การศึกษาการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคานทางพิเศษเฉลิมมหานคร
A Study of Structural Lifting to Replace Elastomeric Bearing Pad for Chalerm Maha Nakhon Expressway

อิศราพงษ์ ขานทอง[1,*] นันทวรรณ พิทักษ์พานิช[2] สราวุธ พรหมาด[3] และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร[4]

[1,2,4] กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
[3] กองบำรุงรักษาทาง ฝ่ายบำรุงรักษา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: It.isarapong@gmail.com*

บทคัดย่อ

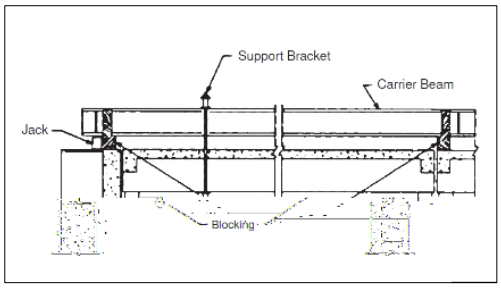
โครงสร้างทางพิเศษส่วนใหญ่ประกอบด้วย โครงสร้างส่วนบน และโครงสร้างส่วนล่าง โดยมีแผ่นยางรองคานติดตั้งอยู่ระหว่างโครงสร้างทั้งสองเพื่อทำหน้าที่รองรับน้ำหนักที่เกิดจากโครงสร้างส่วนบนและน้ำหนักที่เกิดจากยานพาหนะ รวมถึงรองรับการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง จากการสำรวจเบื้องต้น พบว่าแผ่นยางรองคานของทางพิเศษเฉลิมมหานครบางตำแหน่งมี

การเสื ารท องบ การเสื่อมสภาพเนื่องจากมีอายุการใช้ มีอายุการใช้ .

โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีคานหนุน แต่หากสะพานมีความสูงมาก หรือมีการจราจรใต้สะพาน หรือด้านล่างเป็นแหล่งน้ำ อาจพิจารณาเลือกใช้วิธีการหิ้วสะพานแทน



รูปที่ 1 การยกโครงสร้างส่วนบนโดยวิธีการใช้คานหนุน



รูปที่ 2 การยกโครงสร้างส่วนบนโดยวิธีการหิ้วสะพานด้วย Carrier Beam

Morteza and Reza [2] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแผ่นยางรองคานของสะพานทางหลวงแห่งรัฐอิสฟาฮาน ประเทศอิหร่าน พบว่ามีปัจจัยหลัก ๆ ที่เป็นตัวกำหนดวิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรองคานคือ รูปแบบหรือประเภทของสะพาน และการเข้าถึงแผ่นยางรองคาน โดยการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคานสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การยกพื้นสะพานด้วยโครงเฟรม การยกพื้นสะพานพร้อมกันโดยใช้แม่แรงไฮดรอลิค (Hydraulic Jack) หลายตัว หรือการยกคานสะพานทีละคานด้วยแม่แรงไฮดรอลิคเพียงตัวเดียว

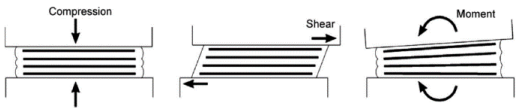
นอกจากนี้ Sun และคณะ [3] ได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์แรงขณะทำการยกสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-Girder) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้สามารถเปลี่ยนฐานรองได้อย่างปลอดภัยและมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยที่สุด โดยการวิเคราะห์ได้คำนึงถึงผลของความหนาแน่นของหน่วยแรง (Stress Concentration) บริเวณจุดที่จะทำการยกคานด้วยแม่แรงไฮดรอลิค เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการระเบิดหรือแตกออก (Bursting) บริเวณคาน โดยวิธีดังกล่าวที่เสนอเป็นการยกคานทีละตัวเพื่อทำการเปลี่ยนฐานรอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์โครงสร้างโดยรวมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับระบบคานและแผ่นพื้นสะพาน

อย่างไรก็ตาม การยกสะพานหรือการยกโครงสร้างส่วนบนต้องวิเคราะห์และออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะกายภาพของโครงสร้าง และสภาพพื้นที่ทำงาน รวมทั้งต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อโครงสร้างและประชาชนรอบบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ โดยบทความนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน ของทางพิเศษเฉลิมมหานครที่เป็นโครงสร้างรูปแบบ Half Joint ภายใต้เงื่อนไขสำคัญคือทางพิเศษต้องสามารถเปิดให้บริการได้อย่างต่อเนื่อง โดยต้องคำนึงถึงความสะดวกในการเดินทางของผู้ใช้ทางพิเศษและประชาชนที่ใช้ถนนใต้ทางพิเศษ หรือประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียงให้มีความปลอดภัยตลอดเวลา

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผ่นยางรองคาน (Elastomeric Bearing Pad)

แผ่นยางรองคานถูกนำมาใช้ติดตั้งระหว่างโครงสร้างสะพานส่วนบนและส่วนล่าง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 มีวัตถุประสงค์ในการรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของโครงสร้างส่วนบน และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ของยานพาหนะ โดยการรับน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจะส่งผลให้แผ่นยางรองคานเสียรูปในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเสียรูปในแนวดิ่ง (Vertical Deformation) ที่เกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุก การเสียรูปด้านข้าง (Horizontal Deformation) ที่เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโครงสร้างส่วนบน และการหมุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างส่วนบนรับโมเมนต์ดัด (Bending Moment) โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับแรงดังกล่าวที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 นอกจากนี้การเสียรูปในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่อง และสภาวะแวดล้อมภายนอกที่กระทำต่อแผ่นยางรองคานเป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้แผ่นยางรองคานเกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพด้วยเช่นกัน ดังนั้นการจะนำแผ่นยางรองคานมาใช้ต้องพิจารณาคุณสมบัติการเสียรูปในรูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อให้เกิดการส่งถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างได้อย่างสมบูรณ์ [4]



รูปที่ 3 การเสียรูป (Deformation) ของแผ่นยางรองคาน

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้แผ่นยางรองคานเสียหายหรือเสื่อมสภาพประกอบด้วย การเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้า การแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพาน การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน แสงแดด และสภาวะแวดล้อม การเลื่อนไถลของแผ่นยางรองคานออกจากฐานรอง และคุณสมบัติของยางที่ใช้ออกแบบไม่ได้มาตรฐาน รวมไปถึงการติดตั้งแผ่นยางรองคานที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งเกณฑ์การกำหนดสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคานแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเกณฑ์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการตรวจสอบความเสียหายของแผ่นยางรองคานต่อไป [5]

ตารางที่ 1 เกณฑ์การกำหนดสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคาน

สภาพ	สภาพแผ่นยางรองคาน	รายละเอียด
ดี	สภาพดีไม่มีความเสียหาย	- สภาพดีเหมือนใหม่
พอใช้	สภาพใช้งานได้	- มีการโย้เอียงไม่เกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันไม่เกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสะพานไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองคาน - พบการปริแตกที่ผิวแต่ไม่พบรอยฉีกขาด - ไม่พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก
ชำรุด	สภาพชำรุดไม่อยู่ในสภาพใช้งานได้	- มีการโย้เอียงเกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันเกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสะพานเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองคาน - พบรอยฉีกขาด - พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก

2.2 รอยต่อของโครงสร้าง

โดยทั่วไปพบว่าสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-Girder) มีรอยต่อระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบ Half Joint และ รูปแบบ Full Joint ซึ่งจะแตกต่างกันที่ลักษณะของคานและเสาตอม่อ โดยรูปแบบ Half Joint จะมีคานตามยาว (Girder) ซึ่งบากครึ่งล่างส่วนปลายของคานและวางลงบนแผ่นยางรองคานที่อยู่บนพื้นยื่นหัวเสา (Cantilever Deck) ที่ยื่นออกมาจากเสาตอม่อสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับรูปแบบ Full Joint จะไม่มีการบากส่วนปลายของคาน แต่คานตามยาวจะฝังเข้ากับคานขวางตัวริม (End Diaphragm) ที่วางตัวตามแนวขวางแล้วจึงวางลงบนแผ่นยางรองคานที่วางบนเสาตอม่อสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 รอยต่อของโครงสร้างสะพาน รูปแบบ Half Joint



รูปที่ 5 รอยต่อของโครงสร้างสะพาน รูปแบบ Full Joint

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การสำรวจความเสียหายของแผ่นยางรองคานและพื้นที่โดยรอบเสาตอม่อ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการสำรวจทางพิเศษเฉลิมมหานครประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ดินแดง-ท่าเรือ (DD-PO) ส่วนที่ 2 บางนา-ท่าเรือ (BN-PO) และส่วนที่ 3 ดาวคะนอง-ท่าเรือ (DK-PO) ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อนำข้อมูลความเสียหายของแผ่นยางรองคาน และลักษณะพื้นที่โดยรอบเสาตอม่อหรือตำแหน่งที่จะทำการยกโครงสร้างมาวิเคราะห์และออกแบบวิธีการยกโครงสร้างให้เกิดความปลอดภัย รวมถึงการวิเคราะห์รูปแบบการเข้าถึงพื้นที่ปฏิบัติงาน จากการสำรวจพบว่า แผ่นยางรองคานมีความเสียหายจำนวน 15,014 แผ่น ซึ่งวางอยู่บนเสาตอม่อทางพิเศษจำนวน 1,555 ตำแหน่ง แบ่งเป็นโครงสร้างรูปแบบ Half Joint จำนวน 919 ตำแหน่ง และรูปแบบ Full Joint จำนวน 636 ตำแหน่ง โดยสภาพพื้นที่ในตำแหน่งที่จะทำการยกโครงสร้างมีอุปสรรคต่อการยกโครงสร้างที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของทางพิเศษที่คร่อมถนน คร่อมทางรถไฟ คร่อมสิ่งปลูกสร้างถาวร คร่อมลำคลอง/บึง หรือแม้กระทั่งอุปสรรคจากเสาตอม่อที่มีความสูงมาก เป็นต้น



รูปที่ 6 แผนที่ทางพิเศษเฉลิมมหานคร

3.2 การศึกษาข้อมูลแบบก่อสร้าง

การศึกษาข้อมูลแบบก่อสร้างสะพานมีส่วนสำคัญในการพิจารณาการจัดกลุ่มข้อมูล รูปแบบของโครงสร้าง และรอยต่อต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบหรือวิธีการยกโครงสร้าง รวมถึงเป็นการรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ น้ำหนักบรรทุกจรจากยานพาหนะ จากการศึกษาและตรวจสอบแบบก่อสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานครพบว่า โครงสร้างโดยทั่วไปเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-Girder) ที่มีระยะห่างระหว่างเสาตั้งแต่ 15-20 ม. มีความยาวช่วงคานส่วนใหญ่ประมาณ 20 ม. ทั้งนี้จำนวนคานและความกว้างของสะพานจะแตกต่างกันในแต่ละส่วนทาง ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับในส่วนวัสดุหลักของโครงสร้างทางพิเศษที่เกี่ยวข้องกับการยกโครงสร้าง ได้แก่ คอนกรีตและเหล็กเสริม พบว่า มีเฉพาะเหล็กเสริมที่ใช้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติของวัสดุได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลจากแบบก่อสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานคร

ส่วนที่ 1 DD-PO	ประเภทของพื้น/คานขวาง	S2	
	ความกว้างพื้น (m.)	13.93	
	จำนวนคาน (Girder)	7	
	ระยะห่างระหว่างคาน (m.)	1.97	
	จำนวนช่องจราจร (Lane)	4	3
	ชื่อแบบจำลอง	1HJ-Ext1	1HJ-Ext0
ส่วนที่ 2 BN-PO	ประเภทของพื้น/คานขวาง	Typical	
	ความกว้างพื้น (m.)	17.61	
	จำนวนคาน (Girder)	10	10
	ระยะห่างระหว่างคาน (m.)	1.73	
	จำนวนช่องจราจร (Lane)	3	2
	ชื่อแบบจำลอง	2HJ-Ext1*	2HJ-Ext0*
ส่วนที่ 3 DK-PO	ประเภทของพื้น/คานขวาง	S5	
	ความกว้างพื้น (m.)	10.3	
	จำนวนคาน (Girder)	5	
	ระยะห่างระหว่างคาน (m.)	2.09	
	จำนวนช่องจราจร (Lane)	1**	
	ชื่อแบบจำลอง	3HJ-Ext0	

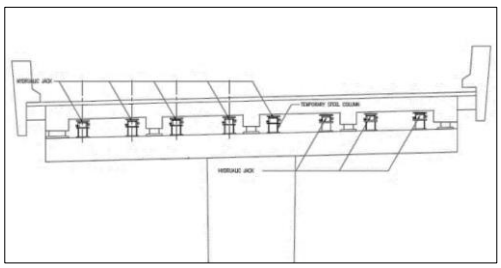
หมายเหตุ: * กรณีตัวอย่างเส้นทาง BN-PO ในช่วงซอยสุขุมวิท 50 บางนา มีความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 15 ม.
** พิจารณาเพียง 1 ช่องจราจร เนื่องจากเหตุผลด้านความปลอดภัยเพราะเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างเส้นทาง DK-PO เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD30

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุ

รายการ	ส่วนที่ 1 DD-PO	ส่วนที่ 2 BN-PO	ส่วนที่ 3 DK-PO
กำลังอัดของคอนกรีต f_c' ที่อายุ 28 วัน (ksc.)			
- คานสะพาน (Girder)	350	350	350
- คานขวาง (End Diaphragm)	240	240	240
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม f_y (ksc.)			
- เหล็กเส้นกลม RB	2,400	2,400	2,400
- เหล็กข้ออ้อย DB	4,000	4,000	3,000

3.3 แนวทางการวิเคราะห์และออกแบบวิธีการยกโครงสร้าง

แนวทางการวิเคราะห์และออกแบบวิธีการยกโครงสร้างของทางพิเศษเฉลิมมหานคร ในรูปแบบ Half Joint จะเลือกวิธีการยกโครงสร้างจากด้านล่างใต้ท้องสะพานเป็นหลัก เนื่องจากต้องการให้ทางพิเศษสามารถเปิดให้บริการกับผู้ใช้ทางได้ตลอดเวลาในระหว่างการยกโครงสร้าง อีกทั้งวิธีการดังกล่าวส่งผลกระทบต่อประชาชนที่สัญจรบนถนนใต้ทางพิเศษน้อยมาก เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ นอกจากนี้รอยต่อของโครงสร้างรูปแบบ Half Joint มีความลึกของคานขวางตัวริมน้อยจึงมีระยะห่างระหว่างพื้นยื่นหัวเสาเพียงพอที่จะสามารถติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิค (Hydraulic Jack) โดยแม่แรงไฮดรอลิคต้องติดตั้งให้อยู่ใกล้กับตำแหน่งของคานตามยาวมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อให้โครงสร้างส่วนบนสามารถถ่ายแรงกลับเข้าสู่พื้นยื่นหัวเสา (Cantilever deck) ได้เช่นเดิม เสมือนพื้นยื่นรับน้ำหนักจากคานตามยาวโดยตรง จากเหตุผลข้างต้นที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่ารอยต่อของโครงสร้างรูปแบบ Half Joint เหมาะสำหรับการยกโครงสร้างจากด้านล่างใต้ท้องสะพานที่ตำแหน่งคานขวางมากที่สุด



รูปที่ 7 ตัวอย่างการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิค บริเวณ Half Joint เพื่อยกโครงสร้าง

3.4 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบและการรวมแรง

น้ำหนักบรรทุกในขณะเปลี่ยนแผ่นยางรองคานที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร โดยในการคำนวณวิเคราะห์จะอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน Standard Specifications for Highway Bridges, AASHTO [6] ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load: DL) พิจารณาน้ำหนักจากส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งหมดของสะพานตามแบบก่อสร้าง ได้แก่ คอนกรีตกันตกด้านข้าง (Side Barrier) ผิวจราจร (Asphaltic Concrete Pavement) พื้นด้านริม (Side Slab) แผ่นพื้นสะพาน (Deck slab) คานสะพาน (Girder) และคานขวาง (Diaphragm)

2) น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load: LL) พิจารณาตามมาตรฐาน AASHTO โดยใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้ผลเกิดแรงภายในโครงสร้างสูงสุด (โมเมนต์ดัดและแรงเฉือน) คือน้ำหนักแผ่กระจายขนาด 9.4 kN/m ต่อ 1 ช่องจราจร ซึ่งคิดขนาดกว้าง 3 ม. (10 ฟุต) กระทำตลอดความยาวช่วงสะพาน และมีน้ำหนักกระทำเป็นจุดขนาด 116 kN สำหรับพิจารณาแรงเฉือนสูงสุดในพื้นสะพาน ทั้งนี้ได้จัดน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐานโดยช่องจราจรริมสุดห่างจากขอบในของชิ้นส่วนคอนกรีตกันตกด้านข้าง (Side Barrier) 0.6 ม. และพิจารณาขนาดความกว้างยานพาหนะ 1.8 ม. เพื่อคำนวณแบ่งน้ำหนักบรรทุกจรลงคานตามยาวตัวริม (External Girder: Ext.G) และตัวใน (Internal Girder: Int.G) อีกทั้งได้พิจารณากรณีมีน้ำหนักบรรทุกจรเต็มทุกช่องจราจร (แบบจำลอง HJ-Ext1) และกรณีที่ลดจำนวนช่องจราจรเพื่อจัดจราจรให้น้ำหนักบรรทุกจรไม่ถ่ายลงคานรองพื้นสะพานตัวริม (แบบจำลอง HJ-Ext0) ซึ่งสามารถสรุปน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับกรณีต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4

3) ค่าตัวคูณขยายเผื่อน้ำหนักบรรทุกจร (Over Load Factor) สำหรับประเทศไทยการคำนวณออกแบบภายใต้ข้อกำหนดของหลาย ๆ หน่วยงาน อาทิเช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท การทางพิเศษแห่งประเทศไทย กำหนดให้ใช้ค่าตัวคูณดังกล่าวเท่ากับ 1.3

4) ตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) เป็นค่าตัวคูณขยายเผื่อน้ำหนักบรรทุกจร กรณีที่น้ำหนักบรรทุกจรเหล่านั้นกระแทกโครงสร้างสะพาน โดยค่าตัวคูณขยายขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพานแต่ไม่เกินร้อยละ 30 โดยบทความนี้เพื่อพิจารณาความปลอดภัยสูงสุดจึงคำนวณด้วยค่าแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 1.3

5) ตัวคูณลดค่าแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรต่อเนื่องกันหลายช่องจราจร (Reduction in Load Intensity) ใช้ค่าตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO คือ กรณีพิจารณา 1 หรือ 2 ช่องจราจร ให้คิดน้ำหนัก 100% กรณีพิจารณา 3 ช่องจราจร ให้คิดน้ำหนัก 90% กรณีพิจารณา 4 ช่องจราจรขึ้นไป ให้คิดน้ำหนัก 75%

6) การรวมผลของน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากการดำเนินงานเปลี่ยนแผ่นยางรองคานเป็นการทำงานในระยะสั้นน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการคำนวณจึงพิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแผ่นยางรองคานเป็นหลัก โดยพิจารณาใช้ค่าตัวคูณแรง (Load factor) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO ซึ่งการรวมผลของแรงสำหรับการออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service Load Design) และสำหรับการออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกปรับค่า (Load Factor Design) สามารถคำนวณได้ดังนี้

- สภาวะใช้งาน serviceability limit state: 1.00(DL) + 1.00(LL+Impact)
- สภาวะกำลัง Ultimate Limit State: 1.30(DL) + 2.17(LL+Impact)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงคานตามยาว

แบบจำลอง	1HJ-Exat1		1HJ-Exat0		2HJ-Exat0	
ตำแหน่งคาน	Ext.G.	Int.G.	Ext.G.	Int.G.	Ext.G.	Int.G.
รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) Ton.						
(DL)	37.20	22.17	37.20	22.17	27.56	14.94
รวมน้ำหนักบรรทุกจร (LL+Impact) Ton.						
(LL+Impact)	15.91	22.58	0.00	21.71	0.00	8.03
รวมน้ำบรรทุกแบบสภาวะใช้งาน (Serviceability Limit state) Ton.						
SLS	53.11	44.74	37.20	43.87	27.56	22.97
รวมน้ำหนักบรรทุกแบบสภาวะกำลัง (Ultimate Limit state) Ton.						
ULS = 1.3(DL) + 2.17(LL+Impact)						
ULS	82.90	77.83	48.36	75.94	35.83	36.86

หมายเหตุ: การพิจารณาขนาดช่องจราจรเท่ากับ 3 ม. ในทุกกรณี และใช้ค่าตัวคูณลดในกรณีที่ช่องจราจรตั้งแต่ 3 ช่องขึ้นไปเท่ากับ 0.9

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน

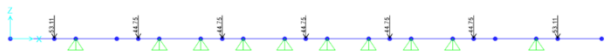
การวิเคราะห์โครงสร้างก่อนการยกเปลี่ยนแผ่นยางรองคานมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ผู้ปฏิบัติงาน และบุคคลอื่น ๆ โดยรอบบริเวณพื้นที่ในขณะดำเนินการยกโครงสร้าง โดยหลักการของการยกโครงสร้างสะพานคือ การเปลี่ยนจุดรองรับ (Support) จากตำแหน่งเดิมชั่วคราว ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างในส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ให้มีความเหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้ง่ายและสะดวกที่สุดคือ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโครงเฟรม ซึ่งมีแนวทางในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรม

สำหรับการเปลี่ยนแผ่นยางของโครงสร้างรูปแบบ Half Joint มีพื้นที่บริเวณจุดต่อระหว่างปลายคานตามยาวและพื้นยื่นหัวเสาเพียงพอทำให้สามารถสอดแม่แรงไฮดรอลิคเพื่อยกคานขวางตัวริมได้ ดังนั้นในการเปลี่ยนแผ่นยาง จึงใช้การยกโครงสร้างบริเวณคานขวางตัวริมซึ่งจะรับน้ำหนักของพื้นสะพานครึ่งหนึ่งของความยาวช่วง โดยในการวิเคราะห์โครงสร้างจะสร้างแบบจำลองคานขวางตัวริมและใส่น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด (Point Load) ซึ่งก็คือน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงคานตามยาว และกำหนดจุดรองรับคือตำแหน่งที่จะติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิคที่ใช้ยกดันสะพานขึ้นในแนวดิ่ง

1) การวิเคราะห์ขนาดแรงดันแม่แรงไฮดรอลิค

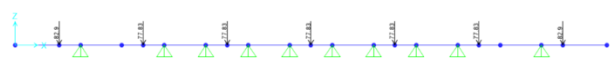
การวิเคราะห์ขนาดแรงดันแม่แรงไฮดรอลิคในแบบจำลองตามที่กล่าวมาข้างต้นจะพิจารณาน้ำหนักบรรทุกแบบสภาวะใช้งาน เนื่องจากเป็นน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงของโครงสร้าง โดยค่าแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับที่ได้คือค่าแรงที่นำมาใช้ในการยกโครงสร้างของแม่แรงไฮดรอลิค ทั้งนี้ต้องพิจารณาการจัดตำแหน่งแม่แรงไฮดรอลิคให้ชิดกับตำแหน่งคานตามยาวให้มากที่สุดเพื่อรักษาพฤติกรรมทางโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมก่อนการยกมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลอง 1HJ-Ext1
(เส้นทาง DD-PO, กรณียอมให้น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลง Ext.G.)

2) การตรวจสอบกำลังความแข็งแรงของคานขวางตัวริม (End Diaphragm)

สำหรับการตรวจสอบกำลังความแข็งแรงของคานขวางจะใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาขนาดแรงดันของแม่แรงไฮดรอลิค แต่จะแตกต่างกันที่การใช้น้ำหนักบรรทุก โดยการตรวจสอบกำลังจะใช้น้ำหนักบรรทุกแบบสภาวะกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากจะต้องนำค่าแรงที่ได้จากแบบจำลองไปใช้เปรียบเทียบค่าแรงที่ได้จากการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงภายนอกของหน้าตัดคานขวางคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design) ต่อไป



รูปที่ 9 แบบจำลอง 1HJ-Ext1
(เส้นทาง DD-PO, กรณียอมให้น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลง Ext.G.)

3.5.2 การตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

การตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Natural Frequency) เป็นคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพานที่สำคัญอย่างหนึ่ง โดยมีความหมายทางกายภาพกล่าวคือ หากมีรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานด้วยความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะทำให้สะพานสั่นไหวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Resonance) จนกระทั่งวิบัติในที่สุด โดยทั่วไปสะพานสำหรับรถยนต์จะไม่มีปัญหาดังกล่าว เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะสูงกว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดจากการวิ่งผ่านของขบวนรถบรรทุก เว้นแต่ในกรณีสะพานรองรับรถไฟความเร็วสูงซึ่งมีเพลาจำนวนมากกระทำด้วยความถี่สูง จึงอาจมีปัญหาดังกล่าวได้ ในอีกมุมหนึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสะพานเป็นค่า Eigen Value ที่ได้จากสมการ Mass Matrix และ Stiffness Matrix ดังนั้นค่าความถี่ธรรรมชาติที่ได้จากผลทดสอบสะพานจริงจึงถูกนำมาใช้เปรียบเทียบและปรับแก้แบบจำลองสะพานไฟไนต์เอลิเมนต์ หากแบบจำลองสะพานสามารถให้ค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงว่าการกระจายน้ำหนักโครงสร้างและการกระจายสติฟเนส (Stiffness) ของแบบจำลองสะพานมีสภาพใกล้เคียงกับพฤติกรรมสะพานจริง ซึ่งแบบจำลองสะพานที่ได้รับการปรับแก้แล้วสามารถทำนายผลการกระจายแรงภายในโครงสร้างได้ใกล้เคียงสภาพจริง สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานจะประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 7 ชุด อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Data Acquisition) จำนวน 1 เครื่อง และคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค (Notebook Computer) จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งการสั่นไหวที่ตำแหน่ง L/4 จำนวน 3 จุด ตำแหน่ง L/2 จำนวน 3 จุด และตำแหน่ง 3L/4 อีก 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 11 เพื่อตรวจวัดรูปแบบการสั่นไหวที่เกิดขึ้นทั้งตามแนวยาวและตามแนวขวางของสะพาน ซึ่งการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างส่วนบนจะทำการตรวจวัดภายใต้การจราจรปกติ (ไม่มีการปิดการจราจร) อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานสำหรับนำไปใช้ประกอบการปรับแก้แบบจำลองสะพานไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลการวิเคราะห์กระจายแรงภายในโครงสร้าง



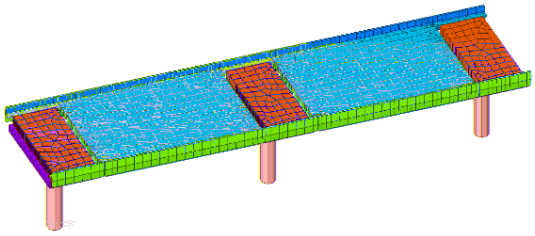
รูปที่ 10 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง



รูปที่ 11 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างส่วนบน (ท้องสะพาน)

3.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกจำลองขึ้นตามขนาดที่ระบุไว้ตามแบบก่อสร้างอย่างละเอียด เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่มีค่าใกล้เคียงสะพานจริงและสามารถปรับแก้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมสะพานจริงมากที่สุด โดยประเภทของเอลิเมนต์ (Element type) ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) Frame element ใช้สำหรับจำลองโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตกันตกด้านข้าง คานสะพาน คานขวางด้านนอก คานขวางด้านใน และเสาตอม่อ และ 2) Shell element ใช้สำหรับจำลองโครงสร้างพื้น และพื้นยื่นหัวเสา ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้มีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้อย่างรวดเร็ว ปรับแก้แบบจำลองได้ง่าย จำนวนเอลิเมนต์ และ Degree of Freedom ไม่มากจนเกินไป โดยการศึกษานี้เลือกใช้โปรแกรม MIDAS Gen ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล มีความนิยมใช้กันมากในปัจจุบัน สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างลักษณะต่าง ๆ ได้หลากหลายเช่น อาคาร สะพาน หรือโครงสร้างพิเศษ โดยแบบจำลองโครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานรูปแบบ Half Joint ในโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของโครงสร้าง

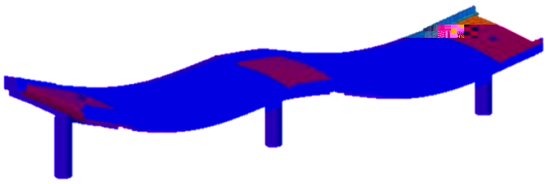
การปรับแก้แบบจำลองสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มหรือลดค่า Stiffness ของส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ให้ได้ค่าความถี่การสั่นไหวพื้นฐานธรรมชาติของแบบจำลองใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจากภาคสนาม โดยการตรวจวัดภาคสนามได้ผลการสั่นไหวในโหมดพื้นฐานหลัก 2 โหมด คือ การสั่นไหวแบบดัดตามยาว และการสั่นไหวแบบดัดตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความถี่การสั่นไหวธรรมชาติจากการตรวจวัดภาคสนาม และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ปรับแก้แล้ว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5 สำหรับผลการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ Stiffness จากแบบจำลองของส่วนโครงสร้างต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจากการตรวจวัดภาคสนามและการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

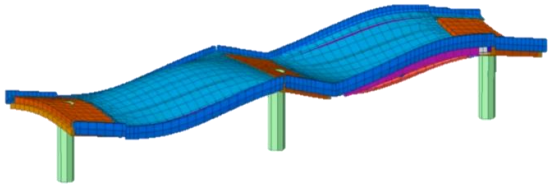
รูปแบบการสั่นไหว (Bending)	ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (Hz)		
	ภาคสนาม	แบบจำลอง	%แตกต่าง
1st Longitudinal	5.0293	5.0258	0.007
1st Transverse	10.3027	10.0697	2.300

ตารางที่ 6 ค่าปรับแก้พารามิเตอร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Parameter	ค่าปรับแก้
Flexural Stiffness of the Girder	15%
Flexural Stiffness of the Deck Slab	15%
Flexural Stiffness of the Cantilever Deck Slab	15%
Flexural Stiffness of the End Diaphragm	-20%
Flexural Stiffness of the Intermediate Diaphragm	15%



(ก) 1st Longitudinal Bending Mode



(ข) 1st Transverse Bending Mode

รูปที่ 13 รูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ให้แบบจำลองมีพฤติกรรมใกล้เคียงสะพานจริง จะถูกนำมาพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรบนสะพานกรณีต่าง ๆ ทั้งหมด 3 กรณี เพื่อวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้างที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคานดังนี้

- Load Case 1: พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร 4 ช่องจราจร (ยานพาหนะวิ่งชิดขอบสะพาน)
- Load Case 2: พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร 2 ช่องจราจร (ยานพาหนะวิ่งกึ่งกลางสะพาน)
- Load Case 3: พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร 3 ช่องจราจร (ยานพาหนะวิ่งกึ่งกลางสะพาน)

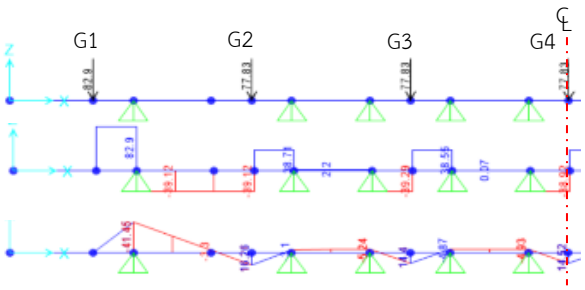
การพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความละเอียดเสมือนจริง ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกจรของแต่ละช่องจราจรจะถูกกระทำเป็นรูปแบบ 2 ล้อ ที่มีระยะห่างล้อเท่ากับ 1.8 ม.

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรม

1) ผลการวิเคราะห์ขนาดแรงดันแม่แรงไฮดรอลิคพบว่า ค่าแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ (Support) สูงสุดเกิดขึ้นที่คานตามยาวตัวริมสุดมีค่าประมาณ 54-76 ตัน และค่าแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับภายในอื่น ๆ มีค่าประมาณ 10-25 ตัน ทั้งนี้อยู่ขึ้นกับขนาดมิติของสะพาน อย่างไรก็ตามแม่แรงไฮดรอลิคอาจไม่ถูกดันขึ้นพร้อมกัน และเท่า ๆ กันทั้งหมด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในการยกโครงสร้างควรใช้แม่แรงไฮดรอลิคที่มีกำลังไม่ต่ำกว่า 80 ตัน จำนวน 1 ตัว ติดตั้งชิดขอบคานตามยาวตัวริมด้านใน โดยมีความห่างไม่เกินกว่า 0.3 ม. วัดจากขอบคานตามยาวถึงกึ่งกลางของแม่แรงไฮดรอลิค และใช้แม่แรงไฮดรอลิคที่มีกำลังไม่ต่ำกว่า 60 ตัน ติดตั้งให้ห่างจากขอบคานตามยาวในระยะไม่เกิน 0.3 ม. (จำนวน 2 ตัว/คาน) โดยวัดถึงกึ่งกลางแม่แรงไฮดรอลิคถึงขอบคานตามยาวภายในแต่ละตัว

2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของคานขวางที่สภาวะกำลัง (Strength Limit State) แสดงในรูปที่ 14 ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดค่าแรงสูงสุด

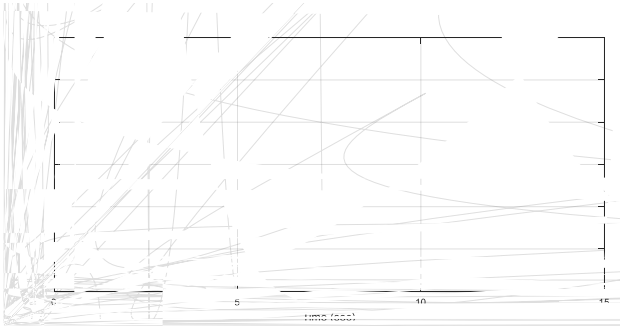


รูปที่ 14 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง 1HJ-Ext1
(บน: แบบจำลองคานขวางสภาวะกำลัง, กลาง: ค่าแรงเฉือน (Ton.),
ล่าง: ค่าโมเมนต์ (Ton.-m.))

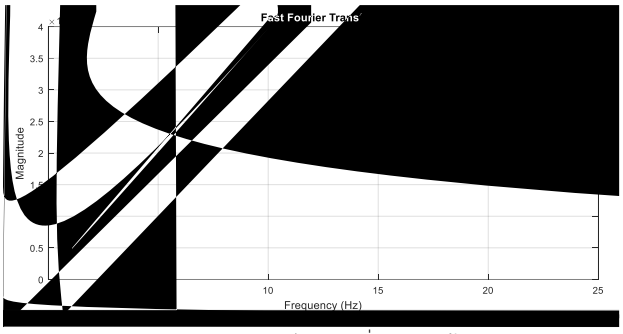
การวิเคราะห์ค่าแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างคานขวางต้องตรวจสอบกำลังความแข็งแรงว่าสามารถต้านทานแรงที่เกิดขึ้นในขณะทำการยกโครงสร้างได้หรือไม่ สำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และกำลังต้านทานแรงเฉือน ดังแสดงในตารางที่ 7-9 พบว่า คานขวางมีกำลังต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคานได้ยกเว้นที่บริเวณปลายคานขวางซึ่งมีลักษณะเป็นคานยื่นที่รับน้ำหนักจากคานตามยาวตัวริมจะมีพฤติกรรมการเกิดโมเมนต์และแรงเฉือนที่สูง ดังนั้น จึงแนะนำให้ทำการยกโครงสร้างรอยต่อแบบ Half Joint เพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน โดยต้องจัดการจราจรบนสะพานเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลงที่คานตามยาวตัวริม (Ext.G.) หรือกล่าวได้ว่าไม่อนุญาตให้ยานพาหนะวิ่งอยู่ในช่วงระหว่างคานตามยาวตัวริมและตัวใน

4.2 ผลการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

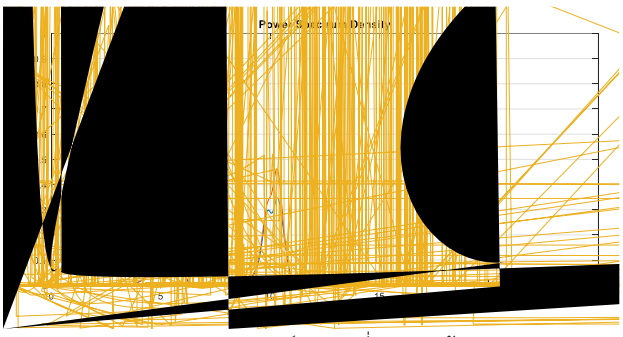
ผลการตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นไหวที่ได้จาก Accelerometer AC01-AC07 ที่ติดตั้งบนโครงสร้างส่วนบน ที่อยู่ใน Time Domain จะถูกนำมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูป Frequency Domain ด้วยวิธี Fast Fourier Transform Analysis (FFT) และวิเคราะห์ให้จุดยอด (Peak) ให้เห็นเด่นชัดขึ้นด้วยวิธี Power Spectral Density (PSD) และทำการ Normalize ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.00 เพื่อความสะดวกในการหาจุดยอด จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน 2 โหมดแรก เท่ากับ 5.03 Hz (โหมดดัด) และ 10.30 Hz (โหมดบิด) ดังแสดงในรูปที่ 15 และพล็อตรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ของโครงสร้างแต่ละรูปแบบ ได้ดังรูปที่ 16



(ก) ความเร่งการสั่นไหว (Time Domain)

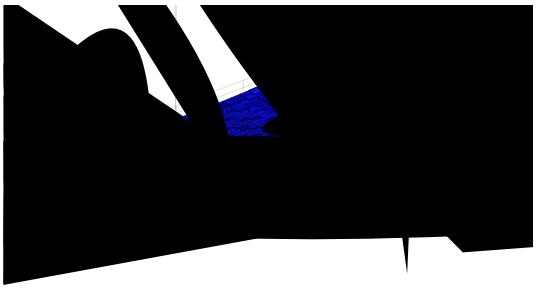


(ข) ผลการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติด้วย FFT

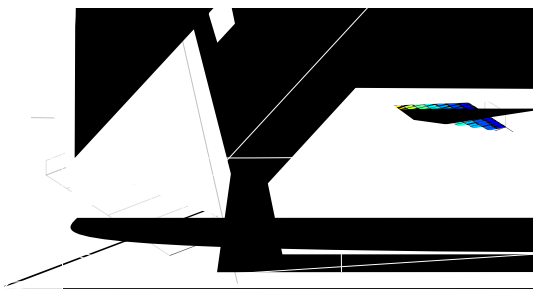


(ค) ผลการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติด้วย PSD

รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)



(ก) Bending Mode



(ข) Torsion Mode

รูปที่ 16 รูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape)

4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกำลังต้านทานแรงภายนอกของคานขวางในทุกกรณี แสดงว่าการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน รูปแบบ Half Joint มีความปลอดภัย

4.4 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรมและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรมและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 7-9 พบว่า ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่จุดรองรับในคานขวางมีค่าใกล้เคียงกันมาก (แตกต่างกันประมาณ 2%) โดยผลของการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงเฉือน (Vu) และโมเมนต์ (Mu) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองโครงเฟรมมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2) การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบโครงเฟรมมีค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการยกโครงสร้างสูงเกินกว่ากำลังต้านทานที่คานขวางสามารถรับได้อย่างมาก (ไม่ผ่าน) ในกรณีที่ยอมให้น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลงคานตามยาวตัวริม (กรณีจัดช่องจราจร 4 ช่อง (HJ-Ext1: 4Lane)) และเกินกว่ากำลังต้านทานโมเมนต์เพียงเล็กน้อยในกรณีอื่น ๆ (HJ-Ext0: 2Lane, 3Lane) ซึ่งหากพิจารณาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดและพิจารณาเหล็กในพื้นร่วมรับแรงด้วยจะถือว่ายอมรับได้ (อนุโลม) เนื่องจากในการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน การทางพิเศษแห่งประเทศไทยจะอนุญาตให้ดำเนินการได้ในช่วงเวลากลางคืนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ (เวลา 22.00 - 04.00 น.) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้ทาง ส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นจริงน้อยกว่าแบบจำลอง จึงทำให้การยกโครงสร้างมีความปลอดภัยเพิ่มมากยิ่งขึ้น

3) การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เกินกำลังต้านทานแรงภายนอกของคานขวางในทุกกรณี แสดงว่าการยกโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแผ่นยางรองคานของรูปแบบ Half Joint มีความปลอดภัย

4) การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ถึงแม้จะเห็นว่าการวิเคราะห์แรงให้ผล “ผ่าน” ในทุกกรณีก็ตาม (กำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์สูงกว่าค่าแรงที่เกิดขึ้นจากการยกโครงสร้าง) แต่จะสังเกตได้ว่าผลของค่าแรงเฉือนสูงสุดในกรณีที่ยอมให้น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลงคานตามยาวตัวริม ที่ตำแหน่งขอบขวาของคานตามยาวตัวริม (G1) ผ่านเพียงเล็กน้อย (ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการยกโครงสร้าง 67.9 Ton. น้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือน 71.9 Ton. ประมาณ 5% เท่านั้น)

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรมและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Load case 1

ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง			Load case 1	
			FEM	Frame HJ-Exat1 4 Lane
ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด (SLS) Ton.			73.90	75.60
ค่าแรงเฉือน (Vu) Ton.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øVn	Vu	Vu
ขอบขวา G1	2ป12@0.07m.	71.90	67.90	81.45 (ไม่ผ่าน)
ขอบซ้าย G2	2ป10@0.25m.	27.00	25.00	37.86 (ไม่ผ่าน)
ขอบขวา G2	4ป10@0.25m.	48.20	27.30	32.54
ขอบซ้าย G3	4ป10@0.25m.	48.20	26.60	36.15
ค่าโมเมนต์ (Mu), Ton.-m.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øMn	Mu	Mu
Jack ตัวที่ 1	4DB28	21.53	-18.00	-40.73 (ไม่ผ่าน)
G2	6DB28	30.49	8.80	15.11
Jack ตัวที่ 2	4DB28	21.53	-3.10	-5.22
G3	6DB28	30.49	8.60	12.85

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรมและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Load case 2

ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง			Load case 2	
			FEM	Frame HJ-Exat0 2 Lane
ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด (SLS) Ton.			53.90	53.50
ค่าแรงเฉือน (Vu) Ton.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øVn	Vu	Vu
ขอบขวา G1	2ป12@0.07m.	71.90	42.30	46.92
ขอบซ้าย G2	2ป10@0.25m.	27.00	11.40	24.52
ขอบขวา G2	4ป10@0.25m.	48.20	15.80	34.56
ขอบซ้าย G3	4ป10@0.25m.	48.20	30.30	29.80
ค่าโมเมนต์ (Mu), Ton.-m.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øMn	Mu	Mu
Jack ตัวที่ 1	4DB28	21.53	-15.00	-23.46 (อนุโลม)
G2	6DB28	30.49	5.30	12.72
Jack ตัวที่ 2	4DB28	21.53	-2.00	-4.56
G3	6DB28	30.49	6.11	11.10

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองโครงเฟรมและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Load case 3

ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง			Load case 3	
			FEM	Frame HJ-Exat0 3 Lane
ค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด (SLS) Ton.			55.50	54.30
ค่าแรงเฉือน (Vu) Ton.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øVn	Vu	Vu
ขอบขวา G1	2ป12@0.07m.	71.90	45.20	46.92
ขอบซ้าย G2	2ป10@0.25m.	27.00	20.90	26.14
ขอบขวา G2	4ป10@0.25m.	48.20	27.20	43.94
ขอบซ้าย G3	4ป10@0.25m.	48.20	26.50	35.74
ค่าโมเมนต์ (Mu), Ton.-m.				
ตำแหน่ง	ปริมาณเหล็กเสริม	øMn	Mu	Mu
Jack ตัวที่ 1	4DB28	21.53	-15.80	-23.46 (อนุโลม)
G2	6DB28	30.49	8.00	15.10
Jack ตัวที่ 2	4DB28	21.53	-2.30	-6.87
G3	6DB28	30.49	8.00	13.30

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทความนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเปลี่ยนแผ่นยางรองคานของทางพิเศษเฉลิมมหานครในรูปแบบ Half Joint ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 วิธีการยกโครงสร้าง รูปแบบ Half Joint ที่เหมาะสมที่สุดคือการยกโครงสร้างบริเวณคานขวางจากใต้ท้องสะพาน เนื่องจากมีพื้นที่เพียงพอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์การยกและไม่กระทบกับผู้ใช้ทางพิเศษ หรือประชาชนที่สัญจรบนถนนใต้ทางพิเศษ

5.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโครงเฟรมให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และได้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัยกว่า

5.3 การยกโครงสร้าง รูปแบบ Half Joint ของทางพิเศษเฉลิมมหานคร เพื่อความปลอดภัย ควรต้องมีการจัดการจราจรบนสะพานไม่ให้ยานพาหนะวิ่งถ่ายน้ำหนักสู่คานตามยาวตัวริม เนื่องจากสติฟเนสของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานแต่ละช่วงมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการถ่ายแรงในสะพานและแรงภายในคานตามยาว ประกอบกับข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการตรวจวัดพฤติกรรมของสะพานทุกช่วงได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่พนักงานกองวิจัยและพัฒนา และเจ้าหน้าที่กองบำรุงรักษาทาง การทางพิเศษแห่งประเทศไทย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการค้นคว้าข้อมูลจนการศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

เอกสารอ้างอิง

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007). *Maintenance Manual for Roadways and Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

[2] Morteza, A. and Reza, A. (2013). Inspection, Condition Evaluation and Replacement of Elastomeric Bearings in Road Bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9, pp.918-934.

[3] Sun, K., Hyeong, Y. K. and Jung, H. K. (2001). Bearing Replacement for Prestressed Concrete I - Girder Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 6, pp.271-275.

[4] Transportation Research Board (2001). *NCHRP Report 449, Elastomeric Bridge Bearings: Recommended Test Methods*. National Academic Press.

[5] กรมทางหลวง (2555). *โครงการศึกษาสภาพการใช้งานและวิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรอง Bearing Pad ในสะพานกรมทางหลวง*. กรมทางหลวง, หน้า 34-38.

[6] American Association of State Highway and Transportation Officials (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.