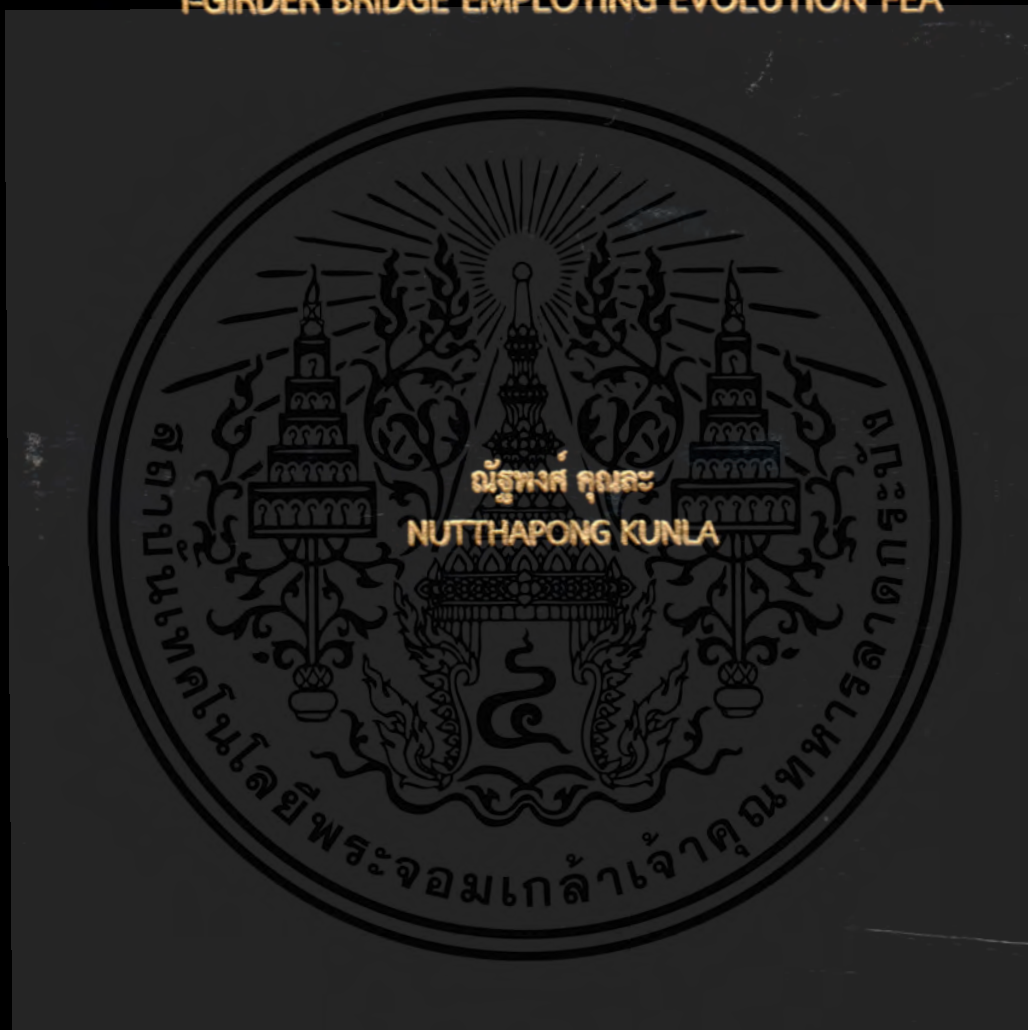


ผลของโครงขวางและค้ำยันที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดของ
คานสะพานเหล็กโค้งไอเกอร์เคอร์ตามแนวนอนโดยใช้โปรแกรม
เอโวลูชันเอฟอีเอ

EFFECT OF CROSS FRAME AND BOTTOM BRACING ON TORSIONAL
NATURAL FREQUENCY OF HORIZONTALLY CURVED STEEL
I-GIRDER BRIDGE EMPLOYING EVOLUTION FEA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559
KMITL-2016-EN-M-030-030

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของโครงขวางและค้ำยันที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดของ
คานสะพานเหล็กโค้งไอเกอร์เดออร์ตามแนวนอนโดยใช้โปรแกรม
เอโวลูชันเอฟอีเอ

EFFECT OF CROSS FRAME AND BOTTOM BRACING ON TORSIONAL
NATURAL FREQUENCY OF HORIZONTALLY CURVED STEEL
I-GIRDER BRIDGE EMPLOYING EVOLUTION FEA



T144135

ณัฐพงศ์ คุณละ
NUTTHAPONG KUNLA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144135
วันเดือนปี 01 11 2559

b. 00266971
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-030-030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF CROSS FRAME AND BOTTOM BRACING ON TORSIONAL
NATURAL FREQUENCY OF HORIZONTALLY CURVED STEEL I-GIRDER
BRIDGE EMPLOYING EVOLUTION FEA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2016
KMUTL-2016-EN-M-030-030



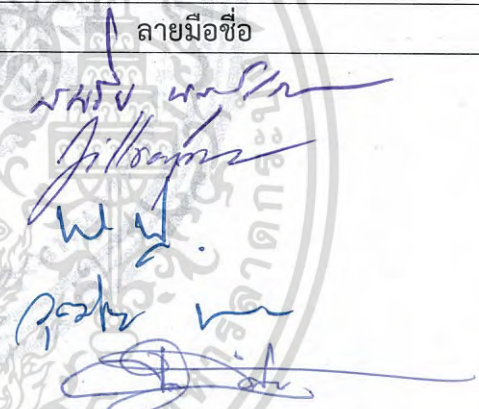
COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของโครงขวางและค้ำยันที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของคานสะพาน
เหล็กโค้งไอเกอร์เดอร์ตามแนวนอนโดยใช้โปรแกรมเอโวลูชันเอฟอีเอ
Thesis Title Effect of Cross Frame and Bottom Bracing on Torsional Natural Frequency of
Horizontally Curved Steel I-Girder Bridge Employing Evolution FEA
นักศึกษา นายณัฐพงศ์ คุณละ
รหัสประจำตัว 57601166
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.บำรุง พ่วงเกิด
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-030-030

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมชัย	นรเศรษฐ์โสภณ	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
รศ.ดร.เพ็ญศิริ	ทองผดุงโรจน์	
ผศ.ดร.วุฒิชัย	ชาติพัฒนานันท์	
ดร.บำรุง	พ่วงเกิด	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา (รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี) ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
คนบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของโครงขวางและค้ำยันที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดของคานสะพานเหล็กโค้งไอเกอร์เตอร์ตามแนวนอนโดยใช้โปรแกรมเอโวลูชันเอพีเอ
นักศึกษา	นายณัฐพงศ์ คุณละ
รหัสประจำตัว	57601166
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.บำรุง พวงเกิด

บทคัดย่อ

เกอร์เตอร์สะพาน (girder bridges) ที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอมีความต้านทานต่อการบิด (torsion) ต่ำ ซึ่งทำให้สะพานเหล่านี้ตกอยู่ในความเสี่ยงเมื่อเกิดการสั่น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของ cross frame และค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เตอร์สะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ โดยศึกษาผลของชนิดของ cross frame สามชนิด ผลการเสริมและผลการเสริมค้ำยันที่ด้านล่างของเกอร์เตอร์ ในการศึกษาค่าเชิงตัวเลข แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D) ของเกอร์เตอร์ถูกสร้างขึ้นโดยการใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า Evolution FEA ซึ่งเป็นโปรแกรมเสรี (free soft) ชนิดที่เปิดเผยรหัส (open-source) ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่ได้แสดงว่า เกร์เตอร์ที่ประกอบด้วยค้ำยันชนิดรูปตัวเอ็กซ์ (x-type cross frame) มีค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดบิดตัวของเกอร์เตอร์สะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ใกล้เคียงกับเกอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยค้ำยันชนิดรูปตัวเค (k-type cross frame) และเกอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยค้ำยันชนิดรูปตัวแซด (z-type cross frame) ผลการเสริมค้ำยันชนิดรูปตัวเอ็กซ์ (x-type cross frame) เทียบกับผลการเสริมค้ำยันที่ด้านล่างที่มีน้ำหนักเท่ากัน พบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดบิดตัวของเกอร์เตอร์สะพานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ที่มีการเสริมค้ำยันชนิดรูปตัวเอ็กซ์ (x-type cross frame) มีค่าสูงกว่า ผลการเสริมค้ำยันที่ด้านล่างค่อนข้างมาก และผลการเสริมค้ำยันที่ด้านล่างของเกอร์เตอร์ ทำให้ความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดบิดตัวของเกอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเกอร์เตอร์ที่มี ที่ไม่มีการเสริมค้ำยันที่ด้านล่างของเกอร์เตอร์ จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถระบุได้ว่า ค้ำยันชนิดรูปตัวเอ็กซ์ (x-type cross frame) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการบิดตัวของเกอร์เตอร์เนื่องจากการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ มากกว่าค้ำยันชนิดรูปตัวเค (k-type cross frame) และค้ำยันชนิดรูปตัวแซด (z-type cross frame) ส่วน ค้ำยันด้านล่างไม่มีผลต่อการช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการบิดตัวของเกอร์เตอร์เนื่องจากการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ดังนั้นค้ำยันชนิดรูปตัวเอ็กซ์ (x-type cross frame) ควรถูกนำไปใช้ในโครงสร้างสะพานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในโครงการอื่นใดได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้องกับกรเกิดแผ่นดินไหว เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างสะพานและป้องกันความเสียหายเนื่องจากการบิดตัวของสะพาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Cross Frame and Bottom Bracing on Torsional Natural Frequency of Horizontally Curved Steel I-Girder Bridges Employing EVOLUTION FEA
Student	Mr.Nutthapong Kunla
Student ID.	57601166
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Dr.Bumroong Puangkird

ABSTRACT

Horizontally curved steel I-girder bridges have low torsional resistant that makes them vulnerable to damage from vibration. This research employed a numerical tool to study the effects on the natural torsional frequency of an I-girder bridge when it was reinforced with a fixed number of cross frames (k-type, z-type, and x-type), an additional number of x-type cross frames, and bottom bracings. The dynamics of a three-dimensional finite element model of the I-girder bridge was simulated with Evolution FEA, a public domain open-source software. The numerical results showed the following: i) that the natural torsional frequencies of the bridge reinforced with the three types of cross frames were nearly equal; ii) that reinforcing the bridge with an additional number of x-type cross frames increased the natural torsional frequency significantly; and iii) reinforcing the bridge with bottom bracings that had the same mass as the x-type cross frames did not increase the natural torsional frequency significantly. Because x-type cross frames not only can make an I-girder bridge more rigid but also give the bridge more resistance to torsional force, it should be used to reinforce a bridge in an area that has frequent seismic activities.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องผลของค้ำยันที่มีต่อความถึธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของคานสะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวโอ ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ดร.บำรุง พ่วงเกิด ที่ได้รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา แนะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับทำวิจัย แนะนำวิธีการเขียนบทคัดย่อ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ และแนะนำงานประชุมสัมมนาทางวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์บทความ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สยาม สงวนรัมย์ ที่กรุณาแนะนำโปรแกรม CorelDraw เพื่อใช้ในการวาดรูปภาพในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ปรารถนา กังสดาลย์ ที่ช่วยเขียนบทความภาษาอังกฤษ จนบทความสามารถลงตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ดร.จิตราภรณ์ วงศาางาม ผศ.ดร.เพ็ญศิริ ทองผดุงโรจน์ และผศ.ดร.วุฒิชัย ขาดิพัฒนานันท์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า เพื่อมาสอบวิทยานิพนธ์

สุดท้ายที่ลืมไม่ได้ ขอขอบคุณน้องทั้งสองคนคือ นายสืบศักดิ์ คุณละ และนางจรรยา วินเซอ และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสายยนต์ คุณละ และคุณแม่วนิดา คุณละ ที่ให้โอกาสและสนับสนุนตลอดเวลา

ณัฐพงศ์ คุณละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	7
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	8
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	19
3.1 การสั้นของระบบต่อเนื่อง.....	19
3.2 วิธีการของเรย์ลี.....	19
3.3 วิธีของเรย์ลี-ริทซ์.....	20
3.4 สมการลากรางจ์.....	21
3.5 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
3.5.1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	23
3.5.2 การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์.....	24
3.5.3 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.5.4 การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกัน	
แล้วแก้ปัญหาระบบสมการใหญ่.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3.5.5 การคำนวณหาค่าความถี่..... 29
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม.....	30
4.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับ Evolution FEA.....	30
4.2 การวิเคราะห์ความแม่นยำตรงของโปรแกรม.....	30
4.2.1 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa.....	31
4.2.1.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA.....	32
4.2.1.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa.....	33
4.2.2 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และ คณะ.....	35
4.2.2.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA.....	36
4.2.2.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ.....	38
4.2.3 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Virginia Transportation Research Center (VTRC).....	40
4.2.3.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA.....	41
4.2.3.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ VTRC.....	43
4.3 สรุปผลการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม.....	43
บทที่ 5 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	45
5.1 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์.....	45
5.2 กระบวนการขึ้นต้น.....	45
5.2.1 การสร้างแบบจำลองของเกอร์เตอร์.....	46
5.2.2 กำหนดสมบัติวัสดุให้กับเกอร์เตอร์.....	48
5.2.3 การกำหนดเงื่อนไขสภาวะขอบ.....	49
5.2.4 การแบ่งเอลิเมนต์.....	50
5.3 กระบวนการวิเคราะห์ (analysis).....	52
5.4 กระบวนการขั้นตอนสุดท้าย (post-processor).....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลการคำนวณด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	53
6.1 ผลของชนิดของ cross frame.....	53
6.2 ผลของการเสริม cross frame (effects of adding cross frame).....	57
6.3 ผลของการเสริมค้ำยันด้านล่าง (effects of adding bottom bracing).....	59
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
7.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	62
7.3 ข้อเสนอแนะและพัฒนางานวิจัย.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก. การติดตั้งโปรแกรม Evolution FEA.....	70
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
4.2 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของคานายึดแน่นปลายด้านหนึ่ง.....	34
4.3 แสดงรายละเอียดรูปร่างของคานโค้ง.....	35
4.4 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ.....	36
4.5 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของคานโค้งที่ถูกยึดแบบ Pinned supported.....	38
4.6 แสดงรายละเอียดของ girder.....	40
4.7 แสดงรายละเอียดของ cross frame.....	40
4.8 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	41
4.9 การเปรียบเทียบความถี่การสั่นสะเทือนของสะพานที่มีคานโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ.....	42
5.1 ขนาดของ cross frame.....	48
5.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุของ.....	49
5.3 สภาวะเงื่อนไขขอบของเกอร์เดอร์.....	49
6.1 ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์ที่ไม่มี bottom bracing.....	56
6.2 ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์ที่มีการเสริม cross frame.....	58
6.3 ความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์ที่มีการเสริม bottom bracing.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การผลิต girder ในโรงงาน Missouri Plant.....	2
1.2 การเคลื่อนย้าย girder จากโรงงานผลิต.....	2
1.3 การติดตั้งโครงสร้าง girder สะพานข้ามแม่น้ำ.....	3
1.4 การติดตั้งโครงสร้างสะพาน.....	3
1.5 การก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำ.....	4
1.6 สะพานข้ามแม่น้ำ Ford City Bridge.....	4
1.7 สะพานข้ามแยก White Bridge/Robertson Road Interchange.....	5
2.1 เครื่อง monochord สำหรับทดลองการสั่นของเส้นเชือก.....	8
2.2 เครื่องวัดแผ่นดินไหวเครื่องแรกของโลกสร้างโดย Zhang Heng.....	9
2.3 cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type).....	16
2.4 cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type).....	19
3.1 การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	24
3.2 เอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์.....	24
3.3 เอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ.....	24
3.4 เอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ.....	25
3.5 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม.....	25
3.6 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม.....	25
3.7 เอลิเมนต์สามมิติรูปสี่เหลี่ยมปริซึม.....	26
3.8 เอลิเมนต์สามมิติรูปทรงแปดเหลี่ยม.....	26
3.9 เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทรงกระบอก วิเคราะห์ปัญหาแผ่นโค้ง วิเคราะห์ปัญหาทรงแปดเหลี่ยม.....	27
4.1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับคานยื่นแผ่นบาง.....	31
4.2 Mode 1 (105.00 Hz).....	32
4.3 Mode 2 (295.11 Hz).....	32
4.5 Mode 4 (959.17 Hz).....	32
4.6 Mode 5 (1432.50 Hz).....	33
4.7 Mode 6 (2002.60 Hz).....	33
4.8 Mode 7 (2661.80 Hz).....	33
4.9 Mode 8 (3416.90 Hz).....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 เปรียบเทียบผลการศึกษากับการศึกษาของ Nitipong.....	34
4.11 รายละเอียดรูปร่างของคานโค้ง.....	35
4.12 คาน θ เท่ากับ 10 องศา.....	37
4.13 คาน θ เท่ากับ 10 องศา (204.51 Hz).....	37
4.14 คาน θ เท่ากับ 20 องศา.....	37
4.15 คาน θ เท่ากับ 20 องศา (184.47 Hz).....	37
4.16 คาน θ เท่ากับ 30 องศา.....	37
4.17 คาน θ เท่ากับ 30 องศา (158.83 Hz).....	37
4.18 คาน θ เท่ากับ 90 องศา.....	38
4.19 คาน θ เท่ากับ 90 องศา (63.20 Hz).....	38
4.20 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคานโค้ง.....	39
4.21 แสดงรายละเอียดโครงของ curved I girder.....	40
4.22 แสดงรูปร่างของสะพานก่อนเกิดการสั่น.....	42
4.23 แสดงการรูปร่างของสะพานที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นครั้งแรก.....	42
4.24 แสดงการซ้อนทับกันของรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23.....	43
5.1 ขนาดหน้าตัด cross frame.....	46
5.2 ลักษณะการวางตัวของเกอ์เตอร์.....	46
5.3 cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type).....	47
5.4 cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type).....	47
5.5 cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type).....	48
5.6 ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing)	48
5.7 สภาวะเงื่อนไขขอบ.....	49
5.8 รายละเอียดของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง.....	51
6.1 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ จำนวน 11 คู่.....	53
6.2 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเค จำนวน 11 คู่.....	54
6.3 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวแซด จำนวน 11 คู่.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4 โหมตที่ 1 ของการสันด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type).....	55
6.5 โหมตที่ 1 ของการสันด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type).....	55
6.6 โหมตที่ 1 ของการสันด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type).....	56
6.7 Plane view ของเกอร์เตอร์ที่มีการเสริม x-type cross frame.....	58
6.8 โหมตที่ 1 ของการสันด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่เสริม cross frame.....	58
6.9 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย x-type cross frame และค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing).....	59
6.10 การสันที่ทำให้เกิดการบิดตัวอันดับที่ 1 ของเกอร์เตอร์ที่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง.....	60
7.1 แสดงลักษณะค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Robiul Awall.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

c_n	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันรูปร่าง
E	modulus of elasticity, GPa
G	shear modulus of elasticity, GPa
I_x	moment of inertia about x - axis, m^4
I_y	moment of inertia about y - axis, m^4
I	moment of inertia about the centroid z - axis, m^6
$[K]$	เมทริกซ์การยึดหยุ่น (global stiffness matrix)
$[K]^T$	ทรานสโพสของเมทริกซ์การยึดหยุ่น (transpose of global stiffness matrix)
$[K]_e$	เมทริกซ์การยึดหยุ่นของเอลิเมนต์ (element stiffness matrix)
K_T	st. Venant constant, m^4
L	Lagrangian
m	มวล, kg
$[M]$	เมทริกซ์มวล (global mass matrix)
$[M]^T$	ทรานสโพสของเมทริกซ์มวล (transpose of global mass matrix)
$[M]_e$	เมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์ (element mass matrix)
$q_i(t)$	the i th generalized coordinates
T	พลังงานจลน์, J
T_{\max}	พลังงานจลน์สูงสุด, J
$T(q_i)$	พลังงานจลน์ในรูปฟังก์ชันความเร็วในระบบพิกัดทั่วไป, J
t	เวลา, s
\bar{X}	เวกเตอร์ของขนาดหรือรูปร่าง (mode shape), m
\bar{x}	เวกเตอร์การกระจัด, m
$\ddot{\bar{x}}$	เวกเตอร์ความเร่ง, m/s^2
\bar{x}_e	เวกเตอร์การกระจัดของเอลิเมนต์, m
$\ddot{\bar{x}}_e$	เวกเตอร์ความเร่งของเอลิเมนต์, m
u	การกระจัดในแนวแกน x , m
v	การกระจัดในแนวแกน y , m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

w	การกระจัดในแนวแกน z , m
$w_n(x)$	ฟังก์ชันการรูปร่างการสั่น
V	พลังงานศักย์, J
V_{\max}	พลังงานศักย์สูงสุด, J
$V(q_i)$	พลังงานศักย์ในรูปฟังก์ชันระบบพิกัดทั่วไป, J
ω	ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency), Hz
ω_n	ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ n natural frequency corresponding to the n th mode shape, Hz
ω_1	ความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน (fundamental frequency, First natural frequency), Hz
$\frac{d}{dt}(\)$	always refers to a time derivative of ()
δT	variational kinetic energy
δU	variational strain energy
$\delta \mathcal{V}$	variational potential energy loss due to applied loads
สัญลักษณ์กรีก	
ϕ	มุมเฟส, radian
ρ	Material density, kg/m ³
θ_1	การหมุนรอบแกน x , radian
θ_2	การหมุนรอบแกน y , radian
θ_3	การหมุนรอบแกน z , radian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการจราจรติดขัดเป็นปัญหาสำคัญในเมืองใหญ่ที่มีประชากรหนาแน่น ซึ่งปัญหาการจราจรติดขัดมีสาเหตุอันเนื่องมาจากการขาดระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ประชาชนมีการใช้รถส่วนตัวกันมาก ทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณความจุของถนนที่สามารถรองรับการจราจรได้

ตามบริเวณทางแยกต่างๆ เป็นจุดหนึ่งที่เกิดปัญหาการจราจรติดขัดอย่างมาก เนื่องจากว่ารถยนต์จากถนนสายต่างๆ ต้องมาบรรจบกันที่แยกซึ่งทำให้มีปริมาณรถหนาแน่น ส่งผลให้ปริมาณความจุของถนนที่สามารถรองรับการจราจรลดลงนำไปสู่การจราจรที่ติดขัด รวมทั้งการใช้อุปกรณ์ควบคุมการจราจร เช่น ป้ายจราจร เครื่องหมายจราจรและสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสม ชับซ้อนหรือไม่ชัดเจน ซึ่งล้วนนำไปสู่การจราจรที่ติดขัด

เพื่อแก้ไขปัญหการจราจรตามแยกต่างๆ ในเมืองใหญ่ที่มีจำนวนรถยนต์หนาแน่น จึงได้มีการสร้างสะพานข้ามแยกเพื่อลดปัญหาการจราจร สะพานที่นิยมสร้างตามแยกต่างเพื่อลดปัญหาการจราจรตามเมืองใหญ่คือสะพานชนิด beam bridges หรือเรียกอีกอย่างว่า girder bridge ซึ่งเป็นสะพานชนิดพื้นฐานที่สุดในบรรดาสะพานที่มีทั้งหมด สะพานชนิด girder bridge สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชนิด คือ box girder bridge, T-girder bridge และ I-girder bridge ซึ่งสะพานทั้งสามชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยข้อดี box girder bridge คือมีความต้านทานต่อการบิดตัวค่อนข้างสูง ข้อเสียคือ มีต้นทุนในการก่อสร้างสูงและยากต่อการซ่อมบำรุง ส่วนสะพานชนิด T-girder bridge เมื่อเทียบกับสะพานชนิด I-girder bridge จะมีต้นทุนในการก่อสร้างสูงกว่า และ T-girder bridge มีข้อเสียที่สำคัญเกี่ยวกับแรงดึงเนื่องจากว่าด้านล่างของ T-girder bridge ไม่มี flange [1]

ในประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น สะพานชนิด I-girder bridge เป็นที่นิยมสร้างกันในช่วงระยะเวลา 25 ปีที่ผ่านมา เพื่อเป็นสะพานข้ามแม่น้ำและเป็นสะพานข้ามแยกต่างๆ ในเมืองที่มีการจราจรหนาแน่นเพื่อลดปัญหาการจราจรซึ่งได้มีการระบุไว้ในงานวิจัยของ Linzell, D. และคณะ [2] งานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] และงานวิจัยของ Kang Y.J. และ Yoo C.H [4] สะพานชนิด I-girder bridge แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ concrete I-girder bridge และ steel I-girder bridge เมื่อเปรียบเทียบข้อดีของสะพานทั้งสองชนิดจะพบว่า steel I-girder bridge จะทำให้ลดต้นทุนและลดเวลาในการก่อสร้างได้มากกว่าชนิด concrete I-girder bridge เนื่องจากว่าสะพาน steel I-girder bridge สามารถทำการตัดเหล็กและเชื่อมเหล็กเป็นโครงสร้างของคานที่โรงงานก่อน

นำเข้าไปประกอบติดตั้งในสถานที่ก่อสร้างสะพานทำให้ลดเวลาและลดต้นทุนในการก่อสร้างลง รูปที่ 1.1 แสดงรูปถ่ายของสะพาน I-girder bridge ที่สร้างขึ้นใหม่ ซึ่งเห็นได้ว่ารูปทรงของคานที่โรงงานก่อน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1-1.5 แสดงการผลิต steel I-girder การขนส่ง และการติดตั้ง steel I-girder ในสถานที่ก่อสร้าง สะพาน ส่วนสะพาน concrete I-girder bride ต้องเสียเวลาในทำแบบสำหรับหล่อคาน ทำการหล่อคานและต้องทำการบ่มปูนอย่างน้อยเป็นเวลา 7 วัน โครงสร้างของคานสะพานชนิดนี้มีน้ำหนักมากกว่าสะพาน steel I-girder bridge ทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้าย



รูปที่ 1.1 การผลิต girder ในโรงงาน Missouri Plant [5]



รูปที่ 1.2 การเคลื่อนย้าย girder จากโรงงานผลิต [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 การติดตั้งโครงสร้าง girder สะพานข้ามแม่น้ำ [7]



รูปที่ 1.4 การติดตั้งโครงสร้างสะพาน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 การก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำ [9]

สำหรับสะพานชนิด steel I-girder bridge สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ horizontally straight steel I-girder bridge และ horizontally curved steel I-girder bridge โดยสะพานทั้งสองชนิดได้ถูกนำมาใช้งานในลักษณะที่ต่างกัน แต่สะพานทั้งสองชนิดมีข้อเสียที่เหมือนกันคือ ความต้านทานต่อการบิดตัวที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่าหน้าตัดของ steel I-girder เป็นชนิดแผ่นบาง

สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge ได้ถูกนำมาใช้เป็นสะพานข้ามแม่น้ำ และใช้เป็นสะพานข้ามแยก เพื่อต่อถนนที่มีความโค้งเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.6 สะพานข้ามแม่น้ำ Ford City Bridge [10]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 สะพานข้ามแยก White Bridge/Robertson Road Interchange [11]

สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge มีความความต้านทานต่อการบิดตัวต่ำกว่าสะพานชนิด horizontally straight steel I-girder bridge และความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของสะพานที่ชนิดที่มีโครงสร้างเกอร์เตอร์เป็นเหล็กตรงหน้าตัดรูปตัวไอมีค่าสูงกว่าสะพานที่ชนิดที่มีโครงสร้างเกอร์เตอร์เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ เนื่องจากผลของส่วนโค้งของสะพานส่งผลให้สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge มีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากกว่าสะพานชนิด horizontally straight steel I-girder bridge [3], [12] ในการออกแบบสะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge นักออกแบบจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับข้อมูลทุกข้อมูลที่มีผลต่อการต่อความเสียหายของสะพาน ตามที่มีการระบุไว้ในงานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] งานวิจัยของ Kang Y.J. และ Yoo C.H [4] งานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] งานวิจัยของ Bo Yeon Kim และคณะ [13] และงานวิจัยของ Cahn Tuan Nguyen และคณะ [14]

การสั่นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างของสะพาน การสั่นของโครงสร้างสะพานอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์ แรงลม เป็นต้น เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับค่าธรรมชาติทำให้เกิดการสั่นพ้อง ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงจนเกิดความเสียหายกับโครงสร้างของสะพาน ดังที่เกิดกับสะพาน Tacoma Narrows ในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1940 เนื่องจากการสั่นตามขวางที่เกิดจากแรงลม ความถี่ธรรมชาติของการสั่นจึงเป็นข้อมูลสำคัญ ข้อมูลหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบสะพาน

สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge เป็นสะพานที่มีความต้านทานต่อการบิดตัวค่อนข้างต่ำ girder ของสะพานแต่ละ girder ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วย cross frame และ/หรือ ค้ำยัน (bracing) cross frame และค้ำยัน (bracing) เป็นโครงสร้างที่มีความจำเป็นอันดับแรก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สองของสะพานต่อจากคานสะพาน ซึ่งทำหน้าที่กระจายแรงที่กระทำกับคานสะพาน และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างสะพาน

เมื่อโครงสร้างสะพานมีการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวจะส่งผลให้เกิดการเสียหายได้ และในรายงานทางวิชาการของ Jun Yi Meng และ Eric M. Lui [15] ระบุว่าผลของการบิดตัวของสะพานควรถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบสะพานที่เกี่ยวกับแผ่นดินไหว เพื่อเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างสะพานที่มีความต้านทานต่อการบิดตัวค่อนข้างต่ำ นักออกแบบสะพานจึงได้ใช้ cross frame และค้ำยัน เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการบิดให้กับโครงสร้างสะพานที่มีคานสะพานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ

cross frame และค้ำยันที่นิยมใช้กันมีเพียงไม่กี่ชนิด ซึ่งได้แก่ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) ส่วน cross frame ชนิดตัวแซด (z-type) เป็น cross frame ชนิดใหม่ที่เริ่มมีการวิจัยในมหาวิทยาลัยเท็กซัส (University of Texas) ซึ่งแต่ละชนิดมีความสามารถในการถ่ายเทแรงที่มากกระทำในแต่ละกรณีไม่เท่ากัน เช่นในกรณีของ cross frame ชนิดตัวเอกซ์ (x-type) เป็น cross frame ที่ออกแบบมาเพื่อรับแรงดึงและแรงกดส่วน cross frame ชนิดตัว แซด (z-type) ถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงดึงอย่างเดียวโดยตามที่ระบุไว้ในงานวิจัย Weihua Wang [16] นอกจากนี้ทิศทางและตำแหน่งการวางของ cross frame ยังมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของเกอร์เดอร์สะพานด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาชนิด cross frame และค้ำยัน ด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิด (torsion) ของ horizontal curved steel I-girder โดยที่ไม่มีแรงภายนอกมากกระทำ (external load) ซึ่งชนิดของ cross frame ที่นำมาศึกษาได้แก่ cross frame ชนิดตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดตัวแซด (z-type) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบสะพานในการเลือกชนิดของ cross frame และค้ำยัน ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษารสั่นของโครงสร้างสะพานโดยวิธีการทดลองกับโครงสร้างจริงเป็นสิ่งที่ทำได้ยากและไม่สามารถศึกษาได้ทุกโหมดของการสั่น ส่วนการวิเคราะห์วิธีแบบทั่วไปให้ความกระจ่างเกี่ยวกับพฤติกรรมการสั่นของโครงสร้างไม่มากนัก การศึกษาครั้งนี้จึงใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ละเอียดและชัดเจนกว่า วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดของ cross frame ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของคานสะพานโค้งที่เป็นเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเสริม cross frame ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของคานสะพานโค้งที่เป็นเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการเสริมค้ำยันที่ด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีต่อความถี่ธรรมชาติ สำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของคานสะพานโค้งที่เป็นเหล็กหน้าตัดรูปตัวโอ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัย [12], [17] และ [18]

1.3.2 ทำการวิเคราะห์ผลของชนิด cross frame ชนิดตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดตัวแซด (z-type) ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพานที่คานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวโอ (curved steel I-girder bridge)

1.3.2 ทำการวิเคราะห์ผลของการเสริม cross frame กับค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพานที่คานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวโอ (curved steel I-girder bridge)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาโครงสร้างสะพาน และส่วนประกอบ

1.4.2 ทดสอบความแม่นยำของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.3 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานสะพาน cross frame และค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ให้สอดคล้องกับลักษณะที่เป็นจริงทางกายภาพ

1.4.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองโดยประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.5 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.5.1 ทราบชนิดของ cross frame ที่ช่วยเพิ่มการต้านทานการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของ horizontal curved steel I-girder ที่มีประสิทธิภาพที่สุด

1.5.2 ผลที่ได้จากการศึกษาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง ออกแบบโครงสร้างสะพานที่เป็นเหล็กให้มีความแข็งแรงและลดต้นทุนในการก่อสร้าง

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า การสั่นสะเทือนของวัตถุได้เกิดขึ้นก่อนมีมนุษย์เกิดขึ้นบนโลก และการสั่นที่มนุษย์ให้ความสนใจเป็นอย่างแรกคืออุปกรณ์ทางดนตรี โดยที่เครื่องดนตรีที่เกิดจากการสั่นของวัตถุชิ้นแรกคือกอลอง หลังจากนั้นมานุษยาก็พยายามศึกษาเรื่องการสั่นและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นของวัตถุต่างๆ เรื่อยมาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นตามหลักฐานที่มีการบันทึกไว้ บุคคลแรกที่ศึกษาเกี่ยวกับการสั่นคือนักปรัชญาและนักคณิตศาสตร์ชาวกรีก ไพธากอรัส (Pythagoras) มีชีวิตอยู่ในช่วงปี 582-507 ก่อนคริสตกาล โดยทำการศึกษาการสั่นของเส้นเชือก โดยได้ทำการสร้างเครื่องมือทดลองการสั่นของเส้นเชือกที่เรียกว่า monochord ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยเชือกที่มีจุดรองรับสามจุด และที่รองรับตรงกลางสามารถเลื่อนตำแหน่งได้ ปลายเชือกด้านหนึ่งจะยึดติดกับโครงสร้างและที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะแขวนด้วยน้ำหนักเพื่อให้เส้นเชือกตึง และทำการทดลองโดยทำการปรับตำแหน่งจุดรองรับตรงกลางไปเรื่อย



รูปที่ 2.1 เครื่อง monochord สำหรับทดลองการสั่นของเส้นเชือก

จากการทดลอง ไพธากอรัส สรุปว่าเส้นเชือกที่มีความตึงเท่ากัน เส้นที่สั้นกว่าเมื่อเกิดการสั่นให้เสียงที่สูงกว่า และถ้าเส้นเชือกที่สั้นมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นเชือกที่ยาว เส้นเชือกสั้นจะให้เสียงที่มีความถี่เป็นสองเท่าของเชือกเส้นที่ยาว (Octave) และหลังจากนั้น ไพธากอรัส เริ่มให้ความสนใจในเรื่องของระดับเสียง (Pitch) และความถี่ (Frequency) แต่ไม่สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของระดับเสียง (Pitch) และความถี่ได้ ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นของวัตถุได้หยุดไป

จนกระทั่ง ในช่วงประมาณ 350 ปีก่อนคริสตกาล อริสโตเติล (Aristotle) ซึ่งได้ชื่อว่าเป็นปูของวิทยาศาสตร์ ได้นำลูกตุ้ม (pendulum) ที่ถูกคิดค้นโดย Daedalus ในยุคกลางสองล้านปีก่อนคริสตกาล มาเป็นอุปกรณ์สำหรับจับเวลา และกลายมาเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ กาลิเลโอ (Galileo Galilei) นำมาศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของการสั่นในภายหลังต่อมา นอกจากนี้ อริสโตเติล (Aristotle) ยังได้เขียนบทความที่เกี่ยวข้องกับเสียงและเครื่องดนตรี โดยมีข้อความตอนหนึ่งว่า “the voice is sweeter than the sound of instrument” และ “the sound of the flute is sweeter than of the lyre.” ซึ่งข้อความเหล่านี้ได้บอกให้ทราบว่า ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของความถี่ (frequency) และการสั่น ซึ่งในยุคดังกล่าวยังไม่มีนิยามคำว่า frequency ต่อมาในประมาณปี 320 ก่อนคริสตกาล Arisoxenus ซึ่งเป็นลูกศิษย์ของ อริสโตเติล ได้เขียนหนังสือสามเล่มในชื่อ Elements of Harmony ซึ่งหนังสือทั้งสามเล่มนี้อาจถือว่าเป็นหนังสือทางด้านดนตรีที่เก่าแก่ที่สุดในโลกที่เขียนขึ้นเองจากผู้รู้โดยตรง บทความของอริสโตเติลและหนังสือของ Arisoxenus เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องเสียง (acoustics) ก่อนที่ Joseph Sauveur ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของเสียงอย่างจริงจังในศตวรรษที่ 16

ประมาณปี 300 ก่อนคริสตกาล ยูคลิด (Euclid) ได้เขียนเรื่องที่เกี่ยวข้องกับหลักธรรมชาติของเสียง ชื่อ Introduction to Harmonics หลังจากนั้นอารยธรรมของกรีกก็เข้าสู่ยุคเสื่อมถอย จึงไม่มีหลักฐานใดๆ ที่ปรากฏว่าชาวกรีกได้พยายามศึกษาเรื่องของการสั่นอีกเลย

ในด้านของโลกตะวันออกมีจีนเป็นแหล่งกำเนิดอารยธรรมในภูมิภาคนี้ได้มีการค้นพบหลักฐานว่ามีผู้ให้ความสนใจในเรื่องของการสั่นด้วยเช่นกัน และได้มีการสร้างเครื่องวัดการสั่นของแผ่นดินไหวขึ้นเป็นครั้งแรกของโลกในประมาณปี ค.ศ. 132 โดยนักประดิษฐ์ที่สร้างเครื่องนี้ขึ้นคือ Zhang Heng ซึ่งมีอุปกรณ์รูปคล้ายไหทำด้วยทองสัมฤทธิ์หล่ออย่างดี ภายในมีลูกตุ้มที่แกว่งได้เป็นกลไกสำคัญ โดยลูกตุ้มนี้จะมีชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับปากมังกรแปดหัวรอบๆ ไห และที่ปากมังกรแต่ละตัวจะคาบแก้วที่ทำจากสัมฤทธิ์ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ **รูปที่ 2.2** เครื่องวัดแผ่นดินไหวเครื่องแรกของโลกสร้างโดย Zhang Heng [17]

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวก็จะทำให้ลูกตุ้มที่อยู่ภายในนี้เกิดการแกว่งไปมาในทิศทางที่การเกิดแผ่นดินไหว และเมื่อเกิดการแกว่งของลูกตุ้มไปในทิศทางใดกลไกที่อยู่ภายในก็จะไปเปิดปากมังกรตัวที่อยู่ในทิศทางนั้น ทำให้แก้วที่มังกรคาบไว้ตกลงสู่ปากของกบที่นำมาวางไว้รอบๆ ทำให้เกิดมีเสียงขึ้น อุปกรณ์นี้จึงทำให้ผู้ที่คอยเฝ้าสังเกตอยู่ทราบว่าจะเกิดแผ่นดินไหวขึ้นในทิศทางใดและเกิดขึ้นเมื่อเวลาใด หลังจากนั้นก็ไม่พบหลักฐานการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นจนกระทั่งถึงคริสต์ศตวรรษที่ 16

ในคริสต์ศตวรรษที่ 16 ซึ่งถือว่าเป็นศตวรรษแห่งอัจฉริยะ (Century of Genius) นักวิทยาศาสตร์ที่สำคัญในยุคนั้น คือ กาลิเลโอ (Galileo Galilei) (ค.ศ. 1564-1642) ผู้ซึ่งถือว่าเป็นบุคคลที่วางรากฐานของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพราะรากฐานของวิทยาการ หลักปรัชญาและหลักวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ได้มีรากฐานมาจากยุคนั้นเป็นส่วนใหญ่ มีเรื่องเล่าว่าวันหนึ่งในระหว่างที่นั่งฟังการเทศน์ที่โบสถ์ที่เมืองพิซา กาลิเลโอ (Galileo Galilei) ได้เผลอบนเข่าไปมองไปที่เพดานโบสถ์ และเกิดสะดุดใจกับการแกว่งไปมาของโคมไฟแขวนอยู่บนเพดาน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ กาลิเลโอ ทำการทดลองวัดการแกว่งตัวของลูกตุ้มเพื่อหาคาบของการแกว่งโดยใช้ชีพจรเป็นอุปกรณ์จับเวลา และผลที่ได้คือคาบของการแกว่งของลูกตุ้มนั้นไม่ขึ้นกับช่วงกว้างของการแกว่งของลูกตุ้ม ด้วยเหตุนี้ทำให้ กาลิเลโอ เริ่มทำการทดสอบหารายละเอียดของการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายในเวลาต่อมา กาลิเลโอ (Galileo Galilei) ได้ตีพิมพ์หนังสือ ชื่อ Discourses Concerning Two New Science ในปี ค.ศ. 1638 ซึ่งหนังสือเล่มนี้ได้ปูพื้นฐานที่เกี่ยวกับการสั่นของเส้นเชือก ในหนังสือได้กล่าวถึงการสั่นของวัตถุรวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นเชือกและความถี่ของการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย การสั่นพ้อง (Resonance หรือในบางครั้งจะเรียก Sympathetic Vibrations) และในช่วงเดียวกันนี้นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Marin Mersenne (ค.ศ. 1588-1648) ได้ตีพิมพ์ผลงานเกี่ยวกับการทดลองวัดความถี่ของการสั่นของเชือกไว้ในหนังสือชื่อ Harmonicorum

ผลงานทางด้านวิทยาศาสตร์ของกาลิเลโอ (Galileo Galilei) มีความน่าสนใจและเป็นที่ยอมรับของบุคคลทั่วไปจนกระทั่งเป็นเหตุให้มีการเกิดสถาบันทางวิทยาศาสตร์ขึ้นมาโดยเริ่มจาก Academia del Cimento ซึ่งก่อตั้งขึ้นในเมืองฟลอเรนซ์ประเทศอิตาลีในปี ค.ศ. 1657 และได้มีสถาบันอื่นๆ เกิดขึ้นตามมาทั้งในประเทศอังกฤษ และฝรั่งเศส จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่เป็นเหตุจูงใจให้มีบุคคลเข้ามาร่วมทำงานในด้านวิทยาศาสตร์มากขึ้นและถือว่าเป็นยุคเริ่มต้นของงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ โดยบุคคลสำคัญที่ทำงานที่เกี่ยวข้องกับการสั่นในช่วงเวลานี้ได้แก่ Robert Hook (ค.ศ. 1653-1730) ในเรื่องของสั่นของสปริง และบุคคลสำคัญอีกท่านหนึ่งคือ Joseph Sauveur (ค.ศ. 1653-1716) เป็นผู้ที่ทำการศึกษาเรื่องความถี่ของการสั่นในเส้นเชือกอย่างละเอียด และได้นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องไว้หลายคำเช่น การศึกษาในเรื่องของเสียงใช้คำว่า acoustics การนิยามคำว่า node และ loop ของการสั่นในเส้นเชือก การนิยามความถี่ของการสั่นต่ำที่สุดว่า ความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency) และความถี่ที่สูงขึ้นว่า ความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Frequency) และ Joseph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sauveur พบว่าเส้นเชือกสามารถสั้นอยู่ในความถี่ที่เป็นผลรวมของความถี่ฮาร์โมนิกส์มากกว่าสองความถี่ได้

ในศตวรรษของอัจฉริยะนี้ยังมีอัจฉริยะอีกท่านหนึ่งที่ได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งกลศาสตร์ ท่านคือ Sir Isaac Newton (ค.ศ. 1642–1727) ซึ่งได้เผยแพร่ผลงานชั้นยอดของเขาในปี ค.ศ. 1686 คือ *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ซึ่งได้กล่าวถึงกฎทั่วไปของแรงโน้มถ่วงและกฎการเคลื่อนที่สามข้อ ซึ่งถือเป็นหัวใจของวิชากลศาสตร์ในปัจจุบัน กฎข้อสองของนิวตันได้ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเป็นสมการตั้งต้นในการคำนวณหาค่าความถี่ของการสั่น และ นิวตัน ได้สร้างกฎเพื่อพัฒนา differential calculus สำหรับแก้ไขปัญหากลศาสตร์และฟิสิกส์ ทำให้นักคณิตศาสตร์และนักวิทยาศาสตร์ในยุคนั้นและยุคต่อมาสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ ในยุคนั้นมีนักวิทยาศาสตร์ที่สำคัญอยู่สองท่านคือ เลออนฮาร์ด ออยเลอร์ (Leonhard Euler, 1707-1783) ได้วางรากฐานแคลคูลัสของการแปรผัน (calculus of variations) ที่ใช้ในการแก้ไขปัญหากลศาสตร์และฟิสิกส์ และสร้างทฤษฎีเกี่ยวกับคาน และนักคณิตศาสตร์อีกท่านคือ Brook Taylor (1685-1731) สามารถหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ของเส้นเชือกได้ โดยได้ผลเฉลยออกมาในรูปอนุกรมอนันต์เทย์เลอร์ (Taylor's Series) อันมีชื่อเสียง

จากจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์การสั่นของเส้นเชือกเข้าสู่การสั่นของวัตถุในสองมิติเช่น คาน และแผ่นระนาบบาง เป็นต้น ในศตวรรษที่ 17 สมการการเคลื่อนที่การสั่นตามขวางของคานได้ถูกสร้างขึ้นโดย Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1735 ซึ่งคำตอบของสมการของ Bernoulli หาได้โดย ออยเลอร์ ในปี ค.ศ. 1744 จนกระทั่งวิธีการ Bernoulli และ ออยเลอร์ ได้กลายทฤษฎีที่รู้จักกันในชื่อ ทฤษฎีออยเลอร์- Bernoulli หรือเรียกอีกอย่างว่า thin beam theory

หลังจาก นิวตัน (Newton) ค้นพบหลักการเคลื่อนที่ทั้งสามข้อเป็นต้นมา ยุคของการหาคำตอบด้วยวิธีการคำนวณก็ได้นำไปใช้และพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่องจากจุดเริ่มต้นที่เรียกว่า กลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian Mechanics) เข้าสู่ยุคกลศาสตร์ของลากรานจ์ (Lagrangian Mechanics) โจเซฟ ลากรานจ์ (Joseph Lagrange 1736-1813) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้พัฒนาสมการการเคลื่อนที่และนำระบบพิกัดทั่วไปมาใช้และเรียกสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาว่า Lagrange equation ซึ่งเป็นสมการที่มีประโยชน์มากสำหรับการสร้างสมการการเคลื่อนที่ และต่อมา William Hamilton (1805-1865) นักฟิสิกส์ชาวไอแลนด์ได้ให้ความสนใจสมการของลากรานจ์มากและได้พัฒนาสมการลากรานจ์สำหรับแก้ปัญหาทางพลศาสตร์และนำเสนอวิธีที่เป็นประโยชน์สำหรับสร้างสมการอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบที่ต่อเนื่อง เช่น คานของสะพาน

ในปี 1766 ออยเลอร์ได้นำเสนอสมการสำหรับการสั่นสำหรับแผ่น plate สี่เหลี่ยมที่ถูกระงับโดยแรงดึงได้อย่างถูกต้อง จากความสำเร็จนี้ทำให้ออยเลอร์และลูกศิษย์คือ James Bernoulli หลานของ Daniel Bernoulli ได้นำเสนอสมการสำหรับการสั่นของ plate สี่เหลี่ยมที่เหมือนเป็น grid work ของคาน ในปี ค.ศ. 1788 แต่สมการที่นำเสนอไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากไม่ถูกต้อง จนกระทั่งปีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเหนาไปใช้ประโยชน์ตามการคาดหมายว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 1821 Claude-Louis Navier (1785-1836) ซึ่งเป็นนักออกแบบสะพานและวิศวกร ซึ่งผลงานที่เป็นที่ทราบกันดีคือ Navier–Stokes equations ได้นำเสนอทฤษฎี elasticity และได้สร้างสมการอนุพันธ์ของแผ่น plate ที่เหลี่ยมที่เป็นแบบ flexural resistance ได้ถูกต้องและนำเสนอวิธีการแม่นยำตรงในการเปลี่ยนรูปสมการอนุพันธ์ ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต (algebraic equation) สำหรับหาคำตอบของปัญหาแผ่น plate โดยการใช้ trigonometric series ต่อจากนั้น มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านที่พยายามที่จะนำเสนอสมการการสั่นของ plate เช่น Chladni

เมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 18 นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้มีความสนใจในการศึกษาการสั่นของแผ่น shell และพยายามหาสมการการเคลื่อนที่ของการสั่นของแผ่น shell และหนึ่งในนั้นคือ Augustus Edward Hough Love นักคณิตศาสตร์คนสำคัญในยุคนั้น ได้นำเสนอสมการสำหรับการสั่นในระนาบการสั่นตามขวางของ shell ในปี ค.ศ. 1888 โดยใช้สมมติฐานอย่างง่ายเหมือนกับของคานและ plate ซึ่งพื้นฐาน สมการของ Love กลายเป็นสมการทั่วไปในทฤษฎีของโครงสร้างที่ต่อเนื่อง (continuous structure) ที่มีความหนาแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและความยาว และอีก 120 ปีต่อมา สมการของ Love ได้ถูกนำมาใช้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของการสั่นของคานโค้ง และเมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 19 ได้มีบุคคลซึ่งเป็นผู้บุกเบิกการแก้ปัญหาทางด้านการสั่นเชิงกลแก่อุตสาหกรรม คือ ทิโมเชงโก (Timoshenko)

ทิโมเชงโก (1878–1972) วิศวกรชาวรัสเซีย ได้นิยามทฤษฎีเกี่ยวกับคานที่ชื่อ Timoshenko beam theory อันมีชื่อเสียง ซึ่งได้ถูกนำมาใช้เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับคาน Timoshenko ได้เริ่มศึกษาการสั่นของสะพานตั้งแต่ ค.ศ. 1900 โดยได้คิดสมการที่ใช้อธิบายการสั่นของสะพานชนิด suspension bridge ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นของสะพาน ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของสะพานได้กลายเป็นข้อมูลที่สำคัญข้อมูลหนึ่งสำหรับผู้ออกแบบสะพานที่นำไปใช้ในการออกแบบสะพานมานานนับหลายปี หลังจากมีสะพานเกิดความเสียหายเนื่องจากการสั่นและสะพานที่เสียหายเนื่องจากการสั่นที่เป็นที่รู้จักกันดีคือสะพาน Tacoma Narrows Bridge เกิดการพังทลาย ในปี ค.ศ. 1940 หลังจากก่อสร้างได้เพียง 4 เดือน เนื่องจากการกรรโชกของลมซึ่งทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงของสะพาน

การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นของสะพานที่มีโครงสร้างคานเป็นเหล็ก (steel girder bridge) ในช่วงแรกเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการและเป็นสะพานที่มีคานเป็นแบบตรง ซึ่งได้เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1950 โดย R.S. Ayre, Ford George และ L.S. Jacobsen ได้ศึกษาการสั่นของแบบจำลองสะพานชนิดสองช่วงความยาว (two span) ได้ทำการวัดความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นจากการสั่นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแรงที่ขนาดคงที่กระทำบนแบบจำลอง ส่วนการทดสอบการสั่นโดยการทดลองจริงกับโครงสร้างสะพานนั้นค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง การทดสอบช่วงแรกๆ เป็นการทดสอบหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสั่นของสะพาน ซึ่งได้เริ่มต้นในปี 1962 โดย University of Illinois ได้ทำการทดสอบสะพานที่มีคานสามคาน (three beam bridge) จำนวน 18 สะพาน ภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เผยแพร่ขึ้นต้นการพิมพ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่กระทำโดยยานพาหนะต่างชนิดกัน 14 ชนิด โดยทำการวัดค่าระยะการโก่งและค่าความเครียดของคานสะพานในปี ค.ศ. 1954–1960 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีการใช้งานแพร่หลายมากขึ้น งานวิจัยต่างๆได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ การจำลองแบบแทนการทดสอบจริง และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้ถูกนำมาใช้เป็นการครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (elastic) หรือในสภาพยืดตัว (plastic) นอกจากนี้จะนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์แล้ว ยังสามารถจะใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลันหรือใช้วัสดุต่างชนิดกัน เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการนำชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น ส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน ชิ้นส่วนย่อยๆ เหล่านี้เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเช่นวิธีต่างๆไป แต่จะทำการวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ

แนวความคิดที่จะนำเอาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1940 ต่อมาในปี ค.ศ. 1943 ได้เริ่มใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาความเค้นในปัญหามิติเดียว เช่น ความเค้นที่เกิดในท่อนโลหะ ในคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ในปี ค.ศ. 1956 Turner, Clough, Martins และ Topp [19] ได้วิเคราะห์ปัญหาสองมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นครั้งแรก และได้แสดงวิธีหาสทิงก์ของเอลิเมนต์สองมิติของเอลิเมนต์ระนาบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม โดยการสมมติฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าวิธีสทิงก์โดยตรง (direct stiffness method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้มีความสำคัญใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรวมสทิพเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นสทิพเนสเมทริกซ์ของโครงสร้างทั้งระบบ

เมื่อคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองแทนการทดสอบจริงทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้มาก

ในปี ค.ศ. 1960 Clough [20] ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นในแนวระนาบ โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก ในปี ค.ศ. 1961 ทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นโดย Melosh [21] แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีพื้นฐานมาจากวิธีของเรย์ลีย์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz method) ที่ใช้หลักของงานเสมือน (principle of virtual work) หรือหลักของพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับเพลลา การไหลของของไหล การนำความร้อน และในช่วงปี ค.ศ. 1961-1965 ได้มีผู้พยายามใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แก้ปัญหาสามมิติ โดยในปี ค.ศ. 1961 Martins ได้เสนอวิธีหาสทิพเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สามมิติทรงสี่หน้า (tetrahedral) และในปี ค.ศ. 1965 Clough และ Rashid [22] และ Wilson [23] วิเคราะห์ปัญหาทรงกระบอกตันแกนสมมาตรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาการสั่นของคานโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย Archer [24] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตอบสนองของระบบโครงสร้างโดยใช้เมทริกซ์ของมวลแบบนัย (consistent mass matrix) ของท่อนโลหะและคานที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง และตั้งแต่นั้นปี ค.ศ. 1969 เป็นต้นมา นักวิจัยได้เริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับการศึกษาการสั่นของคานที่เป็นเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ เนื่องจากว่าคานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอได้มีการนำมาใช้งานมากขึ้นและมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าคานตรงมาก

สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge ได้ถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกที่ประเทศฝรั่งเศส ในช่วงปี ค.ศ. 1960s ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่มีมาตรฐานและข้อกำหนดในการออกแบบ การศึกษาการสั่นคานสะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ได้เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1969 โดย C. G. Culver และ D. J. Oestel [25] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคานโค้งที่มีหลายช่วง (multi-span) โดยการใช้วิธีการของ Rayleigh-Ritz ร่วมกับ Lagrange แล้วนำไปอธิบายกับคานที่มีสองช่วง (two span) และในปีนี้ได้มีการจัดตั้งโครงการที่ชื่อ Consortium of University Research Team Project (CURT) ซึ่งเป็นการรวมตัวของมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วย Carnegie Mellon University, University of Pennsylvania, University of Rhode Island และ Syracuse University ภายใต้การสนับสนุนด้านการเงินจาก Federal Highway Administration (FHWA) โดยทำหน้าที่ในการรวบรวมและตรวจสอบงานวิจัยที่เกี่ยวกับสะพานชนิด horizontally curved steel girder bridge. ซึ่งภายหลังได้มีการพัฒนาโปรแกรม

คอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบสะพานชนิด horizontally curved steel girder bridge. โดยการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดทำข้อกำหนดในการออกแบบสะพานชนิด horizontally curved highway bridge. C.G. Culver และ Mozer (1970) [26] ได้ทำการทดสอบแบบจำลองของ สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge และคานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสูตรที่นำเสนอและความถูกต้องของ code computer วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้เคราะห์การสั่นของคานโค้งแผ่นบางโดย Shore และ Chaydhuri (1977) [27] ซึ่งใช้หลักของงานเสมือน (principle of virtual work) และที่สทิฟเนสเมทริกซ์หาจาก stress resultants ที่โหนด (Node) ปลายทั้งสองด้านของเอลิเมนต์ Yoo และ Fehrenbach (1981) [28] ได้วิเคราะห์การสั่นของคานโค้งแผ่นบางโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสทิฟเนสหาได้จากคำตอบของ homogeneous differential equation governing ในสภาวะสมดูลสถิตของคาน Powell และ Mondkar (1978) [29] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิเคราะห์โครงสร้างของสะพานชนิด Curved multiple I-girder bridges โดยที่โปรแกรมนี้อยู่บนพื้นฐานที่เรียกว่า Plane grid idealization และข้อสมมติฐานบางอย่าง การทดสอบกับสะพานจริงทำโดย Federal Highway Administration (FHWA) ในปี ค.ศ. 1992 เพื่อทำการแก้ไขปรับปรุงข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบสะพานชนิด horizontally curved steel girder ที่ได้ประกาศในปี ค.ศ. 1980 ซึ่ง Linzell และคณะ [2] ได้ระบุไว้ในงานวิจัยว่า Federal Highway Administration (FHWA) ได้ทดสอบสะพานที่มีคานเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ (horizontally curved steel girder bridge) ชนิด multi-girder มีชื่อโครงการว่า the curved steel bridge research project (CSBRP) โดยได้ทำการทดสอบหลายอย่างกับสะพานจริงกับสะพานต้นแบบรวมทั้งทดสอบการสั่นด้วยเครื่องไฮดรอลิกส์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่าค่าความถี่พื้นฐานของการสั่นมีค่าเท่ากับ 2.90 Hz

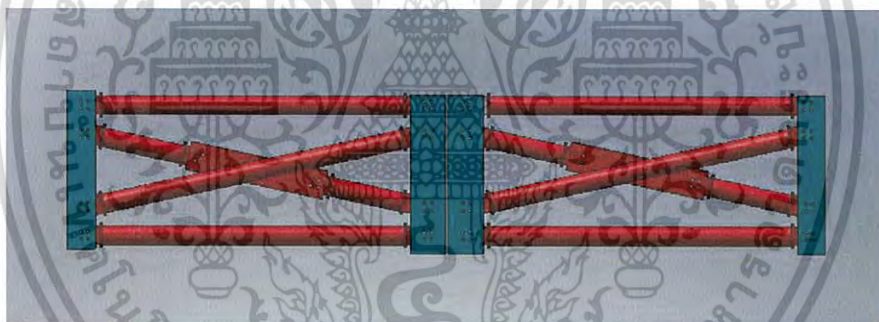
Dongzhou Huang และคณะ (1995) [30] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทาง Dynamics ของ สะพานชนิด horizontally curved steel I-girder bridge อันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ข้ามสะพานเทียบกับสะพานชนิดคานตรง โดยการสร้างแบบจำลองสะพานด้วยคอมพิวเตอร์ การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นของคานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอส่วนใหญ่เป็นการศึกษาโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างแบบจำลองใน วิธีการทางไฟไนต์ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการสั่น

เมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมการสั่นของคานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอด้วยคอมพิวเตอร์เป็นที่นิยมมาก ในการวิเคราะห์ปัญหามีทั้งการเขียน code computer ขึ้นมาแก้ปัญหา และการใช้ซอฟต์แวร์ทางพาณิชย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน CAD ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้น การใช้งานจึงทำได้สะดวก

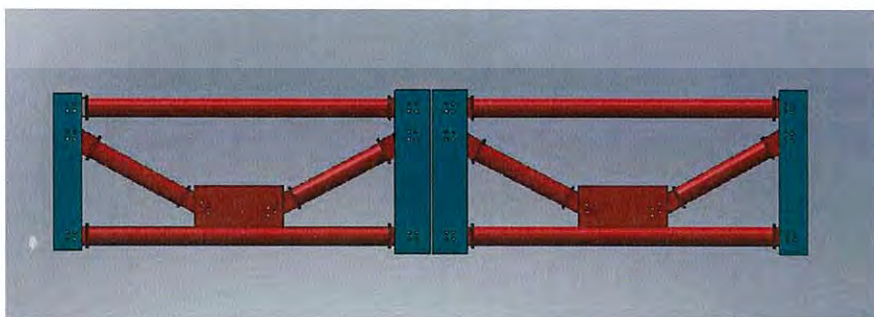
รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2000 Meng, JY และ Lui, EM. (2000) [31] ได้ศึกษาผลของการบิดตัวของสะพานในช่วงความยาวสั้นเนื่องจากการสั่น โดยการเขียน code computer แบบจำลอง Complete Quadratic Combination (CQC) rule [31] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่น ในรายงานระบุว่าผลของการบิดตัวควรถูกนำมาพิจารณาในการออกสะพานที่เกี่ยวกับแผ่นดินไหว

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ทางพานิชย์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นของสะพานที่คานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ โดย H.Maneetes และ D.G. Linzell (2003) [18] ได้นำข้อมูลโครงสร้างสะพานของ Federal Highway Administration (FHWA) ในปี ค.ศ. 1992 มาสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อทางพานิชย์ว่า ABAQUS เพื่อศึกษาอิทธิพลของ cross frame และค้ำยันที่ตอบสนองการสั่นอย่างอิสระของสะพานเหล็กโค้ง โดยได้ทำการศึกษากับ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และค้ำยันด้านล่าง ลักษณะรูปร่างของ cross frame ที่ใช้ในการวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type)



รูปที่ 2.4 cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] ได้ทำการศึกษาที่โหมดความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั่นอย่างอิสระตามขวางของโครงสร้างคานสะพาน โดยได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของแบบจำลองและปรับเปลี่ยนค่าวัสดุเพื่อให้ค่าความถี่ของการสั่นใกล้เคียงกับค่าความถี่พื้นฐานของการทดลองจริง (2.90 Hz) ของ Federal Highway Administration (FHWA) ผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่า cross frame ชนิด x-type ที่มีน้ำหนักมากกว่าชนิด k-type 29 เปอร์เซ็นต์ ให้ความต้านทานต่อการสั่นตามขวางใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าความเค้นดัด (bending stress) ที่เกิดกับคานของสะพาน (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิด x-type มีค่าที่สูงกว่าคานของสะพาน (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิด k-type ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักของ cross frame ตำแหน่งและทิศทางของการวางตัวของค้ำยัน (bracing) มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่น Md. Robiul Awall และคณะ (2012) [3] ได้ศึกษาผลของ bottom bracing ที่มีต่อความถี่ของการสั่นอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ทำให้โครงสร้างสะพานชนิด horizontally curved I-girder ที่มีรัศมีความโค้งแตกต่างกันเกิดการบิดตัว โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อทางพาณิชย์ว่า ANSYS โดยทำการศึกษาที่ค้ำยัน 5 ชนิด และผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่า ค้ำยันด้านล่างทำให้ความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและอัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ของสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของค้ำยันและตำแหน่งการติดตั้งค้ำยัน นอกจากนี้ค้ำยันด้านล่างยังทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่กระจายแรงที่มากระทำกับคานของสะพานอันหนึ่งไปสู่คานสะพานคานอื่นๆที่อยู่ในโครงสร้างสะพาน

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกกลุ่มที่ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การสั่นของสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้ง โดย X. He และคณะ (2011) [32] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้าน dynamics ของสะพานชนิด curved twin I-girder bridge ที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน อันเป็นผลมาจากการสั่นของสะพานและการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก และมีนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างสมการอนุพันธ์สำหรับการเคลื่อนที่ของคานโค้งและใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาโดยทำการเขียน code computer ด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ FORTRAN

Ki-Young Yoon และคณะ (2006) [12] ได้นำเสนอวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสั่นโดยความถี่ธรรมชาติของคานโค้ง ที่มีพื้นฐานมาจาก สมการ Stability Equations ของคานโค้ง ที่นำเสนอโดย Y.J. Kang และ Yoo C.H. (1994) [4] Bo Yeon Kim (2008) และคณะ [13] นำเสนอเอลิเมนต์ของคานชนิดโค้งวงกลมเพื่อใช้วิเคราะห์การสั่นของคานโค้งด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่เมตริกซ์มวล (mass matrix) หาได้จากพลังงานความเครียด (strain energy) เมตริกซ์ความแข็งแรง (stiffness matrix) หาได้จากพลังงานจลน์ (kinetic energy) และฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ได้จากการอินทิเกรต (integral) สมการอนุพันธ์ของคานโค้งที่อยู่ในสภาวะสมดุลสถิตย์ที่ได้นำเสนอโดย Mo ในปี 1997 วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำเสนอได้ถูกทดสอบความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมหรือมีข้อผิดพลาดประการใด กรุณาแจ้งให้ทราบทันที
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องด้วยการคำนวณค่าธรรมชาติของการสั่นของเศษหนึ่งส่วนสี่ของวงแหวนที่ปลายด้านหนึ่งถูกยึด (a quarter cantilever ring) และปลายอีกด้านถูกแรงมากระทำ ค่าธรรมชาติธรรมชาติของการสั่นของคานโค้ง ค่าธรรมชาติธรรมชาติของการสั่นของคานโค้งรูปตัว s ผลลัพธ์ที่คำนวณได้โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ถูกนำเสนอโดยมีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

วิธีเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การสั่นของคานโค้งนอกจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วยังมีวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า differential quadrature method (DQM) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการสั่นของคานโค้ง Kijun Kang (2007) [33] ใช้วิธี DQM คำนวณหาค่า eigenvalue ของการสั่นอย่างอิสระของคานโค้งแผ่นบางที่หน้าตัดของคานเป็นแบบ Wide flange ที่มีแอมพลิจูด (amplitude) ของการสั่นมีค่าน้อยๆ ผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่า วิธีการ DQM ที่มีการแบ่งคานออกเป็น 11 ช่วง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณโดยวิธีการแมนตรงและวิธีการของ Ritz Li Hongjing และคณะ (2008) [34] ได้ใช้วิธี differential quadrature element method (DQEM) โดยใช้วิธีการ DQM ร่วมกับวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่า eigenvalues ของการสั่นตามธรรมชาติที่มีแอมพลิจูด (amplitude) น้อยๆของ continuous horizontally curved steel girder bridge ชนิดสองช่วงความยาว (two span) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการ (DQEM) จะเริ่มเข้าใกล้ค่าที่คำนวณโดยวิธีการทางทฤษฎี เมื่อแบ่งคานออกเป็น 13 ช่วง

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเครื่องคอมพิวเตอร์จะมีประสิทธิภาพสูงเพียงใดก็ตามการคำนวณของคอมพิวเตอร์ก็ยังคงต้องการคำสั่งซึ่งผู้ใช้เป็นผู้กำหนด โดยคำสั่งเหล่านั้นผู้ใช้ต้องให้คอมพิวเตอร์ทำงานบนพื้นฐานของทฤษฎีและปรัชญาของการแก้ปัญหาอย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจหลักพื้นฐาน ทฤษฎี ข้อสมมติฐานในการนำทฤษฎีเหล่านั้นไปใช้ในการแก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม และการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ก็เป็นเพียงการใช้เครื่องมือช่วยในการคำนวณเท่านั้น ซึ่งหลักทฤษฎีของการสั่นจะได้กล่าวในบทที่ 3

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การสั่นของระบบต่อเนื่อง

ระบบที่เป็นระบบต่อเนื่อง คือ ระบบที่เมื่อพิจารณาทุกจุดของระบบว่ามีอิสระที่จะเคลื่อนที่ไปมาในทิศทางที่กำหนดได้ เช่น การสั่นของเส้นเชือก การสั่นของคาน เป็นต้น ทุกๆ จุดบนเชือกหรือคานสามารถเคลื่อนที่ไปมาในทิศทางต่างๆ ได้ตลอดเวลา ในบางกรณีนิยมเรียกระบบต่อเนื่องว่าระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระเข้าสู่อันันต์

ระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระที่จำกัด สมการการเคลื่อนที่จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ปกติ แต่สำหรับระบบต่อเนื่องนั้นสมการการเคลื่อนที่จะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) คือ ตัวแปรจะเป็นฟังก์ชันของทั้งตำแหน่งและเวลา ซึ่งการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของสมการมีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก

สำหรับวิธีการแก้ปัญหาคานการสั่นของคานซึ่งเป็นการสั่นของระบบต่อเนื่อง ที่มีสมการการเคลื่อนที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) วิธีที่นิยมใช้กันคือ วิธีการแยกตัวแปร (separation of variables)

วิธีการวิเคราะห์การสั่นของคานนอกจากจะใช้สมการเคลื่อนที่แล้ว ยังมีวิธีการอื่นที่ใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ซึ่งได้แก่ วิธีของเรย์ลีย์ (Rayleigh's Method) วิธีของเรย์ลีย์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz Method) และวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 วิธีของเรย์ลีย์

วิธีของเรย์ลีย์ (Rayleigh's Method) เป็นวิธีการเพื่อนำไปหาค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระหลายชั้น และระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระอนันต์

วิธีการของเรย์ลีย์ ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคานนั้นเป็นวิธีการประมาณหาค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานหรือเรียกอีกอย่างว่าค่าความถี่ธรรมชาติต่ำสุด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่าการใช้สมการการเคลื่อนที่ วิธีเรย์ลีย์ใช้หลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงาน หากระบบเป็นระบบอนุรักษ์คือไม่มีแรงจากภายนอกกระทำต่อระบบและระบบไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย ค่าพลังงานจลน์สูงสุด (T_{\max}) จะเท่ากับพลังงานศักย์สูงสุด (V_{\max}) นั่นคือ

$$T_{\max} = V_{\max} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติการเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์โมนิกส์ ดังนั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = \bar{X} \sin(\omega t + \phi)$$

สมการพลังงานจลน์สูงสุดและสมการพลังงานศักย์สูงสุดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \bar{X}^T [M] \bar{X} \omega^2$$

$$V_{\max} = \frac{1}{2} \bar{X}^T [K] \bar{X}$$

ดังนั้นสมการ (3.1) จะได้

$$\frac{1}{2} \bar{X}^T [M] \bar{X} \omega^2 = \frac{1}{2} \bar{X}^T [K] \bar{X}$$

ค่าความถี่ธรรมชาติจะสามารถเขียนในรูป

$$\omega^2 = \frac{\bar{X}^T [K] \bar{X}}{\bar{X}^T [M] \bar{X}}$$

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคานด้วยวิธีการของเรย์ลีย์หาได้โดยการสมมติรูปร่างโหมด (mode shape) ขึ้นเพื่อที่จะประมาณค่าความถี่ธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้รูปร่างของการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกระทำสถิตหรือการเปลี่ยนรูปร่างในสภาพสมดุลใช้เป็นรูปร่างประมาณ เพื่อที่จะหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการประมาณได้ ความถูกต้องของผลที่ได้ด้วยวิธีการของเรย์ลีย์ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการเลือกใช้รูปร่างโหมด

การสมมติรูปร่างโหมดที่ไม่ถูกต้องก็เหมือนกับเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับคาน ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มาด้วยวิธีการของเรย์ลีย์จะมีค่าสูงกว่าค่าที่แท้จริง

3.3 วิธีของเรย์ลีย์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz Method)

ในการวิเคราะห์การสั่นของระบบต่อเนื่องที่มีค่าความถี่ธรรมชาติที่มีสูงกว่าค่าความถี่พื้นฐาน วิธีการของเรย์ลีย์ (Rayleigh's Method) ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการที่เรียกว่า วิธีของเรย์ลีย์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz Method) ซึ่งหลักการของวิธีนี้คือ ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติที่มากขึ้นให้ถูกต้อง ต้องมีการประมาณรูปร่างโหมดที่หลายๆความถี่ธรรมชาติที่มากขึ้น ซึ่งวิธีการนี้ใช้การประมาณรูปร่างโหมดที่หลายๆ ความถี่ธรรมชาติหรือหลายโหมดนั่นเอง ถ้ารูปร่างโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง จะทำให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานและความถี่ธรรมชาติที่สูงขึ้น ตามจำนวนรูปร่างโหมดที่ประมาณได้อย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากขึ้น

จำนวนฟังก์ชันที่ใช้ประมาณค่ารูปร่างโหมด เป็นจำนวนค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่ใช้ประมาณ หากประมาณค่ารูปร่างโหมดจำนวนมากขึ้น ค่าความถี่ธรรมชาติก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับความถี่จริงมากขึ้น และจะต้องทำการคำนวณมากขึ้น

ในการวิเคราะห์การสั่นของคาน หากเลือกฟังก์ชันขึ้นมา n ฟังก์ชันเพื่อแทนรูปร่างการสั่นหรือการเปลี่ยนรูปของคาน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$W(x) = c_1 w_1(x) + c_2 w_2(x) + \dots + c_n w_n(x)$$

เมื่อ $w_1(x), w_2(x), \dots, w_n(x)$ เป็นฟังก์ชันที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้สภาพที่ขอบเขตเป็นจริง ซึ่งการสมมติ $w_i(x)$ ขึ้นอยู่กับสภาพที่ขอบเขตของแต่ละลักษณะปัญหา และฟังก์ชันที่เลือกมาต้องเป็นฟังก์ชันที่ทำให้สภาพที่ขอบเขต (boundary condition) เป็นจริง ส่วน c_1, c_2, \dots, c_n เป็นสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาค่า

ค่า c_1, c_2, \dots, c_n ที่หามาเป็นค่าที่เลือกขึ้นเพื่อทำให้ ค่าฟังก์ชัน $w_i(x)$ มีค่าใกล้เคียงกับค่ารูปร่างโหมดที่แท้จริงมากที่สุด

3.4 สมการลากรานจ์

ในการวิเคราะห์การสั่นของคานโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์หลายงานวิจัย สมการตั้งต้นนิยมสร้างมาจากสมการลากรานจ์ ดังเช่นงานวิจัยของ Bathe ที่ระบุไว้ในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [35], [36] และ [37]

สมการลากรานจ์เป็นสมการการเคลื่อนที่ในรูปอนุพันธ์ของพิกัดทั่วไป โดยพิจารณาพลังงานและงานที่เกิดขึ้นกับอนุภาคทั้งหมด โดยพลังงานศักย์ V เป็นฟังก์ชันกับพิกัดทั่วไป และพลังงานจลน์ T เป็นฟังก์ชันกับความเร็วในระบบพิกัดทั่วไป ดังนั้น

$$V = V(q_i)$$

$$T = T(\dot{q}_i)$$

โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน หลักของพลังงาน และงานเสมือน (virtual work) สามารถหาสมการ Lagrange ได้คือ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ในกรณีของการสั่นแบบเสรี แรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ $Q_i = 0$ ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = 0 \quad (3.2)$$

ถ้า i มีค่าจาก 1 ถึง n จะได้สมการการเคลื่อนที่ n สมการ โดยวิธีนี้ทำให้สามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการสั่นได้ง่าย โดยทั่วไปแล้วเนื่องจากพลังงานศักย์ $V = V(q_1, q_2, \dots, q_n)$ ดังนั้น $\frac{\partial V}{\partial q_i}$ จึงเท่ากับศูนย์ จากสมการ (3.2)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = 0 \quad (3.3)$$

จากนิยามของลากรางจ์ (Lagrangian, L) โดย

$$L = T - V$$

สมการ (3.3) เขียนในเทอม Lagrangian, L ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

สมการลากรางจ์เป็นสมการที่มีประโยชน์มากในการหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีหลายลำดับชั้นความเป็นอิสระ เพราะพื้นฐานของสมการลากรางจ์มาจากวิธีพลังงานดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาทิศทางเคลื่อนที่และทิศทางของแรงที่กระทำ

3.5 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัญหาทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อนของแผ่นเหล็ก ปัญหาเกี่ยวกับการสั่นของโครงสร้าง เป็นต้น ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อให้ได้ผลเฉลยแบบแม่นยำ (exact solution) สามารถทำได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) ซึ่งในบางกรณีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์ทำได้ยากหรือไม่ได้เลย ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเชิงปฏิบัติ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ยากมากหรือทำไม่ได้เลย ทำให้มีการคิดค้นวิธีการหาผลเฉลยโดยการประมาณ (approximate methods)

วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method) เป็นวิธีการหาผลเฉลยโดยการประมาณที่ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เป็นวิธีที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย และนำไปเขียนในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ง่าย แต่ข้อเสียของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม คือ มีความยุ่งยากเมื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) จึงได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อนำมาใช้เพื่อหาผลเฉลยโดยการประมาณ

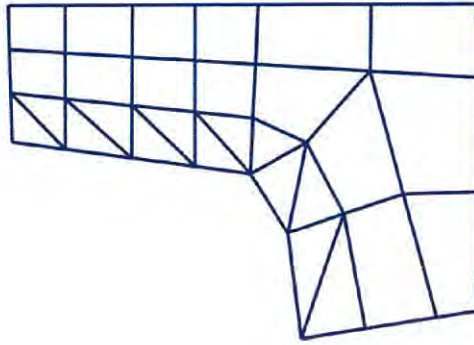
วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านปัญหาทางด้านพลศาสตร์และกลศาสตร์ของแข็ง สามารถที่นำไปใช้แก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี เช่น การสันของโครงสร้างสะพานแบบตรงซึ่งประกอบเกอเดอร์และค้ำยัน

โครงสร้างเกอเดอร์ (girder) สะพานในงานวิจัยนี้เป็นแบบ horizontally curved steel I-girder bridge การคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นมีความซับซ้อนกว่าโครงสร้างเกอเดอร์สะพานที่เป็นแบบตรงมาก การคำนวณโดยวิธีการแก้สมการอนุพันธ์ปกติ หรือวิธีการเปลี่ยนรูปของลาปลาซ (Laplace's Transform) เป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อนมาก งานวิจัยนี้จึงประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการหาค่าถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมด

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆ โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

การหลักการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเริ่มต้นจากการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาหรือสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (domain) ออกเป็นส่วนย่อยๆ (element) ที่เกี่ยวโยงกันด้วยจุดต่อที่เรียกว่าโหนด (node) รูปร่างของเอลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาหนึ่งอาจมีมากกว่าหนึ่งรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไป ดังแสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

3.5.2 การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ที่ใช้ในแต่ปัญหาแต่ละปัญหาอาจจะเหมือนกันหรือไม่เหมือน ปัญหาเดียวกันเมื่อใช้เอลิเมนต์ต่างชนิดกันโดยจำนวนเอลิเมนต์เท่ากัน ก็มีผลทำให้คำตอบที่ได้ต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกชนิดให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละปัญหา ชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด

1. เอลิเมนต์มิติเดียว เป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน เป็นต้น รูปที่ 3.2 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเรียกว่าจุดต่อภายนอก รูป 3.3 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ คือจุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ และ รูปที่ 3.4 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือสองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายใน

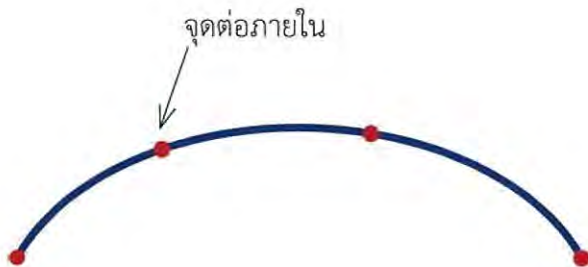


รูปที่ 3.2 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์



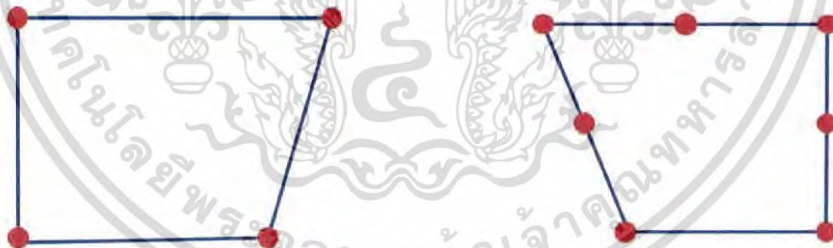
รูปที่ 3.3 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

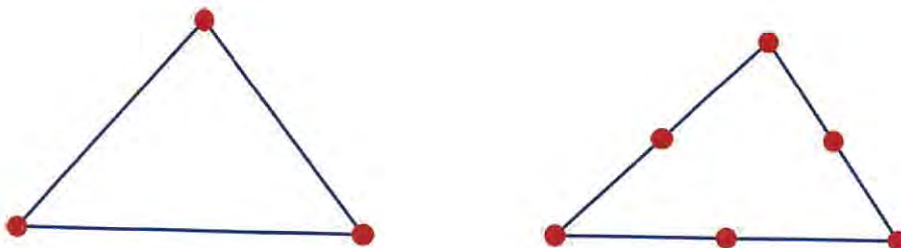


รูปที่ 3.4 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ

2. เอลิเมนต์สองมิติ ถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรง หรือเส้นโค้ง เช่น รูปที่ 3.5 แสดงเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อ และ 8 จุดต่อชนิดด้านตรง และด้านโค้ง แบบไอโซพาราเมตริก รูปที่ 3.6 แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ และ 6 จุดต่อ ด้านตรง และด้านโค้งแบบไอโซพาราเมตริก โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับ ความนิยมมากกว่า เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับขั้นความเสรีเท่ากับเอลิเมนต์ สี่เหลี่ยมที่ให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม หรือด้านโค้งนั้น ย่อมขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้



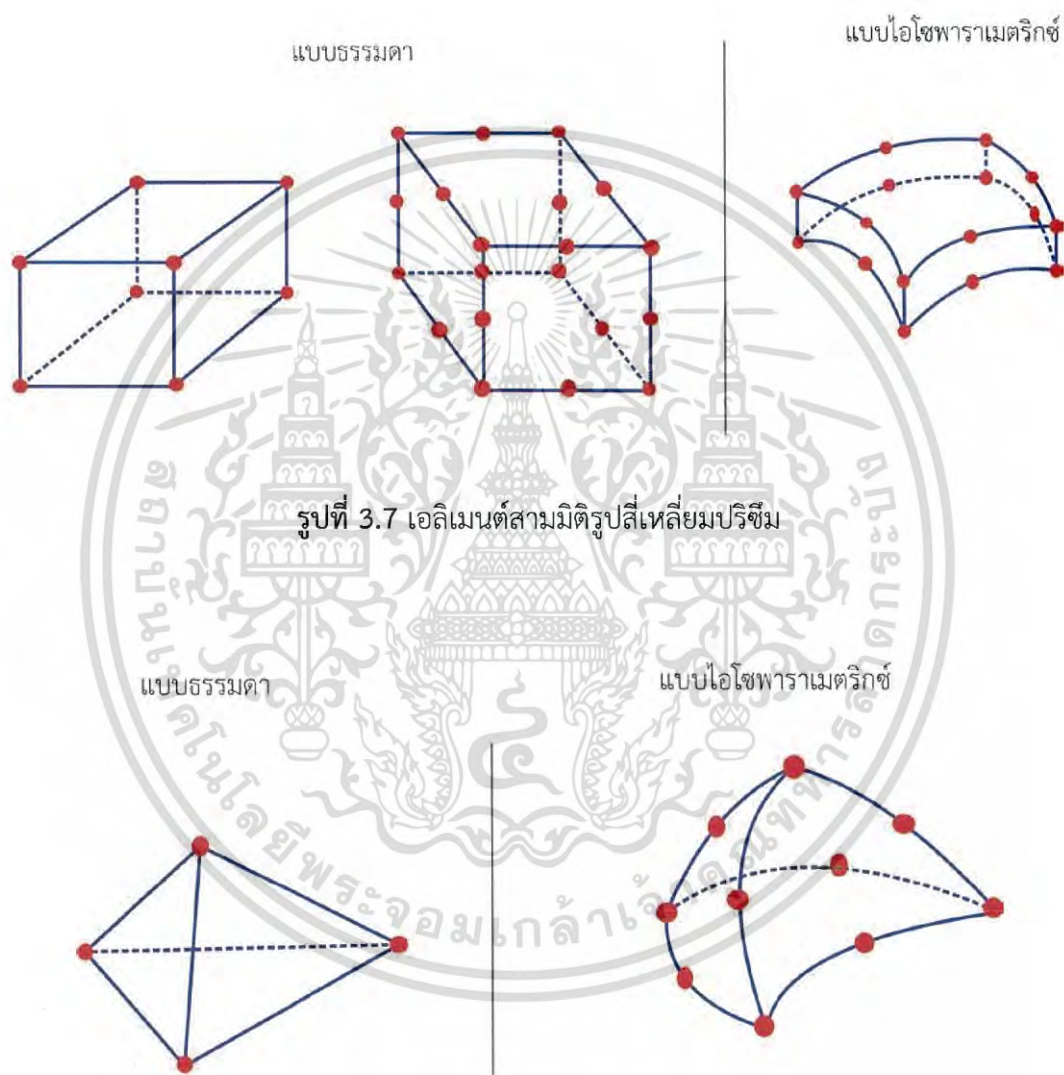
รูปที่ 3.5 แสดงเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.6 แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เอลิเมนต์สามมิติ ใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆไป ลักษณะของเอลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมปริซึม ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และเอลิเมนต์เป็นรูปกรวยสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมปริซึม เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 6 หน้า (hexahedron) ประกอบด้วยชนิดด้านตรง (linear) 8 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (straight-line quadratic) 20 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (quadratic with curve faces) 20 จุดต่อ



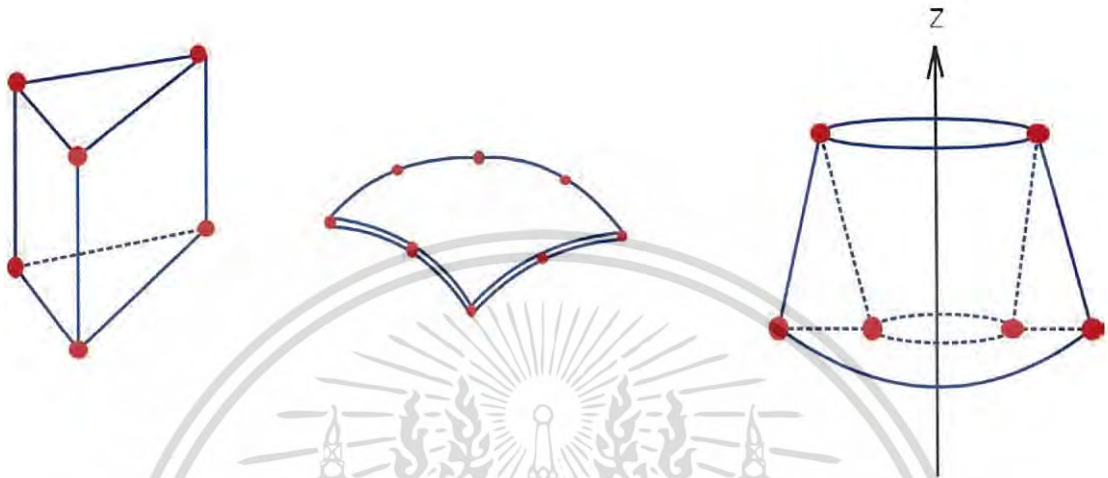
รูปที่ 3.7 เอลิเมนต์สามมิติรูปสี่เหลี่ยมปริซึม

รูปที่ 3.8 เอลิเมนต์สามมิติรูปกรวยสามเหลี่ยม

เอลิเมนต์สามมิติรูปกรวย เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 4 หน้า (tetrahedral) ซึ่งประกอบด้วยชนิดด้านตรง 4 จุดต่อชนิดเส้นตรงกำลังสอง 10 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง 10 จุดต่อตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์อีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะรูปทรงกระบอก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ลักษณะแผ่นโค้ง (shell) และเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารูปกรวยสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ไม่วากรัมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ซึ่งอาจเป็นเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมหมุนรอบแกนสมมาตร (360°) โดยทั่วไปเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อมากๆ ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อน้อย แต่เพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการ และใช้เวลาในการคำนวณมาก



รูปที่ 3.9 เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทรงกระบอก วิเคราะห์ปัญหาแผ่นโค้ง (shell) วิเคราะห์ปัญหารูปกรวย

3.5.3 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากการแบ่งรูปร่างปัญหา (domain) ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์ย่อยๆ เหล่านี้จะต้องมีสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ โดยที่สมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์จะถูกสร้างขึ้นมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์แล้วถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์สามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการโดยตรง (direct approach)

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์วิธีการโดยตรง (direct approach) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยการใช้เงื่อนไขการสมดุลแรงในแต่ละเอลิเมนต์ย่อยๆ

2. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการแปรผัน (Variation approach)

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาการวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และนิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้านโครงสร้าง วิธีการแปรผันมีหลักการคล้ายกับวิธีการของริทซ์ (Ritz Method) แตกต่างกันที่วิธีการแปรผันแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย วิธีการแปรผันแบ่งออกเป็นวิธีการย่อยได้ 3 วิธี คือ

1. วิธีการงานเสมือน (principle of virtual work)

2. วิธีของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cross frame และค้ำยัน (bracing) ที่ประกอบด้วยวัสดุท่อ H.Maneeetes และ D.G. Linzell [18] ได้เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด beam element

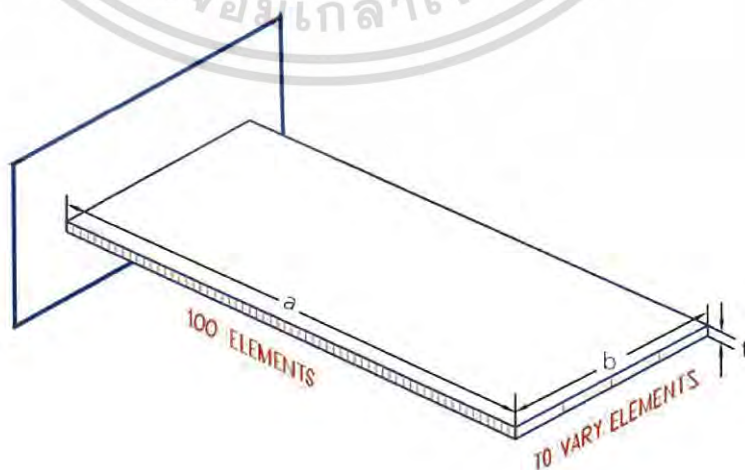
ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อทำการวิเคราะห์สั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งแบบจำลองของโครงสร้างสะพานประกอบ shell element และ beam element และโปรแกรม Evolution FEA เป็นโปรแกรม CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในการนำโปรแกรม Evolution FEA มาใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระโครงสร้างสะพานจึงต้องทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรมนี้ก่อน

การวิเคราะห์ความแม่นยำทำได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยที่ทำการศึกษาก่อนหน้าเกี่ยวกับการสั่นของแผ่นบางที่ทำการศึกษาโดย Nitipong และ Kiatfa [17] การศึกษาการสั่นของคานโค้ง ที่ทำการศึกษาโดย Ki-Young Yoon และคณะ [21] และการศึกษาการสั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอศึกษาโดย Virginia Transportation Research Center (VTRC) ที่ระบุในงานวิจัยของ H.Maneeetes และ D.G. Linzell [18] ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17]

Nitipong และ Kiatfa [17] ได้ทำการศึกษาก่อนหน้าเกี่ยวกับคานยื่นแผ่นบางโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางพาณิชย์ที่มีชื่อว่า ANSYS ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

คานยื่นถูกยึดแน่นปลายด้านหนึ่ง โดยมีขนาดความยาว a คงที่ 0.5 ม. และความหนา t คงที่ 0.005 ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนความกว้าง b ของคานจะแปรผันตามอัตราส่วนทางเรขาคณิต (Geometric Ratio; r) และคุณสมบัติวัสดุแสดงในตารางที่ 4.1 เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ shell Element ชนิดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้ด้านยาว (a) ให้มีจำนวนเอลิเมนต์มีค่าเป็น 100 element และให้ด้านกว้าง (b) มีจำนวนแปรผันตามอัตราส่วนทางเรขาคณิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับคานยื่นแผ่นบาง ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วิธีทฤษฎีของแคสติกลีโย (Castigliano's theorem)

3. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)

โดยทั่วไปแล้วในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสมการเชิงอนุพันธ์ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการคิดวิธีการสำหรับสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์ย่อยๆ จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง วิธีการดังกล่าวเรียกว่าการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 4 วิธีด้วยกัน คือ

1. โดยการจัดตำแหน่งจุด (point collocation)
2. โดยการจัดโดเมนย่อย (subdomain collocation)
3. โดยวิธีการกาเลอร์คิน (Galerkin)
4. โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (least squares)

ในกรณีของการวิเคราะห์การสั่นของคานโค้งสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้สามารถหามาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธีคือ

1. วิธีการโดยตรง (direct approach)

Bo Yeon Kim และคณะ [13] ได้ใช้วิธีการโดยตรง (direct approach) สร้างสมการดิฟเฟอเรนเชียลโดยอาศัย สมการสมดุลของแรง ทำให้สามารถหาแรงภายใน และ แรงปฏิกิริยา ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่น

2. วิธีหลักการแปรผัน (Variation approach)

Ki-Young Yoon และคณะ [12] ได้ใช้หลักการ Hamilton's principle ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์ของคานโค้ง ซึ่งมีหลักการคล้ายกับวิธีการของ Lagrange ซึ่งหลักการ Hamilton's principle สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T + \delta U + \delta V) dt = 0$$

ในงานวิจัยได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ source code ที่พื้นฐานที่เขียน code โดย Bathe ซึ่งใช้วิธีการ Lagrange ซึ่งเป็นวิธีหลักการแปรผัน (Variation approach)

โดยวิธีการโดยตรง (direct approach) และ วิธีหลักการแปรผัน (Variation approach) ทำให้ได้สมการเชิงอนุพันธ์การเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์สำหรับการสั่นแบบอิสระอยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

3.5.4 การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ปัญหาระบบสมการใหญ่

เมื่อได้สมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่เขียนในรูปของเมทริกซ์แล้วจึงนำเอาเมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดระบบสมการใหญ่ เรียกว่า เมทริกซ์ระบบรวม ต่อจากนั้นกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบ (boundary condition) แล้วจึงแก้ระบบสมการใหญ่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

$$[M]\ddot{\bar{x}} + [K]\bar{x} = 0 \quad (3.4)$$

เนื่องจากว่าการเคลื่อนของการสั่นเป็นแบบซ้ำไปซ้ำมาหรือเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ ดังนั้น

$$\bar{x} = \bar{X} \sin(\omega t + \phi) \quad (3.5)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.5) ลงใน (3.4) ได้

$$[K]\bar{X} - \omega^2[M]\bar{X} = \{0\}$$

หรือ

$$[K - \omega^2 M]\bar{X} = \{0\} \quad (3.6)$$

3.5.5 การคำนวณหาค่าความถี่

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ได้จากสมการ (3.6) ซึ่งเป็นสมการที่แทนปัญหาที่มีลักษณะพิเศษ เรียกว่า ปัญหาค่าเฉพาะ (Eigenvalue Problem) ทำได้โดยหาจากหลักพีชคณิต ในกรณีของสมการ (3.6) \bar{X} ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\det[K - \omega^2 M] = 0 \quad (3.7)$$

โดยสมการ (3.7) จะเรียกว่า สมการค่าเฉพาะ (characteristic equation) ส่วนค่า ω^2 จะเรียกว่า ค่าเฉพาะ (eigenvalue) โดยจะเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ

สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติค่าที่ต่ำที่สุด (ω) เรียกว่าความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) หรือ ค่าความถี่ที่หนึ่ง (first natural frequency) โดยทั่วไปแล้วค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม

4.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับโปรแกรม Evolution FEA

โปรแกรม Evolution FEA เป็นซอฟต์แวร์ชนิด CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาโดย Mr. Eric Payer ชาวออสเตรีย ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้าน software ที่เคยดำรงตำแหน่ง senior manager ที่บริษัท MSC Software Corp. ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยได้ทำการพัฒนา source code ที่สร้างโดย ศาสตราจารย์ชาวเยอรมันที่ชื่อว่า Klaus-Jürgen Bathe แห่ง Massachusetts Institute technology (MIT) ที่ใช้หลักการของลากรางจ์ในการเขียน code ซึ่ง source code ดังกล่าวได้ถูกนำไปพัฒนาสร้างเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ทางพาณิชย์หลายโปรแกรม เช่น LS DYNA

โปรแกรม Evolution FEA เป็นซอฟต์แวร์เสรี (free software) ชนิดที่มีการเปิดเผยรหัสต้นฉบับ (opened source code) ผู้ใช้สามารถลงทะเบียน ดาวน์โหลดโปรแกรม และทำการติดตั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้เลย ซึ่งวิธีการติดตั้งได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก และวิธีการใช้โปรแกรม Evolution FEA สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [38] และ [39]

จุดมุ่งหมายในตอนแรกของการพัฒนาโปรแกรม Evolution FEA คือ การพัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานเครื่องยนตรกลที่ผลิตในประเทศเยอรมัน ซึ่งข้อดีโปรแกรม Evolution FEA คือ

1. ไม่มีค่าลิขสิทธิ์ของ software
2. ใช้พื้นที่ของ hard disk ของคอมพิวเตอร์ในการติดตั้งโปรแกรมน้อย
3. spec ของเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่ต้องสูง
4. สามารถอินเทอร์เฟส (interface) กับ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS, Nastran และ Permas
5. เป็นโปรแกรมที่มีความแม่นยำเทียบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ทางพาณิชย์ได้

4.2 การวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรม

ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีการ CAD finite element โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ต้องมีความแม่นยำเพียงพอ ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กหน้ารูปตัวไอโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโครงสร้างสะพานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยคานหน้าตัดรูปตัวไอและ cross frame หลายๆ งานวิจัยที่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคานหน้าตัดรูปไอโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ อาทิเช่น งานวิจัยของ Awall และคณะ [3] งานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] และ งานวิจัยของ Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] ได้มีเอกสารที่การเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด shell element สำหรับส่วนที่เป็นคานหน้าตัดรูปตัวไอ และในส่วนองก์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cross frame และค้ำยัน (bracing) ที่ประกอบด้วยวัสดุท่อ H.Maneeetes และ D.G. Linzell [18] ได้เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด beam element

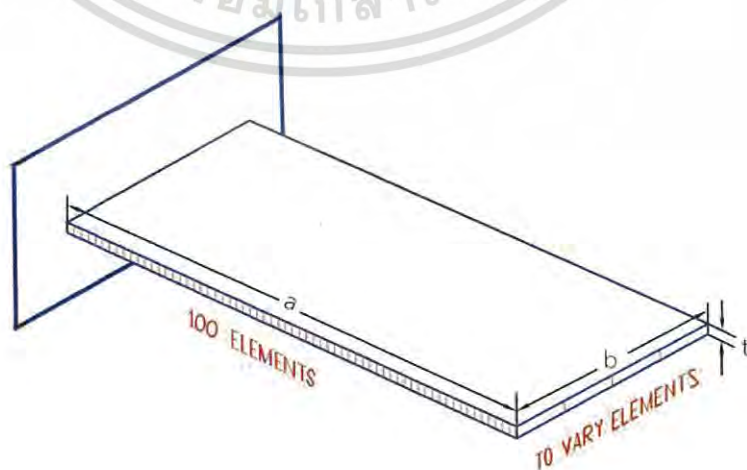
ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อทำการวิเคราะห์ห้สันของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งแบบจำลองของโครงสร้างสะพานประกอบ shell element และ beam element และโปรแกรม Evolution FEA เป็นโปรแกรม CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในการนำโปรแกรม Evolution FEA มาใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระโครงสร้างสะพานจึงต้องทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรมนี้ก่อน

การวิเคราะห์ความแม่นยำทำได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยที่ทำการศึกษาก่อนเกี่ยวกับการสั่นของแผ่นบางที่ทำการศึกษาโดย Nitipong และ Kiatfa [17] การศึกษาการสั่นของคานโค้ง ที่ทำการศึกษาโดย Ki-Young Yoon และคณะ [21] และการศึกษาการสั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอศึกษาโดย Virginia Transportation Research Center (VTRC) ที่ระบุในงานวิจัยของ H.Maneeetes และ D.G. Linzell [18] ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17]

Nitipong และ Kiatfa [17] ได้ทำการศึกษาก่อนการสั่นของคานยื่นแผ่นบางโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางพาณิชย์ที่มีชื่อว่า ANSYS ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

คานยื่นถูกยึดแน่นปลายด้านหนึ่ง โดยมีขนาดความยาว a คงที่ 0.5 ม. และความหนา t คงที่ 0.005 ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนความกว้าง b ของคานจะแปรผันตามอัตราส่วนทางเรขาคณิต (Geometric Ratio; r) และคุณสมบัติวัสดุแสดงในตารางที่ 4.1 เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ shell Element ชนิดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้ด้านยาว (a) ให้มีจำนวนเอลิเมนต์มีค่าเป็น 100 element และให้ด้านกว้าง (b) มีจำนวนแปรผันตามอัตราส่วนทางเรขาคณิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับคานยื่นแผ่นบางที่ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ [17]

Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus ($\times 10^9$ N/m ²)	Poisson's ratio
Carbon steel	7850	210	0.29

4.2.1.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA

ผลที่ได้จากการศึกษาการสั่นของคานยื่นแผ่นบางโดยใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อนำผลเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.9



รูปที่ 4.2 Mode 1 (105 Hz)

รูปที่ 4.3 Mode 2 (295.11 Hz)



รูปที่ 4.4 Mode 3 (579.42 Hz)

รูปที่ 4.5 Mode 4 (959.17 Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 Mode 5 (1432.5 Hz)



รูปที่ 4.7 Mode 6 (2002.2 Hz)



รูปที่ 4.8 Mode 7 (2661.8 Hz)



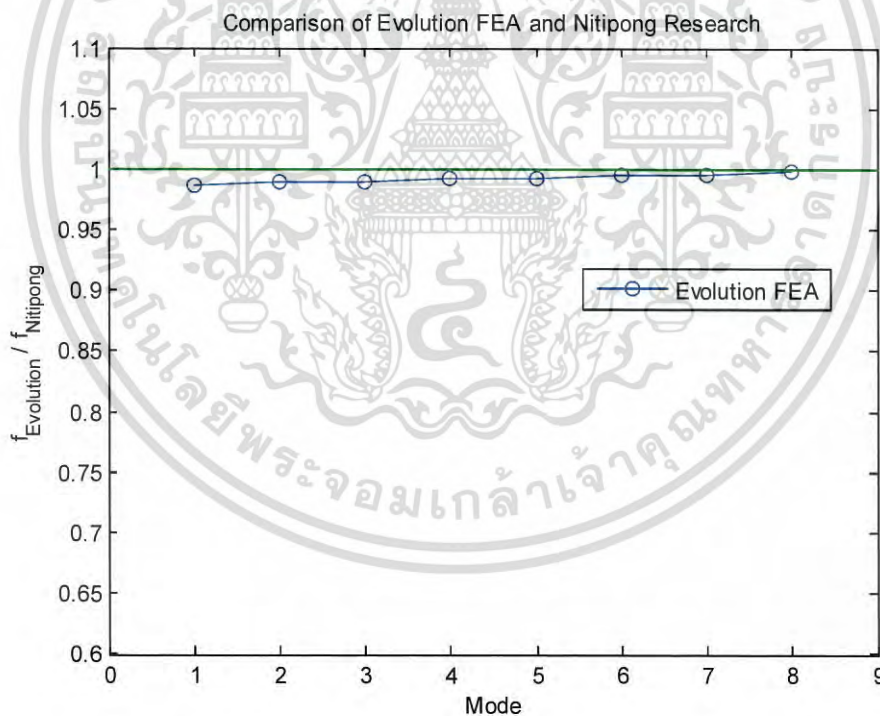
รูปที่ 4.9 Mode 8 (3416.9 Hz)

4.2.1.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17]

จากการศึกษาของงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การสั่นของคานแผ่นบางชนิดคานยื่น โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรม Evolution FEA ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA กับผลการศึกษาของ Nitipong และ Kiatfa [17] ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 เป็นการอัตราส่วนของความถี่ของการสั่นโดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA เทียบกับการศึกษาของ Nitipong และ Kiatfa [17]

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของคานยื่นถูกยึดแน่นปลายด้านหนึ่ง

Mode	Geometric Ratio (r)	Evolution FEA (Hz)	Nitipong and Kiatfa [17] (Hz)	Difference (%)
(1,0)	1	105.27	106.56	1.21
(2,0)	2	295.11	298.14	1.01
(3,0)	3	579.42	584.8	0.92
(4,0)	4	959.17	966.81	0.79
(5,0)	5	1432.50	1441.90	0.65
(6,0)	6	2002.20	2010.00	0.38
(7,0)	7	2661.80	2670.00	0.31
(8,0)	8	3416.90	3421.20	0.13



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการศึกษากับการศึกษาของ Nitipong

ผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ที่ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยทำการศึกษารายได้สถานะและเงื่อนไขเหมือนงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ทุกอย่างพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ดังแสดง

ในรูปที่ 4.10 และมีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] สูงสุดไม่เกิน 1.21 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12]

Ki-Young Yoon และคณะ[12] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Natural frequencies of thin-walled curved beams โดยทำการเขียนโค้ดคอมพิวเตอร์ด้วย Fortran 77 เพื่อวิเคราะห์การสั่นของคานโค้งแผ่นบาง รายละเอียดเกี่ยวกับรูปร่างของคานโค้งที่ใช้ทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4.12 ตารางที่ 4.3 และคุณสมบัติวัสดุของคานโค้ง (curved beam) แสดงในตารางที่ 4.4 โดยที่ให้ความยาวของคานมีค่าคงที่ 5.12 เมตร ส่วนรัศมีของคานมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่รัศมีของคานขึ้นอยู่กับมุม θ และมีการจับยึดที่ปลายทั้งสองข้างของคานเป็นแบบ Pinned



รูปที่ 4.11 รายละเอียดรูปร่างของคานโค้ง

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดรูปร่างของคานโค้ง

Cross section area (m ²)	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)	I (m ⁶)	K_T (m ⁴)
9.297 x 10e-3	1.137x10e-4	3.871x10e-5	5.559x10e-7	1.471x10e-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ

Modulus of elasticity (E) (GPa)	Shear modulus of elasticity (GPa)	Density (ρ) (kg/m ³)
200	77.2	7855

4.2.2.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA

ผลที่ได้จากการศึกษาการสั่นนอกระนาบ (out of plane) ของคานโค้งโดยใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] โดยทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของดั่ง Ki-Young Yoon และคณะ [12] ที่คาน θ เท่ากับ 10, 20, 30 และ 90 องศา ตามลำดับ ใน Ki-Young Yoon และคณะ [12] คานที่ทำการศึกษากำหนดมีความยาวตามแนวโค้งของคานที่ 5.12 m ดังนั้นรัศมีตามแนวโค้งของคานที่ θ เท่ากับ 10, 20, 30 และ 90 องศา มีค่าไม่เท่ากันโดยที่คานที่ θ น้อย มีรัศมีตามแนวโค้งของคานมากกว่า คานที่ θ มีค่ามาก ดังนั้นคานที่ θ เท่ากับ 10 องศา มีรัศมีความโค้งของคานมากกว่า คานที่ θ เท่ากับ 20 องศา คานที่ θ เท่ากับ 20 องศา มีรัศมีความโค้งของคานมากกว่า คานที่ θ เท่ากับ 30 องศา และคานที่ทำมุมเท่ากับ 30 องศา มีรัศมีความโค้งของคานมากกว่า คานที่ θ เท่ากับ 90 องศา ทำให้การแบ่งเอลิเมนต์ของที่ θ ต่างๆกันมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งในงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] และงานวิจัยของ Awall และคณะ [3] มีการระบุไว้ว่า คานโค้งที่มีรัศมีของความโค้งของคานที่มีค่ามากกว่าจะมีค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั่นน้อยกว่าคานโค้งที่มีรัศมีของความโค้งของคานที่มีค่าน้อย ดังนั้นคานที่มีรัศมีความโค้งของคานที่มากจะมีความอ่อนไหวต่อความถี่ของการสั่นมากกว่าคานที่มีรัศมีความโค้งของคานที่น้อย เพื่อให้ได้ค่ามีความผิดพลาดจากงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] น้อยที่สุด จึงได้มีการแบ่งเอลิเมนต์ให้คานที่มีรัศมีความโค้งมากให้มีจำนวนเอลิเมนต์มากกว่า คานที่มีรัศมีความโค้งน้อย ซึ่งรายละเอียดการแบ่งเอลิเมนต์ของที่ θ เท่ากับ 10, 20, 30 และ 90 องศา ได้อธิบายไว้ที่ด้านล่าง

คานที่ θ เท่ากับ 10 องศา เอลิเมนต์เป็นแบบ Shell ชนิดสี่เหลี่ยมมี 4 node ขนาดของเอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 260 และแต่ละ node มี 5 DOF โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 102 เอลิเมนต์ 510 DOF รูปที่ 4.12 แสดงคาน θ เท่ากับ 10 องศา ก่อนเกิดการสั่น รูปที่ 4.13 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 10 องศา ที่เกิดการสั่นนอกระนาบ (out of plane)

รูปที่ 4.12 คาน θ เท่ากับ 10 องศารูปที่ 4.13 คาน θ เท่ากับ 10 องศา (204.51 Hz)

คานที่ θ เท่ากับ 20 องศา เอลิเมนต์เป็นแบบ shell ชนิดสี่เหลี่ยมมี 4 node ขนาดของเอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 200 และแต่ละ node มี 5 DOF โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 156 เอลิเมนต์ 780 DOF รูปที่ 4.14 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 20 องศา ก่อนเกิดการสั่น รูปที่ 4.15 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 20 องศา ที่เกิดการสั่นนอกระนาบ (out of plane)

รูปที่ 4.14 คาน θ เท่ากับ 20 องศารูปที่ 4.15 คาน θ เท่ากับ 20 องศา (184.47 Hz)

คานที่ θ เท่ากับ 30 องศา เอลิเมนต์เป็นแบบ Shell ชนิดสี่เหลี่ยมมี 4 Node ขนาดของเอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 85 และแต่ละ node มี 5 DOF โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 360 เอลิเมนต์ 1800 DOF รูปที่ 4.16 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 30 องศา ก่อนเกิดการสั่น รูปที่ 4.17 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 30 องศา ที่เกิดการสั่นนอกระนาบ (out of plane)

รูปที่ 4.16 คาน θ เท่ากับ 30 องศารูปที่ 4.17 คาน θ เท่ากับ 30 องศา (158.83 Hz)

ในกรณีคานที่ θ เท่ากับ 90 องศา การแบ่งเอลิเมนต์มีความแตกต่างจากกรณีของ คานที่ θ เท่ากับ 10, 20 และ 30 องศา ตามลำดับ โดยคานที่ θ เท่ากับ 90 องศา ยังคงใช้เอลิเมนต์ที่เป็นแบบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shell ชนิดสี่เหลี่ยมมี 5 node ต่อ 1 เอลิเมนต์ แต่ไม่ได้ใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กโดยทำการเลือกเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่โดยให้มีจำนวนเอลิเมนต์ใกล้เคียงจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] และให้ค่าความถี่ทำให้เกิดการสั่นนอกระนาบมีความผิดพลาดจากงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] น้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัย Ki-Young Yoon และคณะ [12] ใช้จำนวนเอลิเมนต์ 12 เอลิเมนต์ และในการใช้โปรแกรม Evolution FEA ได้ใช้เอลิเมนต์ขนาด 1,200 จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 24 เอลิเมนต์ 120 DOF รูปที่ 4.18 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 90 องศา ก่อนเกิดการสั่น รูปที่ 4.19 แสดงคานที่ θ เท่ากับ 90 องศา ที่เกิดการสั่นนอกระนาบ (out of plane)



รูปที่ 4.18 คาน θ เท่ากับ 90 องศา
Hz)

รูปที่ 4.19 คาน θ เท่ากับ 90 องศา (63.20

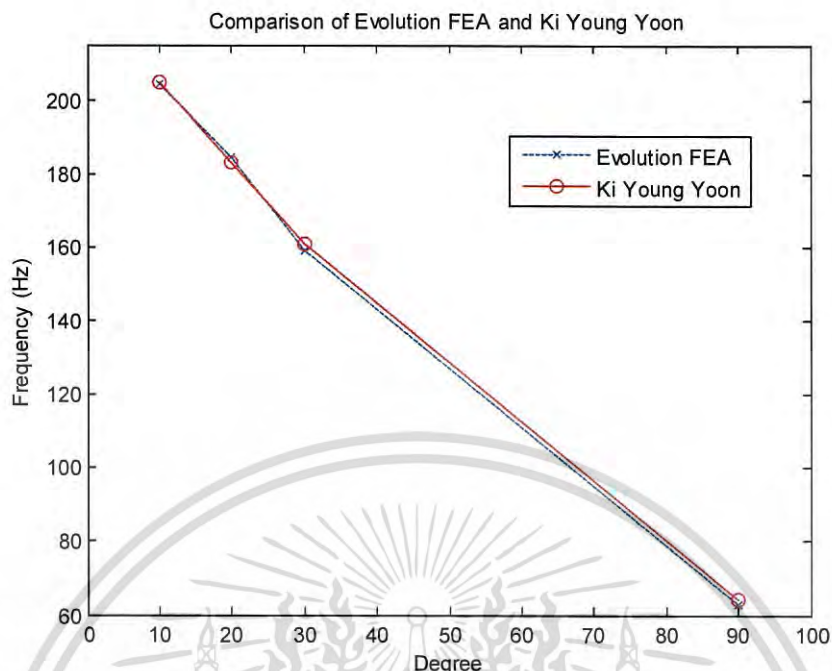
Hz)

4.2.2.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12]

ผลการศึกษากการสั่นนอกระนาบ (out of plane) ของคานโค้งในงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] ด้วยการใช้โปรแกรม Evolution FEA เพื่อทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของโปรแกรม Evolution FEA กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนในโดย Ki-Young Yoon และคณะ [12] ในงานวิจัยเรื่อง Natural frequencies of thin-walled curved beams และผลลัพธ์ที่ได้โดยการ ใช้โปรแกรม Evolution FEA กับผลการศึกษาของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] ได้แสดงในตารางที่ 4.5 และในรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของคานโค้งที่ถูกยึดแบบ Pinned supported

Angle (θ) (degree)	Present (Hz)	Ki-Young Yoon (Hz)	Difference (%)
10	204.51	204.70	1.59
20	184.47	183.20	0.69
30	158.83	160.90	1.28
90	63.02	64.10	1.68



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคานโค้ง

ผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] ระบุว่าผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อคานที่ θ เท่ากับ 10 องศา θ เท่ากับ 20 องศา และ θ เท่ากับ 30 องศา ได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดที่เล็กลงตาม θ ที่เพิ่มขึ้นทำให้คานโค้งมีจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้นตาม θ เพื่อให้ค่าความถี่ที่ได้มีความผิดพลาดจากการใช้โปรแกรม โปรแกรม Evolution FEA มีความผิดพลาดจาก งานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] น้อยที่สุด โดยจำนวน shell เอลิเมนต์ เมื่อคานที่ θ เท่ากับ 10 องศา θ เท่ากับ 20 องศา θ เท่ากับ 30 องศา มีประมาณ 102 เอลิเมนต์ 156 เอลิเมนต์ และ 360 เอลิเมนต์ ตามลำดับ และผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] สูงสุดไม่เกิน 1.58 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อคานที่ θ เท่ากับ 90 องศา ในวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนขนาดของ shell element ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยได้ทำการปรับขนาดของ shell element เท่ากับ 1,200 เพื่อให้จำนวนของเอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] และอีกเหตุผลหนึ่งต้องการทดสอบว่าเมื่อเอลิเมนต์มีขนาดใหญ่ขึ้นการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีความผิดพลาดจากงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] มากเพียงใดเนื่องจากในงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] ระบุว่า โค้ดคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นสามารถให้คำตอบได้ใกล้เคียงค่าตามทฤษฎีมาก (โปรแกรม Evolution FEA ยังมีข้อจำกัดของเอกสาร โปรแกรมที่สามารถสร้างเอลิเมนต์ได้ไม่เกิน 10,000 เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ชิ้นงานขนาดใหญ่ ถ้าค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอลิเมนต์มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้จำนวนเอลิเมนต์เกิน 10,000 เอลิเมนต์) จากการใช้ shell element เท่ากับ 1,200 ทำให้มีจำนวน shell เอลิเมนต์ 24 เอลิเมนต์ และในงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] ใช้เอลิเมนต์จำนวน 12 เอลิเมนต์ และผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยของ Young Yoon และคณะ [12] สูงสุดไม่เกิน 1.68 เปอร์เซ็นต์

4.2.3 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Virginia Transportation Research Center (VTRC)

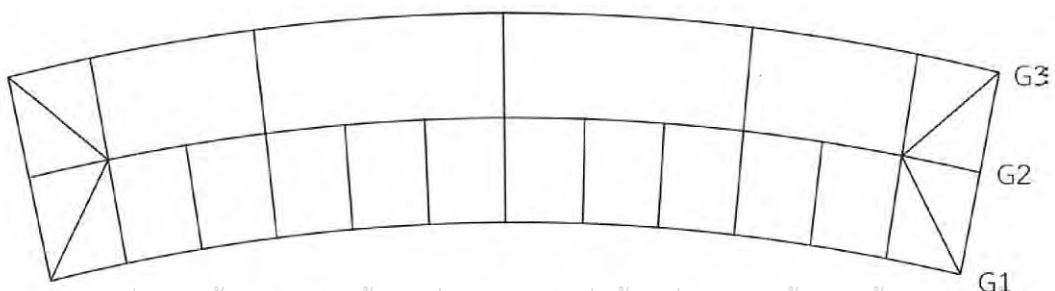
การทดสอบการสั่นอย่างอิสระของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอของนักวิจัยจาก Virginia Transportation Research Center (VTRC) ที่ระบุในงานวิจัยของ H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] ซึ่งรายละเอียดรูปร่างของโครงสร้างสะพานในงานวิจัยของ VTRC ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.21 และรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติวัสดุแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 แสดงรายละเอียดของ girder

Location	Flanges $b_f \times t_f$ (mm)	Web $h_w \times t_w$ (mm)
G1	406 x 27	1219 x 11
G2	508 x 30	1219 x 13
G3	610 x 57	1219 x 13

ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดของ cross frame

Cross Frame	Diameter (mm)	Thickness (mm)	I_x (mm ⁴)	I_z (mm ⁴)
Pipe	127	6.4	4422721	8845442



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

Part	Material	Density (kg/m ³)	Poisson's Ratio	Elastic modulus ($\times 10^9$ N/m ²)
girder	ASTM A 572 grade 50	7850	0.29	204
cross frame	ASTM A 572 grade 50	7850	0.29	204

แบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ใช้ในงานวิจัยของ Awall และคณะ [3], H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] และ Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] ประกอบด้วยเอลิเมนต์ชนิด shell เอลิเมนต์ shell เอลิเมนต์กับส่วนของคานที่เป็น web และ flange และ H.Maneetes [18] ใช้ beam เอลิเมนต์กับส่วนของโครงสร้างที่เป็น cross frame และ bottom bracing โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการเลือกใช้ shell element และการเลือกใช้ beam element ในงานวิจัยของ Awall และคณะ [3], H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] และ Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] ได้ทำการอธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.4 การแบ่งเอลิเมนต์ บทที่ 5 ของวิทยานิพนธ์นี้

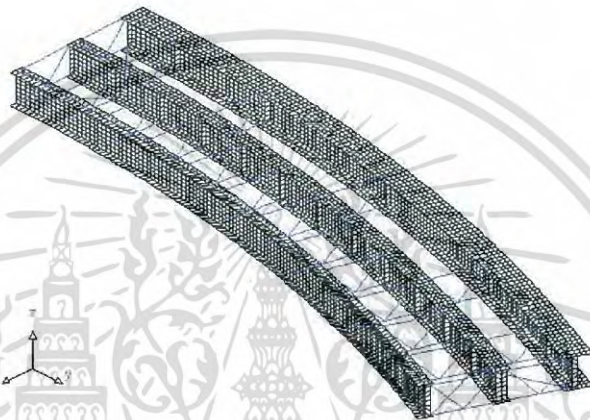
เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของโปรแกรม Evolution FEA กับการทดสอบจริงของนักวิจัย VTRC เอลิเมนต์ในแบบจำลองของโครงสร้างสะพานได้ใช้เอลิเมนต์ชนิด shell เอลิเมนต์และ beam เอลิเมนต์ ตามที่ได้มีการใช้กันในงานวิจัยของ Awall และคณะ [3], H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] และ Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] โดยใช้ shell เอลิเมนต์กับส่วนของคานที่เป็น web และ flange และใช้ beam เอลิเมนต์กับส่วนของโครงสร้างที่เป็น cross frame และ bottom bracing เหมือนในงานวิจัยของ H. Maneetes โดยขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้มีขนาด 200 และมีจำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 6,300 เอลิเมนต์ 33,000 DOF

4.2.3.1 ผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA

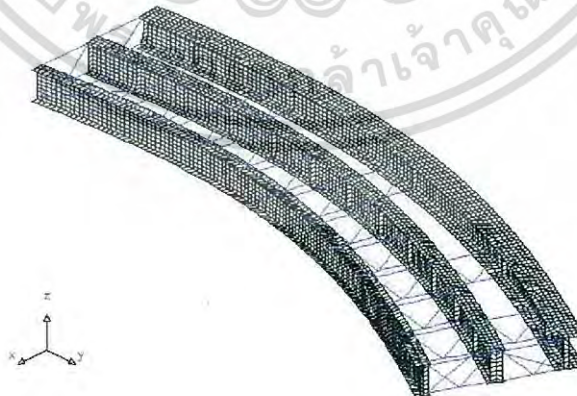
ผลที่ได้จากการศึกษาความถี่ธรรมชาติของการสั่นโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กค้ำหน้า ตัดรูปตัวโอโดยการใช่โปรแกรม Evolution FEA เพื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบการสั่นกับสร้างโครงสร้างสะพานของจริงของนักวิจัยจาก VTRC ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Evolution FEA และการทดสอบของ VTRC แสดงในตารางที่ 4.9 โดยที่รูปที่ 4.22 แสดงรูปร่างของสะพานก่อนเกิดการสั่นสะเทือน รูปที่ 4.23 แสดงการรูปร่างของสะพานที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นครั้งแรก รูปที่ 4.24 แสดงการซ้อนทับกันของรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 เพื่อเปรียบเทียบรูปร่างของสะพานเพื่อแสดงให้เห็นภาพก่อนการสั่นและขณะเกิดการสั่น

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบความถี่การสั่นสะเทือนของสะพานที่มีคานโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ

Mode	Evolution Fea (Hz)	VTRC (Hz)	Difference (%)
1	2.94	2.90	1.37

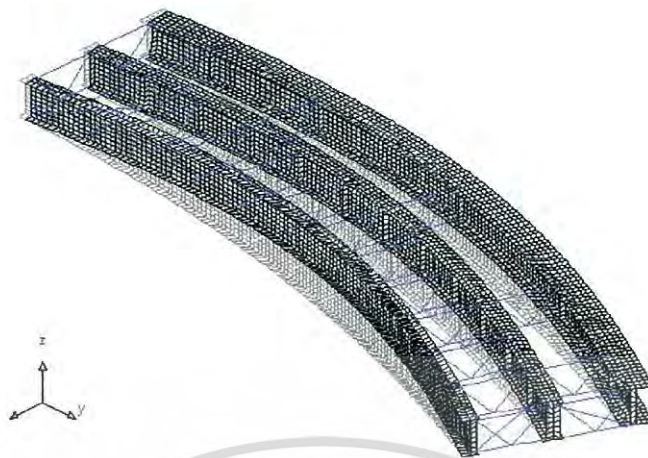


รูปที่ 4.22 แสดงรูปร่างของสะพานก่อนเกิดการสั่น



รูปที่ 4.23 แสดงการรูปร่างของสะพานที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นครั้งที่ความถี่ 2.94 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงการซ้อนทับกันของรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

4.2.3.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยโปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ VTRC

ผลการศึกษาความถี่ธรรมชาติของการสั่นโครงสร้างสะพานโค้งด้วยโปรแกรม Evolution FEA เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการทดลองได้โดยนักวิจัยของ Virginia Transportation Research Center (VTRC) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ด้วยการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง โดยมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง 1.37 เปอร์เซ็นต์

4.3 สรุปผลการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม

การศึกษาความแม่นยำของโปรแกรม Evolution FEA เพื่อนำก่อนนำมาใช้ในการวิเคราะห์การสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างของสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโครงหน้าตัดรูปตัวไอ โดยการใช้โปรแกรม Evolution FEA ทำการศึกษาการกับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] งานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] และงานทดสอบจริงของนักวิจัย VTRC ที่ระบุไว้ในงานวิจัยของ H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] และผลลัพธ์จากงานวิจัยทั้ง 3 งานวิจัยเป็นดังนี้

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Nitipong และ Kiatfa [17] ที่ได้ใช้โปรแกรมทางพาณิชย์ที่ชื่อว่า ANSYS ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเหมือนกัน ซึ่งพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีความคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์ของงานวิจัย Nitipong และ Kiatfa [17] สูงสุดไม่เกิน 1.21 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA กับงานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จาก

งานวิจัยของ Ki-Young Yoon และคณะ [12] ที่ได้จากการเขียนโค้ดทางคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใช้ด้วย Fortran 77 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีความคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์ของงานวิจัย Ki-Young Yoon สูงสุดไม่เกิน 1.67 เปอร์เซ็นต์ และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยใช้โปรแกรม Evolution FEA เปรียบเทียบกับการทดสอบจริงของนักวิจัย VTRC ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Evolution FEA มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริงของนักวิจัย VTRC 1.37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้นี้ทำให้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

โปรแกรม Evolution FEA มีความสามารถในการวิเคราะห์การสั่นของคานแผ่นบางได้ถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับโปรแกรมทางพาณิชย์ที่ชื่อว่า ANSYS โดยคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยการใช้ ANSYS ไม่เกิน 1.21 เปอร์เซ็นต์ สามารถวิเคราะห์การสั่นของคานโค้งหน้าตัดรูปตัวไอได้ถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนโดยใช้ Fortran 77 โดยคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ที่ใช้ Fortran 77 ไม่เกิน 1.21 เปอร์เซ็นต์ และคลาดเคลื่อนจากการทดสอบการสั่นของโครงสร้างสะพานจริง 1.37 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโปรแกรม Evolution FEA มีความน่าเชื่อถือเพียงพอในการนำไปวิเคราะห์การสั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอได้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

วิธีการ CAD (Computer Aid Design) ไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากการคำนวณวิธีนี้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีหน่วยความจำขนาดใหญ่ และการประมวลผลที่รวดเร็ว ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆ โดยวิธีการ CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการการวิเคราะห์ปัญหาการเกี่ยวกับการการสั่นของเกอร์เตอร์สะพาน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ชื่อว่า Evolution FEA เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมด (mode shape) โดยกระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. กระบวนการขั้นต้น (pre-processor)
2. กระบวนการวิเคราะห์ (analysis)
3. กระบวนการขั้นตอนสุดท้าย (post-processor)

ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

5.2 กระบวนการขั้นต้น (pre-processor)

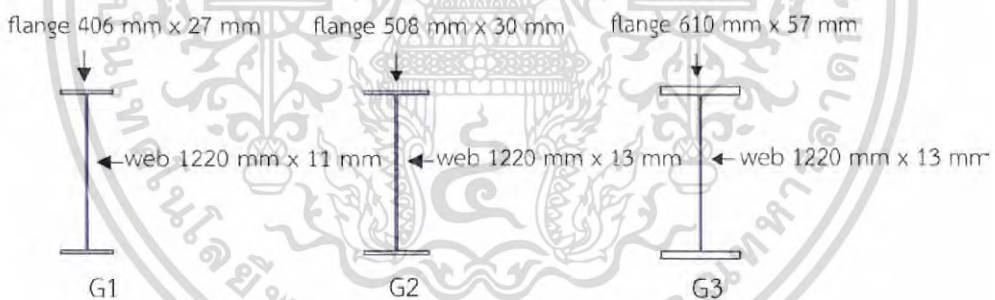
กระบวนการขั้นต้น (pre-processor) เป็นกระบวนการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จากรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหา จากนั้นประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนวิเคราะห์ปัญหา การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์อันประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากบนรูปร่างลักษณะของปัญหาที่กำหนดให้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ตามปกติหารูปร่างของปัญหามีความซับซ้อนการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้เวลานาน ซึ่งประกอบด้วยการสร้างจุด เส้นตรง เส้นโค้ง และพื้นผิว และได้ถูกเก็บไว้ในรูปของสมการทางเรขาคณิตในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถสร้างเอลิเมนต์ทั้งขนาดและจำนวนต่างๆ กันได้ โดยรูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ขึ้นยังเสมือนรูปร่างต้นแบบของจริงมากที่สุด รูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์ยังประกอบด้วยหมายเลขของจุดต่อ (node) หมายเลขของเอลิเมนต์และข้อมูลอื่นที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป รายละเอียดต่างๆ จำนวนมากเหล่านี้ปกติจะไม่แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ยกเว้นผู้ใช้ต้องการให้แสดงเพื่อตรวจสอบหลังจากการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เสร็จสิ้นลงแล้ว ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอันอาจประกอบด้วย การกำหนดค่าให้กับบางจุดต่อของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของหรือใกล้เคียงกับของจริงให้มากที่สุดจึงจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความเป็นจริงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

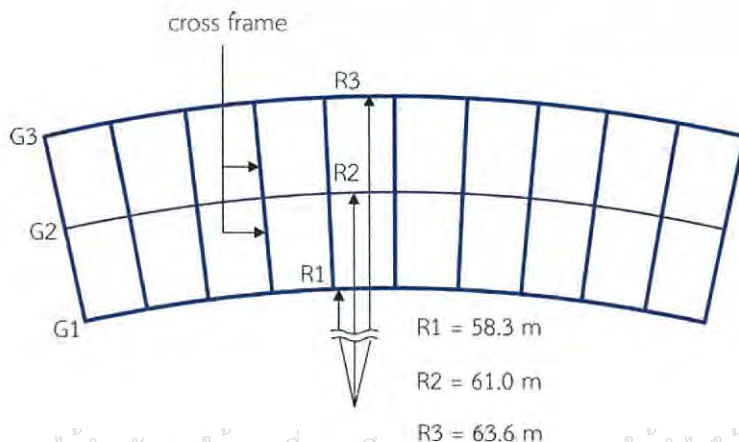
จริง รายละเอียดของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 การสร้างแบบจำลองของเกอร์เตอร์

ในการศึกษาการถล่มธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เตอร์เริ่มจากการสร้างแบบจำลองแบบสามมิติของโครงสร้างเกอร์เตอร์ซึ่งประกอบด้วย เกอร์เตอร์ cross-frame และ ค้ำยันให้สอดคล้องให้สอดคล้องกับทางกายภาพมากที่สุด โครงสร้างเกอร์เตอร์สะพานที่ใช้ในวิจัยนี้ได้มีพื้นฐานมาจากงานวิจัยของ The Data of A Bridge Supported in Curved Steel Bridge Research Project [15] โครงสร้างเกอร์เตอร์สะพานประกอบด้วย เกอร์เตอร์หน้าตัดรูปตัวไอสาม เกอร์เตอร์เชื่อมต่อกันด้วย cross frame ขนาดเกอร์เตอร์มีรายละเอียดดังนี้ เกอร์เตอร์ทั้งสามวางห่างกันตามแนวรัศมี 2.67 เมตร เกอร์เตอร์ที่วางอยู่ด้านนอกสุด (G3) มีรัศมีความโค้ง 63.63 เมตร เกอร์เตอร์ที่วางอยู่ตรงกลาง (G2) มีรัศมีความโค้ง 60.96 เมตร และเกอร์เตอร์ที่วางอยู่ด้านในสุด (G1) มีรัศมีความโค้ง 58.29 เมตร ระยะความยาวตามแนวโค้งของ G1, G2 และ G3 คือ 26.2 เมตร, 27.4 เมตร และ 28.6 เมตร ตามลำดับ ขนาดหน้าตัดของเกอร์เตอร์ทั้งสามเกอร์เตอร์อธิบายในรูปที่ 5.1 และลักษณะการวางตัวของเกอร์เตอร์ทั้ง 3 เกอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

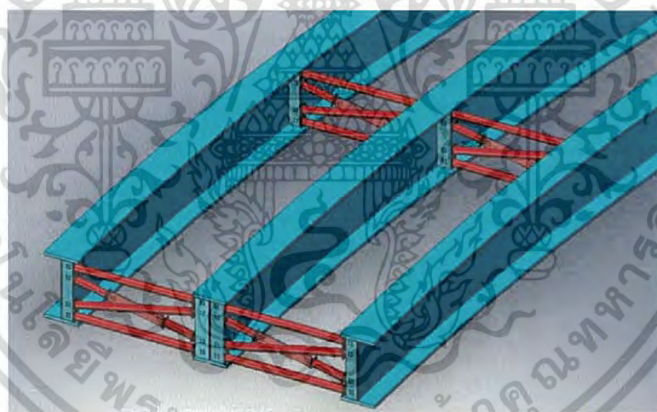


รูปที่ 5.1 ขนาดหน้าตัด cross frame

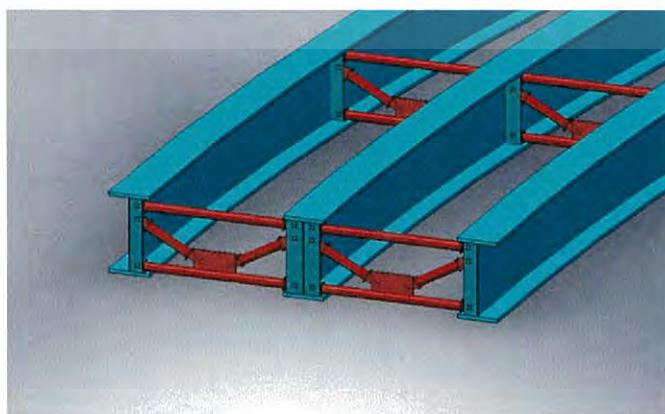


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 5.2 ลักษณะการวางตัวของเกอร์เตอร์

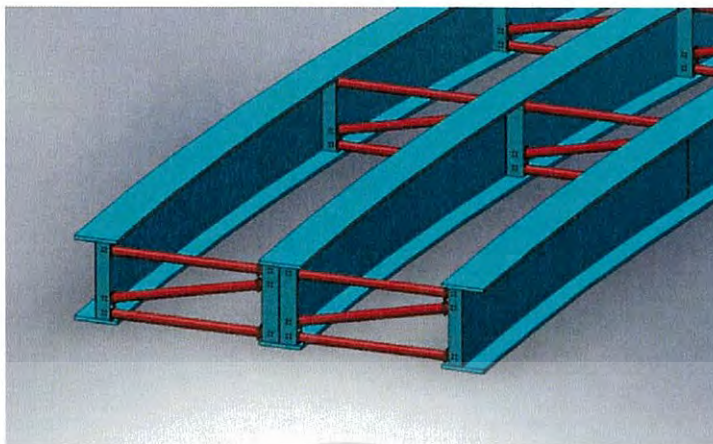
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของ cross frame และการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของสะพานที่มีช่องที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งชนิดของ cross frame ที่นำมาทำการวิจัยประกอบด้วย cross frame จำนวน 3 ชนิด ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) โดยที่ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) เป็น cross frame ที่นิยมใช้กันมากในทุกๆ รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกาโดยระบุไว้ในงานวิจัยของ Weihua Wang [16] และ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] และในส่วน cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) เป็น cross frame แบบใหม่ที่ได้เริ่มมีการวิจัยในมหาวิทยาลัยเท็กซัสที่ Austin (University of Texas at Austin) ตามที่ระบุในงานวิจัยของ Weihua Wang [16] ซึ่งลักษณะรูปร่างของ cross frame ทั้งสามชนิดดังแสดงในรูปที่ 5.3-5.5 และรูปร่างของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ขนาดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบกันเป็น cross frame ทั้ง 3 ชนิด และ bottom bracing แสดงในตารางที่ 5.1



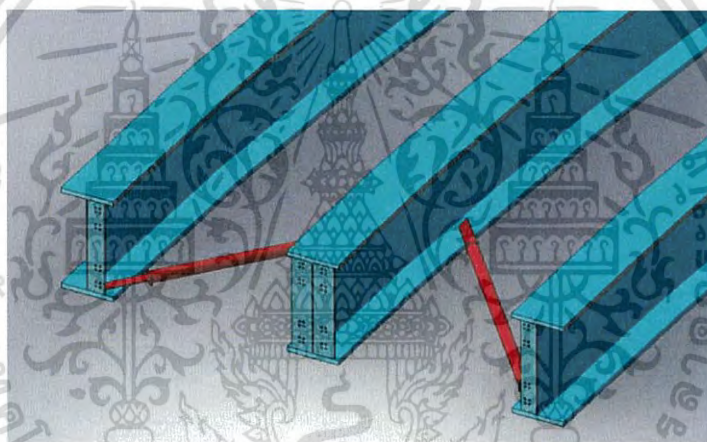
รูปที่ 5.3 cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 5.4 cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type)



รูปที่ 5.6 ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing)

ตารางที่ 5.1 ขนาดของ cross frame

Cross frame	Diameter [mm]	Thickness [mm]
Pipe	127	6.4

5.2.2 กำหนดสมบัติวัสดุให้กับเกอร์เตอร์

หลังจากสร้างแบบจำลองของโครงสร้างเกอร์เตอร์เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปได้แก่การกำหนดสมบัติของวัสดุให้กับโครงสร้างเกอร์เตอร์และ cross frame วัสดุที่ใช้ทำเกอร์เตอร์และ cross frame มีคุณสมบัติเป็นแบบ homogenous และ isotropic material อยู่ในช่วง elastic วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

Model part	Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Girder	Carbon steel	7850	200	0.3
Cross frame	High strength steel	7850	204	0.3

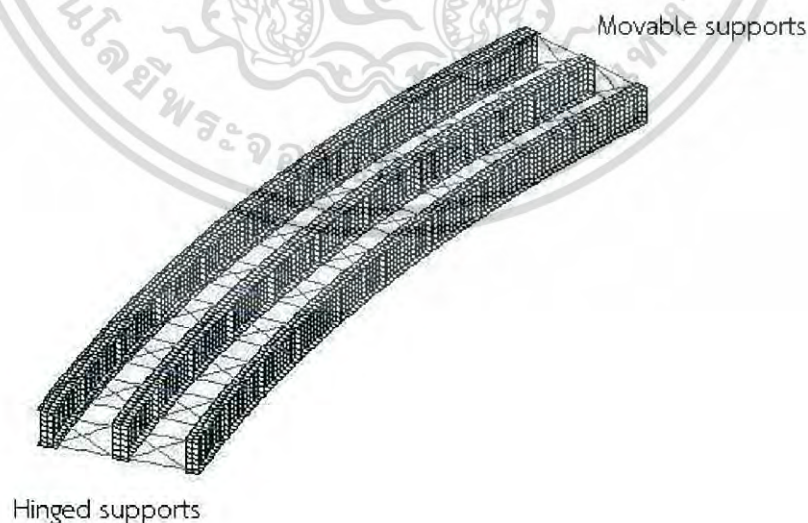
5.2.3 การกำหนดเงื่อนไขสถานะขอบ

เงื่อนไขการจับยึดที่ปลายของเกอร์เตอร์เป็นแบบ hinged และ roller ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และรายละเอียดของการจับยึดอธิบายในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สถานะเงื่อนไขขอบของเกอร์เตอร์

Type	u	v	w	θ_1	θ_2	θ_3
Hinged	Fix	Fix	Fix	Free	Free	Free
Movable	Fix	Fix	Free	Free	Free	Free

หมายเหตุ u, v, w การกระจัดในแนวแกน x, y, z
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ การหมุนรอบแกน x, y, z



รูปที่ 5.7 สถานะเงื่อนไขขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

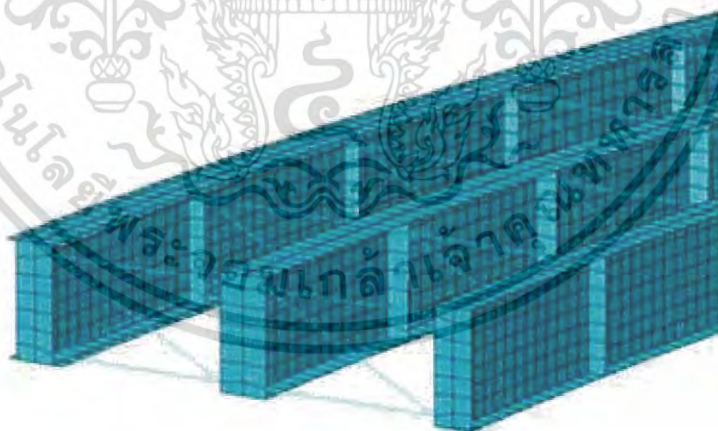
5.2.4 การแบ่งเอลิเมนต์

ในขั้นตอนนี้แบบจำลองที่สร้างไว้จะถูกนำมาแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ การวิเคราะห์ปัญหาการสั่นของโครงสร้างสะพานที่มีคานเป็นเหล็กหน้ารูปตัวไอโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ หลายๆ งานวิจัยได้มีการใช้ shell element กับแบบจำลองของโครงสร้างสะพานในส่วนของเกอร์เตอร์ และ beam element กับแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนที่เป็น cross frame และค้ำยันด้านล่าง ยกตัวอย่างเช่น Robiul Awall และคณะ [3] Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] และ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] ได้ใช้ shell element กับส่วนของเกอร์เตอร์ โดยงานวิจัยของ Robiul Awall ได้ใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งก่อนทำการวิจัย Robiul Awall ได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้โดยเทียบกับการทดลองของ Kim และคณะ ตามที่ Robiul Awall กล่าวข้างในงานวิจัย โดยผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้เอลิเมนต์ชนิด shell element กับส่วนของ girder ให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองของ Kim และคณะ โดยค่าความถี่ที่ได้จากงานวิจัยของ Robiul Awall มีค่า 2.45 Hz และค่าความถี่จากการทดลองของ Kim และคณะมีค่า 2.55 Hz ซึ่งทำให้ Robiul Awall และคณะ [3] สรุปว่า แบบจำลองและเอลิเมนต์ที่ใช้ (shell element) สามารถนำมาใช้กับแบบจำลองของสะพานได้ ส่วนในงานวิจัยของ Canh Tuan Nguyen และคณะ [14] ได้ทำการสร้างสมการเพื่อนำวิเคราะห์การบิดตัวของสะพานที่เป็นคานเหล็กตรงหน้าตัดรูปตัวไอด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีพื้นฐานมาจากสมการลากรางจ์ โดยทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของสมการกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม ABAQUS ที่ใช้เอลิเมนต์ชนิด shell กับส่วนของ girder และเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีและผลที่ได้ระบุวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สมการของ Canh Tuan Nguyen มีค่าที่ใกล้เคียงกับ ผลการวิเคราะห์โดยการใช้โปรแกรม ABAQUS ที่ใช้เอลิเมนต์ชนิด shell และผิดพลาดจากทางทฤษฎี 2.9 เปอร์เซ็นต์ทำให้ Canh Tuan Nguyen สรุปว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องเป็นอย่างดี และในกรณีได้บอกเป็นนัยว่า เอลิเมนต์ชนิด shell สามารถนำมาใช้กับส่วนของ girder ได้เป็นอย่างดี และงานวิจัยสุดท้ายที่งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการที่ใช้ shell element กับส่วนของเกอร์เตอร์ (girder) คืองานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] โดยที่ H.Maneetes และ D.G. Linzell ใช้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์การสั่นของสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งสะพานที่นำมาใช้ในการทำแบบจำลองมาจากงานวิจัยของ The Data of A Bridge Supported in Curved Steel Bridge Research Project [15] และได้ใช้เอลิเมนต์ชนิด shell element กับส่วนของเกอร์เตอร์สะพาน ซึ่ง H.Maneetes และ D.G. Linzell ได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและชนิดของ element โดยทำการเปรียบกับการทดลองการทดสอบจริง ซึ่งผลลัพธ์ค่าความถี่ที่ได้จากงานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell คือ 2.46 Hz และค่าที่ได้จากการทดลองจริงเท่ากับ 2.90 ซึ่งคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม H.Maneetes และ D.G. Linzell ได้พิจารณาว่าความคลาดเคลื่อน 15 เปอร์เซ็นต์ เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผิดเพี้ยนไปจากเอกสารต้นฉบับ ค่าที่สามารถยอมรับได้ จึงได้ตัดสินใจเลือกใช้ shell element กับส่วนของเกอร์เตอร์ (girder) ไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะพานตลอดงานวิจัย ส่วนการใช้เอลิเมนต์ชนิด beam element กับส่วนของ cross frame และค้ำยัน (bracing) ที่ขึ้นส่วนของ cross frame ค้ำยัน (bracing) ที่ทำขึ้นมาจากท่อได้มีการระบุไว้ในงานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18]

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับศึกษาตัวแปรต่างๆ ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบสามมิติ (3D) โดยเอลิเมนต์ของ flange, web และ stiffener เป็นแบบ shell element ชนิด 4 node 5 degree of freedom (S4R5) และเอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองของ cross frame และ bracing เป็นแบบ beam element ชนิด 2 node 6 degree of freedom (B31) จำนวนของทั้งหมดเอลิเมนต์ประมาณ 6,300 เอลิเมนต์ 33,000 degree

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของโครงสร้างของสะพาน ชนิดขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] โดยงานวิจัยได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ The Data of A Bridge Supported in Curved Steel Bridge Research Project [15] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีใกล้เคียงกับการทดสอบจริงซึ่งคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง 1.37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 แบบจำลองของเกอร์เตอร์ที่ประกอบ cross frame ชนิด x-type ที่ไม่มีการเสริม bottom bracing ถูกใช้เป็นโครงสร้างเกอร์เตอร์พื้นฐานในงานวิจัยนี้ และรายละเอียดของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 รายละเอียดของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง

5.3 กระบวนการวิเคราะห์ (analysis)

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปคือการประมวลผล ซึ่งเป็นการกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ที่ต้องการสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ

ข้อมูลต่างๆ ของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ในกระบวนการขั้นต้น (pre-processor) จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ (analysis) ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับปัญหานั้นสำหรับทุกๆ เอลิเมนต์ ก่อนที่จะนำมาประกอบกันเข้าเป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ จากนั้นจึงแก้ระบบสมการรวมขนาดใหญ่ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้น และขนาดของระบบสมการรวมขนาดใหญ่

5.4 กระบวนการขั้นตอนสุดท้าย (post-processor)

ผลลัพธ์ข้อมูลต่างๆ ของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ในกระบวนการขั้นต้น (pre-processor) จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ (analysis) ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ประกอบด้วยตัวเลขจำนวนมาก ซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์กราฟิก (computer graphics) ซึ่งประกอบด้วย กราฟิกส์ และแอนิเมชัน (animation) เพื่อให้เข้าใจผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งรูปแบบของผลลัพธ์นั้นมีหลายชนิด เช่น การแสดงด้วยแถบรั้วสี (fringe plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นระดับ (contour lines) เป็นต้น

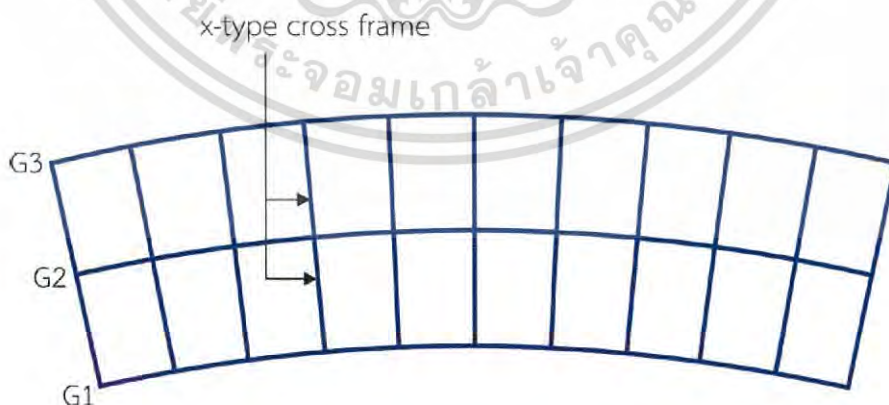
บทที่ 6

ผลการคำนวณด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

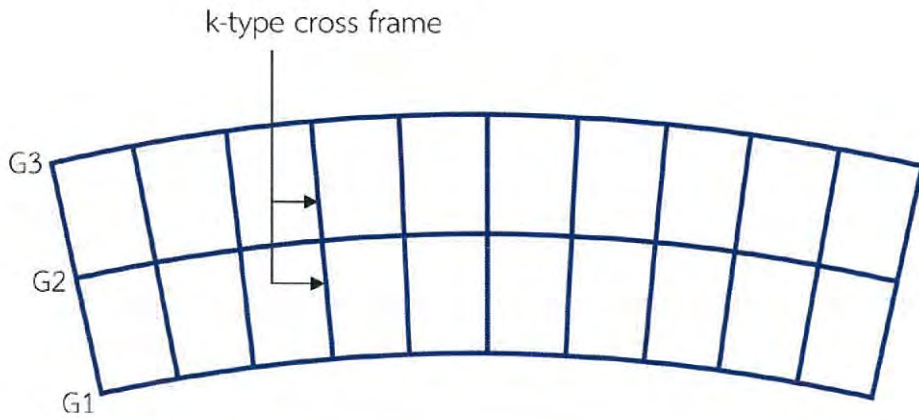
ในบทนี้กล่าวถึงผลที่ได้รับจากการจำลองการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างเกอร์เตอร์ด้วยความถี่ธรรมชาติ ด้วยวิธีการทาง CAD ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Evolution FEA ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาคือ ชนิดของ cross frame การเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) การเสริม cross frame

6.1 ผลของชนิดของ cross frame

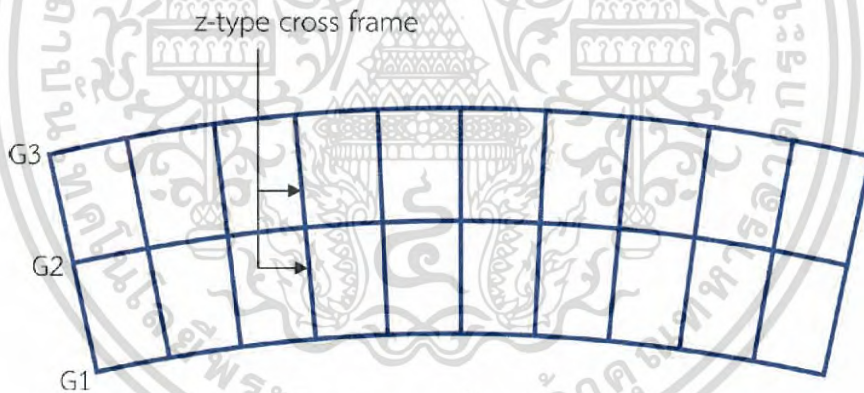
ในการศึกษาชนิดของ cross frame ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder สะพาน โดย cross frame ที่นำมาทำการศึกษามีสามชนิด ได้แก่ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) ซึ่ง cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) เป็น cross frame ชนิดพื้นฐานที่มีการยอมรับและนิยมใช้กันมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วน cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) เป็น cross frame เริ่มทำการวิจัยในมหาวิทยาลัยเท็กซัส (University of Texas) [40] จำนวนของ cross frame ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างของ girder สะพานมีจำนวนทั้งหมด 11 คู่ โดยลักษณะของการวางตัวของ cross frame ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างสะพานดังแสดงในรูปที่ 6.1-6.3



รูปที่ 6.1 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์จำนวน 11 คู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



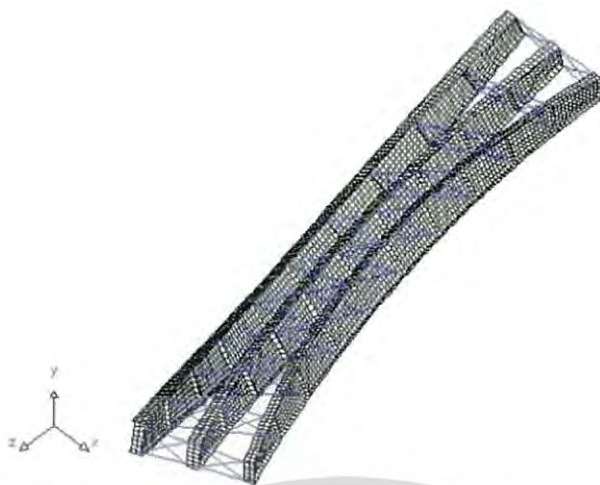
รูปที่ 6.2 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเคจำนวน 11 คู่



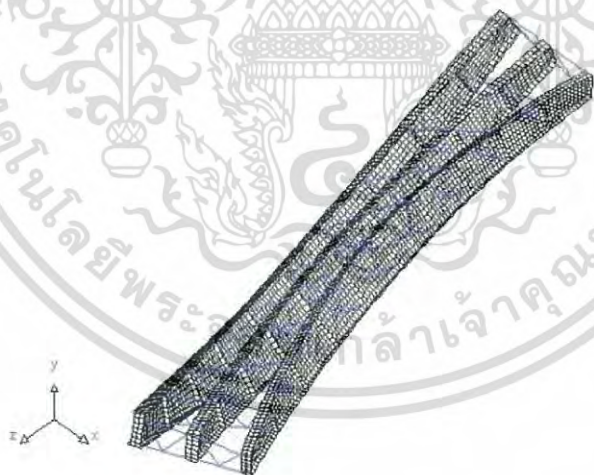
รูปที่ 6.3 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวแซดจำนวน 11 คู่

ผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้าง girder สะพานที่ประกอบด้วย cross frame ซึ่งไม่มีการเสริม bracing ที่ด้านล่าง ที่แสดงการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวในโหมดที่ 1 ของโครงสร้าง girder สะพาน แสดงในรูปที่ 6.4-6.6 และค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นโหมดที่ 1 ที่ทำให้เกิดการบิดตัวแสดงในตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

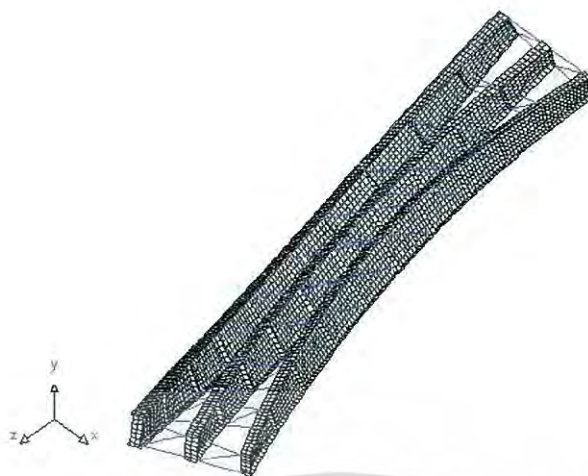


รูปที่ 6.4 โหมดที่ 1 ของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type)



รูปที่ 6.5 โหมดที่ 1 ของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 โหมดที่ 1 ของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type)

ตารางที่ 6.1 ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์ที่ไม่มี bottom bracing

Mode	ความถี่ธรรมชาติ (Hz) ของ girder ที่ประกอบด้วย		
	x-type cross frame	k-type cross frame	z-type cross frame
1 st Torsional	4.04	3.99	3.98

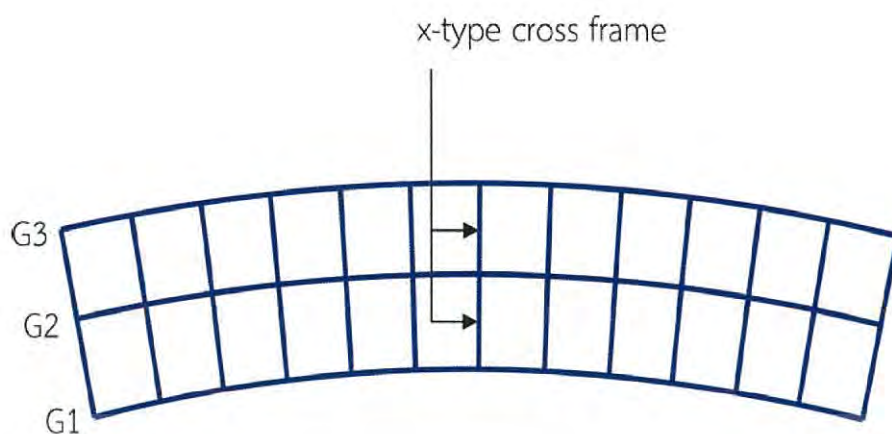
ความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มีค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) โดยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มีค่าสูงกว่าโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) ประมาณ 1.2 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสูงกว่า โครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) ประมาณ 1.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่มีพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนของ cross frame ทุกชนิดมีขนาดเท่ากัน ซึ่งผลลัพธ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ระบุว่า cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) กระจายความยืดหยุ่น (stiffness) ได้สูงกว่า cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และ cross frame (z-type) ชนิดรูปตัวแซด (z-type) โดยที่โครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder และ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มีน้ำหนักมากกว่าโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder ชนิดเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) ประมาณ 29 เพอร์เซ็นต์ และมีน้ำหนักมากกว่าโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย girder ชนิดเดียวกัน และ cross frame ชนิดรูปแซด (z-type) ประมาณ 35 เพอร์เซ็นต์

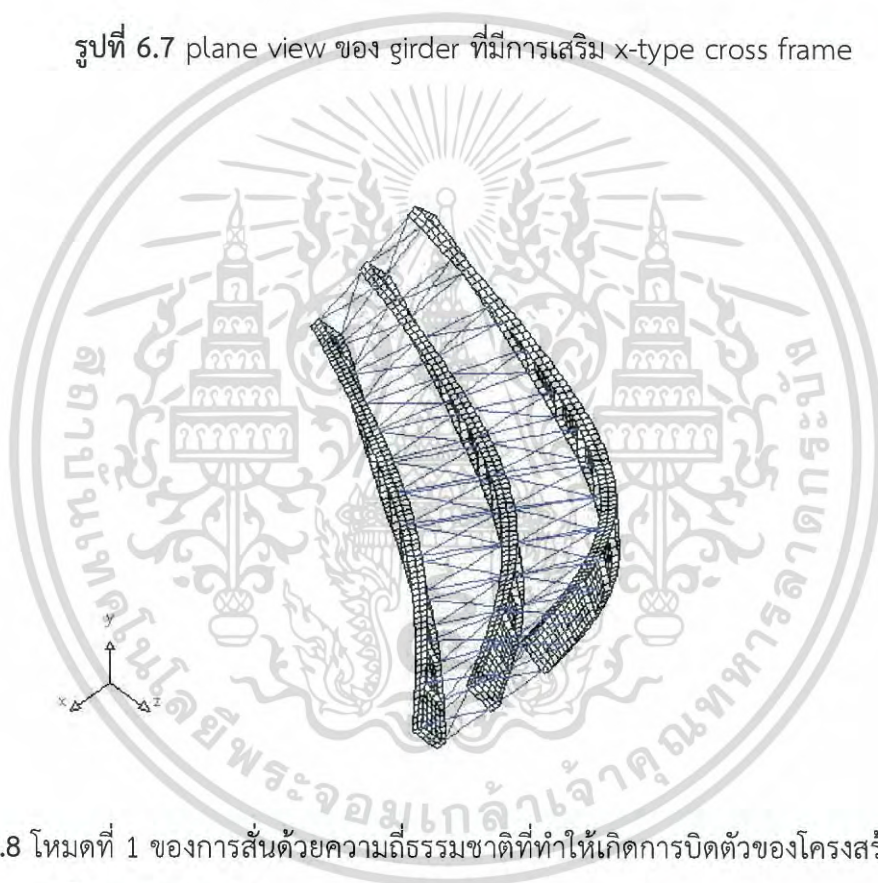
6.2 ผลของการเสริม cross frame (effects of additional cross frame)

การศึกษาผลของการเสริม cross frame ที่มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของโครงสร้างสะพาน curved steel I-girder bridge คือการศึกษาโครงสร้างของสะพานที่ประกอบ cross frame ตามปกติแล้วทำการเพิ่มปริมาณของ cross frame ให้กับโครงสร้างสะพานเดิมที่มี cross frame ประกอบอยู่แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกโครงสร้างสะพานที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) เพื่อเป็นตัวอย่างในการศึกษาผลของการเพิ่ม cross frame เนื่องจากการศึกษาจากในหัวข้อ 6.1 ผลของชนิดของ cross frame พบว่า cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ทำให้เกอ์เตอร์ของสะพานมีความต้านทานต่อการบิดตัวมากกว่า cross frame อีก 2 ชนิด ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการเลือก cross frame ชนิดที่ดีที่สุดมาเป็นตัวอย่างในการศึกษาผลของการเพิ่ม cross frame และในงานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] ได้ทำการวิเคราะห์การสั่นตามขวางของสะพานที่โครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งชนิดของ cross frame ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิดคือ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) โดยผลลัพธ์ที่ได้ในงานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] ระบุว่า cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสั่นตามขวางของสะพานมากกว่า cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และในงานวิจัยของ H.Maneetes และ D.G. Linzell [18] ได้เลือก cross frame รูปตัวเอกซ์ (x-type) เป็นตัวอย่างในการทดสอบกับโครงสร้าง girder ในกรณีที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับทิศทางของการวางตัวของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อการกระจัดของโครงสร้าง girder สะพานในแนวด้านข้าง

โครงสร้างของ girder ที่มีการเสริม cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ประกอบด้วยนี้มีจำนวน cross frame จำนวนทั้งหมด 13 คู่ เพิ่มขึ้นจากกรณีปกติที่ไม่มีการเสริม cross frame จำนวน 2 คู่ ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งของ cross frame ในโครงสร้าง girder สะพาน แสดงในรูปที่ 6.7 ผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แสดงการบิดตัวของโครงสร้าง girder สำหรับโหมดการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวอันดับที่ 1 ของเกอ์เตอร์ที่มีการเสริม cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) แสดงในรูปที่ 6.8 ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอ์เตอร์เนื่องจากการเสริม cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และในกรณีปกติที่ไม่มีการเสริม cross frame ชนิดรูปตัวตัวเอกซ์ (x-type) แสดงในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.7 plane view ของ girder ที่มีการเสริม x-type cross frame



รูปที่ 6.8 โหมดที่ 1 ของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง girder ที่เสริม cross frame

ตาราง 6.2 ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์ที่มีการเสริม cross frame

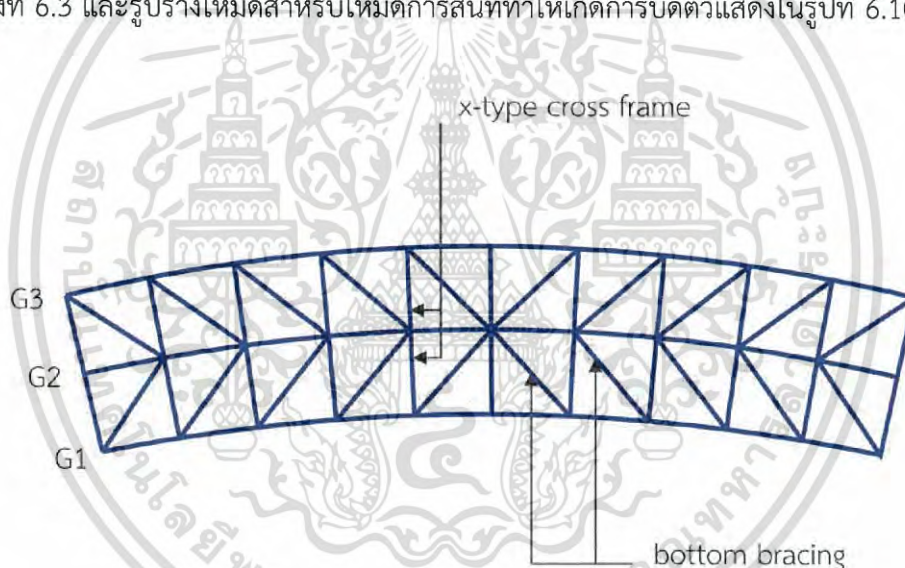
Mode	Natural frequencies (Hz) of girder composed of x-type cross frame	
	Original model	Additional x-type cross frame
1 st Torsional	4.04	4.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เตอร์ที่มีการเสริม cross frame รูปตัวเอกซ์ (x-type) มีค่าสูงกว่า เกอร์เตอร์ที่ไม่มีการเสริม cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

6.3 ผลของการเสริมค้ำยันด้านล่าง (effects of additional bottom bracing)

ผลของการเพิ่ม bottom bracing ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัว ถูกศึกษาโดยการทดสอบกับกรณีที่เป็นจำลองที่ด้วยประกอบ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) เพียงกรณีเดียว เป็นตัวอย่างในการศึกษาผลของการเสริมค้ำยันด้านล่าง โครงสร้าง girder ที่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) แสดงในรูปที่ 6.9 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขสำหรับความถี่ธรรมชาติของโหมดการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวอันดับที่ 1 ของสะพานชนิดพื้นฐานของการศึกษาที่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) และที่ไม่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง แสดงในตารางที่ 6.3 และรูปร่างโหมดสำหรับโหมดการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวแสดงในรูปที่ 6.10

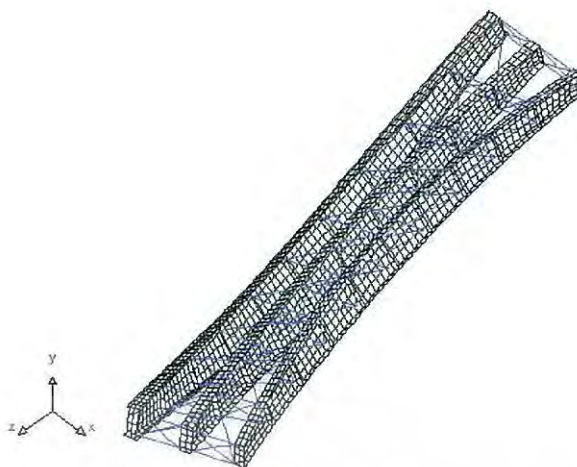


รูปที่ 6.9 plane view ของ girder ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing)

ตาราง 6.3 ความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดที่ 1 ของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เตอร์ที่มีการเสริม bottom bracing

Mode	ความถี่ธรรมชาติ (Hz) ของ girder ที่ประกอบด้วย x-type cross frame	
	ที่ไม่มีการเสริม bottom bracing	ที่มีการเสริม bottom bracing
1 st Torsional	4.04	4.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 การสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวอันดับที่ 1 ของเกอร์เตอร์ที่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขระบุว่า การเพิ่มค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) เพิ่มน้ำหนักให้กับระบบ ซึ่งมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ ระบบที่มีการเพิ่มค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ทำให้ความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวสูงกว่า ระบบที่ปราศจากการเพิ่มค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของระบบที่มีการเพิ่มค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) มีค่าน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของระบบที่มีการเพิ่ม cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ที่มีน้ำหนักเท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

ค้ำยันหรือที่เรียกกันเป็นภาษาอังกฤษว่า bracing หรือ cross frame เป็นชิ้นส่วนสำคัญสำหรับป้องกันการเคลื่อนที่ตามแนวขวางและป้องกันการบิดของ girder สะพานที่โครงสร้างเป็น girder เป็นเหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งศึกษาผลของ cross frame และค้ำยันที่มีต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์สะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งไม่ได้รวมการพิจารณาผลของการจลาจลร่วม และไม่ได้พิจารณาแรงกระจาย (distribution load) เนื่องจากน้ำหนักของพื้นสะพาน (floor slab) ดังนั้นโครงสร้างของเกอร์เดอร์สะพานที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงนำมาจากงานวิจัยที่ใช้ในโครงการ Curved Steel Bridge Research Project (CSBRP) ซึ่งระบุในงานวิจัยของ Linzell, D และคณะ [2] ซึ่งเป็นโครงสร้างสะพานที่ไม่มีพื้นสะพาน (floor slab) และเป็นโครงสร้างสะพานที่นักวิจัยนิยมนำมาศึกษา อาทิเช่น H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] และ Ching-Jen Chang [40] และงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D) ด้วยโปรแกรม Evolution FEA และตัวแปรที่ทำการศึกษางานวิจัยนี้มี 3 ตัวแปร คือ

ตัวแปรที่หนึ่ง คือ ชนิดของ cross frame ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากับ cross frame ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type), cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) โดย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) เป็น cross frame ที่นิยมใช้กันมากทุกๆ รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา [16], [18] และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) เป็น cross frame แบบใหม่ที่ ได้เริ่มมีการวิจัยในมหาวิทยาลัยเท็กซัส ที่ Austin (University of Texas at Austin) ในงานวิจัยของ Weihua Wang [16]

ตัวแปรที่สอง คือ การเสริมค้ำยันด้านล่าง โดยได้ทำการศึกษากับโครงสร้างตัวอย่างเพียงชนิดเดียว โดยได้ทำการเลือกโครงสร้างของ girder สะพานที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มาทำการเสริมค้ำยันด้านล่าง

ตัวแปรที่สาม คือการเสริม cross frame ซึ่ง cross frame ที่นำมาเป็นกลุ่มตัวอย่างเพื่อศึกษาเพื่อแนวโน้มค่าความถี่ธรรมชาติธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เดอร์สะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ

ผลที่ได้รับจากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากการศึกษาตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ระบุว่า ความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์สะพานที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type), cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

type) มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งส่งผลให้ cross frame ทั้ง 3 ชนิดช่วยทำให้เกอร์เดอร์มีความต้านทานต่อการบิดตัวใกล้เคียงกัน โดยที่ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) เป็น cross frame ชนิดที่ให้ความต้านทานต่อการบิดตัวได้ดีที่สุดแต่อย่างไรก็ตามในการเลือกชนิดของ cross frame ต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นอย่างรอบคอบ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นในแนวขวางหรือการกระจัดในแนวด้านข้าง ค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นกับเกอร์เดอร์ (girder) เนื่องจากน้ำหนักของ cross frame และต้นทุนในการก่อสร้าง (cross frame ชนิดรูปตัวเอ็กซ์ มีต้นทุนในการก่อสร้างสูงกว่า cross frame ชนิดรูปตัวเค และ cross frame ชนิดรูปตัวแซด ตามลำดับ) เป็นต้น ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เดอร์ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ตามปกติโดยที่ไม่มีเสริม cross frame เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเกอร์เดอร์ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และได้ทำการเสริม cross frame ให้กับโครงสร้างของเกอร์เดอร์ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างเกอร์เดอร์ที่ได้ทำการเสริม cross frame มีค่าสูงขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการบิดตัวของเกอร์เดอร์ที่เพิ่มขึ้น และค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างเกอร์เดอร์ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ที่มีการเสริมค้ำยันที่ด้านล่าง (bottom bracing) เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเกอร์เดอร์ที่ไม่มีเสริมค้ำยันที่ด้านล่าง (bottom bracing) มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนหนึ่งมีผลเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างสะพานที่เพิ่มขึ้นโดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากน้ำหนักของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่เสริมเข้าให้กับโครงสร้างของสะพานจึงทำให้ต้องใช้ความถี่เพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างสะพาน ในกรณีนี้ศึกษาแสดงให้เห็นว่าค้ำยันที่ด้านล่าง (bottom bracing) ไม่มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เดอร์ หรืออาจจะมีผลแต่มีผลที่น้อยมาก

7.2 การอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของ cross frame และค้ำยันที่มีต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดของเกอร์เดอร์สะพานที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

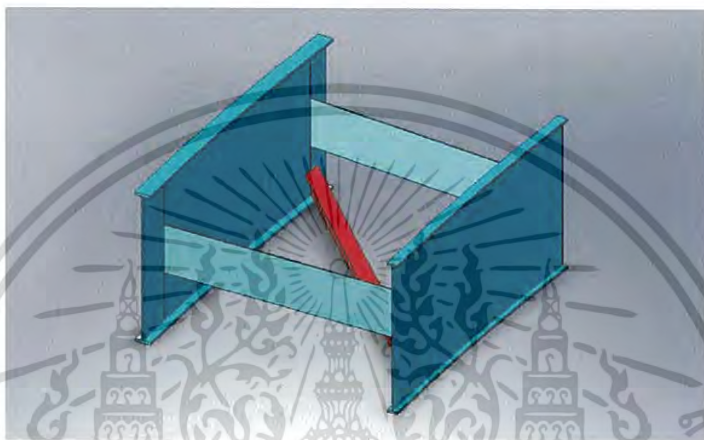
H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของ cross frame ที่มีต่อสนองการสั่นอย่างอิสระตามแนวขวางของเกอร์เดอร์สะพานเหล็กโค้ง ซึ่งเป็นโหมดถี่ของการสั่นพื้นฐานโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) โดยผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่า ค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั่นตามขวางของเกอร์เดอร์ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และชนิดรูปตัวเค (k-type) มีค่าแตกต่างกัน 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกอร์เดอร์ (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความถี่ธรรมชาติเนื่องจากสั้นอย่างอิสระตามแนวขวางมีค่าสูงกว่าเกอร์เดอร์ (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของ cross frame ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั้นที่ทำให้เกิดการการบิดตัวของเกอร์เดอร์ ที่เป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งเป็นโหมดความถี่ของการสั้นอย่างอิสระที่เพิ่มขึ้นจากโหมดความถี่พื้นฐานที่ศึกษาโดย H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] โดยทำการศึกษาคือ cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) และ cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย H. Maneetes และ D.G. Linzell [18] โดยค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั้นที่ทำให้เกิดการการบิดตัวของเกอร์เดอร์มีค่าต่างกัน 1.2 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เกอร์เดอร์ (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) มีค่าความถี่ธรรมชาติเนื่องจากสั้นอย่างอิสระที่ทำให้เกิดบิดตัวของเกอร์เดอร์ของสะพานมีค่าสูงกว่าเกอร์เดอร์ (girder) ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของการสั้นอย่างอิสระนี้ได้รับบุให้ทราบว่า cross frame ชนิดรูปตัวเอกซ์ (x-type) ทำให้โครงสร้างเกอร์เดอร์ (girder) ของสะพานมีความแข็งแรงมากกว่า cross frame ชนิดรูปตัวเค (k-type) และนอกจากนี้ได้ศึกษาผลของชนิด cross frame ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั้นที่ทำให้เกิดการการบิดตัวของโครงสร้างเกอร์เดอร์โดยค่าความถี่ธรรมชาติ เพิ่มขึ้นอีก 1 ชนิด คือ cross frame ชนิดรูปตัวแซด (z-type) ซึ่งเป็น cross frame ที่ได้เริ่มมีการทำวิจัย และผลที่ได้พบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั้นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างเกอร์เดอร์แตกต่างกับเกอร์เดอร์ที่ประกอบด้วย cross frame ชนิด x-type 1.4 เปอร์เซ็นต์

Robiul Awall และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อการสั้นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของสะพานที่มีคานเป็นเหล็กโค้งหน้าตัดรูปตัวไอเนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยที่โครงสร้างสะพานเป็นแบบ twin girder ซึ่งมีพื้นสะพาน (floor slab) รวมอยู่ในโครงสร้างด้วย ในงานวิจัย Robiul Awall ได้ทำการพิจารณาผลของการจรรยาจร่วมด้วยจึงทำในโครงสร้างในงานวิจัยมีส่วนของพื้นสะพานรวมอยู่ด้วย และผลลัพธ์ที่ได้รับพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดตัวของสะพานที่ประกอบด้วยค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) มีค่าสูงกว่าสะพานที่ปราศจาก ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) และในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของ ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั้นที่ทำให้เกิดการการบิดตัวของเกอร์เดอร์ โดยที่โครงสร้างสะพานเป็นแบบ multi-girder ซึ่งมุ่งศึกษาด้านทานการบิดตัวของคานสะพาน (girder) อันเป็นผลมาจากการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] โดยค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั้นที่ทำให้เกิดการการบิดตัวของเกอร์เดอร์ที่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) มีค่าต่างกับเกอร์เดอร์ที่ไม่มีการเสริมค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) น้อยมาก ซึ่งสาเหตุของความไม่สอดคล้องกันนี้เกิดจากในงานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] เป็นการวิเคราะห์การบิดตัวของสะพาน ซึ่งมี

ส่วนของพื้นสะพานรวมอยู่ด้วย โดยพื้นสะพาน (floor slab) มีส่วนช่วยในการต้านทานการบิด โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นสะพานทำหน้าที่เสมือนเป็นค้ำยันด้านบน (top bracing) ส่วนในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่มีต่อการบิดตัวของเกอร์เตอร์ (girder) ซึ่งไม่มีการรวมพื้น (floor slab) และในงานวิจัยของ Robiul Awall และคณะ [3] ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) มีลักษณะเป็นคาน T-beam ที่มีขนาดของ web เท่ากับ 500×16 mm. ซึ่งมีขนาดความสูงเท่ากับครึ่งหนึ่งของ web ของ cross frame ที่มีขนาดของ web เท่ากับ 1000×16 mm. ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Robiul Awall

ผลจากการที่ค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) มีลักษณะเป็นคาน T-beam ทำให้มีพื้นที่ในการรองรับแรงเกือบถึงด้านล่างของ cross frame ซึ่งแตกต่างจากค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ในงานวิจัยนี้โดยชิ้นส่วนค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ประกอบขึ้นจากวัสดุท่อเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่รองรับแรงเฉพะด้านล่างของเกอร์เตอร์นั้น จากลักษณะของค้ำยันด้านล่าง (bottom bracing) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Robiul Awall จึงทำให้โครงสร้างเกอร์เตอร์ในงานวิจัยของ Robiul Awall มีความ rigid มากกว่าโครงสร้างเกอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยค้ำยันด้านล่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ส่งผลให้ค่าถี่ธรรมชาติของการสั่นในงานวิจัยของ Robiul Awall มีค่าสูงกว่าค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างเกอร์เตอร์ในงานวิจัยของ Robiul Awall มีความต้านทานต่อการบิดตัวสูงกว่าโครงสร้างเกอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ ประกอบกับในงานวิจัยของ Robiul Awall เป็นการวิเคราะห์การสั่นในลักษณะมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างของสะพานจึงทำให้แตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่มุ่งศึกษาการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เตอร์ที่ได้ไม่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ จึงทำให้โครงสร้างในงานวิจัยของ Robiul Awall มีส่วนประกอบของพื้นสะพาน (floor slab) เพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และพื้นสะพาน (floor slab) ก็มีส่วนทำให้ความต้านทานต่อการบิดตัวของ girder สะพานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความถี่สำหรับการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Robiul Awall ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องของ ค่าความถี่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นดัดที่เกิดขึ้นกับ girder ของสะพานอันเนื่องน้ำหนักของ cross frame และ floor slab ซึ่งค่าความดัด (bending stress) ของ girder มีผลต่อ criteria ในการออกแบบ girder สะพานด้วย

7.3 ข้อเสนอแนะและพัฒนางานวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ทำให้พบว่าชนิดของ cross frame และค้ำยัน มีผลต่อการสั่นที่ทำให้เกิดการบิดตัวของเกอร์เตอร์ (girder) สะพาน โดยพิจารณาเฉพาะในส่วนของเกอร์เตอร์ cross frame และค้ำยัน ซึ่งงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาพื้นสะพานร่วมด้วย ในปัจจุบันโปรแกรม Evolution FEA ยังมีข้อจำกัดเรื่องการวิเคราะห์ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ในขณะที่ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการสั่น และข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนของเอลิเมนต์ที่โปรแกรม Evolution FEA สามารถทำได้ไม่เกิน 10,000 เอลิเมนต์ ในอนาคตเมื่อโปรแกรม Evolution FEA ได้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้นควรมีการวิเคราะห์ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นภายใน cross frame และค้ำยันด้านล่าง ขณะที่มีการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการบิดของโครงสร้างสะพาน เพื่อให้ผลงานวิจัยครอบคลุมยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] Anonymous. “T-beam” [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/T-beam>
- [2] Linzell, D., Leon, R. and Zureick, A. “Experimental and Analytical Studies of a Horizontally Curved Steel I-Girder Bridge during Erection” **Journal of Bridge Engineering**, vol. 9, Issue 6 , Nov, 2004. pp. 521-530.
- [3] Robiul Awall, Toshiro Hayashikawa, Takashi Matsumoto and Xingwen He. “Effects of bottom bracings on torsional dynamic characteristics of horizontally curved twin I-girder bridges with different curvatures” **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, vol. 11, 2012. pp. 149-162.
- [4] Kang Y.J. and Yoo C.H. “Thin-walled curved beams, II: analytical solutions for buckling of arches” **Journal of Engineering Mechanics**. ASCE, vol. 120, issue 10, 1994. pp. 2102-2125.
- [5] Anonymous. “Big/Dam/Ramp” [Online]. Available : <https://garverusa.com/iq/201243/60/big-dam-ramp/>
- [6] Anonymous. “Replacement of Sussex County Bridge E-07 (Franklin Viaduct) over the Wallkill River and New York Susquehanna & Western” [Online]. Available : <http://www.sussex.nj.us/cit-e-access/news/index.cfm?NID=2687&TID=7&jump2=0&Print=1>
- [7] Anonymous. “Engineering” [Online].//Available : <http://www.fayettevil-398/Engineering>
- [8] Anonymous. “First Horizontal Piece Is Placed Along the New Tappan Zee Bridge” [Online]. Available : http://www.nytimes.com/2015/06/18/nyregion/first-hirizontal-piece-is-placed-along-the-new-tappan-zee-bridge.html?_r=0
- [9] Darrell Waters. “Tappan Zee Bridge Replacement Rapidly Taking Shape” [Online]. Available : http://www.artba.org/news/transportation_builder/tappan-zee-bridge-replacement-rapidly-taking-shape/
- [10] Ching-Jen Chang. “Construction Simulation Of Curved Steel I-Girder Bridges” the Degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Georgia Institute of Technology. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Anonymous. “White Bridge Robertson Road Interchange.” [Online]. Available : <http://balp.com/projects/white-bridgerobertson-road-interchange>.
- [12] Ki-Young Yoon, Young-Jong Kang, Young-Joon Choi and Nam-Hoi Park. “Natural frequencies of thin-walled curved beams” **Finite Elements in Analysis and Design**. vol. 42, 2006. pp. 1176-1186.
- [13] Bo Yeon Kim, Chang-Boo Kim, Seung Gwan Song, Hyeon Gyu Beom and Chongdu Cho. “A finite thin circular beam element for out-of-plane vibration analysis of curved beams” **Journal of Mechanical Science and Technology**. vol. 23, 2009. pp. 1396-1405.
- [14] Cahn Tuan Nguyen, Jiho Moon, Van Nam Le and Hak-Eun Lee. “Natural frequency for torsional vibration of simply supported steel I-girders with intermediate bracings” **Thin-Wall Structures**. vol. 49, 2011. pp. 534-542.
- [15] Jun Yi Meng and Eric M. Lui. “Torsional Effects on Short-Span Highway Bridges” **Computers and Structures**, vol. 75, 2000. pp. 619-629.
- [16] Weihua Wang. 2013 “A Study of Stiffness of Steel Bridge Cross Frames” Ph.D.dissertation, The University of Texas at Austin
- [17] Nitipong Photong and Kiatfa Tangchaichit. “Transition from Plate-Like to Beam-Like Behavior of Cantilevered Plates and Beams” **The 20th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand**, 2006, pp. AMM 044.
- [18] H.Maneetes and D.G. Linzell. “Cross- Frame and lateral bracing influence on curved steel bridge free vibration response” **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 59, 2003. pp. 1101-1117.
- [19] Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. and Topp, L.J. “Stiffness and Deflection Analysis of complex Structure” **Journal of Aeronautical Sciences**, vol.23, no. 9, Sept, 1956. pp. 805-824.
- [20] Clough, R.W. “The Finite Element Method in Plane stress Analysis” **Proceedings American Society of Civil Engineers**, 2nd Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, Sept, 1960. pp. 345-378.
- [21] Melosh, R.J. “A Stiffness Matrix for the Analysis of Thin Plates in Bending”

เอกสารนี้เป็นเอกสารอ้างอิงของ **Journal of the Aerospace Sciences**, vol. 28, No. 1, Jan, 1961. pp. 34-42 การค้นคว้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Clough, R.W. and Rashid, Y. "Finite Element Analysis of Axisymmetric Solids" *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 91, Feb, 1965. pp. 71-85.
- [23] Wilson, E.L. "Structural Analysis of Axisymmetric Solids" *Journal of the American Institute of Aeronautics*, vol. 3, No. 12, Dec, 1965. pp. 2269-2274.
- [24] Archer, J.S. "Consistent Matrix Formulations for Structural Analysis Using finite Element Techniques" *Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol. 3, No. 10, 1965. pp. 1910-1918.
- [25] Culver, C. G. and Oestel, D. J. "Natural frequencies of multispan curved beams" *Journal of Sound and Vibration*, vol. 10, Issue 3, Nov, 1969. pp. 380-389.
- [26] Mozer, J. and Culver, C.G. "Horizontally curved highway bridges Stability of curved" Carnegie Mellon Univ., Rep. No. P1, Research Project HPR-2(111), Pittsburgh.
- [27] Shore, S. and Chaydhuri, S. "Free Vibration of Horizontally curved beam" *J. Struct. Eng. ASCE*, vol. 98, 1977. pp. 793-796.
- [28] Chai Hong Yoo and Jon P. Fehrenbach. "Natural Frequencies of Curved Girders" *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 107, No. 2, Mar/Apr 1981. pp. 339-354.
- [29] Powell GH and Mondkar DP. "Curvbrg: A Program for Analysis of Curved I-girder Bridges" *Computers & Structures*, vol. 9, Issue 3, Sept, 1978. pp. 255-263.
- [30] Dongzhou Huang, Ton-Lo Wang and Mohsen Shahawy. "Dynamic behavior of horizontally curved I-girder bridges" *Computers & Structures*, vol. 57, Nov, 1995. pp. 703-714.
- [31] Armen Der Kiureghian and Yutaka Nakamura. "CQC Modal Combination Rule for High-Frequency Modes" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 22, 1993. pp. 943-956.
- [32] He, X., Noda, Y., Hayashikawa, T Kawatani M. and T. Matsumoto "An Analytical Approach to Coupled Vibration of Curved Rationalized Girder Bridges and Running Vehicles" *Procedia Engineering*, vol. 14, 2011. pp. 2906-2915.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [33] Kijun Kang. "Vibration Analysis of Thin-walled Curved Beams using DQM" *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, 2007, pp. 1207-1217.
- [34] Li Hongjing, Wang Tong and Wei Shuangke. "Natural Vibration Analysis of continuous Horizontally curved girder bridges using DQEM" *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008.
- [35] Klaus-Jürgen Bathe and Saïd Bolourchi. "Large Displacement Analysis of Three-Dimensional Beam Structures" *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 14, 1979. pp. 961-986.
- [36] Eduardo, N. Dvorkin and Klaus-Jürgen Bathe. "A Continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis" *Engineering Computations*, vol. 1, March 1984. pp. 77-88.
- [37] Klaus-jürgen Bathe and Saïd Bolourchi. "A Geometric and Material Nonlinear Plate and Shell Element" *Computers & Structures*, vol. 11, Issues 1-2, February 1980. pp. 23-48.
- [38] Anonymous. "Functionality of the evolution-fea GUI 2D" [Online]. Available : <http://www.evolution-fea.com>.
- [39] Anonymous. "Functionality of the evolution-fea GUI 3D" [Online]. Available : <http://www.evolution-fea.com>
- [40] Ching-Jen Chang. 2007. "Construction Simulation of Curved Steel I-Girder Bridges" Ph.D.dissertation, Georgia Institute of Technology.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งโปรแกรม Evolution FEA

ขั้นตอนของการติดตั้งโปรแกรม Evolution FEA ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการลงโปรแกรม VMware
2. ขั้นตอนของการสร้าง virtual disk
3. ขั้นตอนการทำ USB Format

ก่อนเริ่มขั้นตอนทั้ง 3 ขั้นตอน ผู้ใช้ต้องทำการลงทะเบียนประวัติที่เว็บไซต์ www.Evolutionfea.com เพื่อทำการขอ user name และ password ให้ผู้ใช้ทำการสร้าง folder ที่ชื่อ e-fea virtual_PC ไว้ที่ desktop ทำการ download ไฟล์ที่ชื่อว่า the evolution-fea® virtual PC Package-877 MB ที่อยู่ในรูปของไฟล์ Zip ดังแสดงในรูปที่ ก-1 เก็บไว้ที่ Folder ที่ชื่อ e-fea virtual_PC



รูปที่ ก-1 ไฟล์ the evolution-fea® virtual PC Package

ทำการแตกไฟล์ (unzipped) โดยไฟล์ดังกล่าวประกอบด้วย the e-fea® virtual Machine, the VMware Player V4 Installer และ setup Tutorial ดังแสดงในรูปที่ ก-2



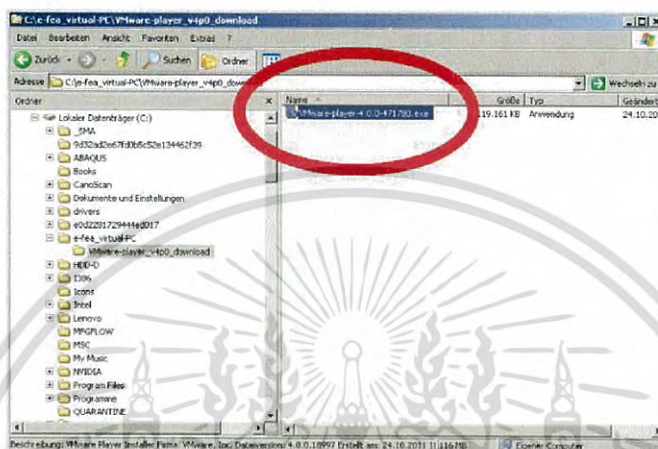
รูปที่ ก-2 ไฟล์ที่ได้จากการแตก (unzipped) ไฟล์ the evolution-fea® virtual PC Package

ขั้นตอนการลงโปรแกรมแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการลงโปรแกรม VMware

1.1 ทำการ double click ที่ ไอคอน  VMware-player_v4p0_download

1.2 ทำการ double click ที่ไอคอน VMware- player-4.0.0.471780... ดังแสดงในรูปที่ ก-3 เพื่อทำการติดตั้ง VMware player



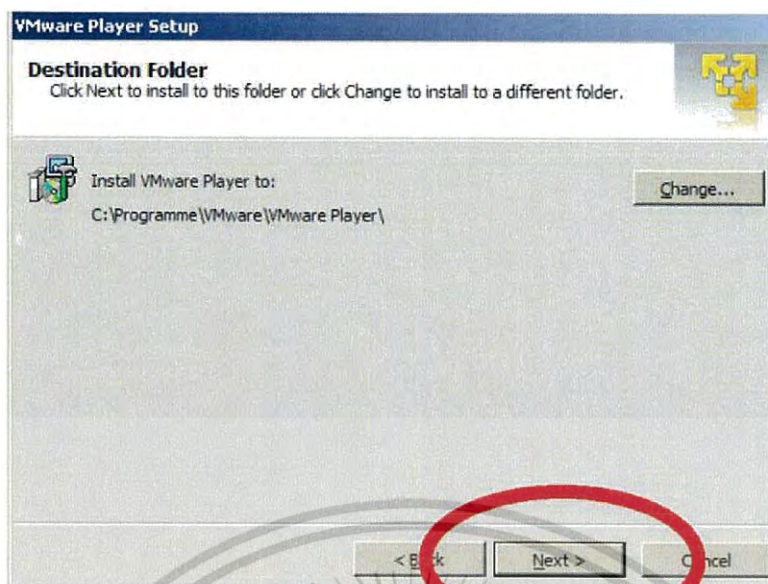
รูปที่ ก-3 ไอคอน VMware - player-4.0.0.471780...

1.3 ทำการติดตั้งโปรแกรม VMware player ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ ก-4-ก-11

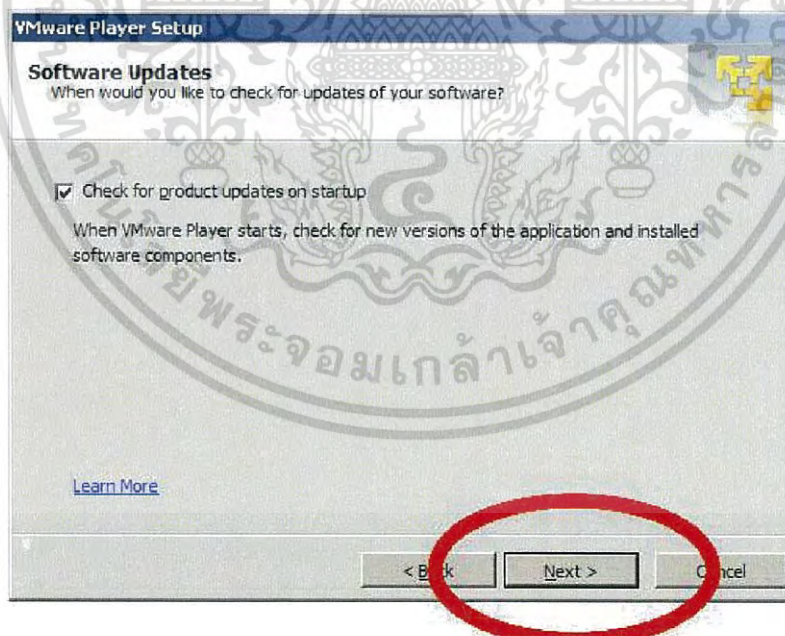


รูปที่ ก-4 ขั้นตอนที่ 1 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

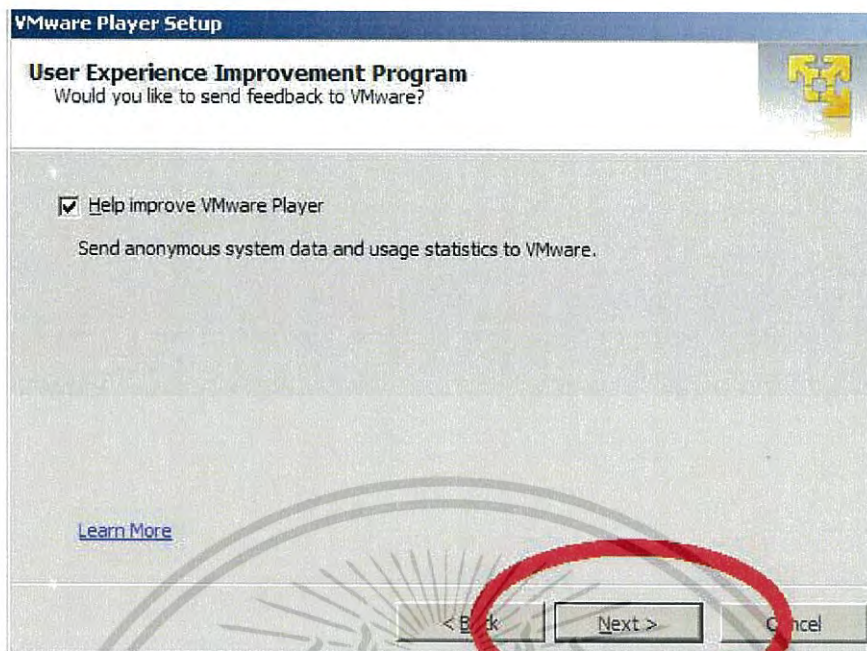


รูปที่ ก-5 ขั้นตอนที่ 2 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player (ระบุตำแหน่งการติดตั้งโปรแกรม)

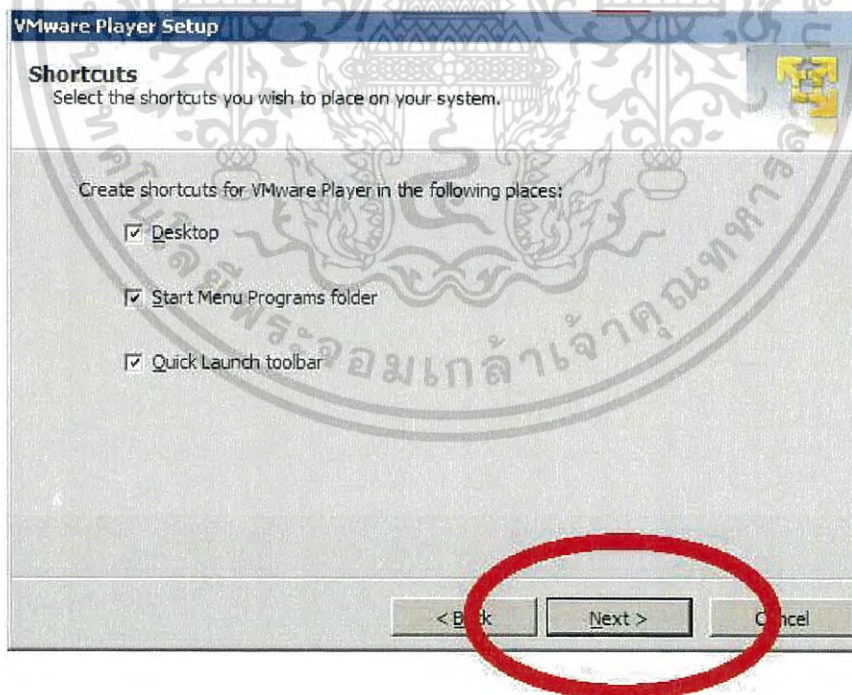


รูปที่ ก-6 ขั้นตอนที่ 3 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

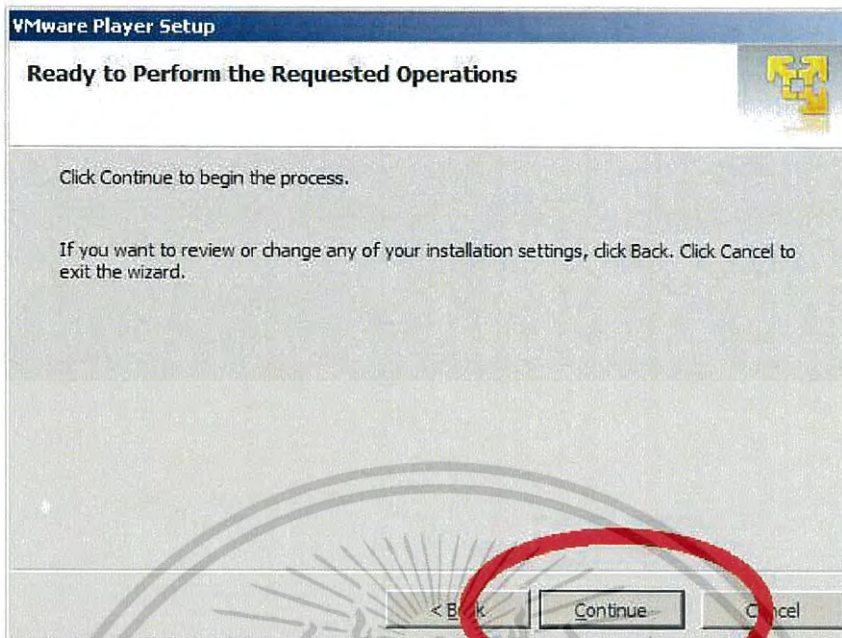


รูปที่ ก-7 ขั้นตอนที่ 4 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

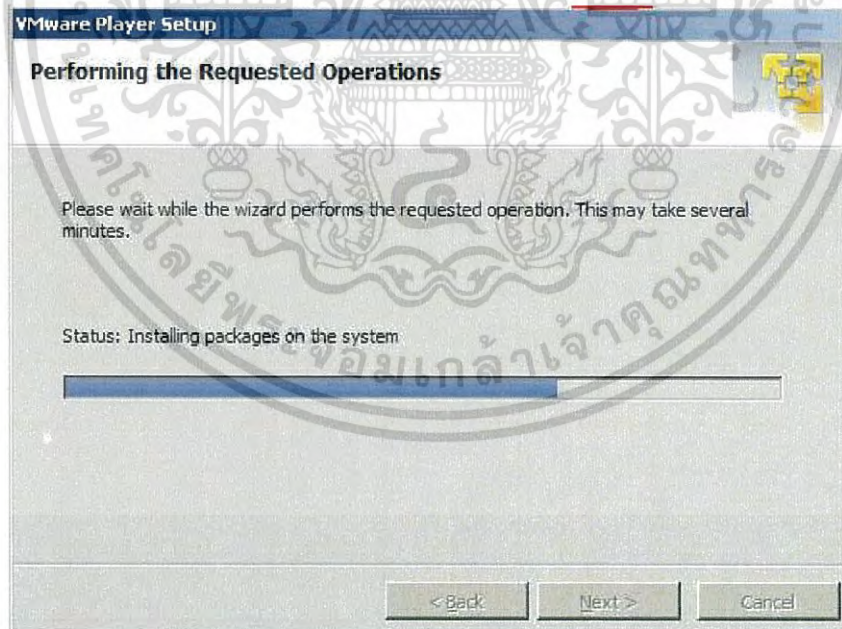


รูปที่ ก-8 ขั้นตอนที่ 5 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-9 ขั้นตอนที่ 6 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player



รูปที่ ก-10 ขั้นตอนที่ 7 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 ขั้นตอนที่ 8 ของการติดตั้งโปรแกรม VMware player

1.4 เมื่อเครื่อง computer ทำการ restart เสร็จ จะปรากฏ ไอคอน VMware ที่หน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

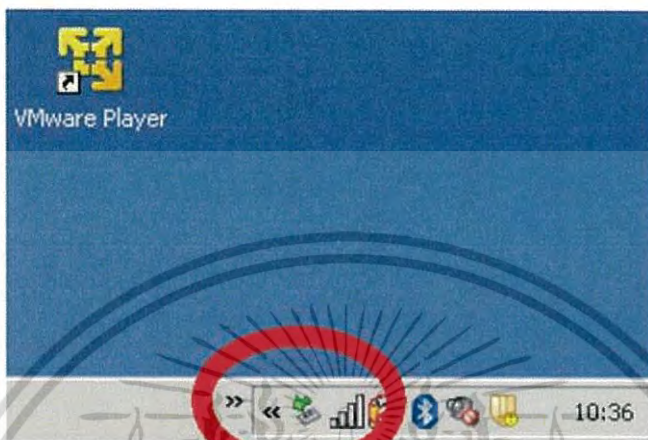


รูปที่ ก-12 แสดงไอคอน VMware ที่หน้าจอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

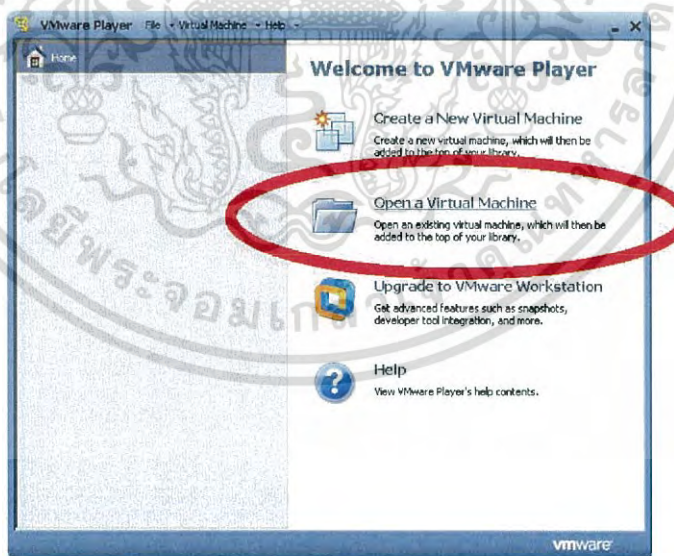
2. ขั้นตอนของการสร้าง virtual disk

2.1 ขั้นตอนการติดตั้ง USB Stick เพื่อให้เป็น virtual disk โดยทำการเสียบ USB Stick ในช่อง USB แล้วจะปรากฏสัญลักษณ์ USB Stick ดังแสดงในรูปที่ ก-13



รูปที่ ก-13 แสดงไอคอน VMware ที่หน้าจอ

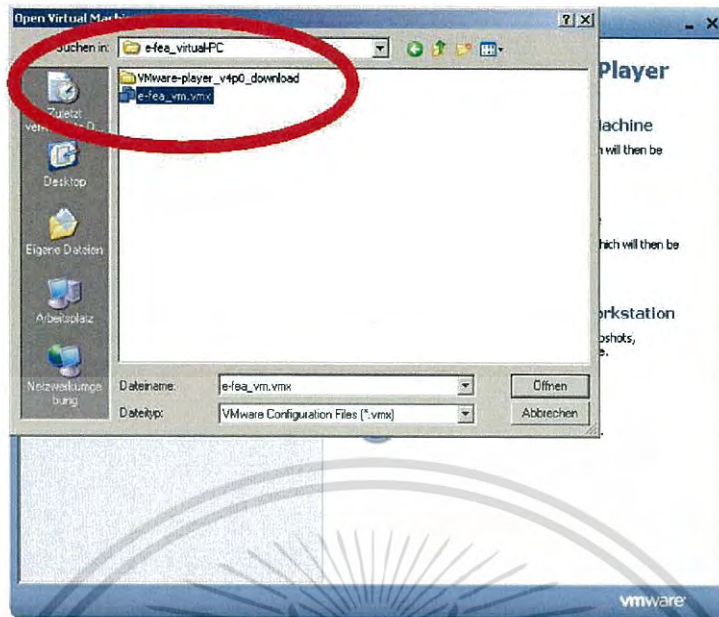
2.2 ทำการคลิกที่ Open a Virtual Machine ดังแสดงในรูปที่ ก-14



รูปที่ ก-14 ขั้นตอน 1 ของการสร้าง virtual disk

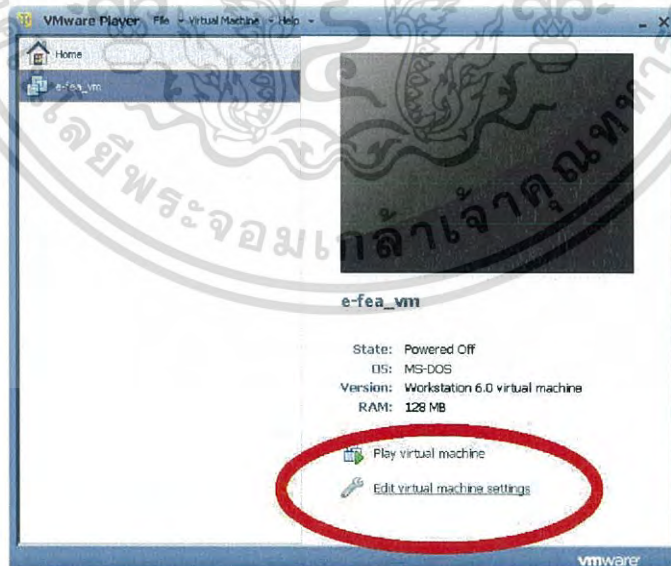
2.3 จะปรากฏหน้าต่าง ดังแสดงในรูปที่ ก-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



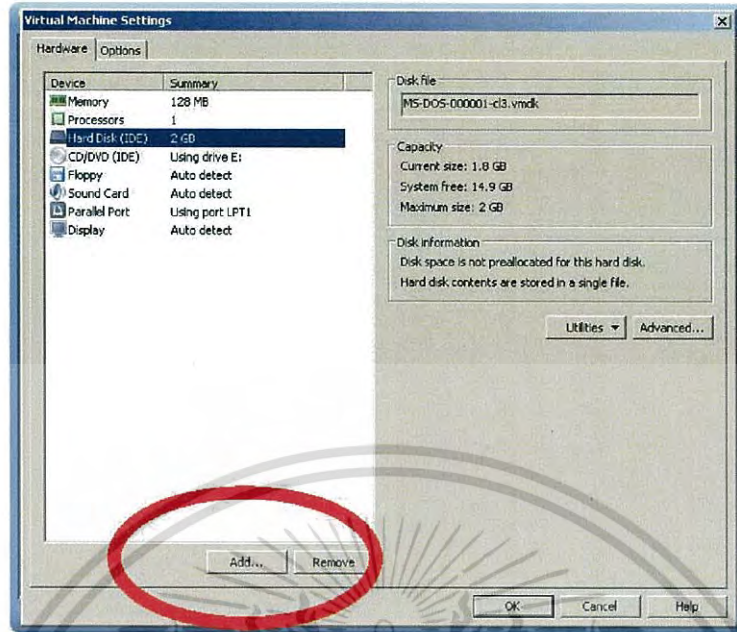
รูปที่ ก-15 ขั้นตอน 2 ของการสร้าง virtual disk

2.4 ทำตามขั้นตอนในรูปที่ ก-16 ถึง ก-21

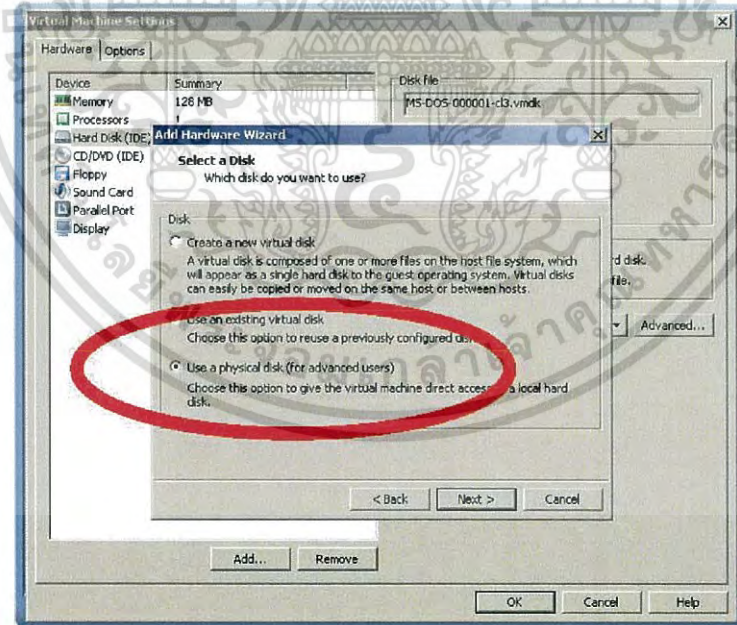


รูปที่ ก-16 ขั้นตอน 3 ของการสร้าง virtual disk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

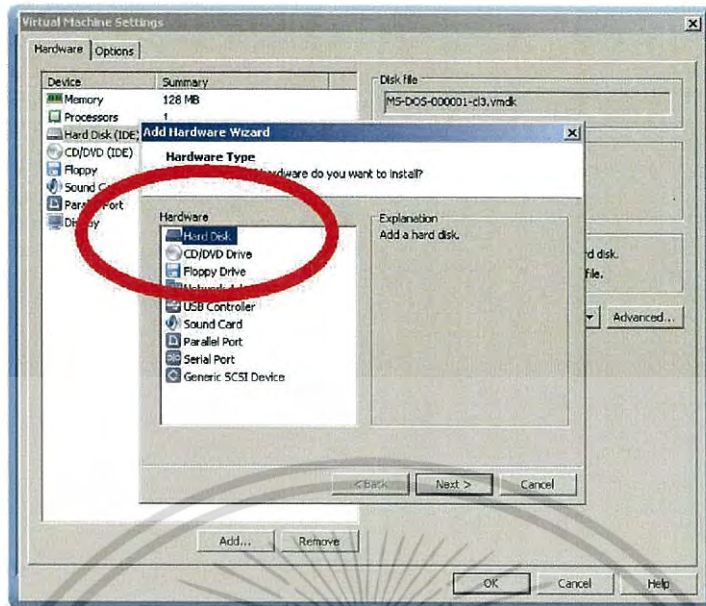


รูปที่ ก-17 ขั้นตอน 4 ของการสร้าง virtual disk

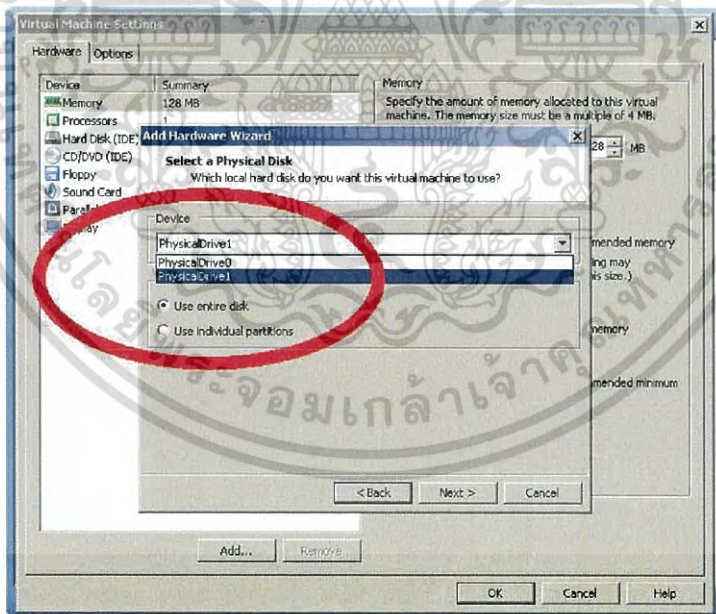


รูปที่ ก-18 ขั้นตอน 5 ของการสร้าง virtual disk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



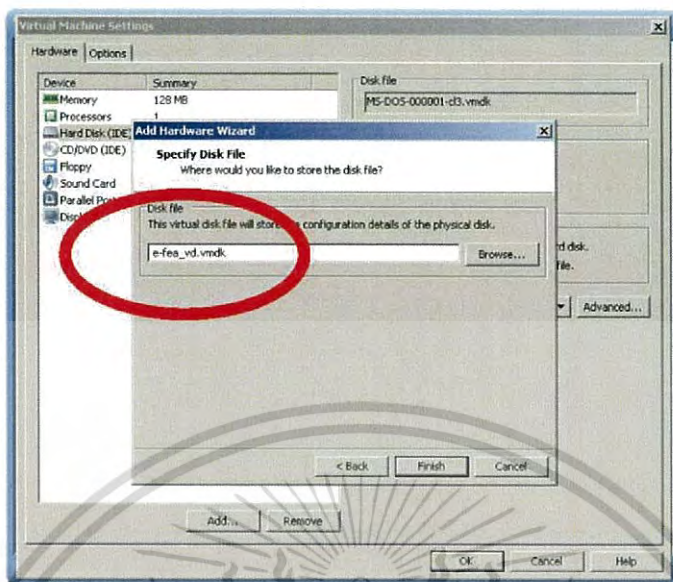
รูปที่ ก-19 ขั้นตอน 6 ของการสร้าง virtual disk



รูปที่ ก-20 ขั้นตอน 7 ของการสร้าง virtual disk

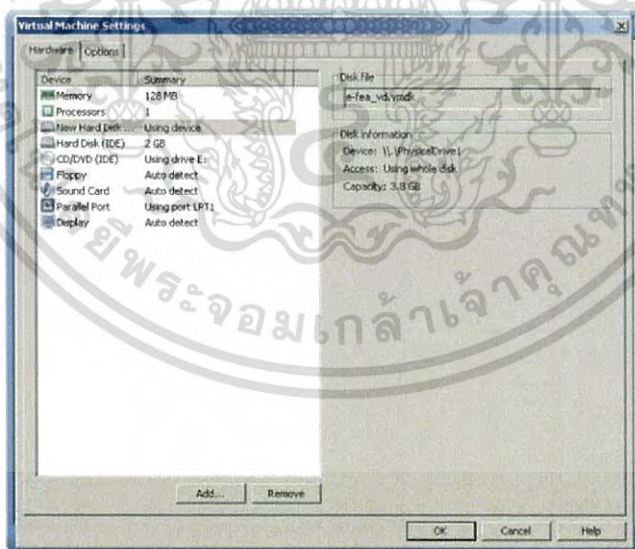
2.5 เมื่อปรากฏหน้าต่าง Add Hardware Wizard ดังแสดงในรูปที่ ก-24 ให้ทำการ คลิกที่ Browse แล้วเลือก e-fea.vd.vmdk แล้วคลิกที่ Finish

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-21 ขั้นตอน 8 ของการสร้าง virtual disk

2.6 ที่หน้าต่าง Virtual Machine Settings คลิก OK ซึ่งเป็นการเสร็จสิ้นขบวนการสร้าง Virtual Disk

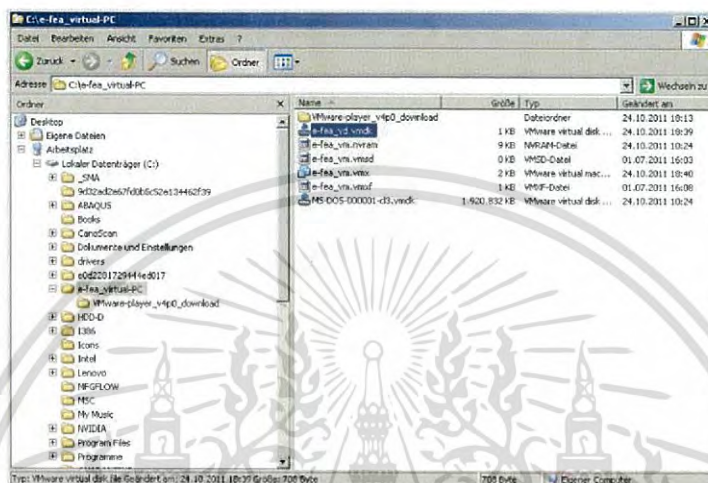


รูปที่ ก-22 ขั้นตอน 9 ของการสร้าง virtual disk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

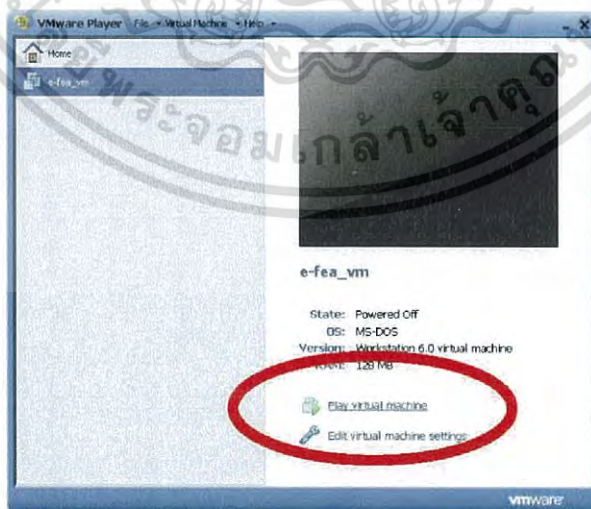
3. ขั้นตอนการทำ USB Format

3.1 ทำการเปิดโปรแกรม Evolution FEA โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ double คลิกที่ ไอคอน ที่แสดงในรูปที่ ก-12 หรือ double คลิกที่ file ที่ชื่อว่า e-fea_vd.vmdk ดังแสดงในรูปที่ ก-23 ที่อยู่ใน Folder ที่ชื่อว่า e-fea virtual_PC ที่อยู่บน desk top ที่ได้ทำการสร้างไว้ในตอนแรก



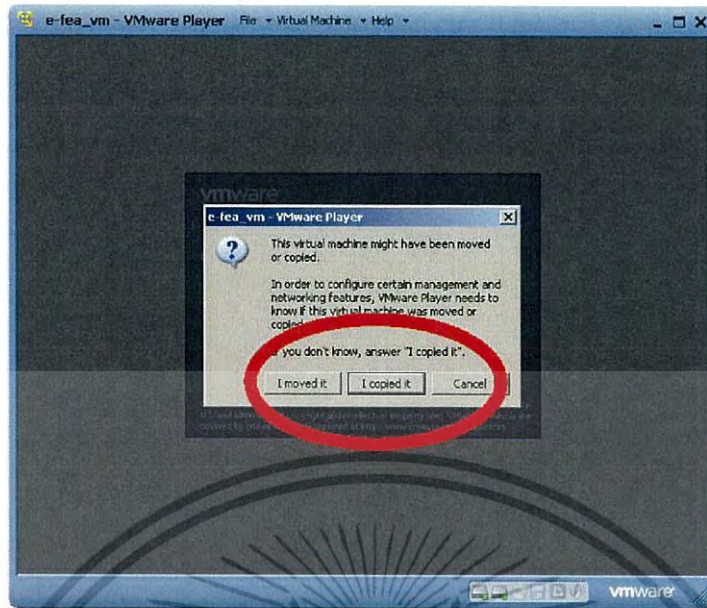
รูปที่ ก-23 การเปิดโปรแกรม Evolution FEA

3.2 ขั้นตอนการสร้าง USB Format ให้ปฏิบัติตามขั้นตอน ดังที่แสดงในรูปที่ ก-24 ถึง ก-46

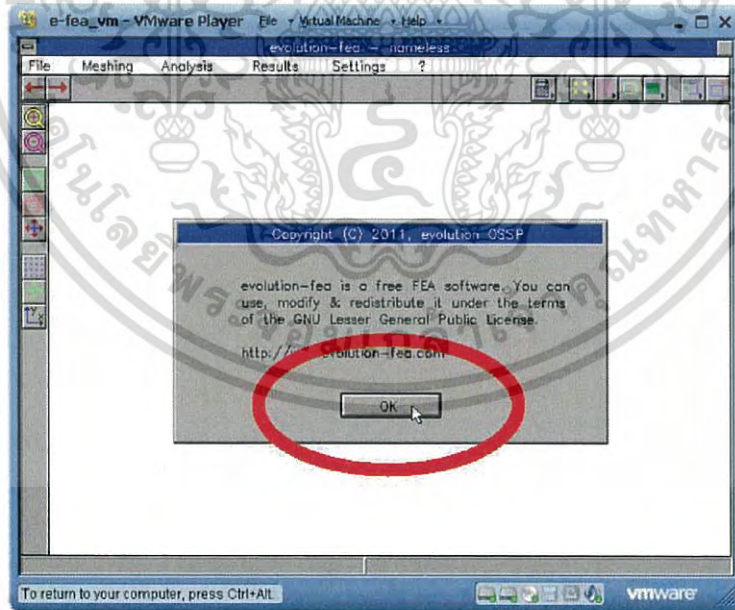


รูปที่ ก-24 ขั้นตอน 1 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

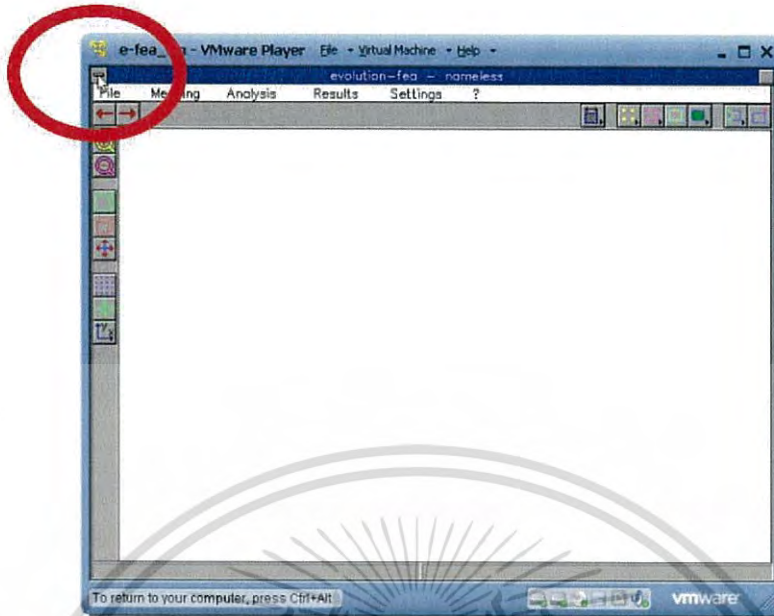


รูปที่ ก-25 ขั้นตอน 2 ของการทำ USB Format

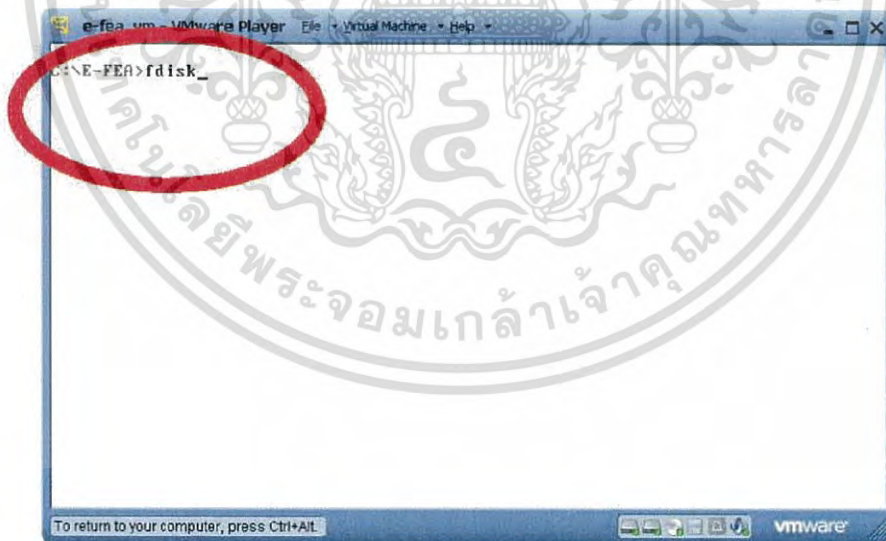


รูปที่ ก-26 ขั้นตอน 3 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

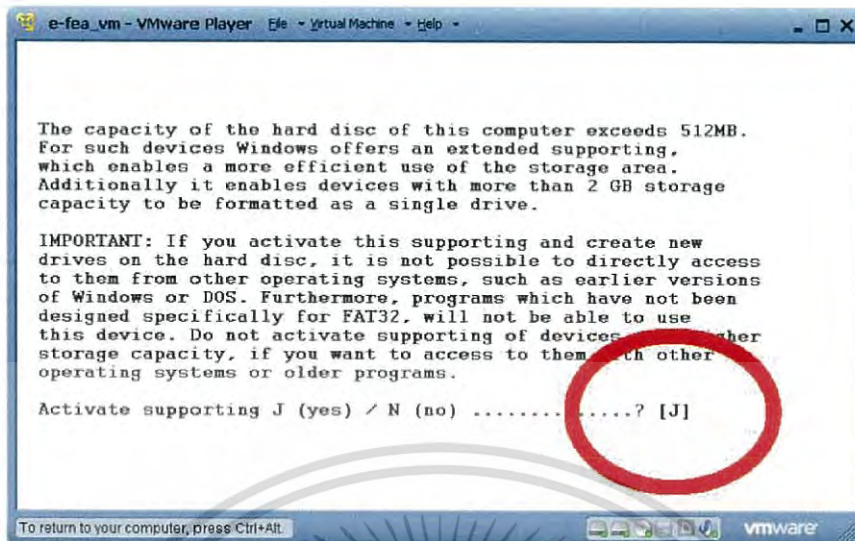


รูปที่ ก-27 ขั้นตอน 4 ของการทำ USB Format



รูปที่ ก-28 ขั้นตอน 5 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

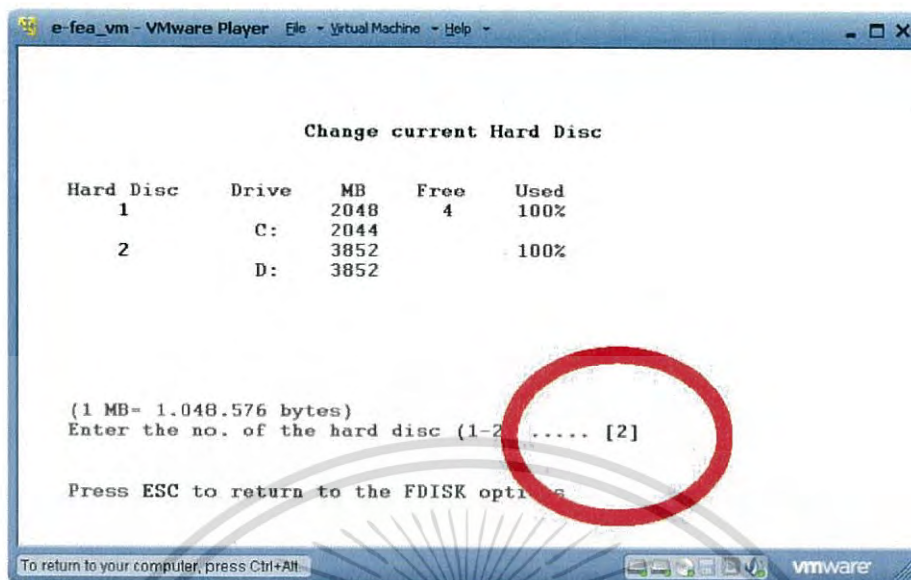


รูปที่ ก-29 ขั้นตอน 6 ของการทำ USB Format

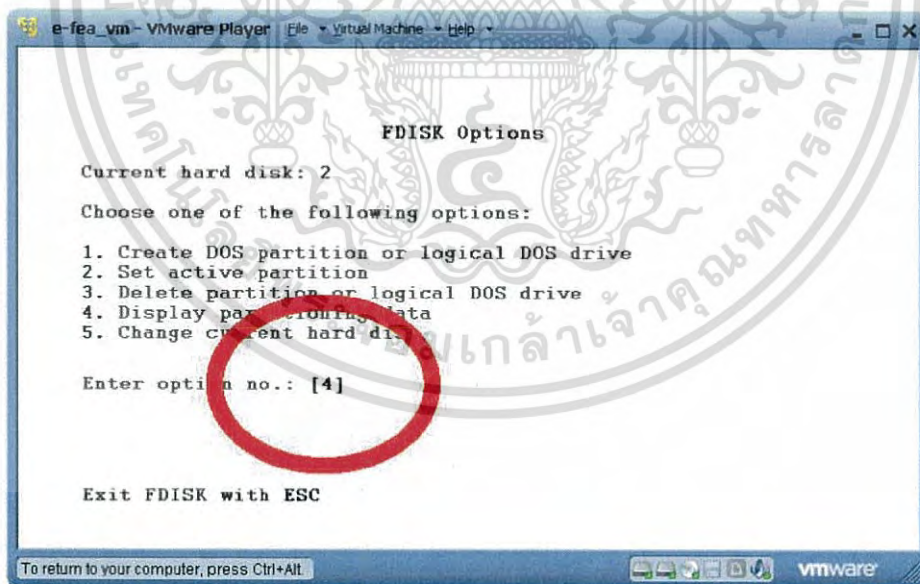


รูปที่ ก-30 ขั้นตอน 7 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

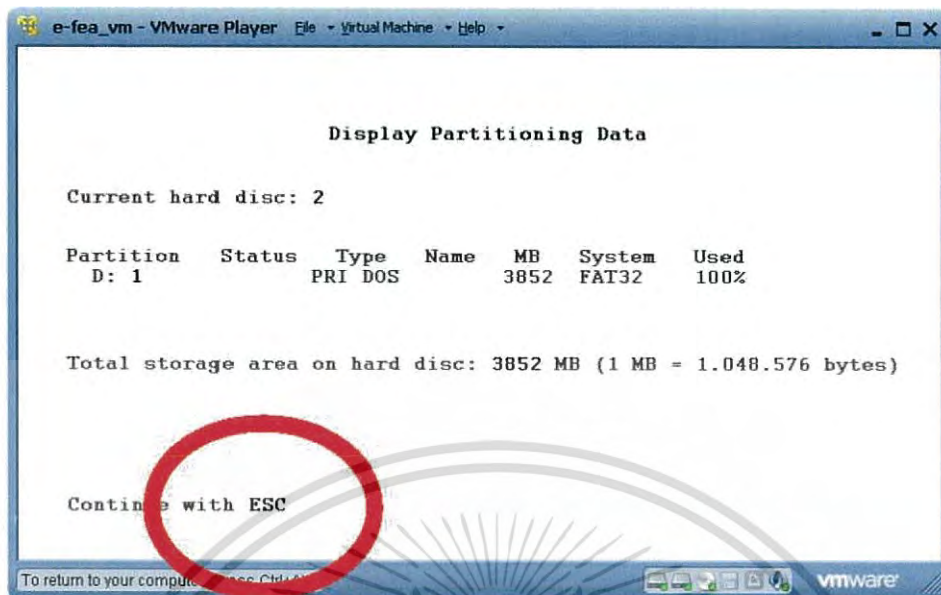


รูปที่ ก-31 ขั้นตอน 8 ของการทำ USB Format

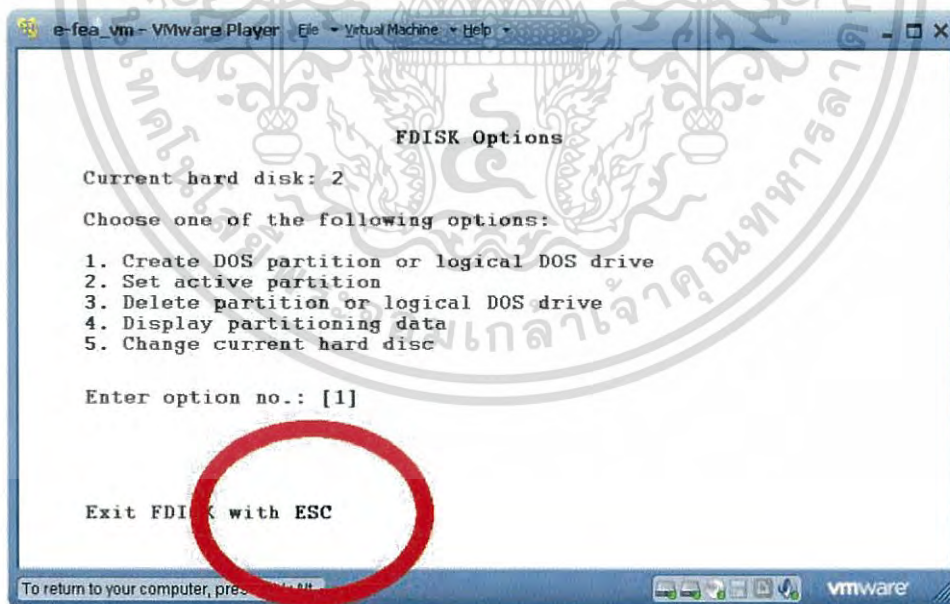


รูปที่ ก-32 ขั้นตอน 9 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

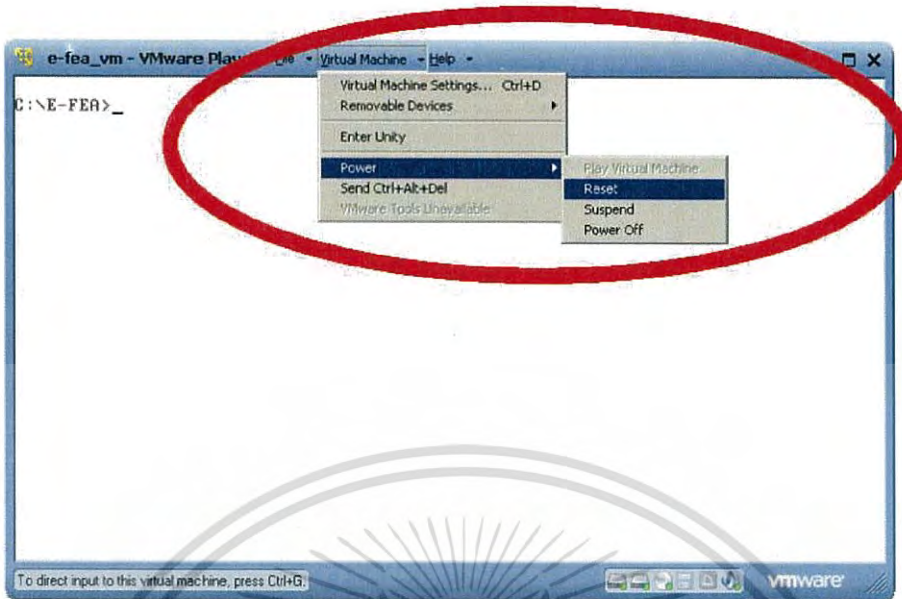


รูปที่ ก-33 ขั้นตอน 10 ของการทำ USB Format

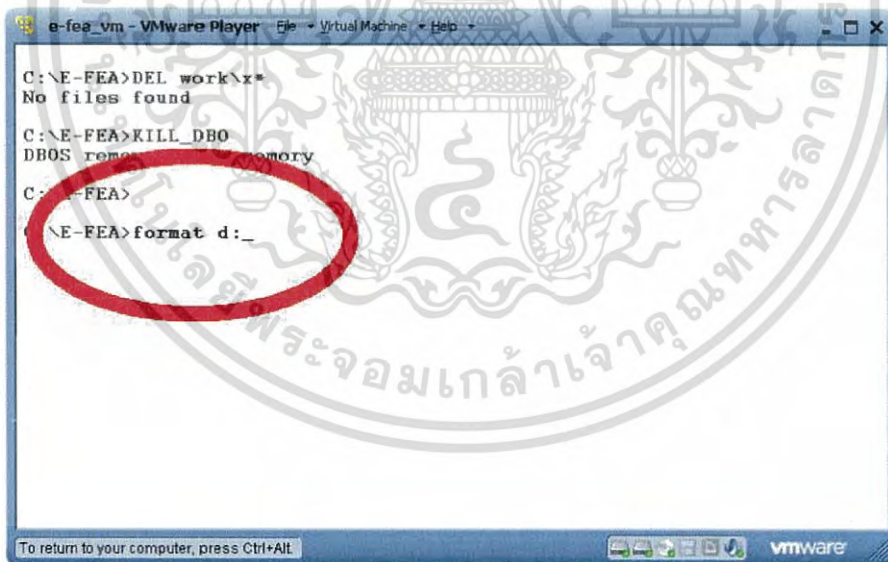


รูปที่ ก-34 ขั้นตอน 11 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

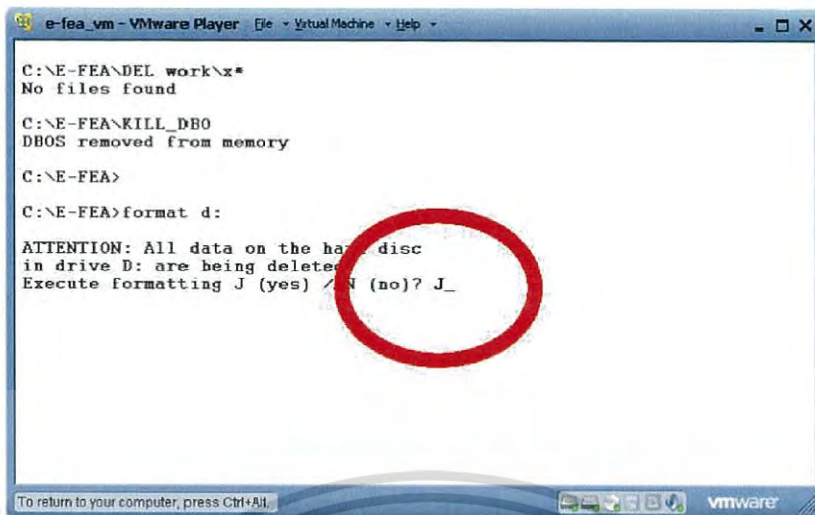


รูปที่ ก-35 ขั้นตอน 12 ของการทำ USB Format



รูปที่ ก-36 ขั้นตอน 13 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

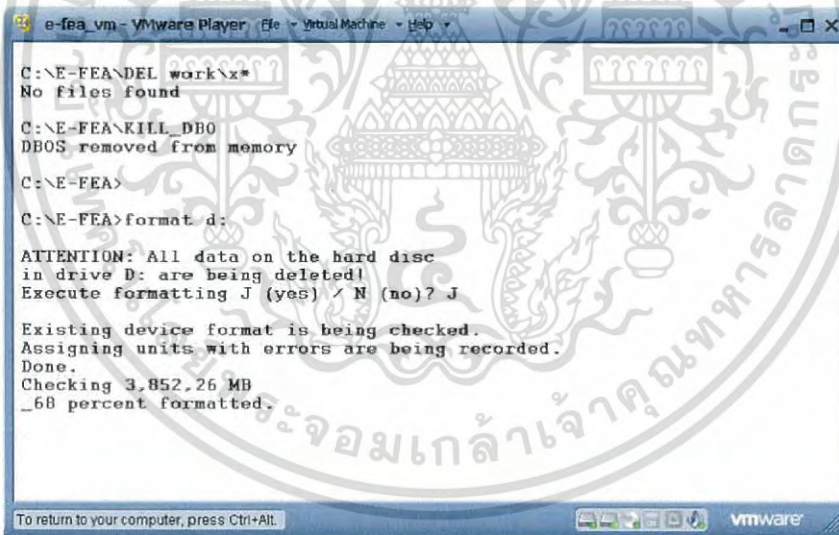


```

e-fea_vm - VMware Player  File  Virtual Machine  Help
C:\E-FEA\DEL work\x*
No files found
C:\E-FEA\KILL_DB0
DB0S removed from memory
C:\E-FEA>
C:\E-FEA>format d:
ATTENTION: All data on the hard disc
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J_

```

รูปที่ ก-37 ขั้นตอน 14 ของการทำ USB Format



```

e-fea_vm - VMware Player  File  Virtual Machine  Help
C:\E-FEA\DEL work\x*
No files found
C:\E-FEA\KILL_DB0
DB0S removed from memory
C:\E-FEA>
C:\E-FEA>format d:
ATTENTION: All data on the hard disc
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J
Existing device format is being checked.
Assigning units with errors are being recorded.
Done.
Checking 3,852,26 MB.
_68 percent formatted.

```

รูปที่ ก-38 ขั้นตอน 15 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

e-fea_vm - VMware Player  File  Virtual Machine  Help
C:\E-FEA>
C:\E-FEA>format d:

ATTENTION: All data on the hard disc
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J

Existing device format is being checked.
Assigning units with errors are being recorded.
Done.
Checking 3.852.26 MB
Formatting done.
File assignment table is being written.
Done.
Free storage area being computed (this might take several minutes).
Done.

Device name (11 characters, press RETURN key for none)? e-fea_
  
```

รูปที่ ก-39 ขั้นตอน 16 ของการทำ USB Format

```

e-fea_vm - VMware Player  File  Virtual Machine  Help
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J

Existing device format is being checked.
Assigning units with errors are being recorded.
Done.
Checking
Formatting done.
File assignment table is being written.
Done.
Free storage area being computed (this might take several minutes).
Done.

Device name (11 characters, press RETURN key for none)? e-fea

4,031,496,192 bytes total storage area on the device
4,031,496,192 bytes available on the device

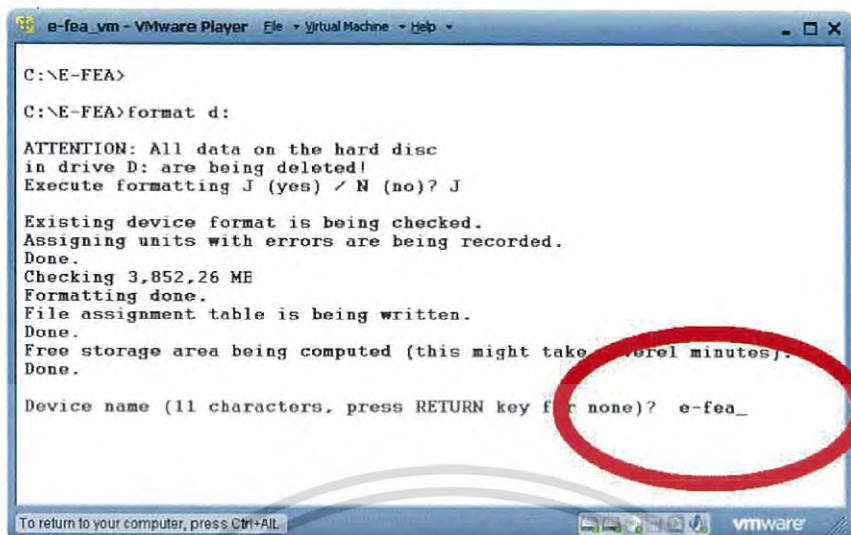
    4,096 bytes in each assigning unit.
    984,251 assigning units on the device.

Serial no. of the device: 4376-DAF8

C:\E-FEA>_
  
```

รูปที่ ก-40 ขั้นตอน 17 ของการทำ USB Format

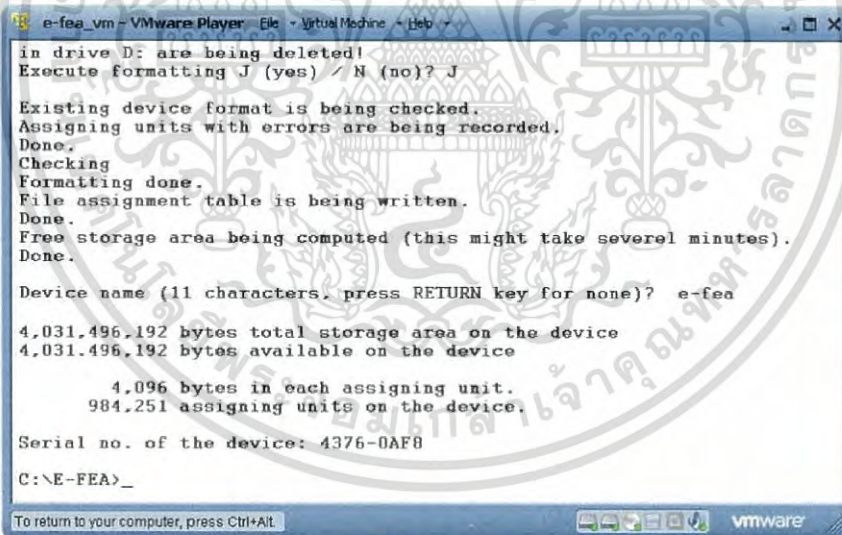
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

e-fea_vm - VMware Player  File - Virtual Machine - Help
C:\E-FEA>
C:\E-FEA>format d:
ATTENTION: All data on the hard disc
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J
Existing device format is being checked.
Assigning units with errors are being recorded.
Done.
Checking 3,852,26 ME
Formatting done.
File assignment table is being written.
Done.
Free storage area being computed (this might take several minutes).
Done.
Device name (11 characters, press RETURN key for none)? e-fea_
  
```

รูปที่ ก-41 ขั้นตอน 18 ของการทำ USB Format

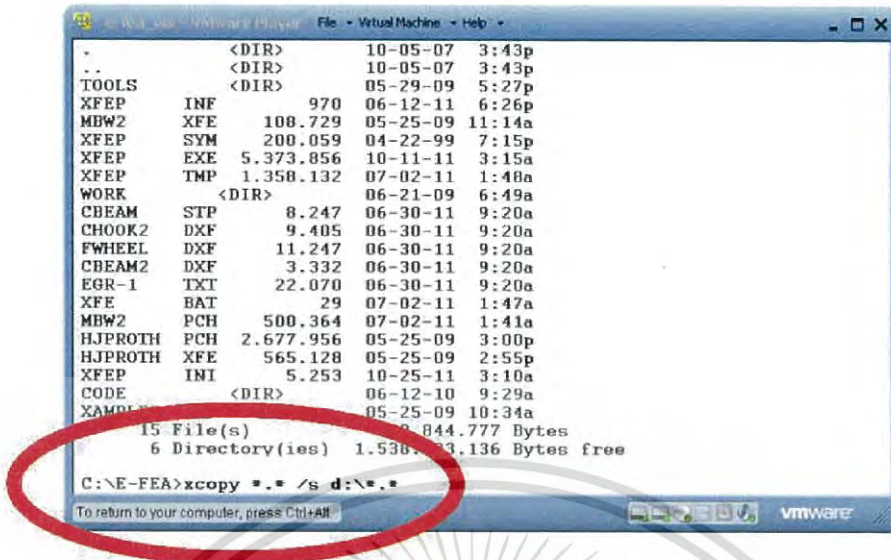


```

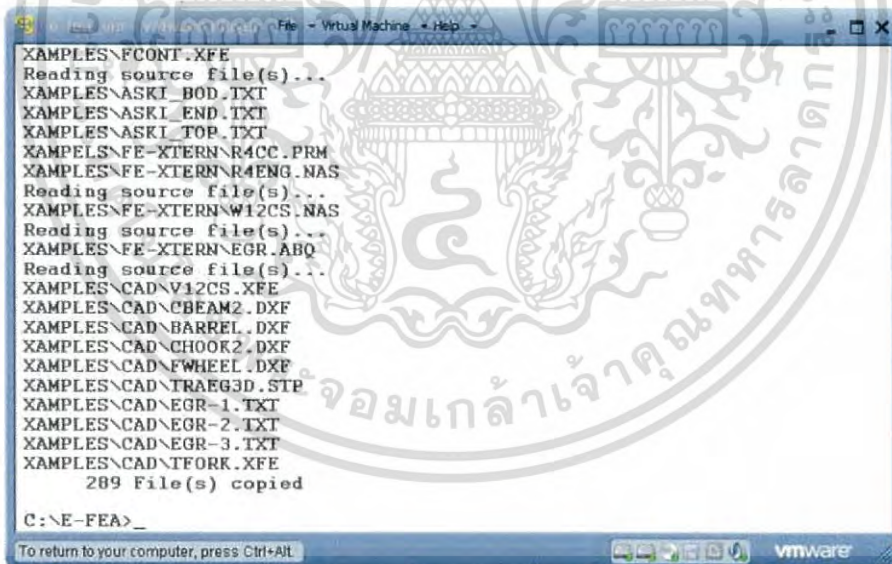
e-fea_vm - VMware Player  File - Virtual Machine - Help
in drive D: are being deleted!
Execute formatting J (yes) / N (no)? J
Existing device format is being checked.
Assigning units with errors are being recorded.
Done.
Checking
Formatting done.
File assignment table is being written.
Done.
Free storage area being computed (this might take several minutes).
Done.
Device name (11 characters, press RETURN key for none)? e-fea_
4,031,496,192 bytes total storage area on the device
4,031,496,192 bytes available on the device
4,096 bytes in each assigning unit.
984,251 assigning units on the device.
Serial no. of the device: 4376-0AF8
C:\E-FEA>_
  
```

รูปที่ ก-42 ขั้นตอน 19 ของการทำ USB Format

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



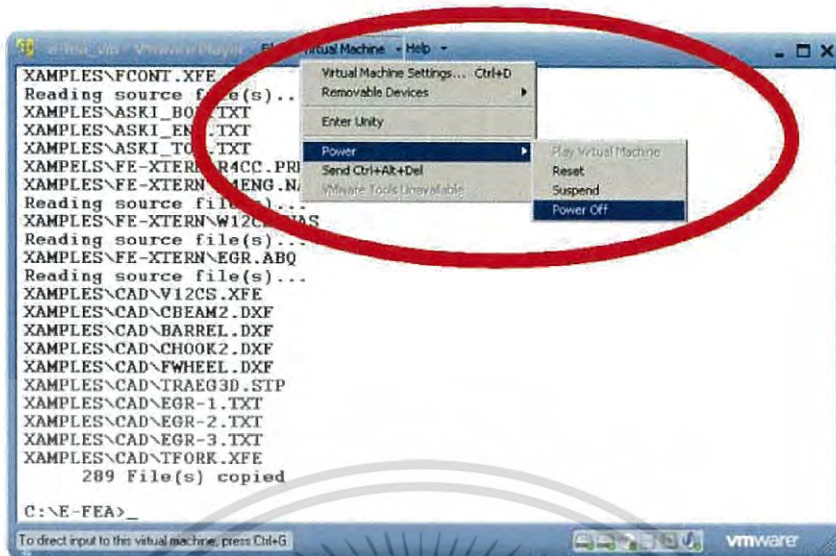
รูปที่ ก-45 ขั้นตอน 20 ของการทำ USB Format



รูปที่ ก-46 ขั้นตอน 21 ของการทำ USB Format

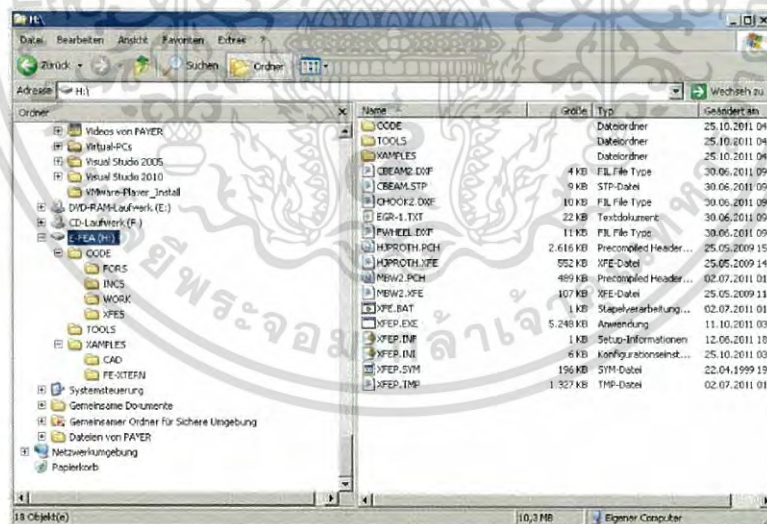
3.3 เมื่อทำ USB Format เสร็จ ทำการออกจากโปรแกรม Evolution FEA ดังแสดงในรูปที่ ก-47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-47 การออกจากโปรแกรม Evolution FEA

USB drive ที่ผ่านขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 มีชื่อว่า e-fea (D) และมี file ที่บรรจุอยู่ใน USB drive ดังที่แสดงในรูปที่ ก-48



รูปที่ ก-48 แสดงรายชื่อ file ที่บรรจุอยู่ใน USB drive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings of

The 19th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering

AINOCE19

The 19th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering

Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Ubon Ratchathani, THAILAND

JUNE 17-19, 2015



Organized by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเว็บไซต์ และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Ubon Ratchathani University is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst at the top. The umbrella is flanked by two lotus flowers. Below the umbrella is a stylized figure, possibly a deity or a royal figure, seated on a throne. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top of the border reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี' (Mahavithayalai Rajabhat Ubon Ratchathani) and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (Phra Chomklao Jaiyongthar Ladkrabang).

**Proceedings of
The 19th International Annual Symposium
on Computational Science and Engineering**

June 17-19, 2015

Ubon Ratchathani University

Ubon Ratchathani, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Content

Computational Fluid Dynamics and Solid Mechanics

CFD01	Inverse Multiquadric RBF in the Dual Reciprocity Boundary Element Method (DRBEM) for Coupled 2D Burgers' Equations at high Reynolds numbers <i>Chanthawara, K.; Kaennakham, S. and Toutip, W.</i>	2
CFD02	Numerical solutions of 2D nonlinear PDEs using Kansa's meshless method and the search for optimal radial basis function <i>Chuathong, N.; Kaennakam, S. and Toutip, W.</i>	13
CFD03	Effect of cross frame and bottom bracing on torsional nature frequency of horizontally curved steel I-girder bridge <i>Kunla, N. and Puangkird, B.</i>	21
CFD04	The Monsoon Precipitation Intensity and Climate Anomaly of China and Thailand <i>Sukawat, D. and Permpoonsinsup, W.</i>	31
CFD05	Numerical Investigation of Turbulent Flow and Heat Transfer in Circular and Oblique-Elliptical Section Tube <i>Sripattanapipat, S. and Promvonge, P.</i>	42
CFD06	Numerical Study on Turbulent Flow and Heat Transfer in Square Channel with 30° Delta-Winglets <i>Tamna, S.; Thianpong, C. and Promvonge, P.</i>	49
CFD07	Comparison between Weakly Compressible and Implicit Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics <i>Yutthanasirikul, P. and Boonyasiriwat, C.</i>	57
Computer Science and Engineering / Computational Mathematics		
CSE01	Mining top-k frequent-regular patterns based on use-given length constraints <i>Amphawanc, K. and Sittichaitaweekul, P.</i>	67
CSE02	Effects of Adaptations on Scaling Parameter of Scale-Free Networks <i>Jhubhalitdh, P.; Modchang, C.; Triampo, W. and Nuttawut, N.</i>	73
CSE03	Parameter Identification of DC-Servo Motor by Adaptive Tabu Search <i>Ketthong, T.; Kiree, C.; Tunyasrirut, S. and Puangdownreong, D.</i>	79
CSE04	Application of Particle Swarm Optimization to Identify Model Parameters of BLDC Motor <i>Kiree, C.; Kumpanya, D.; Tunyasrirut, S. and Puangdownreong, D.</i>	84
CSE05	Application of Intensified Current Search to Design Optimal PID Controller for BLDC Motor Speed Control <i>Kumpanya, D.; Kiree, C. Tunyasrirut, S. and Puangdownreong, D.</i>	89
CSE06	Community-based Approach for Mining Top-K Influencers in Twitter Graph <i>Dejkajonwuth, N.; Manaskasemsak, B. and Rungsawang, A.</i>	95
CSE07	Optimum Study Slider Bar Dicing Parameters for Minimizing Diamond Wheel Wear <i>Manokruang, K. and Pimsarn, M.</i>	99
CSE08	Optimal PID Controller Design for Three-Phase Induction Motor Speed Control by Intensified Current Search <i>Nawikavatan, A.; Tunyasrirut, S. and Puangdownreong, D.</i>	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of cross frame and bottom bracing on torsional nature frequency of horizontally curved steel I-girder bridge

N.Kunla¹ and B.Puangkird^{1,C}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

^C E-mail : kpbumroo@kmitl.ac.th

ABSTRACT

Horizontally curved steel I-girder bridges have low torsional resistant that make them vulnerable for safety when the bridge are vibrated. This research employ numerical tools in studying the effects of cross frame and bottom bracing on torsional nature frequency of vibration of horizontally curved steel I-girder bridges. Three types of cross frames with various effects of additional with cross frame and bottom bracing are investigated K-type, Z-type and X-type cross frame. In performing the numerical investigation, three dimensional (3-D) finite element (FE) of horizontally curved steel I-girder bridge models are established by using Evolution FEA which is public domain software and opened source code. The numerical results show that torsional natural frequencies of horizontally curved steel I-girder bridges that include K-type and Z-type cross frames are almost equal to horizontally curved steel I-girder bridges included X-type cross frames. X-type cross frame also has the same mass as bottom bracing when included in horizontally curved steel I-girder bridge. Additional X-type cross frames bridges lead to increasing in the torsional nature frequencies but additional bottom bracings do not lead to an increase of torsional natural frequencies

Keyword: Natural Frequency, Torsional Vibration, Cross Frame, Curved Girder, Finite Element

1. INTRODUCTION

Horizontally curved steel I-girder bridges are commonly used in highway interchanges to meet growing traffic capacity demands in large urban areas. It possesses numerous beneficial merits such as reduction in total construction cost and time. However, disadvantage of the curved steel I-girder bridges is rather low torsional stiffness

Horizontally curved steel I-girder bridges may easily vibrate due to external dynamic loads like moving vehicles, wind loads, etc. and horizontal curvature induces significant torsion in the bridge girder systems. Therefore, natural frequencies of vibration are important and have to be considered in horizontally curved steel I-girder bridge design. Generally, each I-girder is connected by cross frame or other types of bracing systems, because the strength of the I-girder is considerably enhanced using cross frame and bracings. Accordingly, cross frames between girders must be designed as torsion-resistant members.

Up to present, there have been a number of research studies concerned with natural frequency of curved beam and some of them are concluded in this work such as following. C. G. Culver and D. J. Oestel [7] developed the method of determining natural frequency in multispan curved beam by using Rayleigh-Ritz method together with the Lagrange multiplier concept, which then illustrated a two span beam. Yoon and Kang [3] presented finite element method for free

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand

June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vibration analysis of horizontally curved I-girder based on the study of Kang and Yoo [2]. Another finite element method was presented by Bo Yeon Kim et al [8] to analyze the out-of-plane vibration of curved beams. Another method used to determine natural frequencies of curved beams was the differential quadrature method, which was developed by K. Kang [5].

As described above, their studies were limited to beams without intermediate cross frame and bottom bracing. This case is not a typical practice as the girders are connected to each other by cross frame or bracing. The study of H. Maneetes [4], which considered effect of cross frame and bracing to prevent lateral displacement and reduce dynamic stress differs from the case of effects of cross frame and bottom bracings on natural frequencies for torsional vibration. The effects of torsion on short-span highway bridges investigated by Meng and Lui [6] indicated that the effects of torsion should be considered in the seismic design of bridges. As a result, it is important to have an in-depth study on the natural frequencies for torsional vibration of horizontally curved steel I-girder bridges.

This study focuses on effects of cross frame and bottom bracings on natural frequencies for torsional vibration of horizontally curved steel I-girder bridges. Three types of cross frame and bottom bracings are selected to study natural frequencies of curved steel I-girder under free vibration. To perform the numerical study, a 3-D FE girder bridges are established using Evolution FEA code. Finally, the numerical results of effects of cross frame and bottom bracings are reported.

2. GIRDER GEOMETRY

The bridge adopted in this study is based on the study of curved steel bridge research project (CSBRP) [4] and is composed of three simply supported I-girders and cross frame. The radial span of each three I girders is 2.67 m. The radius of curvature is 63.63 m for the outside girder (G3), 60.96 m for the middle girder (G2) and 58.29 m for the inside girder (G1). The arc length of G1, G2 and G3 is 26.2 m, 27.4 and 28.6, respectively. Measured web and flange dimensions of girder are detailed in Figure 1, while the dimension details of cross frame and bottom bracing are presented in Table 1 and plane view of curved steel I-girder is shown in Figure 2.

Table 1. Dimensions of cross frame and bottom bracing

Cross frame/Bottom bracing	Diameter [mm]	Thickness [mm]
Pipe	127	6.4

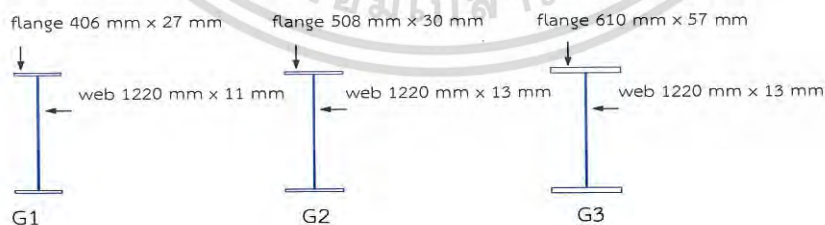


Figure 1. Girder cross section

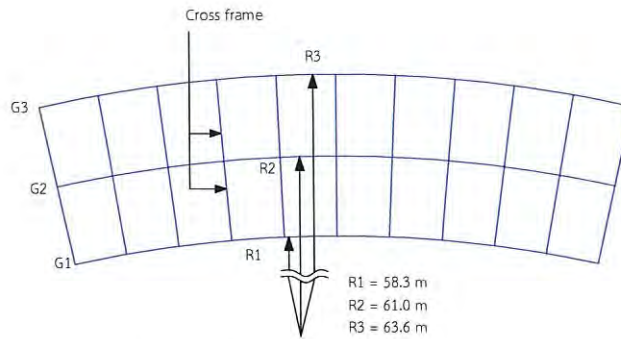


Figure 2. Girder geometry Plane view

3. FINITE ELEMENT MODEL

To verify the validity of the program Evolution FEA, the software was used and compared with three research studies i.e. Nitipong 's research [1], Ki – Young Yoon 's research [2] and experimental study of Curved Steel Bridge Research Project (CSBRP) [4] . The results of using Evolution FEA differed from the findings of Nitipong, Ki – Young Yoon and experimental study of Curved Steel Bridge Research Project (CSBRP) at the maximum of 2%. This result indicated that the software is accurate enough to be applied in this study. The details about FE models of the girder bridges and cross frames, and boundary condition are disclosed below.

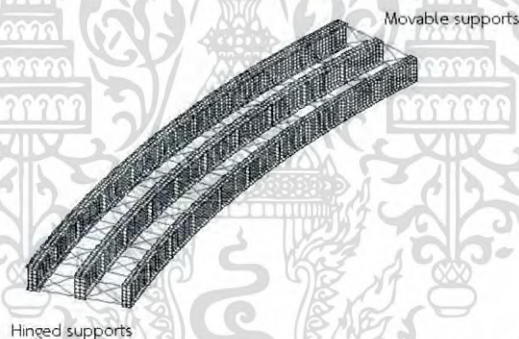


Figure 3. Curved I-girders and their boundary conditions

3.1 BOUNDARY CONDITION

The main conditions of girders are hinged supports and movable-supports as shown in Figure 3 and described in Table 2

Table 2 Boundary conditions

Type	u	v	w	θ_1	θ_2	θ_3
Hinged	Fix	Fix	Fix	Free	Free	Free
Movable	Fix	Fix	Free	Free	Free	Free

Note : u, v, w are translation in the x, y, z directions

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ are rotations about x, y, z directions

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ELEMENT MESH

In this study, the three-dimensional (3D) type of four-node shell elements (S4R5) was used to model the flanges, webs, and transverse web stiffeners. Beam element (B31) was used to model cross frame and bottom bracing. The S4R5 element has four integration points across the element and five section points (integration points) through the thickness of the shell element node. The B31 element has two nodes with six degree of freedom at each node. The model of curved steel I girder bridge consisted of 6,300 elements and 33,000 DOF approximately to demonstrate the validity of the curved steel I girder bridge model based on the study of curved steel bridge research project [4]. FE analysis was performed to be compared with the study of curved steel bridge research project [4]. It was found that the findings of natural frequencies of FE model of curved steel I girder containing mesh of 6,300 elements and 33,000 DOF revealed in Figure 4 were consistent with the findings of curved steel bridge research project [4], and this mesh is used in this study. Figure 5 shows a 3-D view of the FE model of the basic-type bridge with no bottom bracing applied in this study.

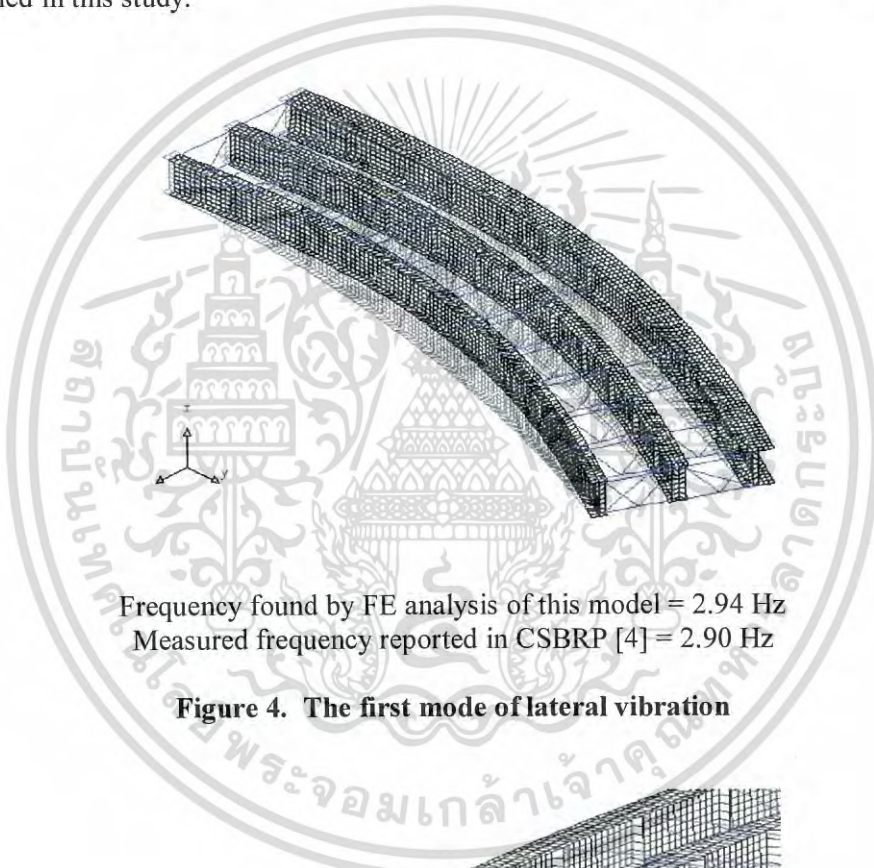


Figure 4. The first mode of lateral vibration



Figure 5. Detailed FE model of the girder

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Materials of girder cross frame and bottom bracing are assumed being homogenous, isotropic and obeying Hook's law. Mechanical properties of girder cross frame and bottom bracing are described in Table 3

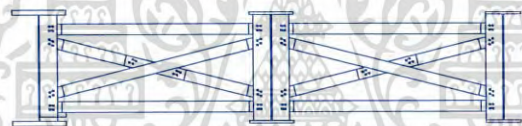
Table 3 Mechanical properties of materials

Model part	Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Girder	Carbon steel	7850	200	0.3
Cross frame	High strength steel	7850	0.503	0.3
Bottom bracing	High strength steel	7850	0.503	0.3

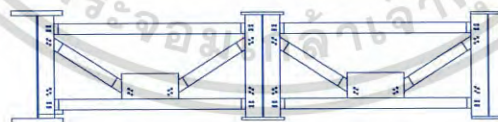
3.4 ANALYSIS METHOD

Free vibration of a given analysis is usually the first step in performing a dynamic analysis to determine the natural frequencies and mode shapes structure. The numerical method applied to determine the natural frequencies and mode shape was Fourier analysis. The Model Assurance Criterion (MAC) available in Evolution FEA was used to solve natural frequencies and associated mode shapes difficulties.

The types of cross frame investigated in this study were X-type, K-type, Z-type cross frame as shown in Figure 6 and bottom bracings shown in Figure 7.



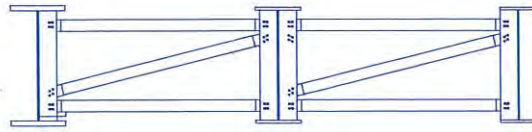
X-type



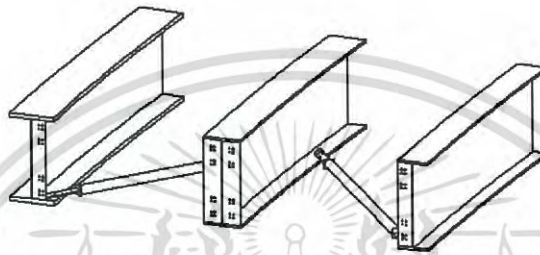
K-type

ANSCSE19 Ubol Ratchathani University, Ubol Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Z-type

Figure 6. Types of Cross frame**Figure 7.** Bottom bracing

4. RESULTS

To investigate effects of cross frame and bottom bracings on natural frequencies for torsional vibration of horizontally curved steel I-girder bridges, the parameters comprised the types of cross-frame, additional cross frame and additional bottom bracing. The results are presented below.

4.1 EFFECTS OF TYPE OF CROSS FRAME

For FE model of steel I-girder bridge composed of three cross frame types with the same member of cross section and no bottom bracing, the first torsional mode is shown in Figure. 8–10 and the numerical results of natural frequencies for first torsional vibration mode of steel I-girder bridge are almost equal as revealed in table 5.



FE analysis : 4.04 Hz

Figure 8. 1st torsional mode of curved steel I-girder with X-type cross frame

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

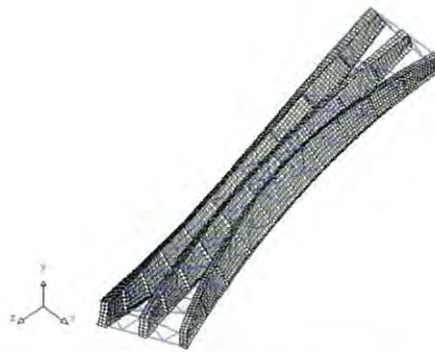


Figure 9. 1st torsional mode of curved steel I-girder with K-type cross frame

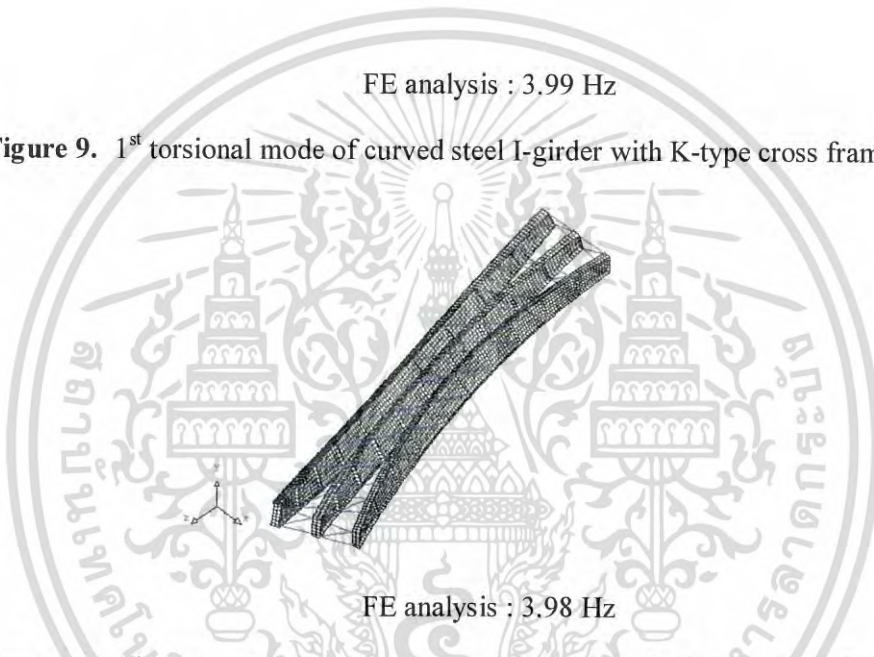


Figure 10. 1st torsional mode of curved steel I - girder with Z-type cross frame

Table 5. Natural frequencies for first mode of torsional vibration

Mode	Natural frequencies (Hz) of girder composed		
	X – type cross frame	K – type cross frame	Z – type cross frame
1 st Torsional	4.04	3.99	3.98

4.2 EFFECTS OF ADDITIONAL CROSS FRAME

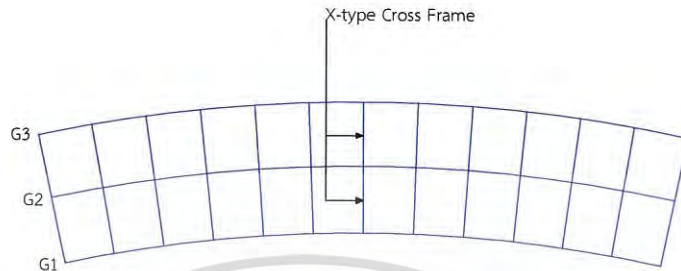
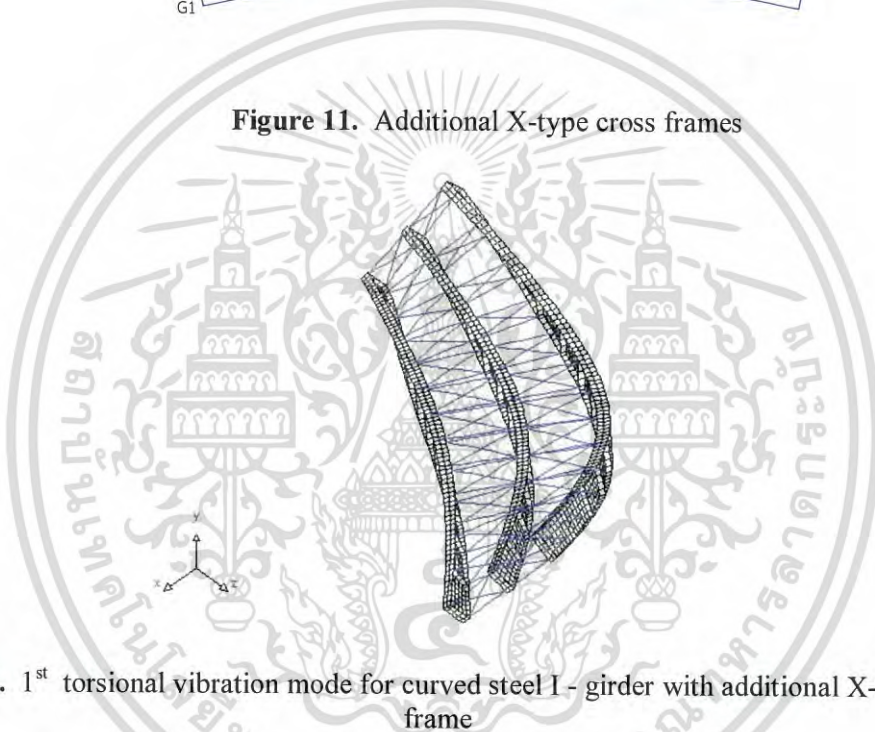
The effects of additional cross frame on natural frequencies of torsional vibration was studied by examining one cross frame case, which was the analytical model containing X-type. X-type cross-frame was added as illustrated in Figure 11. The numerical results of natural frequencies of first torsional vibration mode for the basic-type bridge with additional bottom bracing in this study are disclosed in table 6 and mode shape for first torsional vibration mode is demonstrated in Figure 12.

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6. Natural frequencies for first mode of torsional vibration

Mode	Natural frequencies (Hz) of girder composed of X type cross frame	
	Original model	Additional X type cross frame
1 st Torsional	4.04	4.43

**Figure 11.** Additional X-type cross frames**Figure 12.** 1st torsional vibration mode for curved steel I - girder with additional X-type cross frame

The numerical results indicated that additional X-type cross frame increased weight to the system, which had effects on nature frequencies. It made system stiffer than system without additional cross frame and enhanced natural frequencies for torsional vibration of the basic type girder.

4.3 EFFECTS OF ADDITIONAL BRACING

The effects of additional bottom bracing on natural frequencies of torsional vibration was studied by examining one cross frame case, which was the analytical model containing X-type. Bottom bracings were added as illustrated in Figure 13. The numerical results for natural frequencies of first torsional vibration mode are reported in table 7 and mode shape for first torsional vibration mode is shown in Figure 14.

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

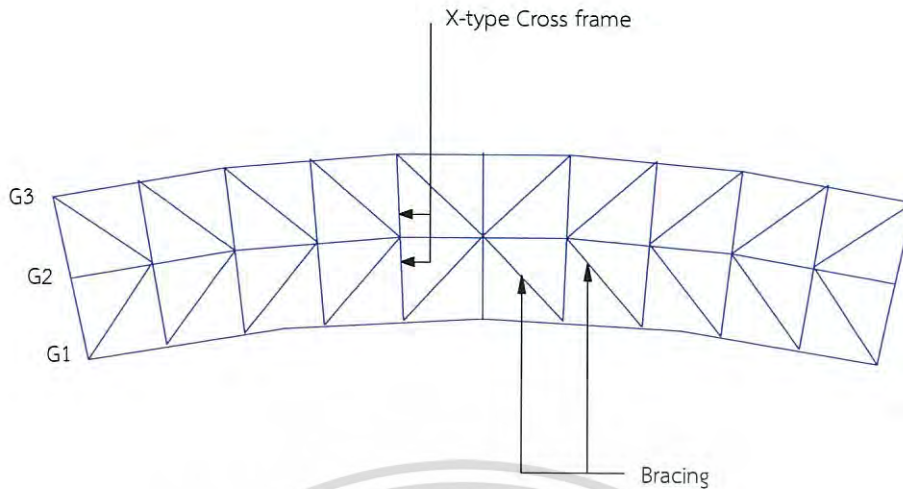


Figure 13. Additional bottom bracing

Table 7. Natural frequencies for first mode of torsional vibration

Mode	Natural frequencies (Hz)	
	Without additional bottom bracing	With additional bottom bracing
1 st Torsional	4.04	4.08

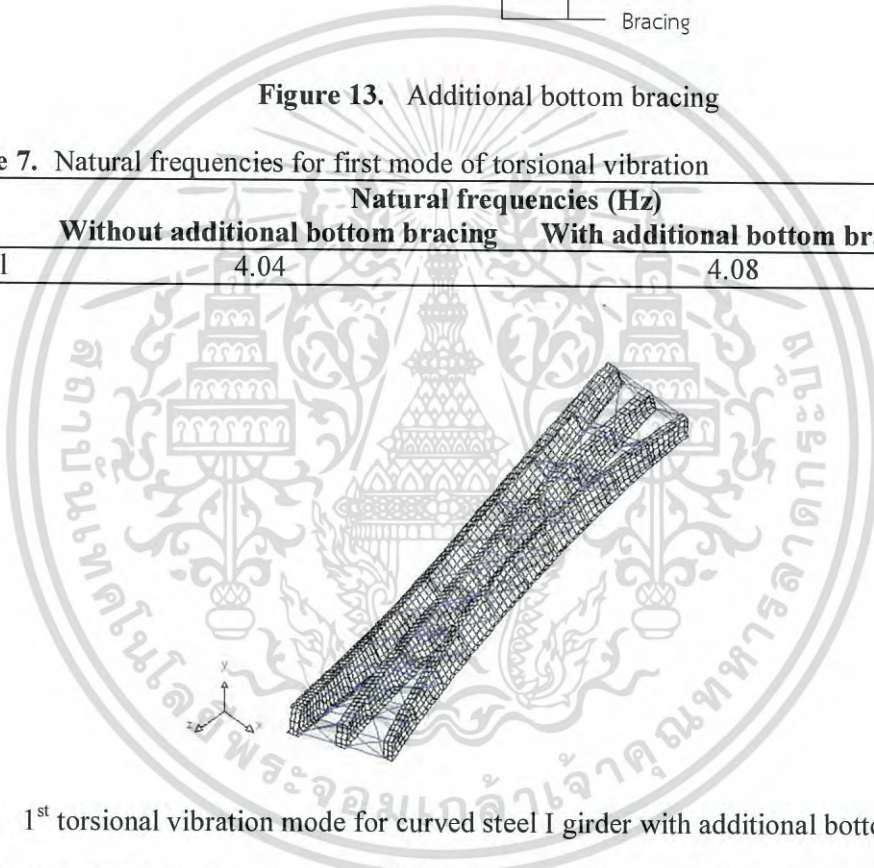


Figure 14. 1st torsional vibration mode for curved steel I girder with additional bottom bracing

The numerical results indicated that additional bracing increased the steel I-girder bridge weight which had effects on natural frequencies. The system with additional bracing provided 1% greater natural frequencies for torsional vibration than the system without additional bottom bracing. However, natural frequencies for torsional vibration of the system with additional bottom bracing were 7.8 % lower than natural frequencies for torsional vibration of the system with additional X-type cross frame equally weighted to the bottom bracing.

5. CONCLUDING REMARKS

This paper studied the effects of cross-frames and bottom bracing on natural frequencies of torsional vibration for the curved steel I-girder bridge based on the study of curved steel bridge research project [4] by using 3-D FE analysis, Evolution FEA. The parameters of this study were

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the types of cross frame (X-type, K-type and Z-type), additional X-type cross frame and bottom bracing. The numerical results indicated that all three types of cross frame (X-type, K-type and Z-type) have effects on torsion resistance of steel I-girder bridge almost the same. When considering torsional vibration for horizontally curved steel I-girder bridge, additional bottom bracings do not lead to increase in natural frequencies for torsional vibration. In contrast, additional cross frames lead to increase in natural frequencies of torsional vibration, which has significant effects on torsion resistance.

REFERENCE

- [1] Nitipong Photong, Kiatfa Tangchaichit. "Transition from Plate-Like to beam-Like behavior of Cantilevered Plates and Beams" The 20th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand , 2006, pp AMM 044
- [2] Y.J. Kang, C.H. Yoo. "Thin-walled curved beams, II: analytical solutions for buckling of arches", J. Eng. Mech., ASCE 120 (10), 1994, pp 2102–2125.
- [3] Ki – Young Yoon, Young – Jong Kang, Young – Joon Choi, Nam – Hoi Park. "Natural frequencies of thin-walled curved beams", Finite Elements in Analysis and Design, 2006, Vol. 42, pp 1176 – 1186
- [4] H.Maneetes, D.G. Linzell. "Cross- Frame and lateral bracing influence on curved steel bridge free vibration response", Journal of Constructional Steel Research, 2003, Vol. 59, pp 1101–1117.
- [5] Kijun Kang. "Vibration Analysis of Thin-walled Curved Beams using DQM", Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, Vol. 21, pp 1207-1217.
- [6] Cahn Tuan Nguyen. "Natural frequency for torsional vibration of simply supported steel I – girders with intermediate bracings", Thin – Wall Structures, 2011, Vol. 49, pp 534 – 542.
- [7] Majumdar. 2010. **Out of plane vibration of curved beams**. [Online]. Available: [http:// www.Ethesis.nitrkl.ac.th/1838](http://www.Ethesis.nitrkl.ac.th/1838)
- [8] Bo Yeon Kim "A finite thin circular beam element for out-of-plane vibration analysis of curved beams"

ANSCSE19 Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand
June 17-19, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ANNUAL SYMPOSIUM 19

The 19th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering

Faculty of Science, Ubon Ratchathani University
Ubon Ratchathani, THAILAND

JUNE 17-19, 2015

Sponsored by



มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ขอเชิญชวนให้ร่วมงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณัฐพงศ์ คุณละ
วัน เดือน ปีเกิด	26 กันยายน 2518 ที่จังหวัด สกลนคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท เนวรัตน์พัฒนาการ จำกัด (มหาชน) - ฝ่ายประมาณราคาและออกแบบงานระบบ
พ.ศ. 2550-2554	บริษัท พาวเวอร์ โนน เอ็นจิเนียริง จำกัด - ฝ่ายประมาณราคา ออกแบบ ติดตั้ง โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ขนาดเล็ก
พ.ศ. 2554-2555	ทีมวิจัยและให้คำปรึกษาของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ - โครงการจัดจ้างที่ปรึกษาออกแบบโครงการก่อสร้างเพื่อพัฒนาการจัดทำน้ำหนักตชนี้ราคาวัสดุก่อสร้าง 2558 (กระทรวงพาณิชย์)
พ.ศ. 2558-ปัจจุบัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้