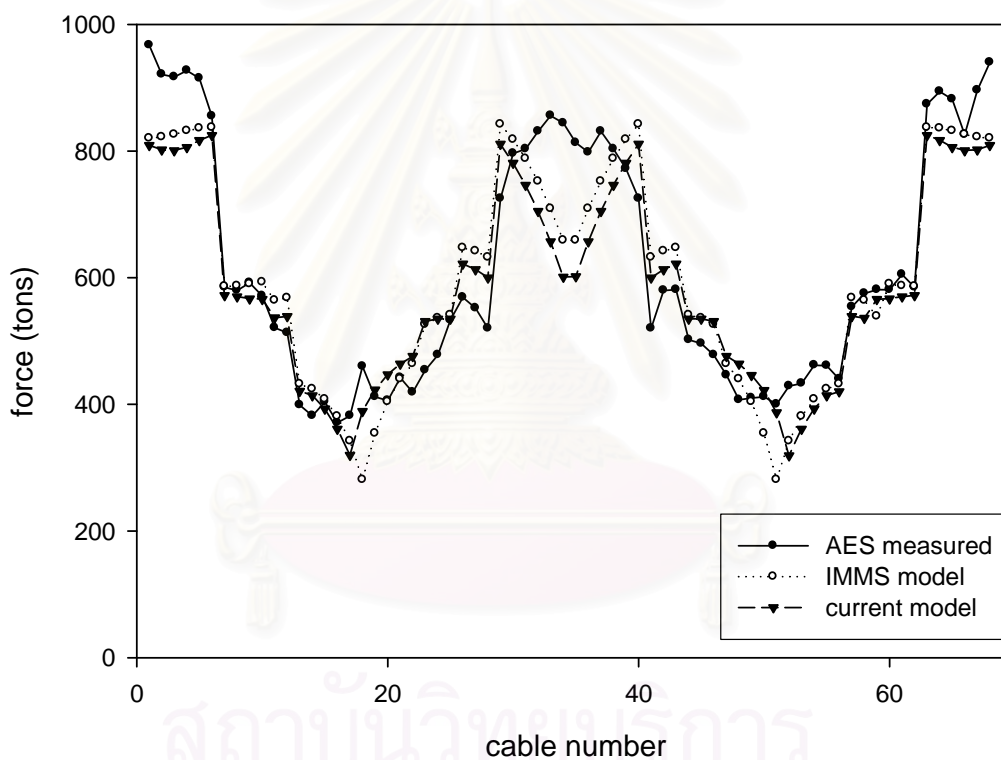
3.2 การเปรียบเทียบแรงภายในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุก

การหาแรงดึงในเคเบิลที่ผ่านมา มีทั้งการสร้างแบบจำลองในสถานะน้ำหนักบรรทุก ออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO และ DIN ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักคงที่ของโครงสร้างสะพาน (dead load) น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ (lane load) และน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (truck load or moving load) และการตรวจวัดแรงดึงในสายเคเบิล โดยมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อปี พ.ศ. 2544 ทีมงานวิศวกรบริษัท AES Group ได้ทำการตรวจวัดในภาคสนามและวิเคราะห์หาแรงดึงของเคเบิลจาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานโดยใช้โปรแกรม SAP2000 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ต่อมาทีมงานวิศวกรบริษัท IMMS ได้ทำการวิเคราะห์แรงดึงในสายเคเบิลในสถานะที่ไม่มีการจราจร หรือการวิเคราะห์ความแรงดึงในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกตายตัวของโครงสร้างสะพาน (dead load) เพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการวิเคราะห์แรงดึงในสายเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่

ไม่มีการจรรยาบรรณที่มีค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 842.41 ตัน ซึ่งเกิดขึ้นที่สายเคเบิลเส้นที่ 29 โดยเริ่มนับสายเคเบิลเส้นแรกจากเสาข้าง (pylon) ฝั่งกรุงเทพมหานคร และแรงดึงที่น้อยที่สุดเกิดขึ้นสายเคเบิลเส้นที่ 18 มีค่าเท่ากับ 280.80 ตัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการเปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวของโครงสร้างสะพาน (dead load) ของโครงสร้างสะพานจากแบบศึกษาทางคณิตศาสตร์กับผลจากการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES Group และผลการวิเคราะห์ของบริษัท IMMS ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.2 และในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลแต่ละเส้นจากผลการตรวจวัดภาคสนามของ AES แบบจำลองของ IMMS และการศึกษานี้ (AES, 2544 และ IMMS, 2547)

จากรูปที่ 3.2 พบว่าแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองของบริษัท IMMS โดยแรงในเคเบิลของงานวิจัยนี้จะมีค่าน้อยกว่า ของบริษัท IMMS อยู่เล็กน้อยเนื่องจากการสร้างแบบจำลองของผู้วิจัยจะพิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวร่วมกับพื้นที่ที่เป็นแอสฟัลต์เท่านั้น แต่เมื่อเทียบกับผลจากการตรวจวัดโดยบริษัท AES พบว่าแรงดึงในเคเบิลยังมีความแตกต่างกันบริเวณ

กลางสะพานและริมทั้งสองข้างจากข้อสรุปเบื้องต้นคือสะพานน่าจะมีการปรับความเครียดภายใน
เคเบิลเพื่อลดการตกท้องช้าง จึงทำให้แรงที่ได้แตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 3.2 แรงดึงของเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว

ลำดับ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)			ลำดับ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)		
	ตรวจวัด ของ AES	แบบจำลอง ของ IMMS	แบบจำลอง ในงานวิจัยนี้		ตรวจวัด ของ AES	แบบจำลอง ของ IMMS	แบบจำลอง ในงานวิจัยนี้
1	967	820	809	35	813	659	602
2	921	822	802	36	798	709	657
3	917	826	801	37	831	752	705
4	927	832	806	38	803	788	746
5	915	836	817	39	772	818	781
6	855	837	825	40	725	842	811
7	585	586	572	41	520	632	600
8	580	587	570	42	580	642	613
9	592	590	567	43	581	647	622
10	571	593	566	44	502	541	535
11	521	564	537	45	496	536	535
12	513	568	539	46	478	526	531
13	399	432	421	47	446	464	476
14	382	424	414	48	407	440	464
15	404	408	393	49	410	404	446
16	371	381	361	50	412	354	422
17	382	342	320	51	400	281	387
18	460	281	389	52	429	342	319
19	412	354	423	53	433	381	361
20	406	404	447	54	462	408	393
21	442	440	464	55	461	424	414
22	419	464	476	56	440	432	420
23	454	526	531	57	554	568	539
24	478	536	535	58	575	564	536
25	533	541	535	59	581	539	566

ตารางที่ 3.2 แรงดึงของเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว (ต่อ)

แรงดึงในเคเบิล (ตัน)				แรงดึงในเคเบิล (ตัน)			
ลำดับ เคเบิล	ตรวจวัด ของ AES	แบบจำลอง ของ IMMS	แบบจำลอง ในงานวิจัยนี้	ลำดับ เคเบิล	ตรวจวัด ของ AES	แบบจำลอง ของ IMMS	แบบจำลอง ในงานวิจัยนี้
26	569	647	622	60	581	590	567
27	552	642	613	61	605	587	570
28	520	632	600	62	585	586	572
29	725	842	811	63	874	837	825
30	796	818	781	64	894	836	817
31	803	788	746	65	882	832	806
32	831	752	705	66	826	826	801
33	856	709	657	67	896	822	802
34	844	659	601	68	940	820	809

3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์

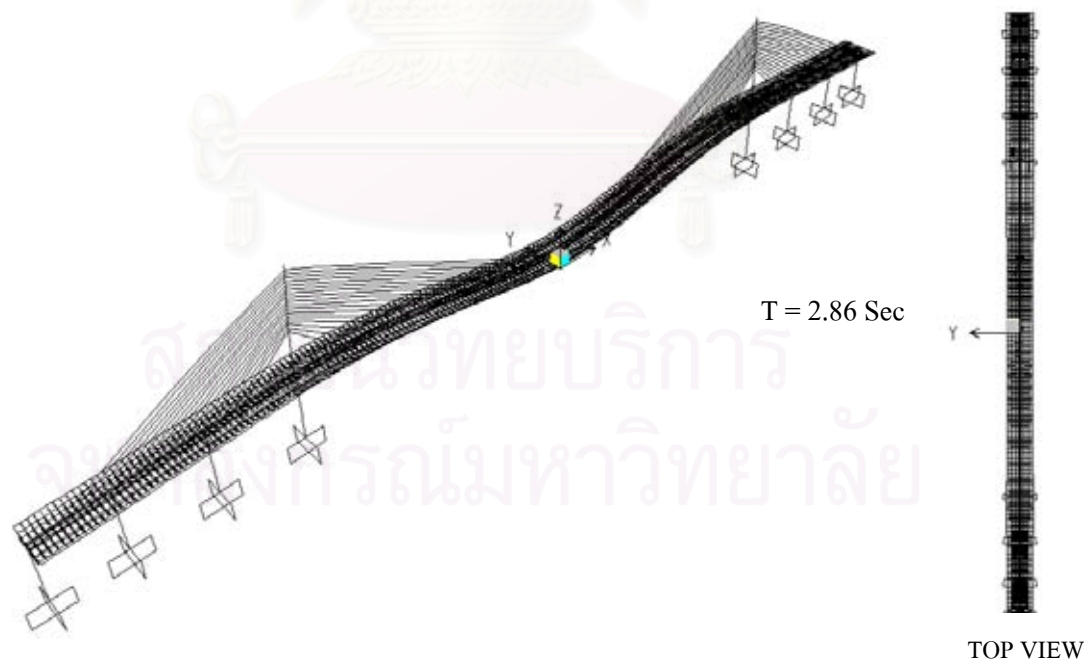
วิธีหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ การเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการทางพลศาสตร์ เช่น คาบธรรมชาติ รูปร่างของโหมด เป็นต้น เมื่อเดือน มิถุนายนปี พ.ศ. 2544 ทีมวิศวกรของบริษัท AES Group ได้ทำการตรวจวัดการสั่นไหวของสะพานพระรามเก้าโดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่งจำนวน 7 ตัวที่พื้นและเสาข้างของสะพาน แล้วได้ทำการวัดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานในแต่ละหน้าตัด โดยเก็บข้อมูลนาน 1 ชั่วโมง เมื่อได้ชุดข้อมูลการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน แล้วได้ทำการประเมินค่าคาบธรรมชาติของโครงสร้างด้วยวิธี PSD (power spectral density analysis) ค่าคาบธรรมชาติของโครงสร้างสะพานที่ยาวที่สุด 7 อันดับแรก ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 โดยมีรูปร่างของโหมดดังในรูปที่ 3.3

จากผลการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน 7 โหมดแรกในตารางที่ 3.3 พบว่าเป็นโหมดการเคลื่อนที่ในดิ่ง 2 โหมด การเคลื่อนที่ตามขวาง 4 โหมด และการบิด 1 โหมด เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองในการศึกษานี้กับผลการตรวจวัดของบริษัท AES และผลการวิเคราะห์โดยทีมงานวิศวกรบริษัท IMMS มาเปรียบเทียบกันพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีค่าคาบธรรมชาติน้อยกว่าผลการตรวจวัดของบริษัท AES ยกเว้นในรูปร่างของโหนดที่ 6

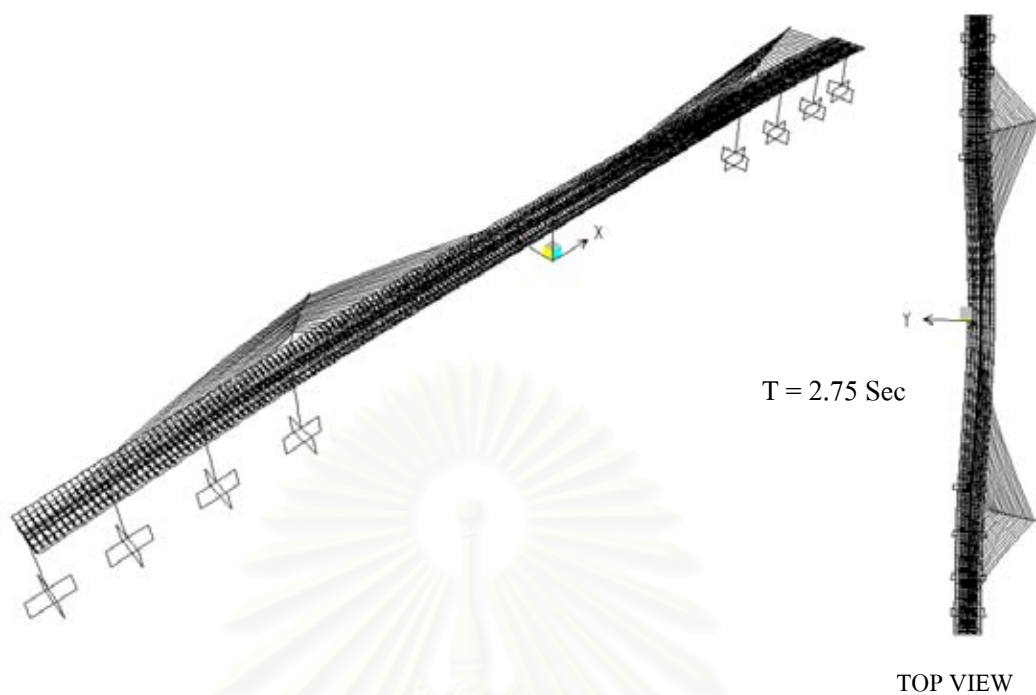
ตารางที่ 3.3 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9

ลำดับ รูปร่าง ของ โหนด	ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่	ลักษณะการเคลื่อนที่	คาบธรรมชาติ (วินาที)				
			ตรวจวัด AES	แบบ จำลอง IMMS	แบบจำลอง ในงานวิจัยนี้	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน (AES เป็นฐาน)	
1	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	3.13	3.03	2.86	-8.63
2	หอคอย	ด้านข้าง	สมมาตร	2.86	2.7	2.75	-3.85
3	หอคอย	ด้านข้าง	ปฏิสมมาตร	2.86	2.7	2.73	-4.55
4	แผ่นพื้น	ด้านข้าง	สมมาตร	2.50	2.22	2.43	-2.80
5	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	ปฏิสมมาตร	2.08	2.05	1.97	-5.29
6	แผ่นพื้น	บิด	สมมาตร	1.49	1.45	1.82	22.15
7	แผ่นพื้น	ด้านข้าง	สมมาตร	1.47	1.43	1.34	-8.84



(ก) รูปร่างของโหนดที่ 1

รูปที่ 3.3 การเคลื่อนตัวของสะพานในแต่ละรูปร่างของโหนด

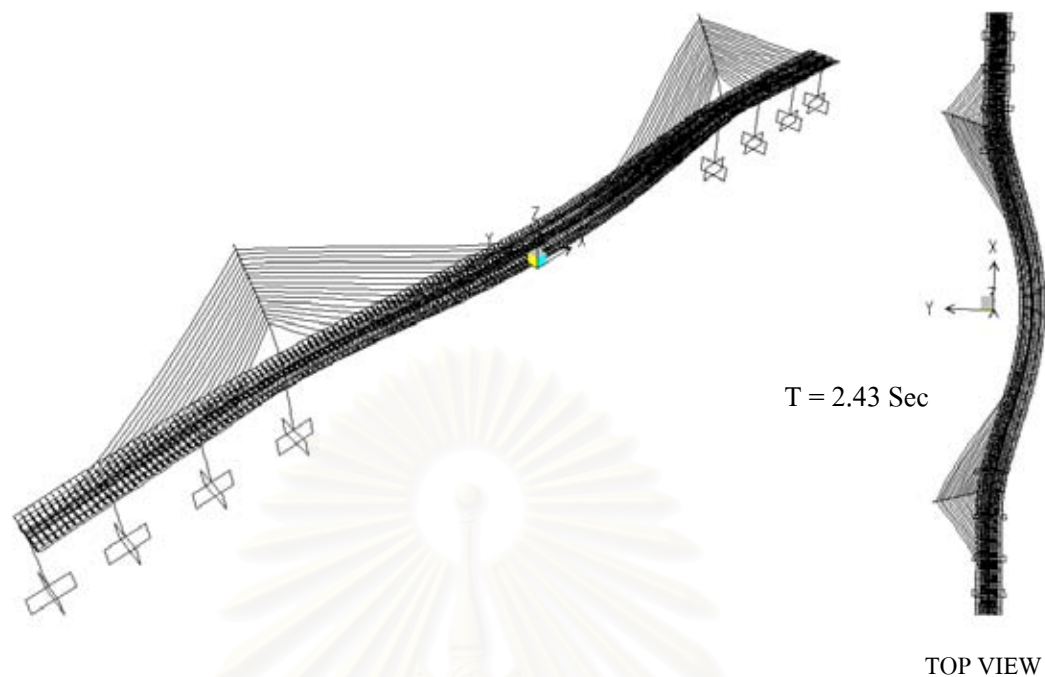


(ข) รูปร่างของโหนดที่ 2

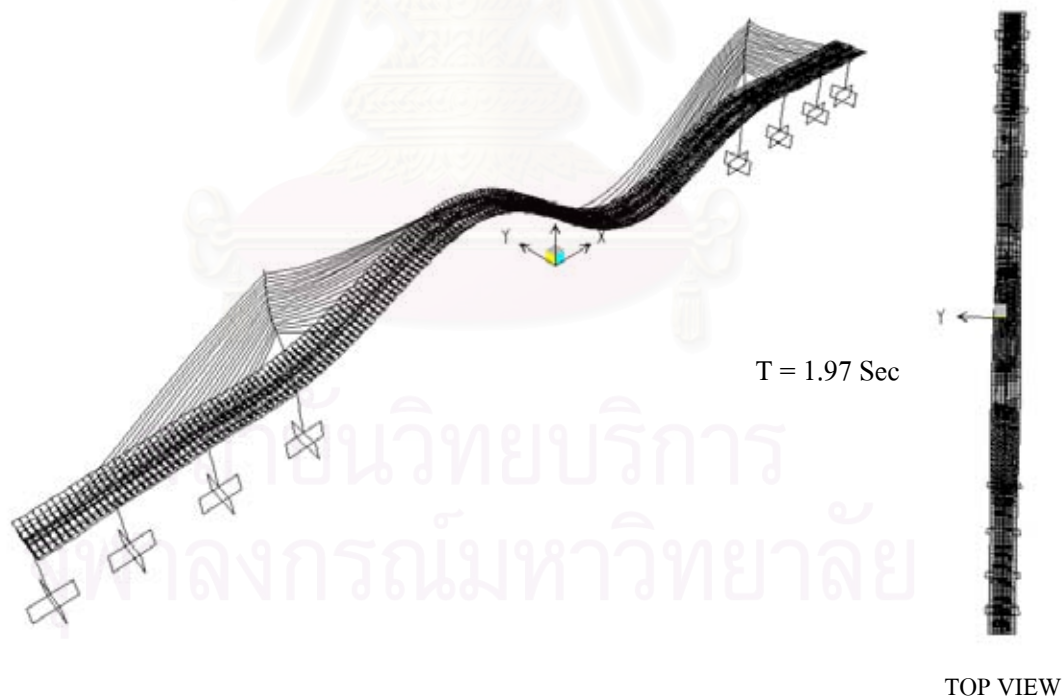


(ค) รูปร่างของโหนดที่ 3

รูปที่ 3.3(ต่อ) การเคลื่อนตัวของสะพานในแต่ละรูปร่างของโหนด

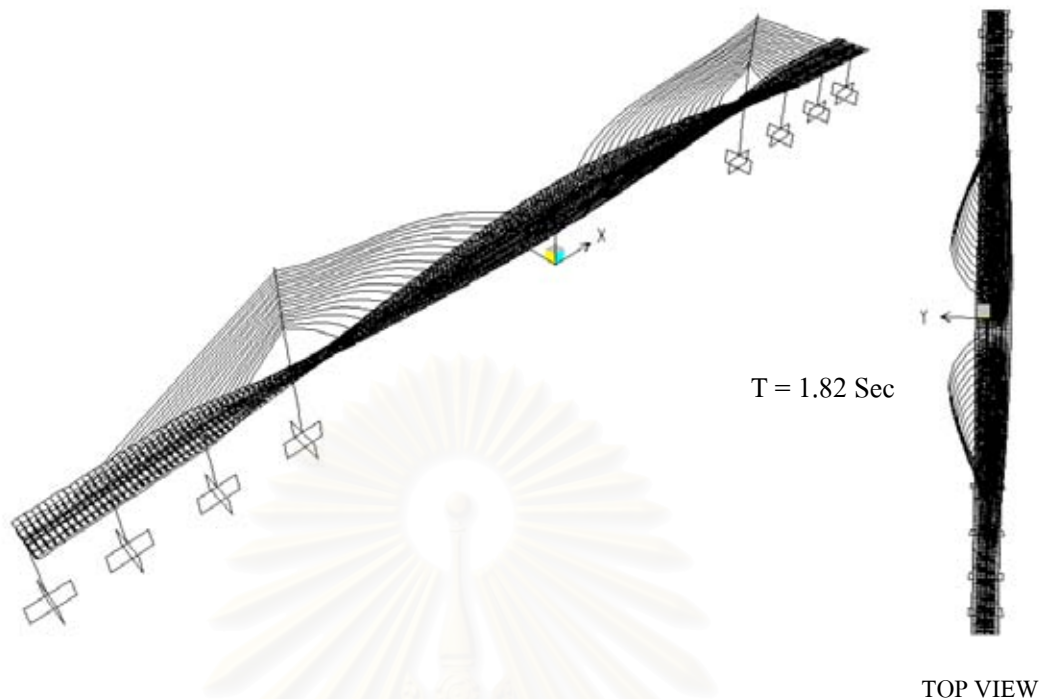


(ง) รูปร่างของโหนดที่ 4

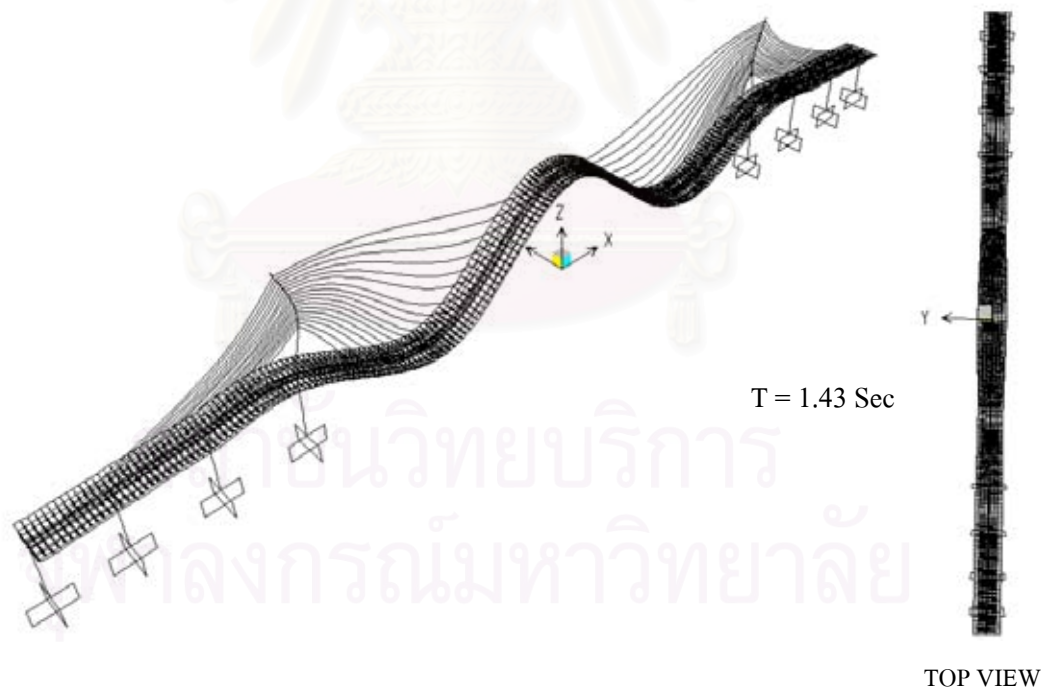


(จ) รูปร่างของโหนดที่ 5

รูปที่ 3.3(ต่อ) การเคลื่อนตัวของสะพานในแต่ละรูปร่างของโหนด



(ฉ) รูปร่างของโหมดที่ 6

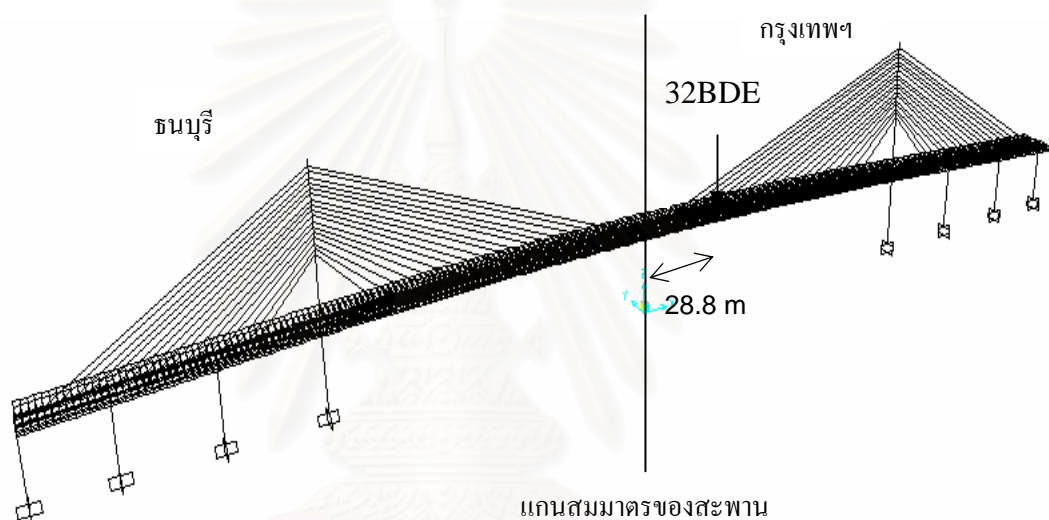


(ช) รูปร่างของโหมดที่ 7

รูปที่ 3.3(ต่อ) การเคลื่อนตัวของสะพานในแต่ละรูปร่างของโหมด

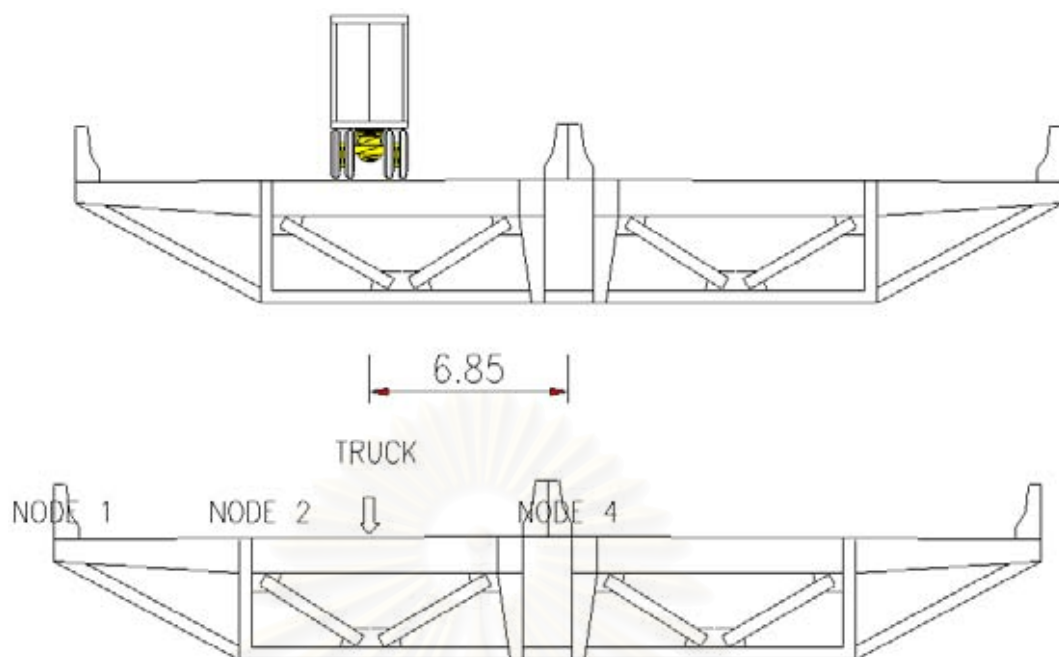
3.4 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึง

การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณหาแรงภายในของชิ้นส่วนรับแรงดึง จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยทำการตรวจวัดชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE ซึ่งอยู่ห่างจากกลางสะพานมาทางด้านกรุงเทพฯ 28.8 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยจะติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) บนชิ้นส่วนรับแรงดึงเพื่อหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกหนัก 45 ตัน วิ่งด้วยความเร็วคงที่ในช่องกลางของสะพาน แล้วดำเนินการเก็บข้อมูล

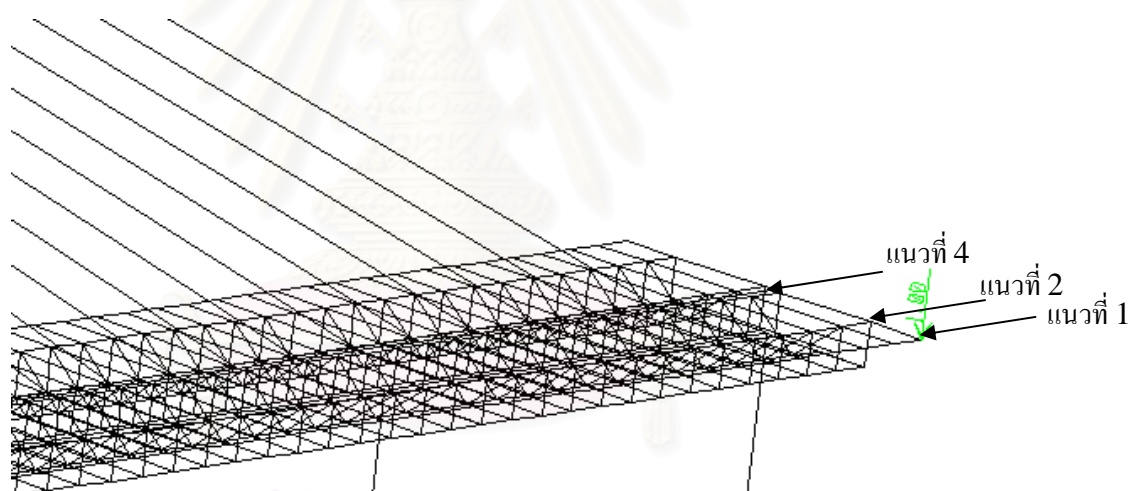


รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของชิ้นส่วนที่ทำการวิเคราะห์หาแรงภายใน

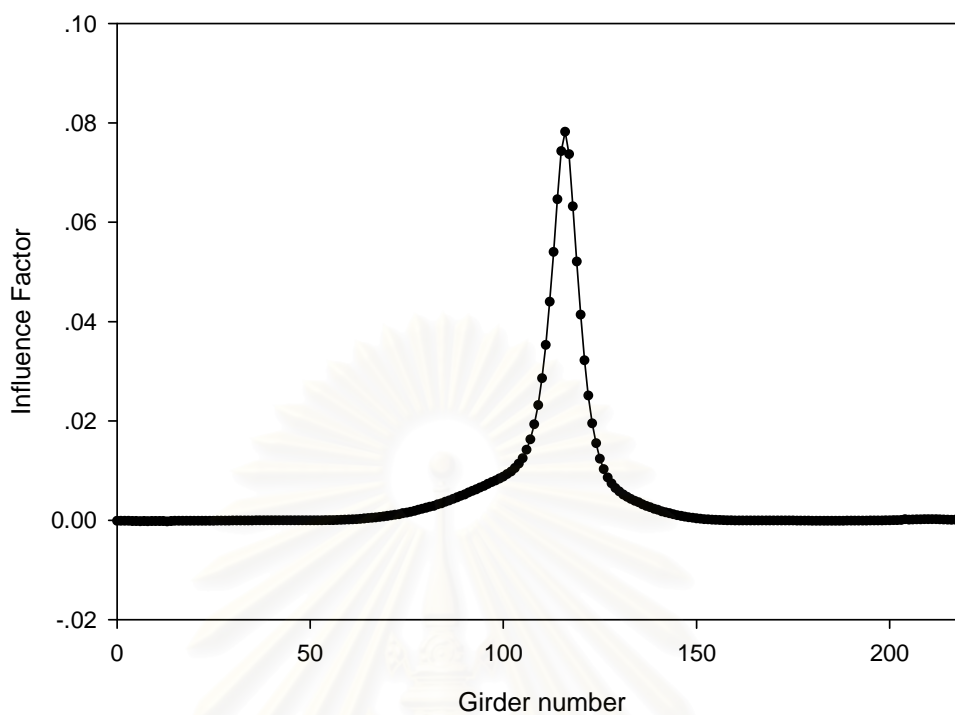
ในการวิเคราะห์หาค่าความเครียดของชิ้นส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.5 นั้นจำเป็นต้องนำหลักการของเส้นอิทธิพล (influence line) มาประยุกต์ใช้ การหาเส้นอิทธิพลของชิ้นส่วนรับแรงดึง จะทำโดยจำลองน้ำหนักบรรทุก 1 กิโลกรัม กระทำที่จุดต่อที่ 1 (ดังรูปที่ 3.6) เคลื่อนที่จากคานตัวแรกไปจนถึงคานตัวสุดท้ายแล้วคำนวณหาแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงจากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกทุกกับแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะได้เส้นอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกทุกที่เคลื่อนที่ผ่านจุดต่อที่ 1 จากนั้นทำในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกทุกที่เคลื่อนที่ผ่านจุดต่อที่ 1 เป็นจุดต่อที่ 2 และ 4 จะได้เส้นอิทธิพลของจุดต่อที่ 2 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



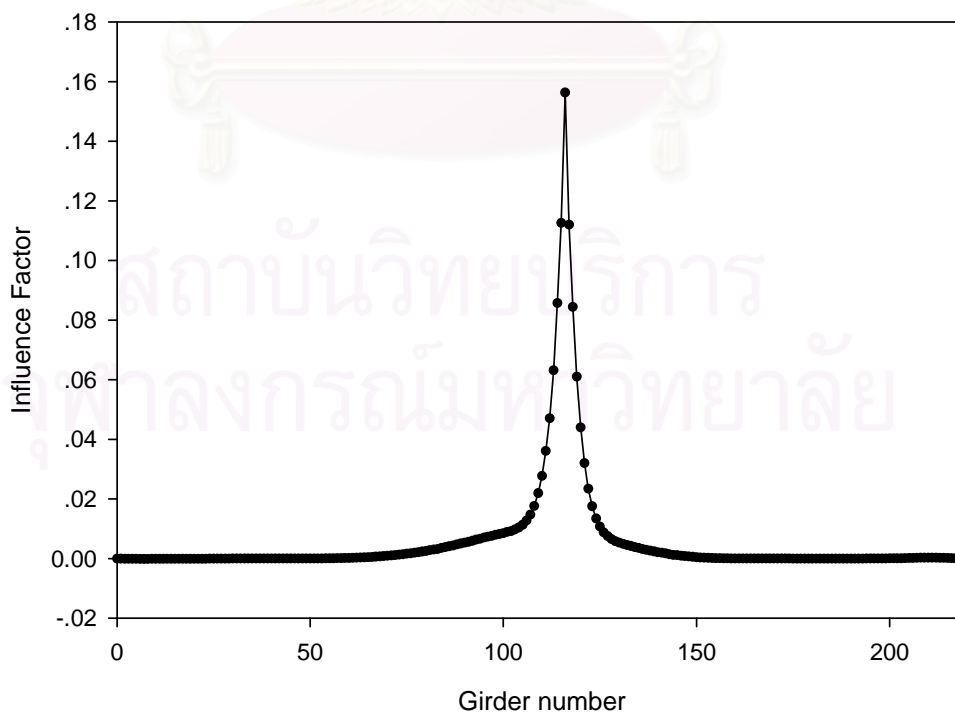
รูปที่ 3.5 จุดต่อที่ใช้ในแบบจำลองและตำแหน่งที่รถบรรทุกวิ่ง



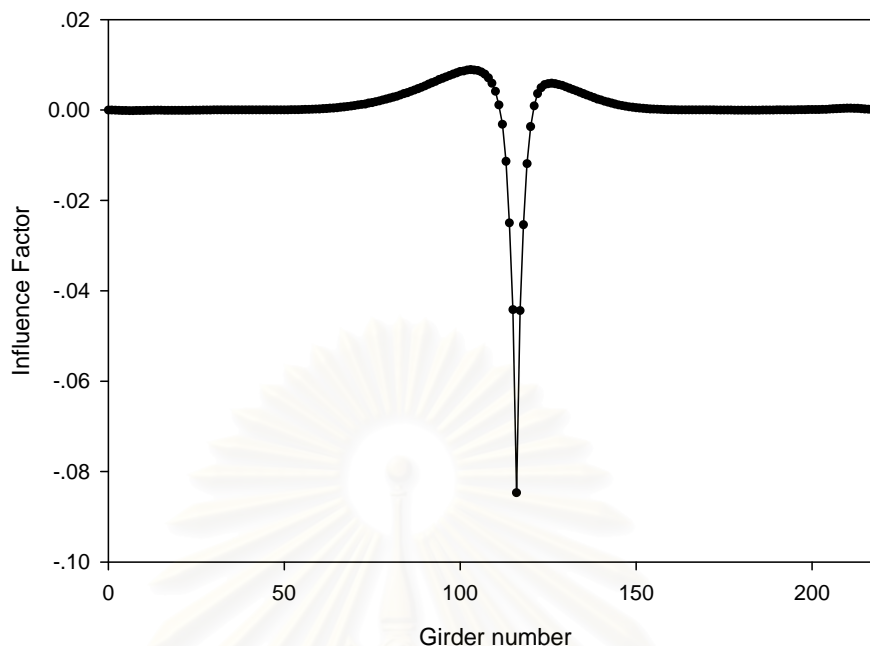
รูปที่ 3.6 ภาพขยายน้ำหนักบรรทุก 1 กิโลกรัมกระทำต่อสะพานผ่านแนวจุดที่ 1



รูปที่ 3.7 เส้นอิทธิพลของแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึง 32BDE เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแรงกระทำตามแนวจุดต่อที่ 1

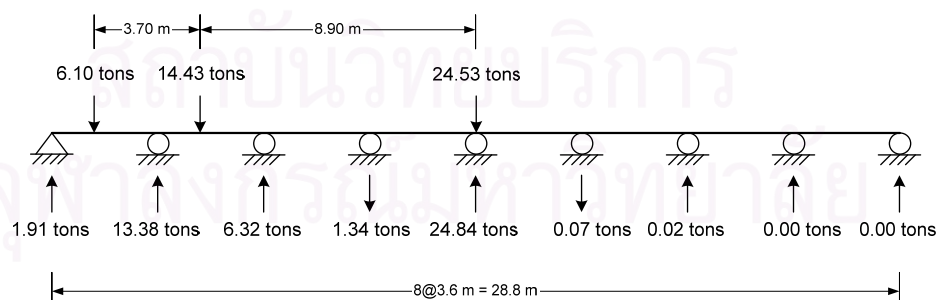


รูปที่ 3.8 เส้นอิทธิพลของแรงส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแนวจุดต่อที่ 2

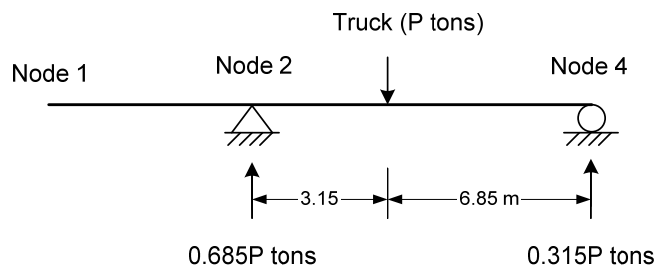


รูปที่ 3.9 เส้นอิทธิพลของแรงส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแนวจุดต่อที่ 4

จากเส้นอิทธิพลของชิ้นส่วนรับแรงดึงของจุดต่อทั้งสาม มีค่าแฟกเตอร์ของแรงเมื่อมีแรงกระทำผ่านจุดต่อหรือตำแหน่งของคาน แต่น้ำหนักบรรทุกทุกวางอยู่ชองกลางของสะพาน จำเป็นต้องกระจายแรงเนื่องจากรบรรทุกทุกให้กระทำที่จุดต่อโดยใช้โปรแกรม SAP2000 จากรูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกให้กระทำที่จุดต่อหรือตำแหน่งของคานในแนวตามยาวของสะพาน ตามระยะห่างระหว่างเพลลาและรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างการกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกตามขวางของสะพานตามตำแหน่งช่องจราจร

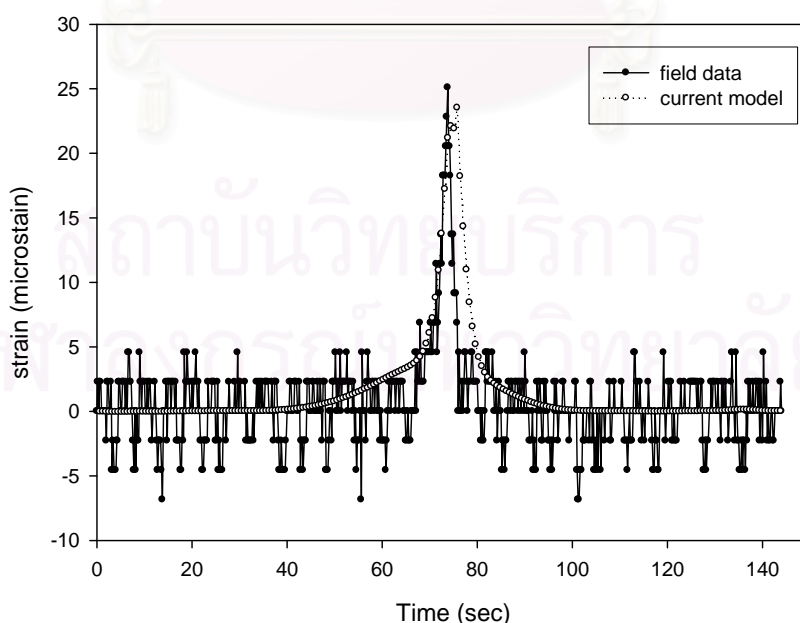


รูปที่ 3.10 การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกเข้าสู่จุดต่อตามยาวของสะพาน โดยใช้โปรแกรม SAP2000

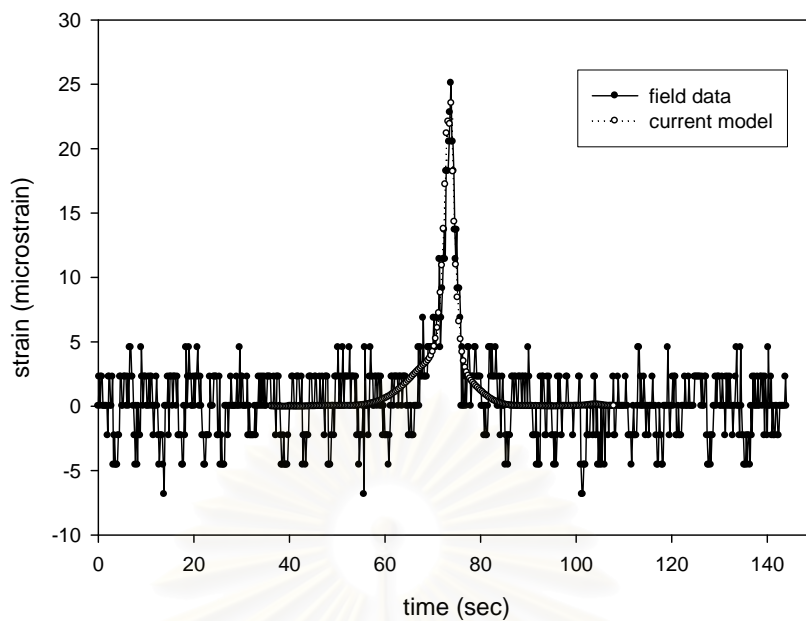


รูปที่ 3.11 การกระจายน้ำหนักรถบรรทุกเข้าสู่จุดต่อตามขวางของสะพาน โดยใช้โปรแกรม SAP2000

เมื่อได้แรงที่กระทำต่อจุดต่อแล้ว ทำการวิเคราะห์หาความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน โดยกำหนดให้ความเร็วของรถบรรทุกมีความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และวิ่งอยู่ชองกลางของแนวถนน โดยการกำหนดแบบจำลองจุดศูนย์กลางถ่วงของรถบรรทุกอยู่ห่างจากจุดต่อที่ 4 เท่ากับ 6.85 เมตรดังรูป จากนั้นจึงนำความเครียดที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับความเครียดที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) แล้วข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟดังรูปที่แสดงในรูปที่ 3.12 พบว่าจุดสูงสุดของค่าความเครียดของผลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามเท่ากับ $25.10 \mu\epsilon$ และค่าค่าความเครียดสูงสุดของแบบจำลองเท่ากับ $23.53 \mu\epsilon$ โดยผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่ความกว้างของกราฟทั้งสองเส้นมีความแตกต่างกันอยู่ จึงทำการปรับความเร็วของรถบรรทุกเป็น 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ปรากฏว่าจุดสูงสุดและความกว้างของกราฟที่ได้สอดคล้องกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)



รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

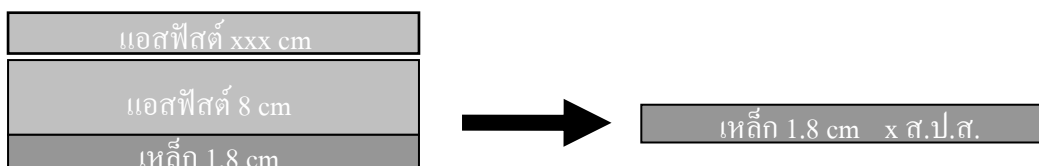
หลังจากการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองในการศึกษานี้ยังมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงและจากแบบจำลองของ AES Group และ บริษัท IMMS จึงได้ทำการปรับแก้โดยอาศัยหลักความเป็นจริงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ในความเป็นจริงสะพานพระรามเก้าอาจมีการซ่อมแซมพื้นถนนไปบ้างบางส่วนส่งผลให้แอสฟัลต์มีน้ำหนักและมวลมีค่าเพิ่มขึ้นดังนั้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ตัวคุณมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย หรือไม่ว่าจะเป็นการใส่ค่าความเครียดในสายเคเบิล ในตามความเป็นจริงแล้วการก่อสร้างก็ต้องมีใส่แรงในสายเคเบิลอยู่แล้วเพื่อลดการตกท้องช้าง เป็นต้น

4.1 ความไวของแรงในชิ้นส่วนต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างสะพานพระรามเก้า

เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของสะพานจึงต้องศึกษาความไวของคุณสมบัติต่างๆของสะพานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างของสะพานพระรามเก้า โดยการปรับแก้จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อส่วนอื่นๆมากนักยกเว้นแต่ส่วนที่ผู้วิจัยต้องการ โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาความไวเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

4.1.1 สัมประสิทธิ์ตัวคุณน้ำหนักและมวลของพื้น

จากในบทที่ 2 คุณสมบัติของแผ่นพื้นได้กล่าวถึงหน้าตัดแปลงไปแล้ว ผู้วิจัยได้ลองปรับสัมประสิทธิ์ดังกล่าวให้มีค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 การเพิ่มสัมประสิทธิ์นี้จะปรับเพื่อให้ได้คาบธรรมชาติใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES เป็นหลัก โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคุณน้ำหนักและมวลของพื้นนี้จะเพิ่มในลักษณะของแอสฟัลต์ให้หนาขึ้นทีละ 1 เซนติเมตร การแปลงนี้จะใช้ค่าน้ำหนักจำเพาะของแอสฟัลต์เท่ากับ 2.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และน้ำหนักจำเพาะของเหล็กเท่ากับ 7.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากรูปที่ 4.1 หลักการแปลงที่ใช้คือนำความหนาที่เพิ่มขึ้นรวมกับความหนาเดิมแล้วคูณด้วยน้ำหนักจำเพาะของแอสฟัลต์แล้วหารด้วยน้ำหนักจำเพาะของเหล็กจากนั้นความหนาที่ได้ไปบวกกับความหนาของเหล็กแล้วหารด้วยความหนาของเหล็ก ค่าสุดท้ายที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคุณ



รูปที่ 4.1 การปรับสัมประสิทธิ์ตัวคูณน้ำหนักและมวลของพื้น

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กับคาบธรรมชาติ

ชนิดของ แบบจำลอง	ร้อยละโดย เทียบกับ ก่อน ปรับแก้	คาบธรรมชาติ (วินาที)								
		โหมคที่								
ง	สัมประสิทธิ์ ตัวคูณ	ก่อน ปรับแก้	1	2	3	4	5	6	7	
Original	2.368	100.00	2.8	6	2.75	2.73	2.43	1.97	1.82	1.34
			2.9	9cm	2.538	105.93	3	2.76	2.73	2.48
10cm	2.709	114.41	3.0	0	2.76	2.73	2.53	2.06	1.93	1.40
			3.0	11cm	2.88	127.12	6	2.78	2.73	2.58
12cm	3.051	129.66	3.1	3	2.79	2.73	2.61	2.15	2.03	1.45
			3.1	AES	-	-	3	2.86	2.86	2.50

จากการสังเกตพบว่ก่อนปรับแก้มวลและน้ำหนักของแผ่นพื้นคาบธรรมชาติของแบบจำลองสะพานพระรามเก้ามีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลจากการตรวจวัดจริงในภาคสนามของบริษัท AES หลังการปรับแก้ทำให้น้ำหนักและมวลของแผ่นพื้นเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้คาบธรรมชาติในรูปร่างของโหมคที่แผ่นพื้นเกิดการเคลื่อนที่เป็นหลักมีคาบธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนในรูปร่างของโหมคที่เสาซึ่งเคลื่อนที่เป็นหลักคาบธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 ร้อยละความต่างคาบธรรมชาติจากแบบจำลองที่ปรับแก้แล้วต่อการตรวจวัดใน
ภาคสนามของ AES โดยใช้ผลการตรวจวัดของ ASE เป็นฐาน

ชนิดของ แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ ตัวคูณ	ร้อยละ ก่อน ปรับแก้	ร้อยละความต่างคาบธรรมชาติจากแบบจำลองที่ปรับแก้แล้วต่อ การตรวจวัดในภาคสนามของ AES						
			เทียบกับ						
			โหมดที่						
1	2	3	4	5	6	7			
Original	2.368	100	-8.63	-3.85	-4.55	-2.80	-5.29	22.15	-8.84
9cm	2.538	105.93	-6.39	-3.50	-4.55	-0.80	-2.88	25.50	-6.80
10cm	2.709	114.41	-4.15	-3.50	-4.55	1.20	-0.96	29.53	-4.76
11cm	2.88	127.12	-2.24	-2.80	-4.55	3.20	1.44	32.89	-2.04
12cm	3.051	129.66	0.00	-2.45	-4.55	4.40	3.37	36.24	-1.36
AES	-	-	3.13	2.86	2.86	2.50	2.08	1.49	1.47

จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่าหากเปลี่ยนสัมประสิทธิ์เป็น 2.709 คาบธรรมชาติ
ที่ได้ก็มีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดของบริษัท AES โดยมีร้อยละความต่างไม่เกิน 4.76 ในทุก
รูปร่างของโหมคยกเว้นในโหมดที่ 6 หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มขึ้นมาเป็นแอสฟัลต์พบว่า
เสมือนมีแอสฟัลต์หนาเพิ่มขึ้น 2 เซนติเมตร จากเดิม 8 เซนติเมตรเป็น 10 เซนติเมตร จากการ
สันนิษฐานว่าหากมีการซ่อมบำรุงพื้นผิวสะพานอาจจะทำให้เกิดความหนามากขึ้นได้ ผู้ทำงานวิจัย
จึงเลือกแบบจำลองที่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์เป็น 2.709 ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ในบทที่ 5 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 การปรับคุณสมบัติของจุดต่อและการปรับแรงดึงในเคเบิล

การปรับคุณสมบัติจุดต่อในงานวิจัยนี้จะศึกษาในส่วนการเปลี่ยนแปลงจุดต่อจากแบบยึดแน่นเป็นแบบจุดหมุนเคเบิล ชั้นส่วนรับแรงดึง แบบจำลองที่ใช้จะใช้แบบจำลองที่ไม่ได้มีการปรับสัมประสิทธิ์ตัวคูณของพื้น โดยการศึกษาจะดูความสัมพันธ์ของการปรับคุณสมบัติกับคาบธรรมชาติ แรงในเคเบิล แรงในชั้นส่วนรับแรงดึง และแรงที่จุดรองรับ

การปรับแรงดึงในเคเบิลจะทำการปรับเพื่อให้แรงดึงในเคเบิลมีค่าสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงจากภาคสนามของ AES กล่าวคือการปรับแรงดึงนี้จะทำให้แรงในเคเบิลมีความใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงแล้วจะส่งผลอย่างไรกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์หรือแรงในเคเบิล แรงในชั้นส่วนรับแรงดึง และแรงที่จุดรองรับ โดยจากการเปรียบเทียบเบื้องต้นพบว่าแรงดึงในเคเบิลมีความใกล้เคียงกันกับแบบจำลองของบริษัท IMMS แต่ต่างกับกับผลจากการตรวจวัดในสนามของบริษัท AES ในบริเวณกึ่งกลางของสะพาน ซึ่งจากข้อสันนิษฐานว่าอาจจะเป็นผลเนื่องจากการไม่คำนึงถึงผลของความเครียดในระหว่างการก่อสร้างจริง ดังนั้นจึงได้ทำการปรับแก้แบบจำลอง โดยเพิ่มค่าความเครียดซึ่งค่าความเครียดที่เพิ่มเข้ามานี้ได้มาจากการคำนวณหาแรงส่วนต่างระหว่างแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES (จากตารางที่ 3.2) นำแรงส่วนต่างที่ได้มาวิเคราะห์เป็นค่าความเครียดส่วนต่าง จากนั้นวิเคราะห์แรงในเคเบิลใหม่อีกครั้งโดยเพิ่มค่าความเครียดดังกล่าว พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ก็ยังมีแรงส่วนต่างอยู่บ้างแต่น้อยลงกว่าครั้งก่อน จึงได้ทำการวิเคราะห์หาความเครียดส่วนต่างทำแบบเดิมซ้ำๆ จนทำให้แรงดึงในเคเบิลของแบบจำลองกับแรงดึงในเคเบิลจากการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES มีความใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

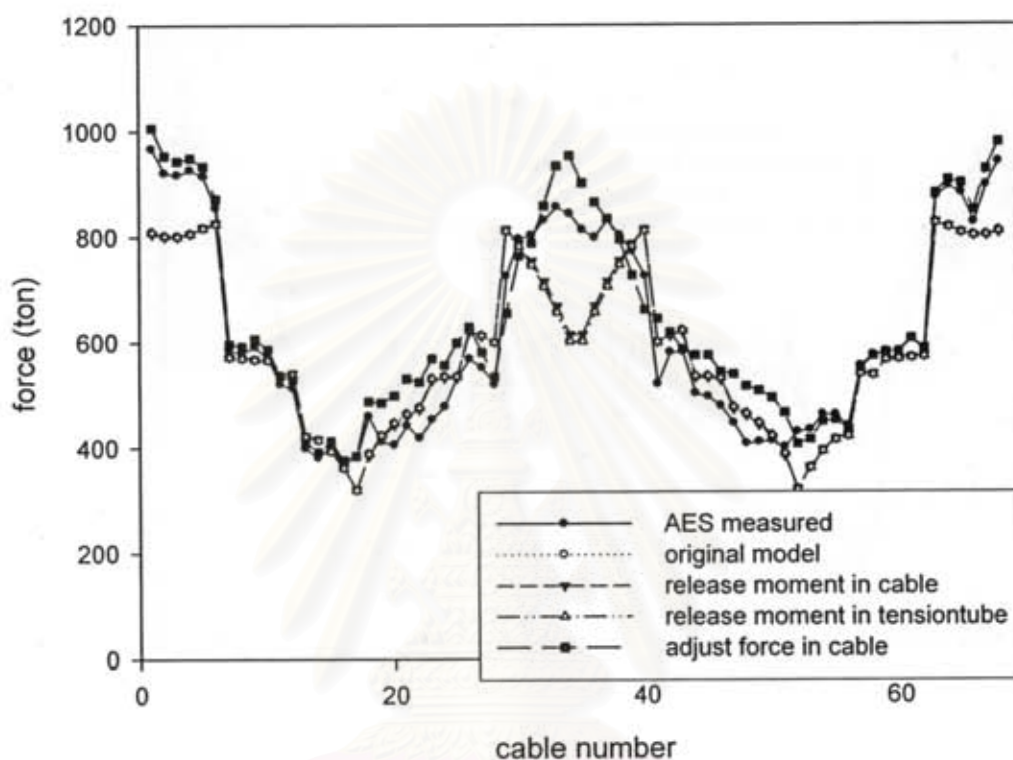
ตารางที่ 4.3 คาบธรรมชาติที่ได้ก่อนและหลังจากการปรับคุณสมบัติของจุดต่อและแรงดึง
ในเคเบิล

ลำดับ	ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่			คาบธรรมชาติ (วินาที)			
				ก่อน ปรับแก้	จุดหมุน		ปรับแรง ดึงใน เคเบิล
					ที่ปลาย เคเบิล	จุดหมุนที่ ปลายชิ้นส่วน รับแรงดึง	
1	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	2.86	2.86	2.86	2.86
2	เสาข้าง	ด้านข้าง	สมมาตร	2.75	2.75	2.75	2.75
3	เสาข้าง	ด้านข้าง	ปฏิสมมาตร	2.73	2.73	2.73	2.73
4	แผ่นพื้น	ด้านข้าง	สมมาตร	2.43	2.43	2.43	2.43
5	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	ปฏิสมมาตร	1.97	1.97	1.97	1.97
6	แผ่นพื้น	บิด	สมมาตร	1.82	1.82	1.82	1.82
7	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	1.34	1.34	1.34	1.34

จากตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนจุดต่อจากแบบยึดแน่นเป็นจุดแบบหมุนเคเบิลและชิ้นส่วนรับแรงดึงรวมทั้งการปรับแรงดึงในเคเบิล ไม่ส่งผลกระทบต่อทางด้านคุณสมบัติทางพลศาสตร์กับแบบจำลองเนื่องมาจากการปรับดังกล่าวไม่ส่งผลถึงค่าสตีเฟนสของโครงสร้างในรูปร่างของโหนดที่เกิดขึ้นในโหนดแรกๆที่ผู้วิจัยพิจารณา คาบธรรมชาติในรูปร่างของโหนดแรกจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้ไม่ได้พิจารณาความไม่เชิงเส้นแบบเรขาคณิต (geometric nonlinearity)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงในเคเบิลเป็นแรงที่สำคัญส่วนหนึ่งของสะพานพระรามเก้าเพราะเคเบิลเป็นชิ้นส่วนหลักของสะพานซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักของโครงสร้างหลักของสะพาน การปรับคุณสมบัติของจุดต่อ และแรงดึงในเคเบิลส่งผลดังรูปที่ 4.2

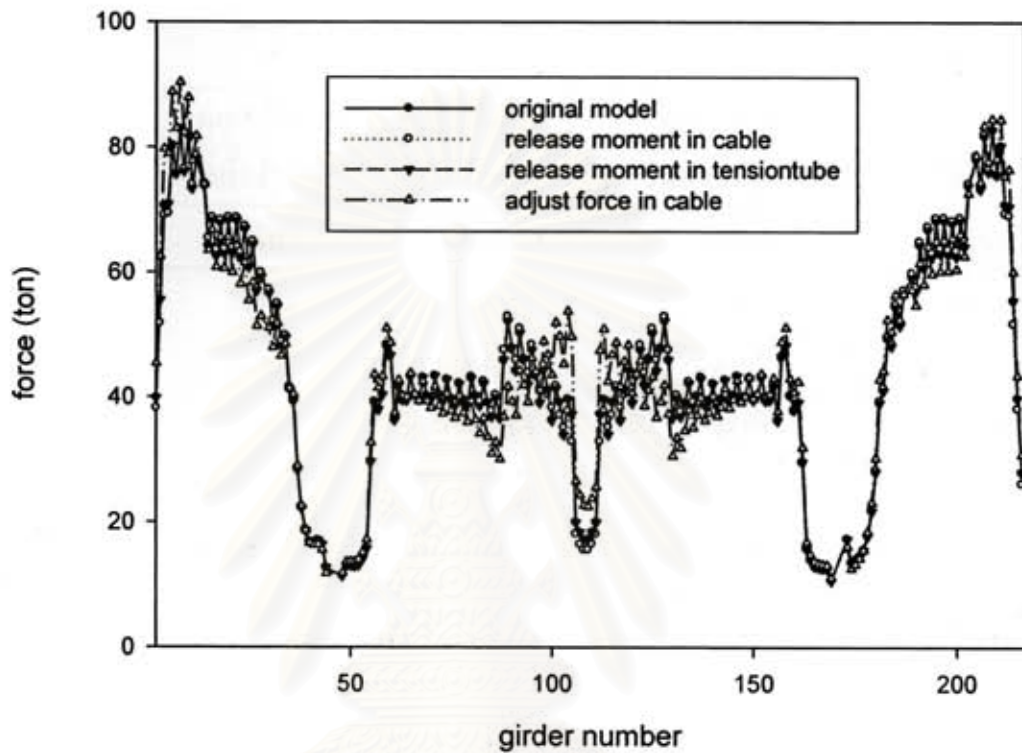


รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบแรงในเคเบิลที่มีการปรับคุณสมบัติของจุดต่อและปรับแรงดึงในเคเบิล

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการปรับคุณสมบัติของจุดต่อของเคเบิลและชิ้นส่วนรับแรงดึงไม่ส่งผลต่อแรงในเคเบิล ส่วนการปรับแรงดึงเพื่อให้สอดคล้องกับบริษัท AES ส่งผลให้แรงดึงในเคเบิลมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเป็นแรงที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของสะพานพระรามเก้าเนื่องมาจากการสำรวจพบว่าในสะพานพระรามเก้าเกิดการชำรุดชิ้นในชิ้นส่วนรับแรงดึง การวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงในส่วนนี้จึงเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญแก่การศึกษา



รูปที่ 4.3 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่มีการปรับคุณสมบัติของจุดต่อ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการปรับคุณสมบัติของจุดต่อของเคเบิลและชิ้นส่วนรับแรงดึง ไม่ส่งผลกระทบต่อแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงมากนัก แต่การปรับแรงดึงในเคเบิลนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึง โดยการวิเคราะห์พบว่าบริเวณที่แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเกิดมาจากการปรับแรงดึงในเคเบิลให้มีความมากขึ้น และบริเวณที่แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ลดลงเกิดจากการที่ปรับแรงดึงในเคเบิลให้ลดลง

แรงปฏิกิริยาที่จตุรกรรับในแนวแกน Z เป็นแรงที่สามารถดูการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างได้ กล่าวคือส่วนใดที่มีแรงที่จตุรกรรับมาก แรงที่ถ่ายต่อกันมาย่อมมีมาก ดังนั้นชิ้นส่วนที่อยู่บริเวณนั้นๆก็จะแรงมากตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 แรงปฏิกิริยาที่ได้ก่อนและหลังจากการปรับคุณสมบัติของจุดต่อและแรงดึงในเคเบิล

ตำแหน่ง	ก่อนปรับแก้	ปลดโมเมนต์ใน	ปลดโมเมนต์ใน	ปรับแรงดึงใน
	แบบจำลอง	เคเบิล	ชิ้นส่วนรับแรงดึง	เคเบิล
	(ตัน)	(ตัน)	(ตัน)	(ตัน)
31500	4963	4988	4963	4867
41500	4205	4190	4205	4150
51500	4888	4866	4888	5035
51501	17838	17850	17838	17860
51502	17855	17866	17855	17849
51503	4887	4866	4887	4920
51504	4206	4191	4206	4218
51505	4963	4988	4963	4905
ผลรวม	63805	63805	63805	63805

แต่การปรับแบบจำลองนี้แรงปฏิกิริยาที่จตุรกรรับกลับมีค่าไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก ดังตารางที่ 4.4 แสดงว่าชิ้นส่วนต่างๆก็มีแรงไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การเปรียบเทียบแรงภายในเคเบิลภายใต้น้ำหนักบรรทุกหลังจากการปรับแก้แบบจำลอง

จากการศึกษาความไวของแรงในชิ้นส่วนต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างสะพานพระรามเก้าพบว่าการปรับสัมประสิทธิ์ตัวคูณของพื้นและการปรับแรงดึงทำให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์และแรงดึงในเคเบิลมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES มากยิ่งขึ้นผู้ทำงานวิจัยทำการปรับแบบจำลองโดยปรับให้สัมประสิทธิ์ตัวคูณพื้นมีค่าเท่ากับ 2.709 และทำการปรับแรงดึงใหม่อีกครั้งเพื่อให้เท่ากับของผลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนามของบริษัท AES โดยการปรับแรงดึงจะทำการปรับหลายครั้งขึ้นเพื่อให้ได้แรงดึงที่ใกล้เคียงกับผลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนามของบริษัท AES มากที่สุด จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง ค่าความเครียดที่ใช้ในการปรับแก้แบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ใช้ในการใส่ค่าความเครียดในเคเบิลหลังการปรับแก้

ลำดับ เคเบิล	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	ลำดับ เคเบิล	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	ลำดับ เคเบิล	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	ลำดับ เคเบิล	ความเครียด ($\mu\epsilon$)
1.00	-101.26	18.00	-298.59	35.00	-447.82	52.00	113.07
2.00	-83.37	19.00	-207.63	36.00	-183.86	53.00	88.83
3.00	-68.39	20.00	-261.72	37.00	-173.68	54.00	64.37
4.00	-56.71	21.00	-249.28	38.00	41.06	55.00	43.37
5.00	-48.80	22.00	-297.83	39.00	228.80	56.00	26.85
6.00	-44.37	23.00	-324.13	40.00	291.57	57.00	14.18
7.00	-45.03	24.00	-307.88	41.00	-85.97	58.00	5.01
8.00	-48.53	25.00	-259.82	42.00	-176.97	59.00	0.14
9.00	-54.39	26.00	-236.80	43.00	-250.22	60.00	-3.73
10.00	-59.54	27.00	-136.25	44.00	-287.36	61.00	-8.18
11.00	-63.26	28.00	-67.11	45.00	-309.00	62.00	-11.86
12.00	-64.21	29.00	321.16	46.00	-306.67	63.00	-19.93
13.00	-59.67	30.00	163.80	47.00	-274.11	64.00	-31.72
14.00	-52.20	31.00	76.05	48.00	-305.76	65.00	-46.38
15.00	-45.04	32.00	-139.41	49.00	-274.17	66.00	-61.08
16.00	-31.63	33.00	-393.27	50.00	-230.68	67.00	-79.25
17.00	379.66	34.00	-549.96	51.00	-185.17	68.00	-96.85

เมื่อเพิ่มค่าความเครียดและทำการเปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลใหม่พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดของบริษัท AES Group. มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.3

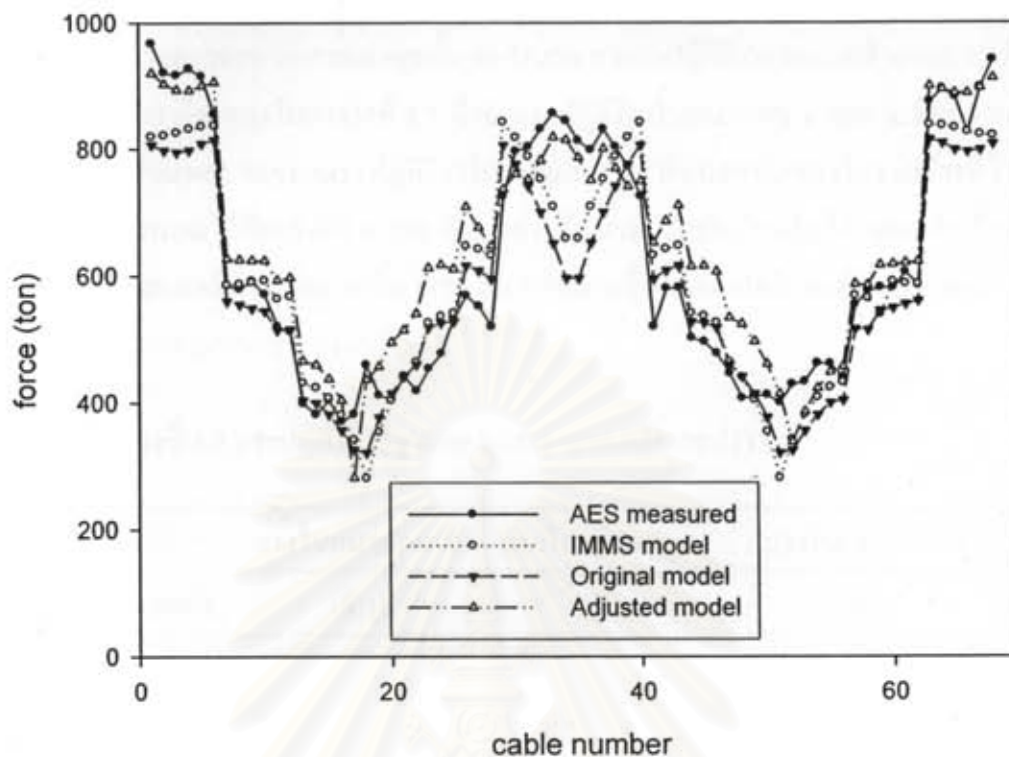
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวก่อนและหลังปรับแก้แบบจำลองกับ บริษัท AES, IMMS

ลำดับ ของ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)				ลำดับ ของ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)			
	ผลการ ตรวจ วัดของ AES	แบบ จำลอง ของ IMMS	ก่อน ปรับ แก้	หลัง ปรับแก้		ผลการ ตรวจ วัดของ AES	แบบ จำลอง ของ IMMS	ก่อน ปรับ แก้	หลัง ปรับ แก้
	1	967	820	807		976	35	813	659
2	921	822	798	929	36	798	709	652	814
3	917	826	795	924	37	831	752	700	850
4	927	832	798	932	38	803	788	741	826
5	915	836	809	919	39	772	818	776	799
6	855	837	815	858	40	725	842	806	757
7	585	586	560	586	41	520	632	595	547
8	580	587	555	580	42	580	642	608	610
9	592	590	549	591	43	581	647	616	616
10	571	593	545	569	44	502	541	528	535
11	521	564	515	519	45	496	536	526	533
12	513	568	516	510	46	478	526	518	518
13	399	432	404	396	47	446	464	460	486
14	382	424	400	378	48	407	440	441	450
15	404	408	382	399	49	410	404	414	455
16	371	381	357	365	50	412	354	377	458
17	382	342	326	375	51	400	281	321	446
18	460	281	321	497	52	429	342	325	414
19	412	354	377	450	53	433	381	356	419
20	406	404	415	443	54	462	408	381	450
21	442	440	442	478	55	461	424	400	450

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบแรงดึงในเคเบิลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกคานตัวก่อนและหลัง
ปรับแก้แบบจำลองกับ บริษัท AES, IMMS (ต่อ)

ลำดับ ของ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)				ลำดับ ของ เคเบิล	แรงดึงในเคเบิล (ตัน)			
	ผลการ ตรวจ วัดของ		แบบ จำลอง			ผลการ ตรวจ วัดของ		แบบ จำลอง	
	AES	IMMS	ก่อน ปรับ แก้	หลัง ปรับ แก้		AES	IMMS	ก่อน ปรับ แก้	หลัง ปรับ แก้
22	419	464	460	453	56	440	432	404	431
23	454	526	519	489	57	554	568	516	543
24	478	536	526	510	58	575	564	515	566
25	533	541	528	563	59	581	539	545	573
26	569	647	616	600	60	581	590	549	575
27	552	642	608	580	61	605	587	555	600
28	520	632	595	544	62	585	586	560	582
29	725	842	806	755	63	874	837	815	872
30	796	818	776	822	64	894	836	809	894
31	803	788	741	825	65	882	832	798	884
32	831	752	700	850	66	826	826	795	830
33	856	709	651	872	67	896	822	798	902
34	844	659	596	857	68	940	820	808	948

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 แรงในสายเคเบิลก่อนและหลังการปรับแก้แบบจำลองจากบริษัท AES และ IMMS

จากรูปที่ 4.4 พบว่าหลังจากการปรับแก้แรงดึงในเคเบิลโดยใส่ค่าความเครียดเข้าไปส่งผลให้แรงในแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดของบริษัท AES มากขึ้นซึ่งมากที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของสะพานและ ช่วงกลางสะพาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การตรวจสอบสภาพสมดุลของแรงหลังจากการปรับแก้แบบจำลอง

ในการตรวจสอบสภาพสมดุลนั้น จะคำนวณหาแรงปฏิกิริยาจากแบบจำลองภายใต้น้ำหนักของโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งค่าแรงปฏิกิริยาในแนวแกน x และ y มีผลรวมของแรงเท่ากับ 0 ส่วนผลรวมของแรงปฏิกิริยาในแนวแกน z กับน้ำหนักของโครงสร้างที่โปรแกรม SAP2000 คำนวณได้คือเท่ากับ 65358 ตัน กล่าวคือ การปรับสัมประสิทธิ์ตัวคูณแผ่นพื้นส่งผลให้โครงสร้างทั้งหมดมีน้ำหนักมากขึ้น 1553 ตัน หรือมากขึ้น 2.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเท่ากับน้ำหนักของแผ่นพื้นที่เพิ่มความหนาขึ้น 2 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.7 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของแบบจำลองหลังการปรับแก้

ตำแหน่ง	แรงในแนวแกน X	แรงในแนวแกน Y	แรงในแนวแกน Z
	(ตัน)	(ตัน)	(ตัน)
31500	-891	-4	18,922
41500	891	-3	18,913
51500	0	0	4,849
51501	0	-2	4,042
51502	0	6	4,875
51503	0	6	4,759
51504	0	-2	4,110
51505	0	0	4,887
ผลรวม	0	0	65,358

4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์หลังการปรับแก้แบบจำลอง

การปรับแก้แบบจำลองโดยอาศัยการเพิ่มสัมประสิทธิ์ตัวคูณที่แผ่นพื้นเป็น 2.709 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากแบบของผู้ออกแบบไม่เกินร้อยละ 15 จากก่อนการปรับแก้ แบบจำลองมีคาบธรรมชาติใหม่ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 คาบธรรมชาติ (natural period) ของโครงสร้างสะพานพระราม 9 หลังการปรับแก้

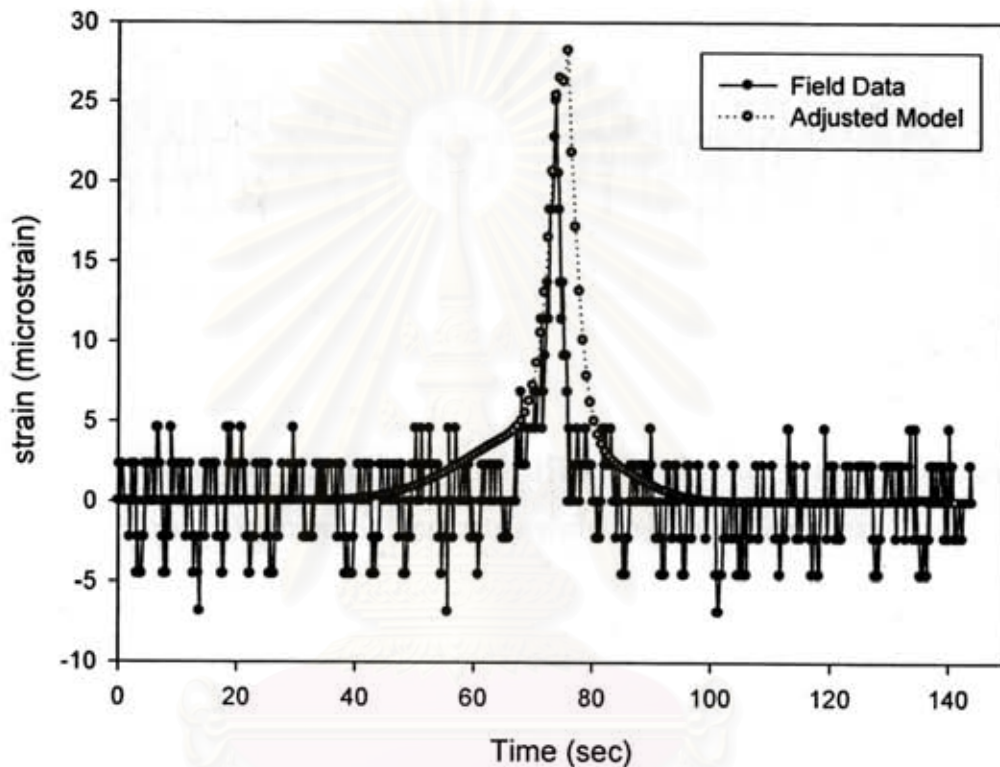
ลำดับ รูปร่าง ของ โหมด	ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่	ลักษณะการเคลื่อนที่	คาบธรรมชาติ (วินาที)					
			ผลการ ตรวจ วัดของ AES	แบบ จำลอง ของ AES	ก่อน ปรับ แก้	หลัง ปรับ แก้	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน เทียบกับ AES	
1	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	3.13	3.03	2.86	3.00	-4.15
2	เสาข้าง	ด้านข้าง	สมมาตร	2.86	2.70	2.75	2.76	-3.50
3	เสาข้าง	ด้านข้าง	ปฏิสมมาตร	2.86	2.70	2.73	2.73	-4.55
4	แผ่นพื้น	ด้านข้าง	สมมาตร	2.50	2.22	2.43	2.53	1.20
5	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	ปฏิสมมาตร	2.08	2.05	1.97	2.06	-0.96
6	แผ่นพื้น	บิด	สมมาตร	1.49	1.45	1.82	1.93	29.53
7	แผ่นพื้น	แนวตั้ง	สมมาตร	1.47	1.43	1.34	1.40	-4.76

จากตารางพบว่าการปรับแบบจำลองทำให้คาบธรรมชาติมีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดของบริษัท AES มากยิ่งขึ้นในหลายๆโหมด โดยเฉพาะในโหมดที่ 1 ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 4.15 เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดของบริษัท AES

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

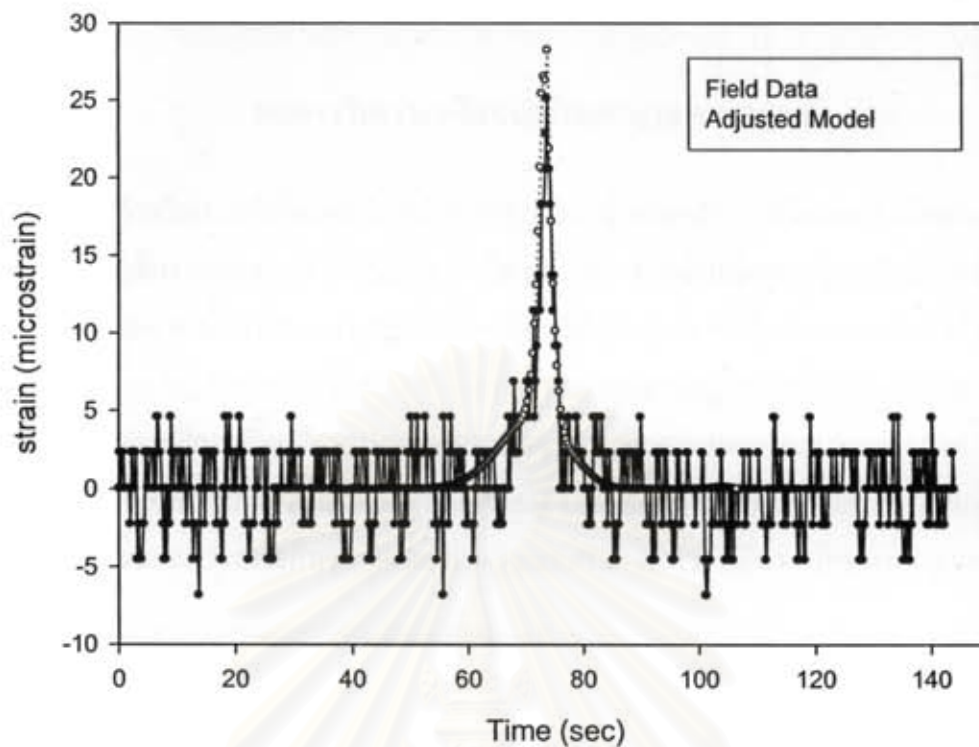
4.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงหลังการปรับแก้แบบจำลอง

การปรับแก้แบบจำลองทำให้เกิดแรงดึงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงหลังการปรับแก้แบบจำลองอีกครั้งหนึ่ง โดยการเปรียบเทียบนี้จะทำในลักษณะเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ผลจากการเปรียบเทียบอีกครั้ง ได้ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE หลังปรับแก้แบบจำลอง (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

จากรูปที่ 4.5 ค่าความเครียดสูงสุดมีค่าเท่ากับ $28.23 \mu\epsilon$ ต่างกับการตรวจวัดในภาคสนามคือ $25.10 \mu\epsilon$ ค่าที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีผลมาจากการปรับแรงดึงในเคเบิลส่งผลให้สติเฟนของคานหลักมีค่าลดลง ซึ่งค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลองหลังการปรับแก้ มีค่าต่างกับผลการตรวจวัดในภาคสนามไม่เกินค่าสัญญาณรบกวน ($5 \mu\epsilon$) จึงถือว่าแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงจากการตรวจสอบในภาคสนาม จากนั้นทำการปรับความเร็วเป็น 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงพบว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในบทที่ 3



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ตำแหน่ง 32 BDE หลังปรับแก้แบบจำลอง (กำหนดความเร็วรถบรรทุกเท่ากับ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

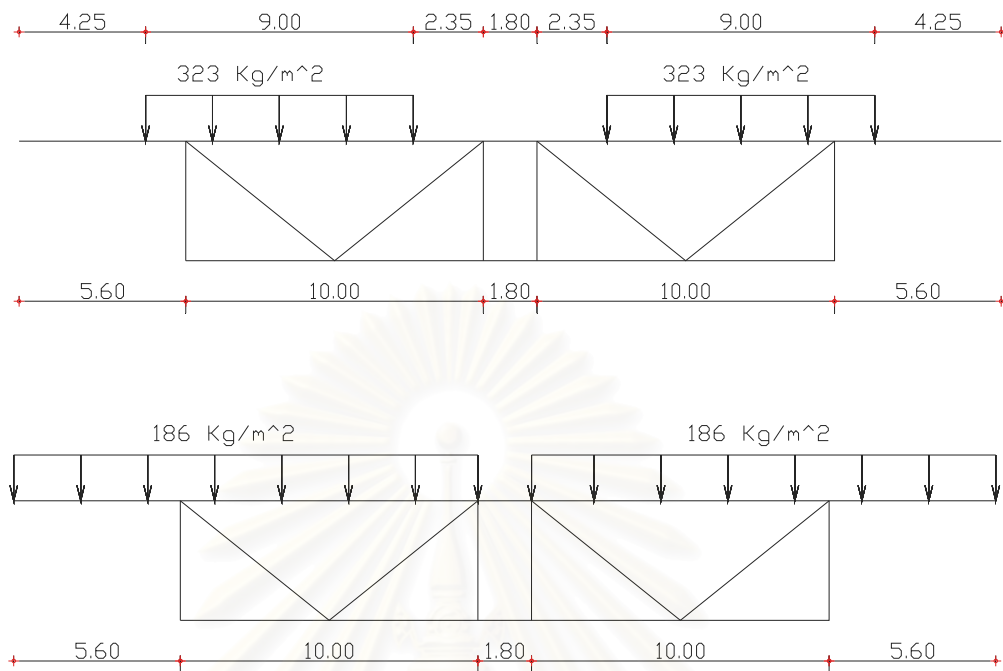
บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานพระรามเก้า

ผลการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกต่างๆนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์หรือประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสะพานพระรามเก้าได้ กล่าวคือ จากน้ำหนักบรรทุกชนิดต่างๆทำให้ทราบถึงผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกชนิดนั้นๆที่กระทำกับสะพาน โดยหากพบการใช้งานภายใต้ น้ำหนักบรรทุกที่ผู้ทำการวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ สามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อได้ น้ำหนักที่ทำการศึกษานี้จะศึกษาน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO แบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniformly Distributed Live Load, *ULL*) น้ำหนักบรรทุกออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO แบบเป็นจุด (Point Live Load, *PLL*) สภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกหนัก 26 ตัน

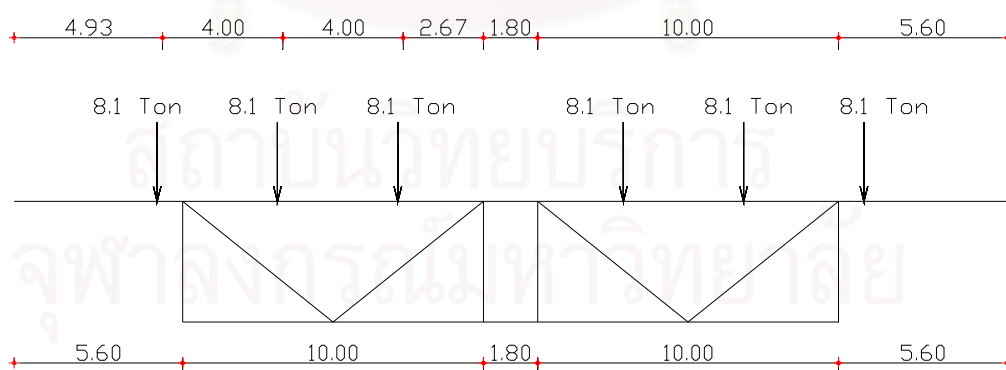
กรณีน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO แบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ (*Uniformly Distributed Live Load, ULL*) กรณีนี้จะไม่นิมน้ำหนักบรรทุกตายตัวจากโครงสร้างแต่จะคิมน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐานของ AASHTO ที่เป็นลักษณะน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอเพียงอย่างเดียว โดยในแบบจำลองจะกระจายแรงที่น้ำหนักบรรทุกกระทำมีความกว้างเท่ากับ 15.6 เมตร แต่น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO มีความกว้าง 9 เมตร (3 ช่องทาง ช่องทางละ 3 เมตร) จึงทำการปรับเปลี่ยนลักษณะของแรงตามความเหมาะสม โดยกระจายแรงน้ำหนักจากเดิม 323 kg/m^2 กระทำในความกว้าง 9 เมตร เป็น 186 kg/m^2 กระทำในความกว้าง 15.6 เมตร เนื่องจากในแบบจำลองจะต้องกระจายแรงให้เต็มในแต่ละชิ้นส่วนซึ่งในตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำมีความกว้างเท่ากับ 15.6 เมตร (ดังรูปที่ 5.1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



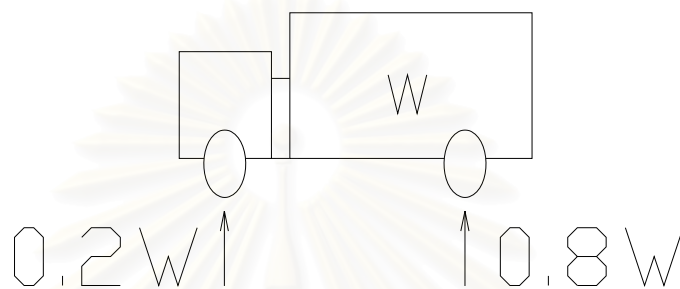
รูปที่ 5.1 น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่ตามมาตรฐาน AASHTO ที่ใช้ในแบบจำลอง

สถานะภายใต้น้ำหนักบรรทุกออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO แบบเป็นจุด (Point Live Load, PLL) กรณีนี้จะมีน้ำหนักบรรทุกแบบจุดกระทำที่ละ Span เพื่อหาแรงและความเค้นที่มากที่สุดของแต่ละชิ้นส่วน (ดังรูปที่ 5.2) จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาแสดงเป็นกราฟ

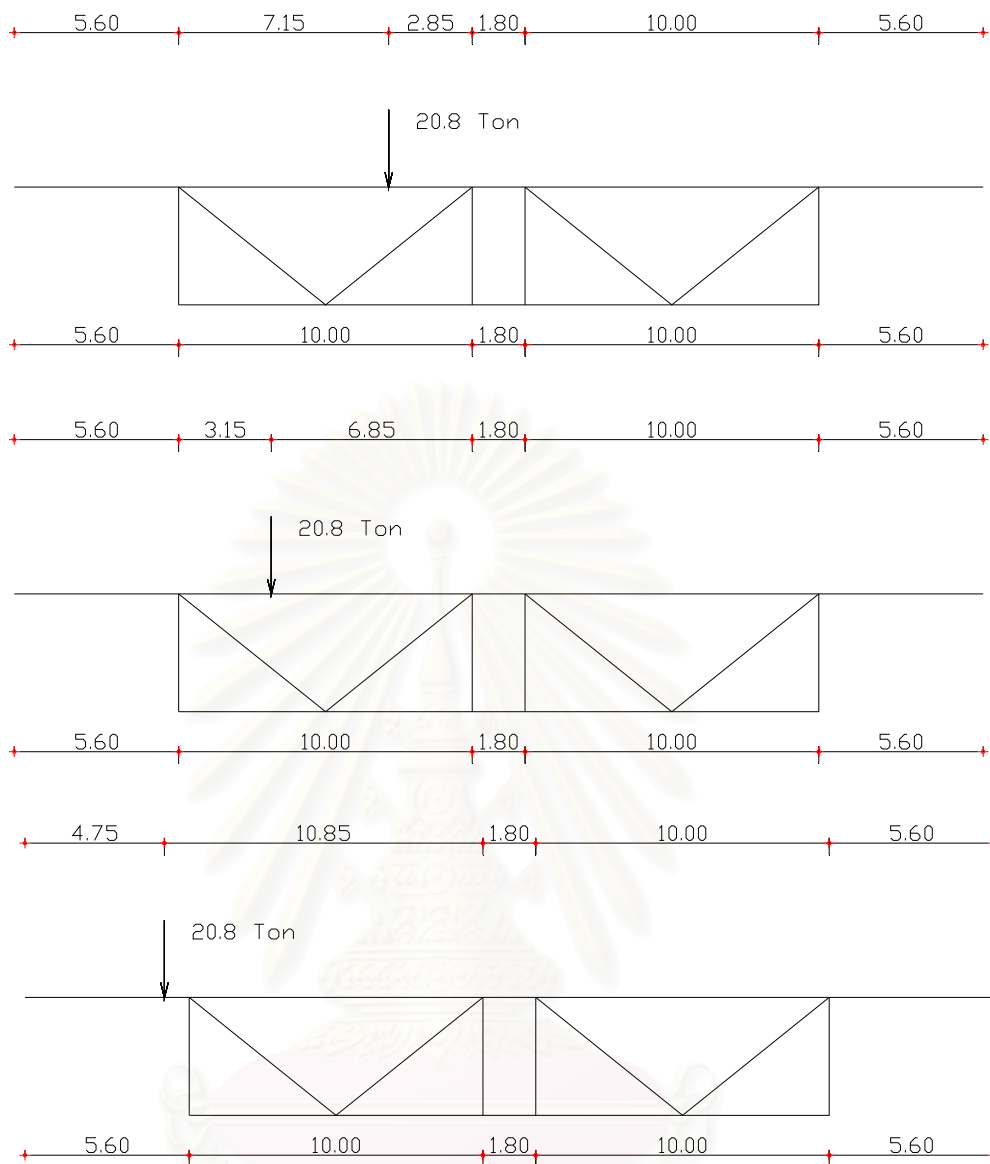


รูปที่ 5.2 น้ำหนักบรรทุกแบบจุดมาตรฐาน AASHTO ที่ใช้ในแบบจำลอง

กรณีที่มีรถบรรทุกหนัก 26 ตัน กรณีนี้ทำการศึกษาเพื่อต้องการทราบผลจากการที่มีน้ำหนักจากรถบรรทุกหนัก 26 ตัน เพียง 1 คัน วิ่งในแบบจำลองสะพาน (ดังรูปที่ 5.3) โดยไม่คำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักจรตามมาตรฐาน AASHTO เนื่องจากช่องทางจราจรของสะพานพระรามเก้ามี 3 ช่องทางจราจร จึงจำแนกกรณีที่ใช้ในการศึกษาออกเป็นช่องทางจราจร คือ กรณีที่รถบรรทุกวิ่งช่องทางจราจรขวาสุด (TR) กรณีที่รถบรรทุกวิ่งช่องทางจราจรกลาง (TC) และกรณีที่รถบรรทุกวิ่งช่องทางจราจรซ้ายสุด (TL) (ดังรูปที่ 5.4)



รูปที่ 5.3 การถ่าน้ำหนักรถบรรทุก 26 ตัน ลงแต่ละเพลลา

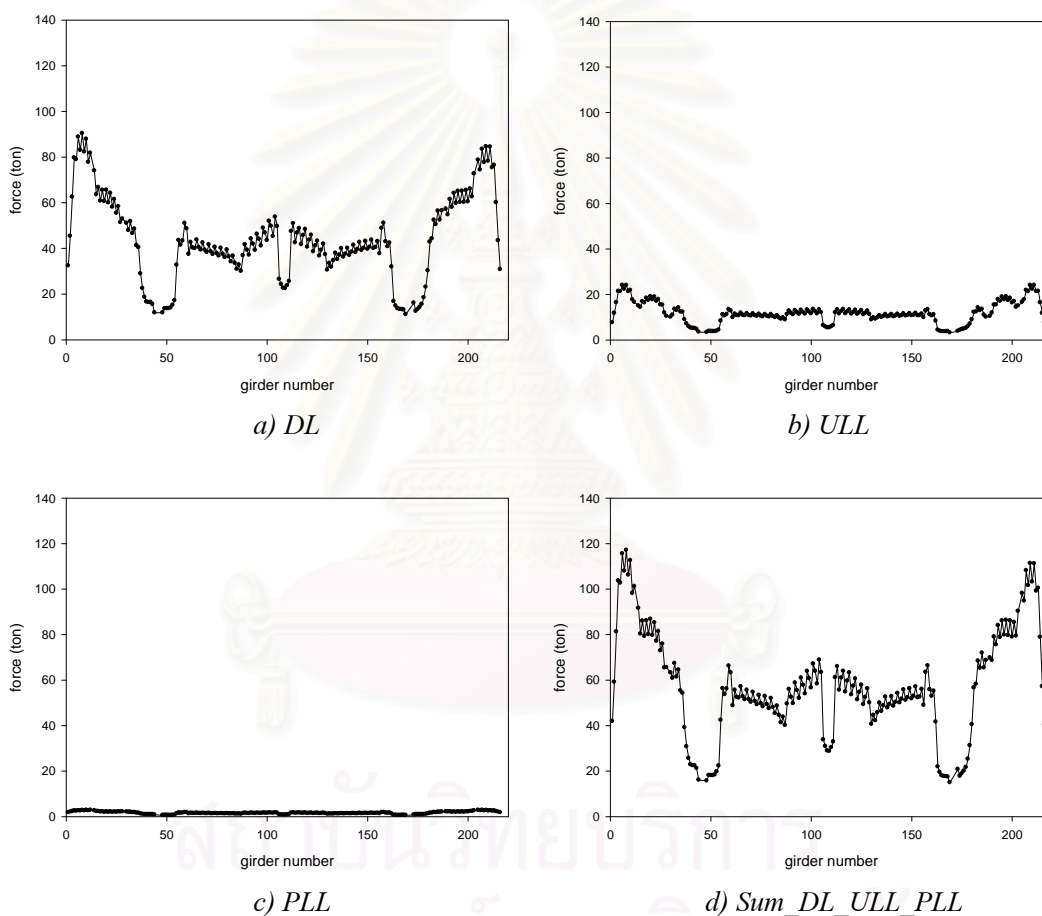


รูปที่ 5.4 การแบ่งกรณีที่น่าหนักรถบรรทุกวิ่งในแต่ละช่องทางจราจร

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

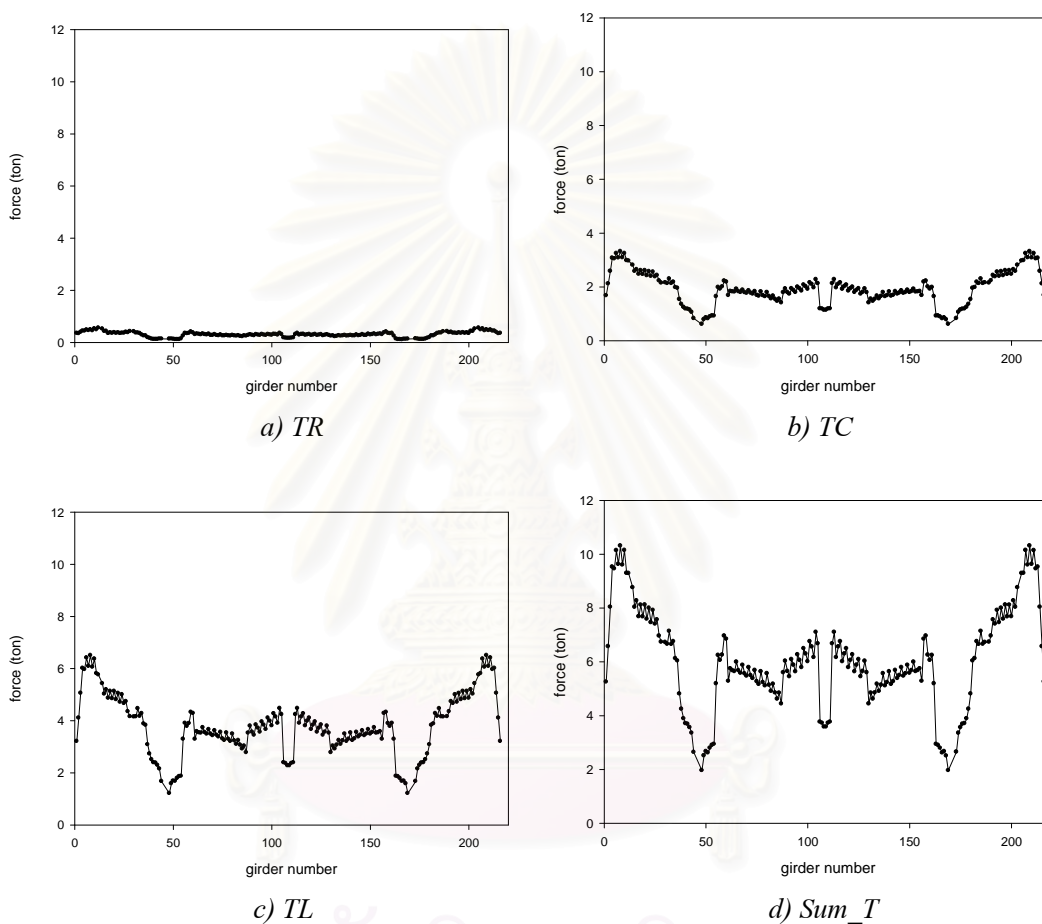
5.1 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึง

แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่มาจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบต่างๆ มีขนาดและลักษณะแตกต่างกันเนื่องมาจากผลจากแรงที่เกิดขึ้นที่แตกต่างกัน ทำให้แรงรวมที่เกิดขึ้นจะมาจากกรณีน้ำหนักบรรทุกตายตัวเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกรณีอื่นๆ โดยจะมีผลจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่ตามมาตรฐาน AASHTO รองลงมา ส่วนกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดแทบจะไม่มีผลต่อแรงรวมเลย จากการสังเกตพบว่าแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวจะมีขนาดประมาณ 4 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่ เนื่องมาจากน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างมีมากกว่าน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่



รูปที่ 5.5 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO

จากการศึกษาพบว่าเมื่อรถบรรทุกวิ่งในช่องทางที่ต่างกันจะทำให้ได้ความเค้นที่ต่างกันตามแต่ช่องทางจร คือ ถ້ารถบรรทุกวิ่งในช่องทางจรซ้ายสุดจะทำให้เกิดแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงมากที่สุดรองลงมาคือช่องทางจรกลางและขวาตามลำดับ เนื่องมาจากระยะห่างจากน้ำหนักรถบรรทุกกับชิ้นส่วนรับแรงดึงแตกต่างกัน ถ้ระยะห่างระหว่างน้ำหนักรถบรรทุกกับชิ้นส่วนรับแรงดึงมาก จะทำให้แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงมากตาม

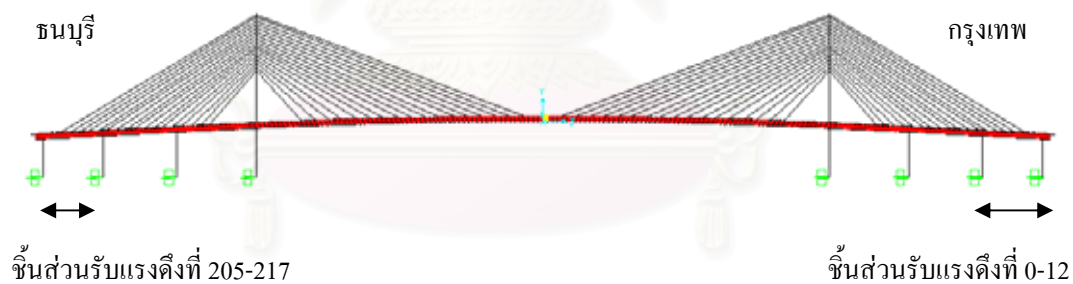


รูปที่ 5.6 แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงในสภาวะภายใต้น้ำหนักรถบรรทุกหนัก 26 ตัน

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 สามารถหาแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในสภาวะดังที่สรุปในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แรงมากที่สุดในส่วนรับแรงดึงภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

ชื่อลักษณะน้ำหนักบรรทุก	ชั้นส่วนรับแรงดึง	แรงมากที่สุด (ตัน)
DL	8	90.14
ULL	6 และ 211	24.08
PLL	10 และ 207	2.82
Sum_DL_ULL_PLL	8	117.12
TR	12 และ 205	0.56
TC	8 และ 209	3.32
TL	8 และ 209	6.51
Sum_T	8 และ 209	10.31

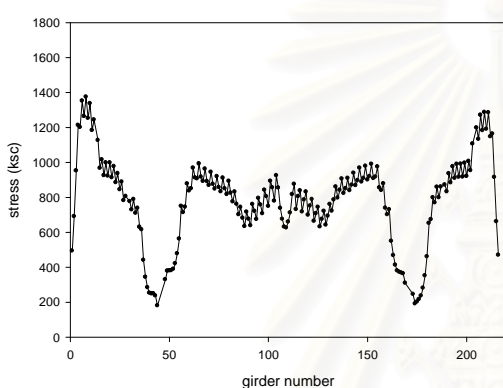


รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของแรงในชั้นส่วนรับแรงดึง

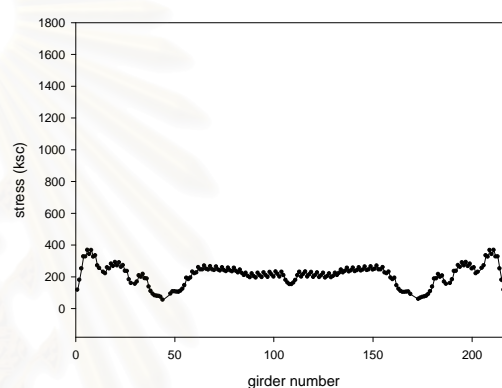
สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ความเค้นในชิ้นส่วนรับแรงดึง

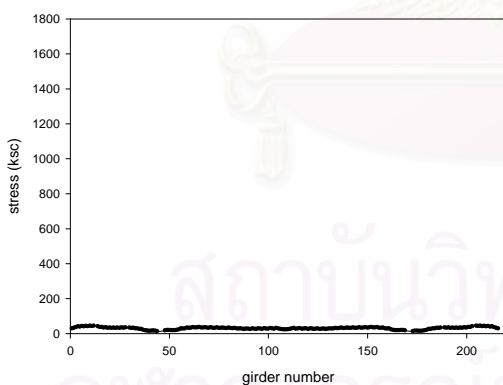
ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรงดึงสามารถคำนวณได้จากการนำแรงที่ได้ในหัวข้อ 5.1 หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนรับแรงดึง แต่ความเค้นก็จะมีผลจากกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกตัวเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกรณีอื่นๆ โดยจะมีผลจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่กระจายตามมาตรฐาน AASHTO รองลงมา ส่วนกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดแทบจะไม่มีผลต่อความเค้นรวมเลย จากการสังเกตพบว่าแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกตัวจะมีขนาดประมาณ 4 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่กระจาย



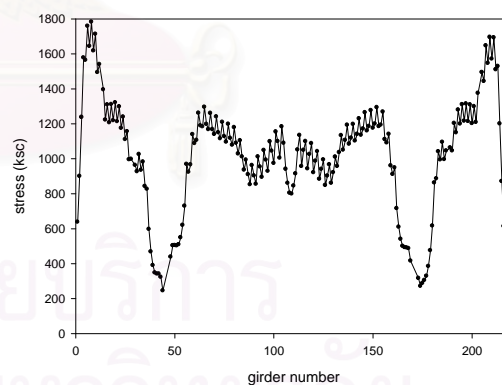
a) DL



b) ULL



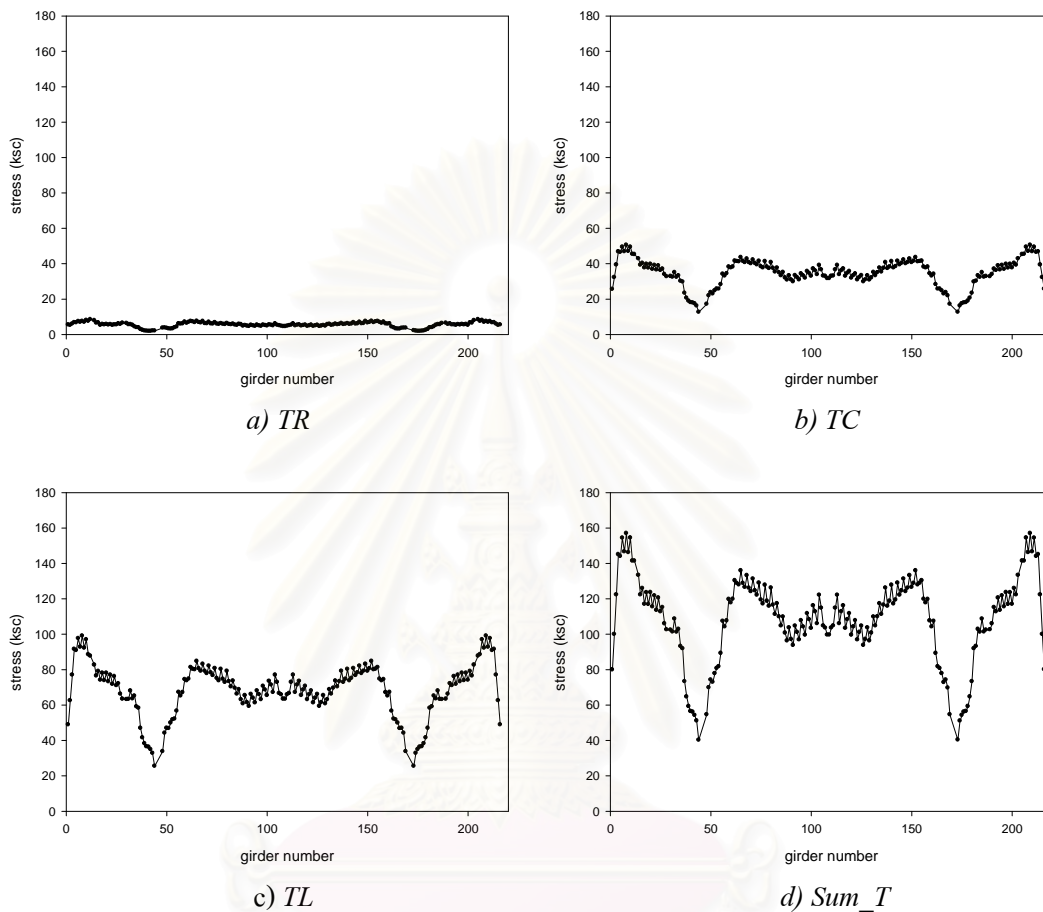
c) PLL



d) Sum_DL_ULL_PLL

รูปที่ 5.8 ความเค้นในชิ้นส่วนรับแรงดึงภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อรถบรรทุกวิ่งในช่องทางที่ต่างกันจะทำให้ได้ความเค้นที่ต่างกันตามแต่ช่องทางจร คือ ถ้าวิ่งในช่องทางซ้ายสุดจะทำให้เกิดความเค้นใน ชิ้นส่วนรับแรงดึง มากที่สุดรองลงมาคือช่องทางกลางและขวาตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ความเค้นในชิ้นส่วนรับแรงดึงในสภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 สามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากสถานะในแต่ละชั้นส่วนได้ จึงทำสรุปค่าความเค้นที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละสภาวะดังตารางที่ 5.2

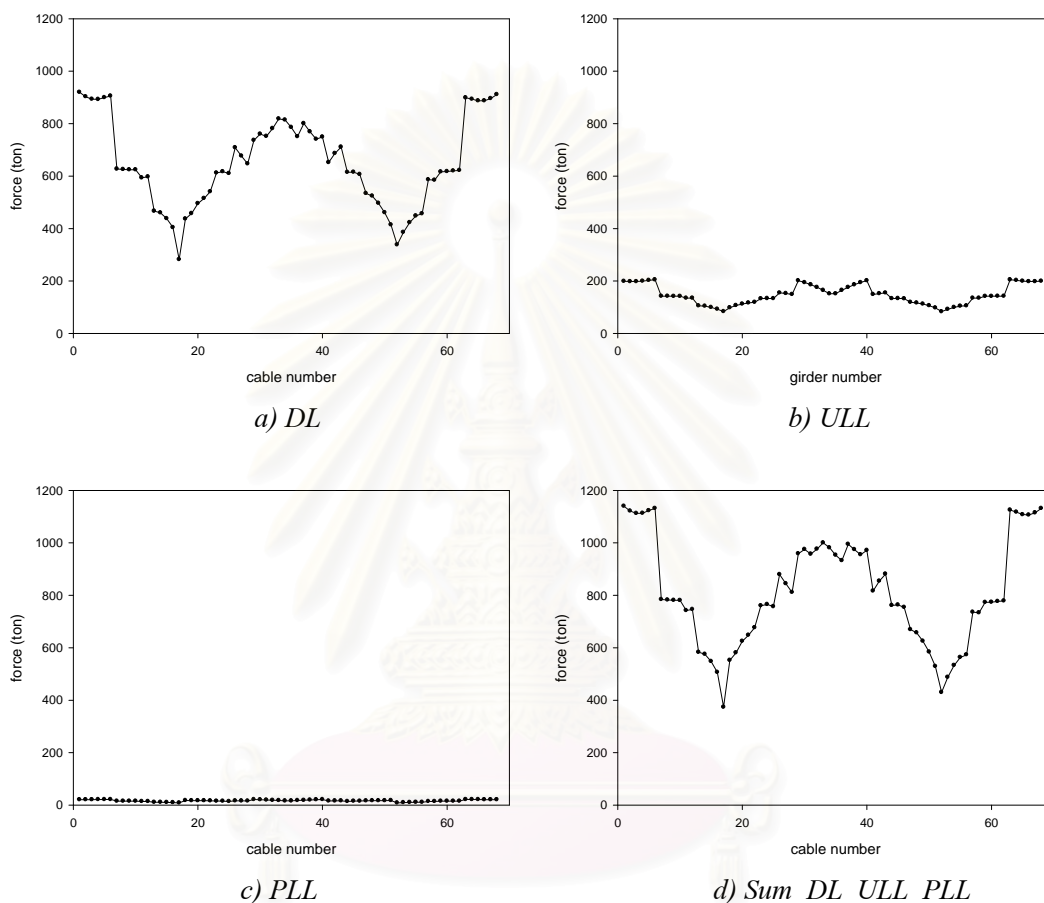
ตารางที่ 5.2 ความเค้นที่มีค่ามากที่สุดแต่ละสภาวะ

ชื่อลักษณะน้ำหนัก บรรทุก	ชั้นส่วนรับแรงดึง	แรงมากที่สุด (กก/ตร.ชม.)
DL	8	1,375
ULL	6 และ 211	367
PLL	10 และ 207	42.9
Sum_DL_ULL_PLL	8	1,783
TR	12 และ 205	8.47
TC	8 และ 209	50.5
TL	8 และ 209	99.0
Sum_T	8 และ 209	157

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 แรงในเคเบิล

เคเบิลเป็นชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักสะพานในช่วงกลางสะพานซึ่งมีความยาวช่วงมาก จำเป็นจะต้องวิเคราะห์และเฟิร์มไว้เพื่อหาค่าแรงในชิ้นส่วนดังกล่าวไม่ให้มีพฤติกรรมที่ผิดแปลกไป โดยวิเคราะห์จากน้ำหนักบรรทุกตายตัว น้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่กระจายและแบบเป็นจุด ซึ่งแรงในเคเบิลนี้แสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แรงในเคเบิลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 แรงปฏิกิริยาที่ฐาน

ฐานของโครงสร้างเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของสะพานทั้งหมด จึงเป็นอีกชิ้นส่วนที่ควรวิเคราะห์หาแรงที่กระทำที่ฐานดังกล่าวเพื่อดูพฤติกรรมไม่ให้เกิดความบดพองได้

ตารางที่ 5.3 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของแบบจำลองเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

จุดต่อ	น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว หลังปรับแก้			น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวร่วมกับ AASHTO		
	แกน X (ตัน)	แกน Y (ตัน)	แกน Z (ตัน)	แกน X (ตัน)	แกน Y (ตัน)	แกน Z (ตัน)
31500	-891	-4	18,922	-1233	1	22,834
41500	891	-3	18,913	1233	2	22,819
51500	0	0	4,849	0	0	4,911
51501	0	-2	4,042	0	1	3,736
51502	0	6	4,875	0	-2	4,754
51503	0	6	4,759	0	-3	4,669
51504	0	-2	4,110	0	1	3,759
51505	0	0	4,887	0	0	4,867
ผลรวม	0	0	65,358	0	0	72,341

บทที่ 6

สรุปผล

งานวิจัยนี้จัดทำเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานพระรามเก้าที่สามารถแสดงพฤติกรรมของ โครงสร้างได้ ซึ่งการจัดทำแบบจำลองนี้โดยอ้างอิงแบบก่อสร้างจากผู้ออกแบบเป็นหลัก เนื่องจากในสภาพความเป็นจริง ระหว่างการก่อสร้างรวมไปถึงระยะเวลาหลังจากที่เปิดให้ใช้สะพานพระรามเก้าอาจจะมีโครงสร้างที่คลาดเคลื่อนไปจากแบบจากผู้ออกแบบ และความคลาดเคลื่อนนี้มีผลกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของสะพานพระรามเก้า จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ด้วยโปรแกรม SAP2000 ควรเตรียมค่าด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล โดยกำหนดรูปแบบให้เป็นระบบเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการตรวจสอบความถูกต้องในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

2. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองควรทำการตรวจสอบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงในภาคสนามเช่น คาบธรรมชาติ แรงดึงในเคเบิล ความเครียดในชิ้นส่วนต่างๆ

3. การเพิ่มความหนาแผ่นพื้นส่งผลให้คาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นในรูปร่างของโหมดที่มีการเคลื่อนที่ของแผ่นพื้นเป็นหลักได้แก่ โหมดที่ 1, 4, 5, 6 และ 7 โดยการเพิ่มความหนาแอสฟัลต์ชั้น 2 เซนติเมตรจะทำให้คาบธรรมชาติของแบบจำลองเพิ่มขึ้นและมีความแตกต่างจากผลการตรวจวัดในภาคสนามของบริษัท AES ไม่เกินร้อยละ 5 ในรูปร่างของโหมดที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 7

4. การใส่แรงดึงเริ่มต้นให้เคเบิลโดยการใส่ค่าความเครียดเริ่มต้นทำให้แรงดึงในสายเคเบิลในแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดแรงดึงในภาคสนามของบริษัท AES

5. การเปลี่ยนแปลงลักษณะจุดต่อที่ปลายของเคเบิลจากแบบยึดแน่นเป็นแบบจุดหมุน ทำให้คาบธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์ แรงในเคเบิลเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2.12 เปอร์เซ็นต์ และแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5.71 เปอร์เซ็นต์ และการเปลี่ยนแปลงลักษณะจุดต่อที่ปลายของชิ้นส่วนรับแรงดึงจากแบบยึดแน่นเป็นแบบจุดหมุน ทำให้คาบธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์ แรงในเคเบิลเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์ และแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.19 เปอร์เซ็นต์

6. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานพระรามเก้าหลังปรับแก้ด้วยน้ำหนักบรรทุกต่างๆพบว่า น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO มีค่าเพียง 1 ใน 4 ของน้ำหนักบรรทุกตายตัว

7. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานพระรามเก้าหลังปรับแก้ด้วยน้ำหนักบรรทุกหนัก 26 ตัน พบว่าหากรถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรทางด้านซ้ายสุดจะทำให้เกิดแรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงมากที่สุด โดยมากกว่าช่องจราจรกลางประมาณ 2 เท่า และมากกว่าช่องจราจรขวาประมาณ 10 เท่า

8. แรงในชิ้นส่วนรับแรงดึงจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณช่วงด้านข้างของสะพาน เมื่อแบบจำลองถูกกระทำด้วยน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO แรงมากที่สุดเท่ากับ 117 ตัน และมีค่าความเค้นเท่ากับ 1,783 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- AES Group, Kinematics and OPAC (2001) Task report on structural analysis, RAMA IX bridge tenth year inspection.
- Clemente, P., Marula, F., Lecce, L., and Bifulco, A. (1998) Experimental modal analysis of the Garigliano cable-stayed bridge, Finite element vibration and dynamic response analysis of engineering structures 7: 485-493.
- Clough, W., and Penzien, J. (1993) Dynamic of Structures, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc.
- Harman, T., Dabney, J., and Richert, N. (2000) Advanced Engineering Mathematics with Matlab, 7th Edition, Brooks/Cole Thomson Learning.
- Kanoknukulchai, W., and Anwar, N. (2003) Finite Element Concept Modeling Applications, ACECOMS, AIT, Thailand.
- Ko, J., Xue, S., and Xu, Y. (1998) Modal analysis of suspension bridge deck units in erection stage, International Conference on Advances in Steel Structures 20: 1102-1112.
- Kreyszig, E. (1999) Advanced Engineering Mathematics, 8th Edition, John Willey & Sons, Inc.
- Macdonald, J., and Daniell, W. (2005) Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurement and FE modeling identify, Engineering structures 27: 1916-1930.
- Ren, W., Peng, X., and Lin, Y. (2005) Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge, Engineering structures 27: 534-548.
- Xu, Y., Ko, J., and Yu, Z. (1996) Modal analysis of tower-cable system of Tsing Ma Long suspension bridge, Engineering structures 19: 857-867.
- บริษัทไอเอ็มเอ็มเอสจำกัด. 2547. โครงการตรวจวัดแรงดึงในเคเบิลของสะพานพระราม 9.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วรวัฒน์ ยิ้มโนกิจ เกิดวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อ พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย