

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานชิงพระรามเก้า Dynamic Behavior of RAMA IX Cable-Stayed Bridge

เสนีย์ ศิริไชย ชิต เหล่าวัฒนา และ บรรพต วนาศิริสวัสดิ์
ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม(ฟีโบ้) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 สุขสวัสดิ์ 48 แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 02-470-9339, 02-470-9129 โทรสาร 02-470-9111, E-Mail : s1400128@cc.kmutt.ac.th

Seney Sirichai, Djitt Laowattana and Bunpoth Vanasirisawut
Center of Operation for Field roBOTics Development (FIBO), King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Suksawasd 48 Bangmod Bangkok 10140 Thailand
Tel : 662-470-9339, 662-470-9129 Fax : 662-470-9111

บทคัดย่อ

สะพานพระรามเก้าเป็นสะพานชิงแบบระนาบเดี่ยว (Single Plane Fan Type) มีช่วงทอดตัวกลางสะพาน (Main Span) 450 เมตร สะพานได้รับการหลายอย่าง อาทิเช่นจากรถยนต์ที่แล่นผ่านและแรงลม เป็นต้น แบบจำลองสามมิติของสะพานได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ รวมทั้งขนาดของการสั่นสะเทือนจากภาระต่างๆ เสา(Pylon) และตอม่อ(Pier)ถูกจำลองด้วยเอเลเมนต์คาน(Beam Element) ส่วนตัวแทน(Bridge Deck)จำลองด้วยเอเลเมนต์เชลล์ ทรัสส์ และคาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานให้ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของโครงสร้างจริง สายเคเบิล(Cable) จำลองด้วยเอเลเมนต์ทรัสส์(Truss Element) ในการวิเคราะห์นั้นจะอ้างอิงข้อมูลของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน(Accelerometer) จากระบบตรวจสอบ(Monitoring System) ที่ติดตั้งเอาไว้แล้วที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของข้อมูลที่ได้นั้นจะถูกนำมาเทียบเคียงกับผลจากแบบจำลองไฟไนท์เอเลเมนต์ โดยผลชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติและเกิดการผิดรูปของสะพาน

Abstract

The RAMA IX Bridge is a Single Plane Fan type of Cable-Stayed Bridge. Its main span is 450 meters. The

bridge experiences several load excitations such as traffic induces and wind loads. A 3-D model has been used in order to analyse the natural frequency as well as vibrational amplitude resulting from practical loads. The girders of bridge deck are comprised of beam, shell and truss element in order to improve its stiffness properties with respect to the real bridge structure. The pylons and stayed cables are represented by beam and truss elements respectively. Our analysis is based on the data from accelerometers in a monitoring system, installed at the Expressway and Rapid Transit Authority of Thailand (ETA). The analytical results regarding dynamic behavior were thoroughly compared with computational outputs from our finite element model. The comparison indicates that model could be effectively used to determine natural frequency and critical deformation of the bridge.

1. บทนำ

สะพานพระรามเก้าเป็นสะพานชิงแห่งแรกและแห่งเดียวในประเทศไทย รวมทั้งยังได้ทำลายสถิติสะพานที่มีช่วงทอดตัวระหว่างเสาชิงสองต้นที่ยาวที่สุด ด้วยความยาวมากกว่า 750 เมตร สะพานชิงพระรามเก้า นับเป็นการผนวกเทคโนโลยี

ทางด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมเพื่อให้ได้โครงสร้างที่สวยงามและทันสมัย สำหรับสะพานที่ใช้เคเบิลในการช่วยรับน้ำหนักของตัวโครงสร้างสะพานนั้นได้มีการก่อสร้างขึ้นมาแล้วหลายที่ในโลก ซึ่งต่างก็แบ่งแยกไปได้หลายประเภททั้งตามลักษณะโครงสร้างการวางตัวของเคเบิลเป็นต้น ประเภทใหญ่ๆที่แบ่งนั้นมี สะพานแขวน(Suspension Bridge) และ สะพานซิง(Cable-Stayed Bridge) โดยสะพานพระรามเก้าจัดอยู่ในประเภทของสะพานซิง นอกจากนี้ในประเภทของสะพานซิงเองสามารถแยกได้เป็นแบบเสาเดี่ยว เช่นสะพานพระรามเก้า หรือแบบเสาคู่ อีกทั้งรูปแบบโครงสร้างที่สามารถยืดหยุ่นไปได้ตามแนวความคิดของนักออกแบบเพื่อให้เกิดรูปทรงที่ดูแปลกและสวยงาม ประกอบกับการก่อสร้างที่มีราคาแพง การบำรุงรักษาและหาจุดที่ต้องแก้ไขเพื่อให้อายุการใช้งานทนทานและยาวนานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น สะพานซิงพระรามเก้าได้เผชิญกับสภาวะของการจราจรอันหนาแน่นของกรุงเทพมหานครที่มีแนวโน้มของรถยนต์เพิ่มมากขึ้นทุกวันทั้งการจราจรที่ติดขัดบนตัวสะพาน แรงลมที่พัดผ่านสะพาน ล้วนแล้วแต่เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการสั่นไหวของสะพานทั้งสิ้น สภาพของภูมิอากาศที่ร้อนของประเทศไทยยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผิวถนนเกิดความเสียหายก่อนเวลาอันควร ทำให้ผิวถนนเกิดการปูด ขรุขระ หรือเป็นหลุม โดยขณะที่ยานพาหนะแล่นผ่านถนนยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของสะพานได้เช่นกัน การที่สะพานต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมแบบนี้บ่อยครั้งทำให้โครงสร้างย่อมเกิดความเสื่อมโทรมและชำรุดได้ ทั้งการคลอนตัวของนอตและจุดยึดต่างๆอาจเกิดปัญหา

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองของสะพานด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และต้องใส่ค่าคุณสมบัติต่างๆของสะพานและวัสดุที่ใช้เพื่อให้เกิดความใกล้เคียงให้มากที่สุด จากนั้นจะทำการแบ่งเอลิเมนต์เพื่อการคำนวณ สิ่งที่ต้องทำคือการเปรียบเทียบแบบจำลองให้พร้อมและถูกต้องในการใช้งาน จากนั้นการเทียบเคียงผลการทดลองที่ได้มาจากการอุปกรณ์การตรวจจับของสะพานที่ทางพิเศษมีอยู่นั้นเป็นตัวช่วยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อใช้คำนวณหาค่าความเค้น ภาระต่างๆทั้งจากอุณหภูมิ รถยนต์ต่อไป ในแขนงของการทำงานวิจัยแบบนี้ได้มีนักวิจัยทั่วโลกหลายคนที่ได้เคยทำมาแล้วดังนี้

John C.Wilson และ Tao Liu [1] แห่งมหาวิทยาลัย Mc.Master เมืองออนตาริโอ ประเทศแคนาดา ได้ทำการ

วิเคราะห์พลศาสตร์ของสะพาน Quincy Bayview ในเมืองยิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา เอกสารงานวิจัยนี้ได้ถูกตีพิมพ์ในปี 1991 พวกเขาได้เก็บผลการทดลองจากการสั่นสะเทือนของสะพานจากแรงกระทำภายนอกทั่วไปอันได้แก่รถยนต์และลมเป็นต้น ซึ่งการทดสอบนี้เรียกว่า Ambient Vibration และใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัม(Spectral Analysis) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์จากการสั่นสะเทือนแบบสุ่มจากผลการทดลองด้วยอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน(Accelerometer) โหมดรูปร่างการสั่นสะเทือน ค่าความถี่ของแต่ละโหมดการสั่นสะเทือนพบได้จากค่าสูงสุดที่แกนความถี่ จากนั้นการวิเคราะห์ค่า Coherence นั้นใช้เพื่อประเมินค่าความเป็นเชิงเส้นของโครงสร้างที่สั่นสะเทือนว่ามีมากน้อยเพียงใดสำหรับการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการแบบเชิงเส้นมาวิเคราะห์ โดยหลักการแล้วค่าของ Coherence ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากเท่าใดยิ่งแสดงถึงคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นเท่านั้น

ในรายงานวิจัยชุดหนึ่งที่น่าสนใจพร้อมกันโดย John C. Wilson และ Wayne Gravelle [2] แห่งมหาวิทยาลัยเดียวกันได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สามมิติ วิเคราะห์โดยใช้หลักการแบบเชิงเส้น(Linear Analysis) ในเนื้อหาได้มีการแนะนำหลักการเปรียบเทียบแบบจำลองโดยการนำค่าสถิติในแนวดิ่ง แนวแกน แนวไขว้(ในแนวแกน Z) และแนวการบิดของตัวสะพาน สำหรับเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ในส่วนของเสาและแท่นของสะพาน(Deck)ใช้เอลิเมนต์คาน เคเบิลใช้เอลิเมนต์ของ Truss ในการคำนวณ

Ahmed M.Abdel-Ghaffar และ Robert H. Scanlan [3], [4] แห่ง มหาวิทยาลัย Princeton ได้วิจัยพลศาสตร์ของสะพานโกลเด้นเกต ประเทศสหรัฐอเมริกา งานแบ่งเป็น2ส่วนคือส่วนของโครงสร้างแขวน(Suspended Structure) และโครงสร้างของตอม่อกับเสายึดเคเบิล(Pier-Tower Structure) ในส่วนของความถี่ของโครงสร้างแขวนที่ทดสอบนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1.5 Hz ขณะที่โครงสร้างของตอม่อกับเสายึดเคเบิลมีค่าความถี่อยู่ระหว่าง 0-5 Hz. ค่าที่ทำการทดสอบถูกเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สามมิติ ค่าอัตราส่วนแอมป์สามารถหาได้จากการทดลองวัดการสั่นสะเทือนจริงของสะพาน จากผลปรากฏว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก

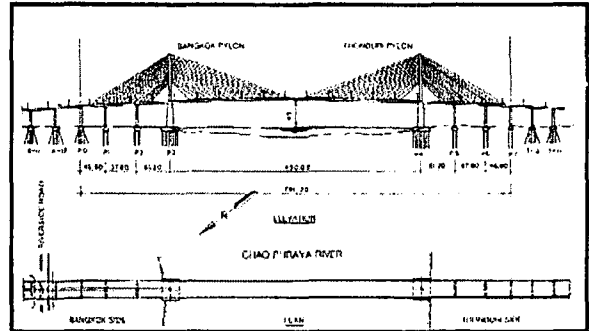
เอกสารวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย(Asian Institute of Technology) ปี1989 [5]

แสดงผลวิจัยการสั่นสะเทือนของสะพานอันเนื่องมาจากความขรุขระของผิวถนน และหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนที่ใช้คือ Tune Mass Damper ซึ่งมีทั้งแบบชนิดรับแรงดัดและบิด โดยวิเคราะห์เทียบเคียงกับแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สองมิติขึ้นซึ่งใช้ เอลิเมนต์Trussมาจำลองเป็นเคเบิลและเอลิเมนต์คานสำหรับเสา แทนสะพาน และต่อม่อ พร้อมทั้งได้มีการจำลองโหลดที่กระทำกับสะพานและจำลองความหยาบของผิวถนนขึ้นมา การทดสอบผลของสะพานที่มี Tuned Mass Damper (TMD) ที่ได้ตั้งค่าความถี่ไป 0.325 Hz (ความถี่ธรรมชาติแรกของสะพาน) จากผลที่ได้พบว่า TMD สามารถลดความสั่นสะเทือนของเคเบิลที่อยู่ใกล้กับกึ่งกลางสะพานของช่วงทอดสะพานได้ ซึ่งได้แนะนำว่าควรมีการติดตั้งแดมเปอร์ที่สายเคเบิลทุกเส้น(ในปัจจุบันนี้ได้ติดตั้งแล้ว)และควรตั้งค่าความถี่ธรรมชาติของตัวไปที่โหมดที่ 5 แทน

เอกสารในปี 1996 เสนอโดย C. Gentile และ F. Martinez Y Cabrera [6] ได้ทดสอบสะพานซึ่งผ่านการซ่อมแซมของเคเบิลแบบเหล็กหล่ออัดคอนกรีตโดยการเพิ่มเติมเคเบิลเส้นเล็กไว้ที่ร็อบนอก สำหรับสะพานที่ทำการวิจัยนั้นคือ Polvevera Creek Viaduct เมืองเจนัว ประเทศอิตาลี โดยได้เก็บผลการถยนต์ที่แล่นผ่านสะพาน พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สองมิติ และสามมิติ ขึ้นมาเพื่อเทียบเคียงกับผลที่ได้จากการตรวจจับ ส่วนโหมดของความถี่ที่ได้มานั้นอยู่ระหว่าง 0-10 Hz ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ พบว่ามีความใกล้เคียงกัน รวมทั้งยังมีความใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์รูปร่างของการสั่นสะเทือนที่โหมดต่างๆได้ต่อไป

2. ลักษณะทั่วไปของสะพาน

สะพานชิงพระราม 9 เป็นสะพานที่เชื่อมการจราจรระหว่างฝั่งธนบุรีและกรุงเทพมหานคร ข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นสะพานซึ่งชนิดระนาบเดี่ยว(Single Plane Fan Type) คือมีเสาซึ่งอยู่ด้านละหนึ่งต้นและใช้สายเคเบิลในการเหนี่ยวรั้งโครงสร้างของสะพานเอาไว้ การออกแบบได้ยึดตามมาตรฐานของเยอรมัน (DIN) ซึ่งรายละเอียดของวัสดุและการออกแบบต่างๆสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [7] หรือที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทย ศูนย์ซ่อมบำรุงสาธิตประดิษฐ์



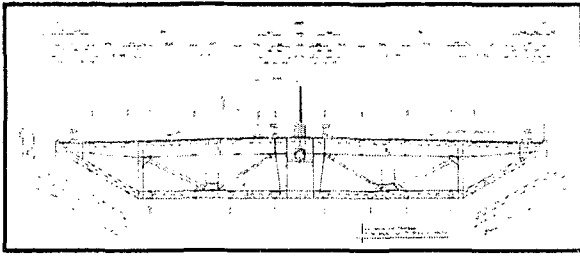
รูปที่ 1 ภาพของสะพานชิงพระรามเก้าที่เชื่อมระหว่างฝั่งธนบุรีและกรุงเทพฯ

สะพานมีความยาวของช่วงทอดตัวกลางสะพาน (Main Span) เป็น 450 เมตร และช่วงทอดตัวท้ายสะพาน (Back Span) ระยะห่างของตอม่อจากตอม่อของเสาซึ่งคือ 61.2 57.6 และ 46.8 เมตรตามลำดับ เป็นด้านละ 165.6 เมตร รวมระยะทางทั้งสิ้น 781.2 เมตร ส่วนระยะนอกเหนือจากนี้เป็นช่วงของเชิงลาดสะพานเราจะไม่นำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง จากรายละเอียดของโครงสร้างในส่วนต่างๆ เช่นลักษณะโครงสร้างของหน้าตัดแทนสะพาน พื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิล ขนาดของเสาซึ่ง เป็นต้น อันเป็นจุดหลักๆของโครงสร้างที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองต่อไป ซึ่งพอจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

2.1 โครงสร้างเหนือผิวดิน (Superstructure)

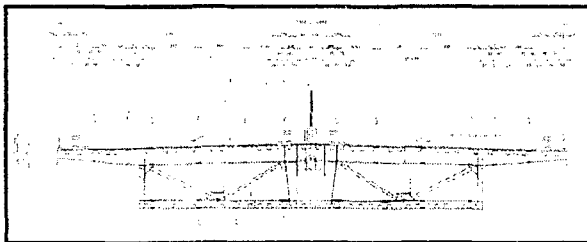
จุดหลักๆนั้นจะประกอบไปด้วยเกอเดอร์(Girder) ตรงส่วนกลางสะพานและท้ายสะพาน เสาซึ่ง(Pylon) และเคเบิล(Cable) โครงสร้างดังกล่าวเป็นส่วนประกอบที่จะทำแบบจำลองในการวิเคราะห์สะพาน

Girder สำหรับเกอเดอร์จะมีความกว้างอยู่ระหว่าง 31-33 เมตร สูง 4 เมตร มีหน้าตัดรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ภายในกลวงเพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้าง ตรงส่วนบริเวณช่วงทอดตัวกลางสะพานนั้นจะออกแบบตามหลักพลศาสตร์เพื่อเพิ่มความสมดุลย์ต่อแรงลม โดยที่พื้นที่ด้านข้างของเกอเดอร์จะเอียงตามลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 ความยาวของแต่ละเกอเดอร์นั้นจะไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงของแทนสะพาน แทนสะพานประกอบไปด้วยเกอเดอร์หลายอันมาประกอบกันจากการประกอบเกอเดอร์ในแต่ละฝั่งของสะพานเป็นลักษณะของแคนทีลีเวอร์(Cantilever) จนกระทั่งสะพานทั้งสองฝั่งมาบรรจบกัน โดยมีความลาดเท่ากับ 5 %



รูปที่ 2 แสดงगेดเดอร์ที่บริเวณช่วงกลางสะพาน(Main Span)

ช่วงหลังสะพานจะเป็นลักษณะหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 3 ช่วงหลังสะพานจะมีรูปทรงที่แตกต่างไปจากช่วงกลางสะพาน เนื่องจากช่วงกลางสะพานเป็นจุดที่ต้องคำนึงถึงการสั่นสะเทือนมากกว่าส่วนอื่น ทั้งจากแรงลม รถยนต์ เป็นต้น ในส่วนหลังสะพานนี้ยังมีจุดรองรับต่าง ๆ เช่น ตอม่อและสายเคเบิลที่ช่วยพยุงโครงสร้างไว้ให้คงอยู่ ส่วนช่วงกลางสะพานจะมีจุดที่พยุงอยู่คือสายเคเบิลและการยึดกันระหว่างแต่ละตัวगेดเดอร์



รูปที่ 3 แสดงगेดเดอร์ที่บริเวณช่วงหลังสะพาน(Back Span)

จากจำนวนลวดของगेดเดอร์และจุดต่อระหว่างแท่นสะพานกับสายเคเบิลจะเป็นส่วนหนึ่งที่น่าไปพิจารณาการแบ่งเอเลเมนต์ของแบบจำลองสะพานต่อไป

Cable มีอยู่ทั้งสิ้น 68 เส้น 4 จุด จุดละ 17 เส้น มีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 119 มิลลิเมตร ถึง 167 มิลลิเมตร ปลายด้านหนึ่งยึดกับเสาซึ่งส่วนอีกด้านจะพยุงตัวแท่นสะพานเอาไว้ดังรูปที่ 1

Pylon มีทั้งสิ้นสองต้น มีความสูงจากแท่นสะพาน 78 เมตร มีทรงเรียว(Taper)จากฐานไปยังยอดเสา ที่ตำแหน่งฐานของเสาจะยึดอยู่กับตอม่อของสะพาน เสาทำหน้าที่เป็นตัวรับน้ำหนักสะพานเอาไว้ด้วยสายเคเบิล ลักษณะของเสาซึ่งเป็นเปลือกหลายๆอันมาประกอบกันไปจนถึงยอด ภายในเสา

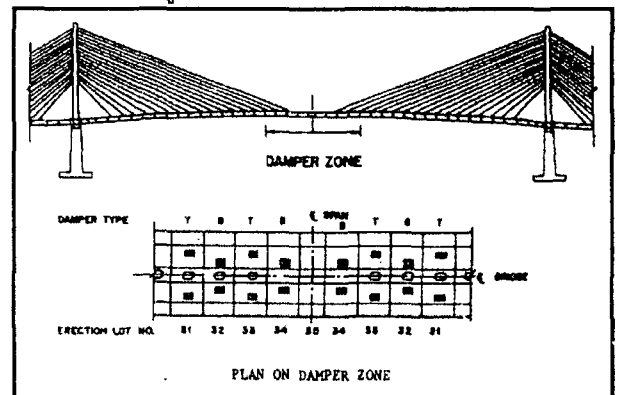
ซึ่งจะกลวงพร้อมกับมีลิฟท์ เพื่อการเข้าไปบำรุงรักษาและดูแลโครงสร้างได้

ที่จุดรองรับระหว่างตัวสะพานกับตอม่อมีตัวแบร์ริง (Bearing) ที่ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนตัวของสะพานให้อยู่ในแนวตามยาวเท่านั้น โดยป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งหรือแนวอื่น ๆ

2.2 อุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber)

การลดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากภาวะภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานพระรามเก้า นั้นมีการติดตั้งอยู่หลายจุดด้วยกัน คือบริเวณช่วงกลางสะพาน ยอดเสาซึ่งแต่ละต้น และที่บริเวณจุดยึดสายเคเบิล ซึ่งจะกล่าวถึงโดยสังเขปดังต่อไปนี้

Tuned Mass Damper ติดตั้งที่ตำแหน่งช่วงกลางของสะพานดังในรูปที่ 4. ประกอบไปด้วยแดมเปอร์ที่รับแรงบิด (Torsion Mode Damper) และรับแรงดัด (Bending Mode Damper) แดมเปอร์จะติดตั้งอยู่ทั้ง 2 มังของสะพานสลับกันระหว่างแดมเปอร์ที่รับแรงดัดและบิดโดยจุดที่สั่นไหวมากที่สุดคือที่ตำแหน่งช่วงกลางสะพาน สำหรับตัวที่รับภาระการบิดตัวจะอยู่ที่ด้านนอกของगेดเดอร์ (Girder) ส่วนตัวที่รับภาระดัดจะติดตั้งด้านในGirderโดยวางสลับกันไป



รูปที่ 4 ตำแหน่งแดมเปอร์ที่ติดตั้งบริเวณกลางสะพาน

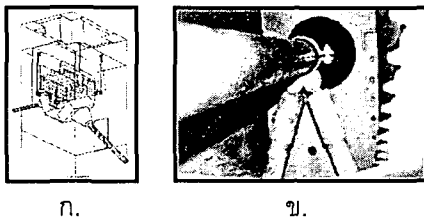
สำหรับปัจจุบันนี้แดมเปอร์ได้ถูกตั้งความถี่ของตัวมันไปให้ความถี่โหมดแรกของสะพานเพื่อป้องกันการตอบสนองของการสั่นสะเทือนที่อาจจะเกิดขึ้นได้มากเมื่อต้องเผชิญกับภาวะจากภายนอกที่มาตรงกับโหมดแรกของสะพาน อันจะทำให้เกิดการตอบสนองที่เป็นอันตรายได้สำหรับส่วนประกอบของแดมเปอร์นั้นจะประกอบไปด้วย สปริง มวลที่ติดตั้งไว้ และแดมปีที่เคลื่อนที่ในกระบอกน้ำมันเพื่อดูดซับการสั่นสะเทือน

ในรูปที่ 5ก. และ 5ข. แสดงภาพของ Bending และ Torsion Damper ตามลำดับ



รูปที่ 5 แสดงชนิดของแดมเปอร์แบบรับแรงบิดและรับแรงดัด

Pylon Damper เป็นอุปกรณ์สำหรับลดการสั่นสะเทือนของเสา(Pylon) โดยตำแหน่งติดตั้งจะอยู่ที่ยอดเสาแต่ละต้น มันจะเคลื่อนที่ในลักษณะของ Inverted Pendulum เพื่อลดการแขวนตัวของเสาที่ใช้เป็นจุดยึดสายเคเบิลของสะพาน โดยรูปที่ 6ก. ได้แสดงให้เห็นตำแหน่งการติดตั้งของแดมเปอร์



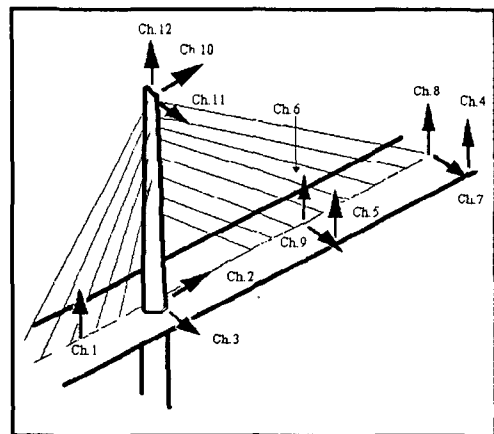
รูปที่ 6 แสดงแดมเปอร์ของเสาและของเคเบิลตามลำดับ

Cable Damper จะมีรูปร่างดังที่ปรากฏในรูปที่ 6ข. โดยตำแหน่งการติดตั้งนั้นจะอยู่ที่บริเวณจุดยึดตอนปลายของแต่ละสายเคเบิลของสะพานเพื่อลดการสั่นของเคเบิล ลักษณะของแดมเปอร์นั้นเป็นโครงสร้างคล้ายตัววี การทำงานคล้ายกับใช้ค้ำของรถยนต์โดยจะยึดและยุบเมื่อการสั่นเกิดขึ้น

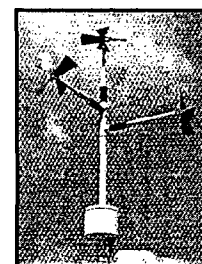
3. อุปกรณ์ตรวจจับและวัดการสั่นสะเทือนของสะพาน

การตรวจจับค่าการสั่นสะเทือนของสะพานหรือความเร็วลม สามารถทำได้โดยการนำข้อมูลจากระบบตรวจจับ (Monitoring System) ของการทางพิเศษฯ. ศูนย์ซ่อมบำรุงสาธิตประจักษ์มาใช้ในการวิเคราะห์ควบคู่ไปกับแบบจำลองไฟไนท์เอลเมนต์สามมิติที่ได้สร้างขึ้นมา โดยอุปกรณ์ทั่วไปที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้คือ อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

(Accelerometers) 12 ตัว 12 ช่องสัญญาณ โมเดลที่ใช้คือ FBA-11 ของบริษัทคิเนเมตริกซ์ (Kinematics)[10] โดยมีช่วงการใช้งาน $\pm 2g$ ใช้กระแสไฟตรง Output $\pm 2.5 Vdc$ มีความถี่ธรรมชาติ 50 Hz ค่าเดมปี 0.7 จากคุณสมบัติของ Accelerometer ดังกล่าวทำให้สามารถตอบสนองความถี่ในช่วงตั้งแต่ 0 จนถึง 50 Hz อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Anemometer) 1 ตัว 3 ช่องสัญญาณ ใช้วัดความเร็วลมระหว่าง 0-30 m/s ตัววัดอุณหภูมิ(Temperature Sensor) 1 ตัว 1 ช่องสัญญาณ โดยมีตำแหน่งการติดตั้งต่าง ๆ ดังได้แสดงในรูปที่ 7 ที่ตำแหน่งสัญญาณช่อง 1-12 เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน ส่วนตำแหน่งการติดตั้งของตัววัดความเร็วลมและอุณหภูมินั้นไม่ได้แสดงในรูปที่ 7 แต่ตำแหน่งติดตั้งนั้นจะอยู่ที่ยอดบนสุดของเสาซึ่งดังแสดงในรูปที่ 8 โดยมีทิศทางต่างกัน 3 ทิศทางเพื่อต้องการจับความเร็วและทิศทางของลมที่พัดผ่าน



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งติดตั้งของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 8 แสดงรูปร่างของ Anemometer แบบ 3 แกน

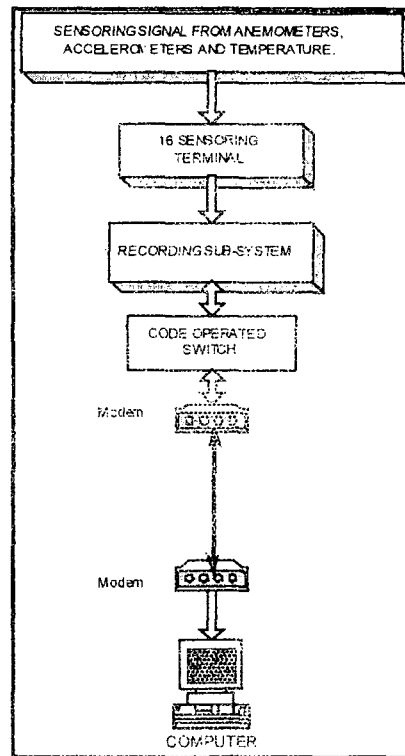
ส่วนตัววัดอุณหภูมิถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางสะพานของช่วงทอดตัวกลางสะพาน ซึ่งมีเพียง 1 ตัว 1 ช่องสัญญาณ

อย่างไรก็ตามในเอกสารชุดนี้จะคิดวิเคราะห์เพียงผลที่ได้จากตัววัดการสั่นสะเทือนก่อนเท่านั้น ส่วนผลจากอันอื่นจะเป็นส่วนที่ได้ทำต่อไป

การทำงานนั้น Sensors ต่างๆจะรับค่าและจะส่งสัญญาณที่ได้ตรวจจับมายังชุดเก็บบันทึกข้อมูล (Recording Sub-System) ซึ่งในที่นี้การทางพิเศษได้ใช้ K2 Central Recording System [8] เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณอานาล็อก (Analog Signal) จาก Sensor และบันทึกเข้าไปในรูปของสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) มีช่องสัญญาณทั้งสิ้น 18 ช่องแต่ใช้งานอยู่ 16 ช่อง ซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 9 ก็คือส่วนของ 3 บล็อกแรกนั่นเอง ต่อจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่าน Modem เพื่อส่งต่อไปกับ Modem อีกตัวโดยใช้สายเคเบิลที่มีการชิลด์สายเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกเพื่อนำสัญญาณเข้าไปบันทึกในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลทั้งทางหน้าจอและพิมพ์ออกมา พร้อมเก็บข้อมูลนี้ไว้ในฮาร์ดดิสก์ ไม่เต็มที่ใช้งานนี้เป็นการสื่อสารกันระหว่างโมเด็ม 2 ตัวด้วยสายเคเบิล ทำงานรับ-ส่งสัญญาณแบบ Full-Duplex [9] คือการทำงานแบบทั้งรับและส่งได้พร้อมกัน โดยไม่ต้องผ่านเครือข่ายโทรศัพท์แต่อย่างใด ส่วนชุด Code Operated Switch เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับคำสั่งการส่งถ่ายข้อมูลระหว่างต้นทางกับปลายทาง

การบันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบตรวจจับนี้โดยรับข้อมูลจากโมเด็มอีกตัวดังแสดงในรูปที่ 9 โดยปกติ การทางพิเศษได้มีหน่วยงานที่คอยดูแลและบำรุงรักษาสะพาน พร้อมมีการพิมพ์ผลการสั่นสะเทือนออกมาเสมอ

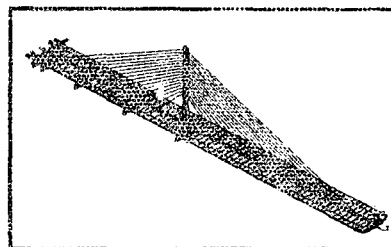
จากที่กล่าวมานี้เป็นการทำงานโดยสังเขปของระบบตรวจจับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งการนำข้อมูลออกมาวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการดึงข้อมูลที่เก็บบันทึกในฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่การทางพิเศษฯ แล้วเราดึงข้อมูลดิบมาแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณความเร่งคือ g (m/s^2) จากนั้นทำการแปลงไปวิเคราะห์บนแกนความถี่ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานจริงได้ ซึ่งจะนำผลนี้ไปใช้ในการปรับเทียบแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกันโดยจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 9 ระบบตรวจจับของสะพานพระรามเก้า

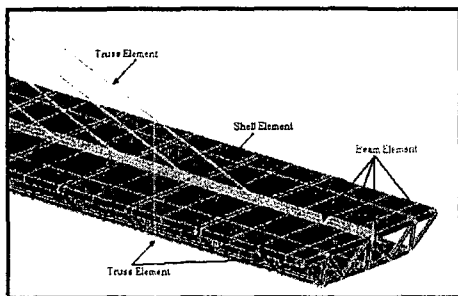
4. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 10 ถูกสร้างขึ้นตามแบบแปลนปัจจุบันของสะพานชิงพระรามเก้า เอลิเมนต์ที่ใช้ทั้งหมดในการจำลองโครงสร้างของสะพานเป็นเอลิเมนต์สามมิติทั้งสิ้น เอลิเมนต์เชลล์ (Shell Element) ที่ใช้เป็นชนิดของเชลล์ 4 โหนด เอลิเมนต์ทรัสส์ (Truss Element) และเอลิเมนต์คาน (Beam Element) เป็นเอลิเมนต์ 2 โหนด ส่วนของแท่นสะพาน (Bridge Deck) จำลองด้วยเอลิเมนต์เชลล์ เอลิเมนต์คาน และเอลิเมนต์ทรัสส์ (Truss Element)



รูปที่ 10 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

โดยสร้างใกล้เคียงกับโครงสร้างของแท่นสะพานจริงดังรูปที่ 11 โครงถักภายในของหน้าตัดแท่นสะพานถูกจำลองด้วยเอเลเมนต์ทรีสส์ มีเอเลเมนต์คานเดินอยู่ตามแนวยาวบริเวณเส้นกึ่งกลาง (Center Line) ของสะพานทั้งด้านบนและด้านล่าง นอกจากนี้ยังมีเอเลเมนต์คานเดินตามแนวขวางด้านบน-ล่างของหน้าตัดแต่ละเกอเดอร์ดังรูป บริเวณผิวด้านบนและล่างของแต่ละเกอเดอร์ของแท่นสะพานถูกจำลองด้วยเอเลเมนต์เชลล์ ส่วนเสาซึ่งจำลองด้วยเอเลเมนต์คานจำนวนหลายเอเลเมนต์ตามจำนวนกล่องของโครงสร้างเสาซึ่ง และแบ่งเอเลเมนต์เพิ่มตรงจุดที่มีการจับยึดของสายเคเบิลสะพาน เคเบิลจำลองด้วยเอเลเมนต์ทรีสส์โดยที่เคเบิลแต่ละเส้นจะจำลองด้วยเอเลเมนต์เดียว



รูปที่ 11 ลักษณะแบบจำลองของแท่นสะพาน(Bridge Deck)

ทั้งหมดมีจำนวน 1511 เอเลเมนต์ และ 740 โหนด ใช้หลักการสมมาตร (Symmetry) สร้างแบบจำลองเพียงครึ่งสะพาน ระยะของความยาวของแบบจำลองที่สร้างนี้เมื่อเปรียบเทียบกับระยะความยาวของสะพานจริงครึ่งสะพานคือ 390.6 เมตร โดยไม่ได้จำลองในส่วนของเชิงลาดสะพานเข้าไปด้วยเนื่องจากจุดที่เราสนใจในการวิเคราะห์ก็คือที่ของช่วงกลางสะพาน ตำแหน่งของจุดรองรับอันเนื่องมาจากแบร์ริง (Bearing) ของตอม่อที่รองรับตัวสะพานบังคับให้มีการเคลื่อนตัวได้เฉพาะในแนวยาวเท่านั้นคือแกน X ทำให้การสร้างจุดยึดในแบบจำลองต้องให้สอดคล้องกับโครงสร้างจริงจึงปล่อยให้เคลื่อนตัวได้เฉพาะในแนวตามยาวของสะพานเท่านั้น บริเวณจุดกึ่งกลางของสะพานเราจะบังคับให้ไม่มีการเคลื่อนตัวได้ในแนวแกน X ส่วนตรงท้ายสะพานซึ่งเป็นบริเวณที่ต่อกับถนนของช่วงเชิงลาดสะพานถูกยึดเอาไว้ไม่ให้มีการเคลื่อนตัวได้ในทุกองศาอิสระ ในระบบของโครงสร้างขนาดใหญ่ อาทิเช่นโครงสร้างของสะพานซึ่งที่เรากำลังพิจารณาอยู่นี้ การหาสมการทางคณิตศาสตร์และการคำนวณผลเป็นเรื่อง

ที่ทำได้ยาก แต่ด้วยเทคโนโลยีของเครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ในปัจจุบันทำให้เราสามารถประหยัดเวลาลงไปได้มาก โดยหลักการทางพลศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น [10] เราสามารถใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{R^{EXT}\} \quad (1)$$

เมื่อ $[M]$ แทนเมทริกซ์มวลของโครงสร้างทั้งหมด
 $[C]$ แทนแดมป์เมทริกซ์
 $[K]$ แทนค่าสทิฟเนสเมทริกซ์
 $\{D\}$ แทนดิสเพลสเมนต์เวกเตอร์

เมื่อโครงสร้างที่พิจารณาเราต้องการหาค่าความถี่ธรรมชาติและไม่คิดผลเนื่องจากแดมป์ของโครงสร้าง แรงกระทำจากภายนอกเป็นศูนย์(เทอมขวามือของสมการที่ 1) มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกจะให้ความสัมพันธ์ว่า

$$\{D\} = \{\bar{D}\} \sin \omega t \text{ และ } \{\ddot{D}\} = -\omega^2 \{\bar{D}\} \sin \omega t \quad (2)$$

แทนสมการดังกล่าวเข้าไปในสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$([K] - \lambda[M])\{\bar{D}\} = \{0\} \quad (3)$$

เมื่อ $\lambda = \omega^2$
 $\{\bar{D}\}$ แทนเวกเตอร์ของโหนดการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกับแต่ละค่าของความถี่ธรรมชาติ
 ω ค่าความถี่ธรรมชาติ
 ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติสามารถหาได้จากสมการ

$$\det([K] - \lambda[M]) = 0 \quad (4)$$

จากนั้นนำค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณออกมาได้แต่ละค่าแทนกลับเข้าไปในสมการที่ (3) เพื่อหารูปาร่างการสั่นสะเทือนได้

หลักการดังกล่าวเป็นการหาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทั่วไปแต่ในความเป็นจริงแล้วการคำนวณค่าเมทริกซ์มวลรวมและสทิฟเนสเมทริกซ์รวมของโครงสร้างขนาดใหญ่และซับซ้อนที่มีชนิดของเอเลเมนต์หลายชนิดประกอบเข้าด้วยกันนั้นสามารถทำได้ยาก ดังนั้นการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้คำนวณหาค่า

ต่าง ๆ เหล่านี้โดยใช้หลักการเชิงตัวเลขจึงเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายกว่า

ส่วนผลของการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งรูปร่างการสั่นสะเทือนของสะพานซึ่งพระรามเก้าได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 12 โดยเราได้แสดงรูปร่างโหมดต่าง ๆ เอาไว้เพียง 10 โหมดแรก แต่ผลในการคำนวณของเราได้คำนวณออกมาทั้งสิ้น 20 โหมดทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติครอบคลุมถึงค่าความถี่ที่ได้มาจากผลการทดลอง เพื่อที่เราจะใช้เปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองได้

จากผลการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองได้สรุปเอาไว้ดังในตารางที่ 2 ในหัวข้อใหญ่ที่ 6 โดยค่าของแบบจำลองที่แสดงนั้นมีอยู่ 20 โหมดแรกและมีการเปรียบเทียบกับผลที่ได้ออกมาจากการทดลองด้วย

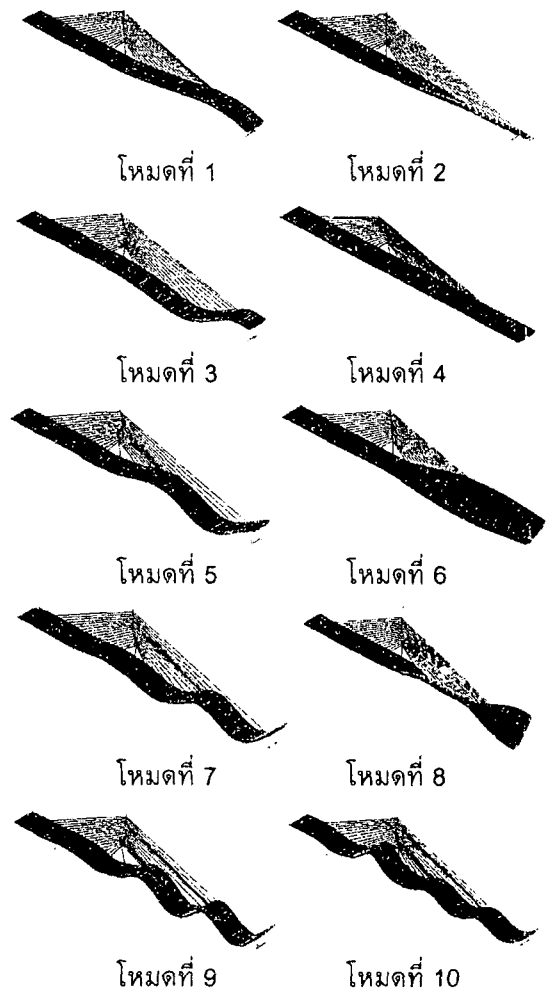
หลังจากที่มีการเปรียบเทียบผลทางคุณสมบัติพลศาสตร์ระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์กับการทดลองแล้ว เราได้มีการจำลองใส่ภาระของรถยนต์และแรงลมที่เป็นลักษณะของแรงสถิตเข้าไปยังแบบจำลองเพื่อต้องการดูพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไรและจะมีระยะการยึดหรือโก่งตัวอย่างไรบ้างเป็นต้น การจำลองใส่ภาระเข้าไบนั้นเราจะใช้รถบรรทุกทุกจำนวน 74 คัน คันละ 37400 กิโลกรัม และรถยนต์ 113 คัน มวลคันละ 2720 กิโลกรัม พร้อมกับแรงลมขนาดความเร็ว 97.72 กิโลเมตร/ชั่วโมง

โดยการใส่ นั้น จะให้บริเวณ เลนด้านนอก 2 เลนของแบบจำลองรับภาระจากรถยนต์บรรทุก ส่วนเลนด้านใน 2 ด้านรับภาระจากรถยนต์ การทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้คือ

1. ภาระการจราจรพุ่งลงตามทิศทาง แกน Y และมีแรงลมหนุนลงตามในทิศทางเดียวกันกระจายทั่วตลอดตัวสะพาน
2. ภาระการจราจรพุ่งลงตามทิศทาง แกน Y และมีแรงลมต้านขึ้นสวนทางในแกนเดียวกันเดียวกันกระจายทั่วตลอดตัวสะพาน
3. ภาระการจราจรพุ่งลงตามทิศทาง แกน Y และมีแรงลมกระทำกับตัวสะพานและเสาข้างในทิศทาง +Z
4. ภาระการจราจรพุ่งลงตามทิศทาง แกน Y และมีแรงลม กระทำกับตัวสะพานและเสาข้างในทิศทาง -Z

ส่วนในรูปที่ 13 ได้แสดงให้เห็นภาพของแบบจำลองที่มีการใส่ภาระต่างกันโดยในภาพเป็นภาระจากการจราจรและ

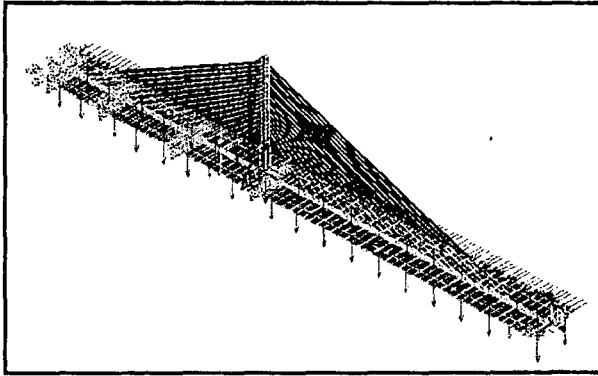
แรงลมกระทำในแกน +Z เมื่อแกน X คือแกนตามความยาวของตัวสะพาน



รูปที่ 12 รูปร่างการสั่นสะเทือน 10 โหมดแรกของแบบจำลอง

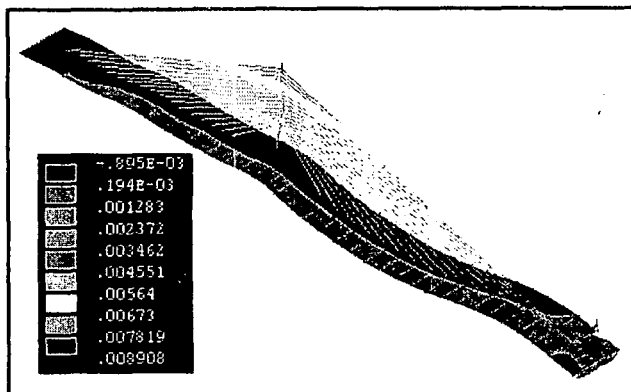
จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าสถิติศาสตร์ของโครงสร้างที่มีภาระต่าง ๆ กันนี้กระทำ โดยการคำนวณได้กระทำด้วยกันทั้งหมด 4 ครั้ง แต่แต่ละครั้งจะทำการคำนวณเป็นแต่ละกรณีไป

ส่วนระยะการดัดหรือการโก่งตัวของการทดลองภาระสถิตได้สรุปเอาไว้ตามตารางที่ 1 พบว่าการที่เราใส่ภาระลมในทิศทางที่เสริมแรงจากรถยนต์จะทำให้โครงสร้างมีการโก่งตัวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ใส่แรงลมต้านแรงกระทำจากรถยนต์ก็ทำให้ระยะโก่งตัวลดลงเช่นกัน ถ้ากรณีที่เปลี่ยนทิศทางของลมมากระทำทางด้านข้างของสะพาน ทั้งตัวสะพานและเสาข้างต่างก็แสดงให้เห็นการโก่งในแนวแกน Z ได้เช่นกัน



รูปที่ 13 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่มีการใส่ภาระต่างๆ

โดยผลจากการหาค่าความถี่ธรรมชาติและระยะขจัดจากแรงสั่นเป็นการทดลองเพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนั่นเอง ในรูปที่ 14 เป็นการแสดงระยะการโก่งตัวตามแกน Z ของแบบจำลองที่มีการกระจายการกระจายอยู่โดยทั่วบริเวณของแท่นสะพานและแรงลมกระทำกับเสาซึ่งและด้านข้างของตัวสะพาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตัดหรือโก่งไม่เฉพาะแต่ตัวสะพานเท่านั้นหากแต่รวมถึงเสาและเคเบิลด้วย



รูปที่ 14 การโก่งตัวตามแกน Z จากการระยยนต์และลมตามรูปที่ 13

ตารางที่ 1 ระยะโก่งตัวของสะพานเนื่องจากการกระจายและลม

ทิศทางโหนดจากการกระจาย	ทิศทางความเร็วลม	ระยะทางสูงสุดในแนวนอน Y (ม.ค)	ระยะทางสูงสุดในแนวนอน Z (ม.ค)
ทิศ - Y	ทิศ - Y	-0.749859	0.00
ทิศ - Y	ทิศ + Y	-0.737191	0.00
ทิศ - Y	ทิศ + Z	-0.74201	0.001283
ทิศ - Y	ทิศ - Z	-0.74201	-0.001292

ส่วนงานต่อไปในอนาคตจะได้มีการนำแบบจำลองใส่ค่าภาระทางพลศาสตร์ที่สอดคล้องกับภาระที่เผชิญอยู่ในปัจจุบันของสะพานซึ่งพระรามเก้า และทดสอบการลดการสั่นสะเทือนหรือการเพิ่มแดมปีงอเลเมนต์ของโครงสร้างว่าควรเป็นเท่าไรที่จะให้ผลการตอบสนองอยู่ในระดับที่น่าพอใจได้ นอกจากนี้การนำแบบจำลองนี้เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นของโครงสร้างก็ยังเป็นสิ่งที่เป็ประโยชน์ต่อการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างได้อีกด้วย

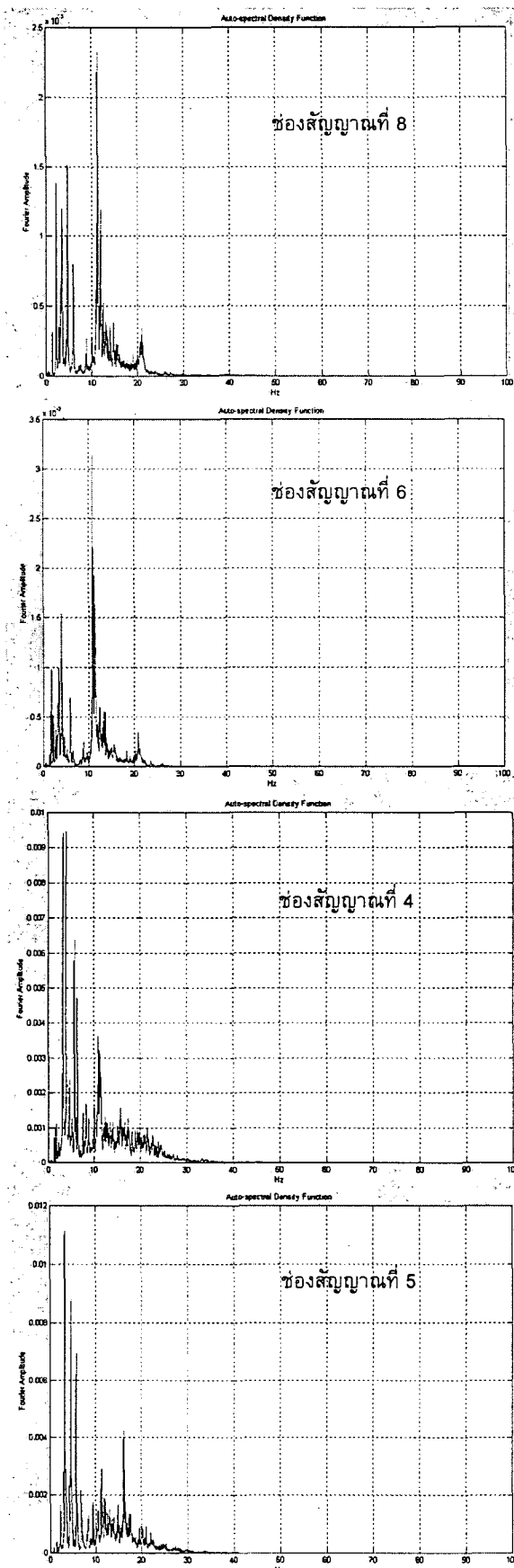
5. ผลการทดลองวัดการสั่นสะเทือนของสะพาน

การสั่นสะเทือนของสะพานที่เกิดขึ้นนี้เป็นชนิดของการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) แรงกระทำหลักๆของการสั่นสะเทือนนี้มาจากรถยนต์ต่างๆที่แล่นผ่านสะพานและยังมีบางส่วนมาจากแรงลมด้วย ในบางประเทศที่มีการเกิดแผ่นดินไหวก็อาจจะมีผลจากแผ่นดินไหวรวมเข้าไปด้วยเช่นเดียวกัน

จากค่าการสั่นสะเทือนบนถนนเวลาที่ได้มาเราสามารถมาคำนวณหาค่าออโตสเปกตรัลเดนซิตี (Autospectral Density) ของแต่ละช่องสัญญาณ [11] ดังได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 15 ที่ตำแหน่งสูงสุดแต่ละจุด(Peak)เป็นการบ่งชี้ถึงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดของการสั่นสะเทือนของสะพานจริง โดยแต่ละจุดก็จะมีขนาดของการสั่นที่แตกต่างกันไป แต่ที่สังเกตได้ก็คือ การสั่นที่โหมดแรกๆจะมีขนาดการสั่นที่ต่ำมากกว่าโหมดหลังๆ ช่วงความถี่ที่พบนั้นไม่เกินระหว่าง 0-40 Hz โดยค่าโหมดแรกอยู่ที่ 0.3153 Hz ที่สำคัญเราจะเห็นความคล้ายคลึงกันของการสั่นระหว่างช่องสัญญาณที่ 8 กับ 6 และ 4 กับ 5 เนื่องจากติดตั้งอยู่ในแนวเดียวกันนั่นเอง

ส่วนค่าสรุปที่ได้ระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลองนั้นได้แสดงเอาไว้ดังตารางที่ 2 ในหัวข้อลำดับถัดไป

สำหรับขั้นตอนการประมวลผลจากข้อมูลดิบที่ได้มีลำดับดังนี้คือ จับค่าการสั่นสะเทือนนี้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในช่วงเวลายาวสองโม่ง ของวันที่ 28 มีนาคม 2543 ช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูลคือ 528 วินาที หรือเท่ากับ 8.8 นาที มีอัตราการแซมปลิงสัญญาณเท่ากับ 200 Hz วัดออกมาเป็นค่าบนแกนเวลา (Time Domain) การทดสอบจะลองจับค่าของ accelerometer ที่วัดการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง คือที่ตำแหน่งช่องสัญญาณที่ 4 5 6 และ 8



รูปที่ 15 แสดงกราฟผลการคำนวณค่าการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งบนแกนความถี่จาก Accelerometer

ค่าที่ accelerometer วัดออกมาได้จะมีหน่วยเป็นโวลท์ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงให้กลายเป็นหน่วยความเร่งคือ g (m/s^2) เสียก่อน ก่อนที่เราจะได้วิเคราะห์ต่อไป จากคุณสมบัติของ Accelerometer ที่ใช้คือ มี Output ที่ $\pm 2g$ และ Output ± 2.5 Vdc ดังนั้นเราเขียนได้จากความสัมพันธ์ของอุปกรณ์การวัดที่ใช้คือ

$$(\text{ขนาดของสัญญาณที่หน่วยเป็นโวลท์}) \cdot 0.8 = g \quad (5)$$

โดยทำการคูณค่าดังกล่าวกับทุกจุดข้อมูลที่ได้มาจากแต่ละช่องสัญญาณ

จากความสัมพันธ์ของการแซมปลิงสัญญาณเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณเราเขียนได้ว่า

$$\text{อัตราแซมปลิงของสัญญาณ(Hz)} F_s = 1/T \quad (6)$$

$$\text{คาบแซมปลิงของสัญญาณ(Sec.) } T \leq 1/2f \quad (7)$$

$$\text{ความถี่ไนควิสต์(Nyquist Frequency)} F_s / 2 \geq f \quad (8)$$

ดังนั้นจากการที่เราเก็บข้อมูลมาได้ทั้งสิ้น 528 วินาที จากสมการที่ 6 เราจะได้อัตราการแซมปลิงเป็น $1/200$ คือ 0.005 วินาที ดังนั้นจะได้จำนวนของชุดข้อมูลที่เก็บมา $528/0.005$ เป็น 105600 ชุดข้อมูลต่อหนึ่งช่องสัญญาณของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) โดยสอดคล้องกับสมการที่ 7 และ 8 จะพบว่าย่านความถี่ตอบสนองสูงสุดที่แกนของความถี่(Frequency Domain)เป็น 100 Hz

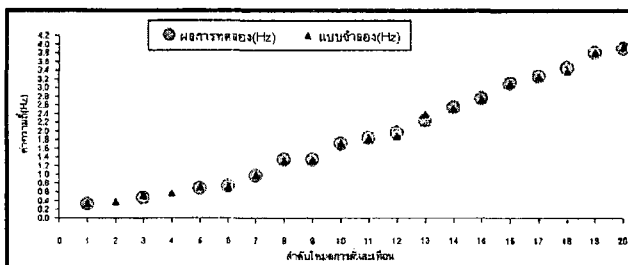
6. การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ได้คำนวณออกมาทั้งสิ้น 20 โหมด ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.33182 ถึง 3.9308 Hz เพื่อเทียบเคียงกับผลของการทดลองที่ได้มา 18 โหมด มีค่าเท่ากับ 0.3158 ถึง 3.9013 Hz อย่างไรก็ตามผลที่พบจากการทดลองมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 40 Hz เราอ่านค่าเพียงที่โหมดแรกๆในช่วง 20 โหมดแรกของแบบจำลองเท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับจำนวนโหมดที่ได้จากแบบจำลอง และจากการอ่านค่าที่พบในแต่ละยอด เราจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานที่พบดังตารางที่ 2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2 แสดงผลจากการทดลองและแบบจำลองสะพาน

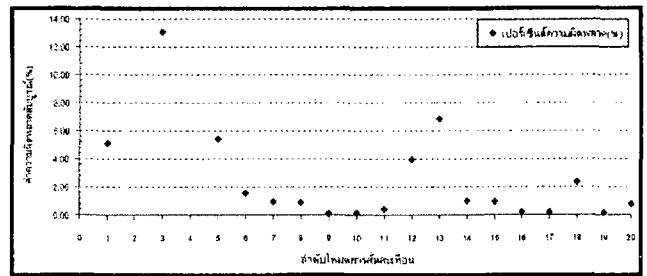
ผลการทดลอง(Hz)	แบบจำลอง(Hz)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด(%)
0.31578	0.33182	5.08115
	0.39057	
0.46695	0.52784	13.03994
	0.58042	
0.68175	0.71855	5.39787
0.73690	0.72565	1.52667
0.97630	0.98545	0.93721
1.33395	1.3219	0.90333
1.34770	1.3466	0.08162
1.71620	1.7137	0.14567
1.83640	1.8436	0.39207
1.96250	1.8852	3.93885
2.24225	2.3955	6.83465
2.53127	2.5061	0.99423
2.75063	2.724	0.96796
3.10003	3.1055	0.17634
3.26293	3.2556	0.22449
3.45405	3.3722	2.36968
3.80413	3.8105	0.16736
3.90130	3.9308	0.75616

จากค่าในตารางที่ 2 เราเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนกันไม่มากนักระหว่างผลทั้งสอง โดยเราจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อนำค่าในตารางดังกล่าวมาพล็อตเพื่อให้เห็นแนวโน้มของผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงความถี่ของผลจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์เทียบกับการทดลอง

เช่นเดียวกันกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ระหว่างข้อมูลทั้งสองเมื่อนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 17 เราจะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากความถี่ธรรมชาติของทั้งสองอย่างมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อผ่านโหมดการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น พร้อมกับมีช่วงการแกว่งตัวลดลงด้วย



รูปที่ 17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ระหว่างแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง

7. สรุป

จากแบบจำลองสามมิติที่ได้สร้างขึ้นมานั้นเราสามารถหาความถี่ธรรมชาติ ที่สอดคล้องกับตำแหน่งการติดตั้งระวางอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ของระบบตรวจสอบ (Monitoring System) ของสะพานพระรามเก้าซึ่งผลปรากฏว่าค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ได้ออกมานั้นมีความใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติที่ได้จากอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน โดยผลจากการทดลองนั้นเป็นค่าความสั่นสะเทือนในแนวตั้งของสะพานแล้วนำมาเทียบเคียงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองในแนวตั้งเช่นกัน

เราได้มีการคำนวณผลของความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองออกมาทั้งสิ้น 20 โหมด โดยในโหมดที่ 2, 6, 8, 14, 17 และ 19 แสดงถึงการบิดตัว (Torsion Mode) (แต่ในรายงานฉบับนี้นำมาแสดงเพียง 10 โหมดแรกเท่านั้น) ของโครงสร้างสะพานส่วนโหมดที่เหลือนั้นจะแสดงถึงการดัดตัว (Bending Mode) และเห็นว่ามียูบ่างโหมดที่มีการเกิดทั้งการดัดของตัวสะพาน เสา และเคเบิลไปพร้อมๆกันค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละโหมด ซึ่งสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งความถี่แต่ละค่าที่ได้นั้นคือค่าที่นําจะทำให้โครงสร้างเกิดพฤติกรรมการสั่นสะเทือนเหมือนเช่นจากแบบจำลอง ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนที่เปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการทดลองและแบบจำลองสะพาน มีค่าต่ำสุดคือ 0.08162% และสูงสุดคือ 13% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นสามารถที่จะนำมาประเมินพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานได้ใกล้เคียงกับค่าการสั่นสะเทือนจริงของโครงสร้างได้ แต่แนวโน้มที่พบ

คือความถี่ที่โหมดการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นมีค่าความผิดพลาดลดลง

หลังจากการทดสอบพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบบจำลองดังกล่าวแล้วเป็นการยืนยันได้ในระดับหนึ่งว่าแบบจำลองสามมิติของเรานั้นมีความแม่นยำเพียงพอ จากนั้นจึงทำการใช้แบบจำลองนี้มาทดสอบใส่ภาระซึ่งประกอบด้วยรถยนต์ 113 คัน มวลคันละ 2720 กิโลกรัม และรถบรรทุก 74 คัน มวลคันละ 37400 กิโลกรัม พร้อมกับมีแรงลมที่ความเร็ว 97.72 km/hr เพื่อดูการตอบสนองของโครงสร้างจากภาระสถิต ทั้งการโก่งหรือดัดในแต่ละแนวแกนดังได้แสดงในตารางข้างล่างนี้ ในทิศที่ภาระจากรถยนต์และลมกระทำในแนวเดียวกันจะเห็นว่ามีความ

ระยะการโก่งในแนวแกน Y มากที่สุดกว่าค่าอื่น โดยที่ไม่มีการใดกระทำในแนวแกน Z ซึ่งก็ไม่ได้ทำให้เกิดระยะโก่งในแกน Z แต่เมื่อทดลองเปลี่ยนทิศแรงลมเป็นทิศ +Y ก็จะทำให้กลายเป็นลดระยะโก่งในแกน Y ให้น้อยลงมาได้ เมื่อทดลองเปลี่ยนทิศทางลมเป็นในแนวแกนบวกหรือลบ Z แบบจำลองนี้ก็แสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดการโก่งในแนวแกน Z ทั้งทิศทางบวกและลบเช่นกัน และทิศทางการโก่งในแนวแกน Y ก็จะเป็นผลอันเนื่องมาจากรถยนต์เท่านั้นซึ่งก็คือ 0.74201 m.

จากผลที่ได้ออกมาข้างนี้ชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมของแบบจำลองทั้งทางพลศาสตร์และสถิตศาสตร์มีค่าต่างๆที่น่าจะเป็นไปได้ แต่ค่าที่ได้ก็ยังคงมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่บ้างซึ่งทั้งนี้ก็อาจจะมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคืออุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนควรต้องมีการปรับเทียบ (Calibration) และอาจมาจากสมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของเราเอง ได้แก่

1. เราสมมุติว่าวัสดุที่ใช้ทำแบบจำลองไม่มีน้ำหนักและเป็นเนื้อเดียวกันตลอด
2. ขนาดของเอเลเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง

ดังนั้นจึงทำให้ผลที่ออกมาข้างนี้มีข้อผิดพลาดอยู่แต่ก็สามารถที่จะยอมรับได้ในการนำไปใช้งานหรือวิจัยต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม(ฟีโบ้) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับความร่วมมือและความสะดวกทางด้านข้อมูลต่างๆในการทำงานวิจัย

ครั้งนี้จากศูนย์ซ่อมบำรุงสาธิตพิเศษ การทางพิเศษแห่งประเทศไทย(The Expressway and Rapid Transit Authority of Thailand) คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] John C. Wilson and Tao Liu, 'Ambient Vibration Measurements on a Cable-Stayed Bridge', Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, 723-747(1991)
- [2] John C. Wilson and Wayne Gravelle, 'Modelling of a Cable-Stayed Bridge for Dynamic Analysis', Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, 707-721(1991)
- [3] Ahmed M. Abdel-Ghaffar and Robert H. Scanlan, Members, ASCE 'Ambient Vibration Studies of Golden Gate Bridge: I. Suspended Structure, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 4, April, 463-482(1985)
- [4] Ahmed M. Abdel-Ghaffar and Robert H. Scanlan, Members, ASCE 'Ambient Vibration Studies of Golden Gate Bridge: II. Pier-Tower Structure, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 4, April, 483-499(1985)
- [5] Benjamin Indrawan, 'Vibration of a Cable-Stayed Bridge Due to Vehicle Moving Over Rough Surface', Master of Engineering Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1989
- [6] C. Gentile and F. Martinez Y Cabrera, 'Dynamic Investigation of a Repaired Cable-Stayed Bridge', Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 41-59(1997)
- [7] Mitsuo Hara, "Manual for Inspection of The RAMA IX Bridge", Kingdom of Thailand, Ministry of Interior, Expressway and Rapid Transit Authority of Thailand, March 1990
- [8] Operating Instructions for K2 Central Recording System, Kinematics, Inc, Pasadena, Calif. 91107, USA, 1995

- [9] Black Box Corporation, LDM-MR 19.2, P.O. BOX 12800, Pittsburgh, PA 15241
- [10] Robert D. Cook, David S. Malkus and Michael E. Plesha, 'Concepts and Applications of Finite Element Analysis', University of Wisconsin – Madison, John Wiley & Sons, United States of America, 3rd edition, 1989
- [11] D.E. Newland, 'Random vibrations, spectral and wavelet analysis', Addison Wesley Longman Limited, Singapore, 3rd edition, 1993