

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเฝ้าระวังและติดตามของโครงสร้างสะพานแบบ Box Girder ด้วยวิธี ERA
Damage Evaluation of Box Girder Bridge Based on Structural
Health Monitoring Data Using ERA Techniques

นักศึกษา นายศิริณัฐพงษ์ ต้วมาก รหัสนักศึกษา 60010977
นางสาวศิริวรรณ เหมพันธ์ รหัสนักศึกษา 60010982
นายอเนก ดารา รหัสนักศึกษา 60011144

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง	
ผศ.ดร.อำพน จรัสจรุงเกียรติ	
ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร	
ผศ.ดร.อัญจวิทย์ สุจริตพงศ์	
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 พฤษภาคม 2564 เวลา 9.00-10.00 น.

สถานที่สอบ ออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่.....

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเฝ้าระวังและติดตามของโครงสร้างสะพานแบบ Box Girder ด้วยวิธี

ERA

Damage Evaluation Of Box Girder Bridge Based On Structural
Health Monitoring Data Using ERA Techniques



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Damage Evaluation Based Of Box Girder Bridge On Structural Health Monitoring Data Using ERA Techniques



Sirinuttapong Tuamak

Siriwan Hamemapan

Anek Dara

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเฝ้าระวังและติดตามของโครงสร้างสะพานแบบ Box Girder

ด้วยวิธี ERA

นายศิริณัฐพงษ์ ต้วมาก รหัสนักศึกษา 60010977

นางสาวศิริวรรณ เหมพันธ์ รหัสนักศึกษา 60010982

นายอเนก ดารา รหัสนักศึกษา 60011144

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทรมดุง

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันจำนวนสะพานในประเทศไทยมีมากกว่า 8,000 แห่งที่มีอายุมากกว่า 15 ปี ซึ่งสะพานที่มีอายุช่วงนี้อยู่ในช่วงที่ควรจะได้รับการดูแลและตรวจสอบเพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน ซึ่งวิธีการตรวจสอบโดยปกติแล้วการตรวจสอบจะมีระยะห่าง 5 ปี ซึ่งในช่วงระยะเวลา 5 ปีก็อาจจะมากพอสมควร ถ้าหากมีการตรวจพบความผิดปกติได้เข้า ก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้เช่นกัน และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ราคาการซ่อมแซมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากปัญหาดังกล่าวทางออกคือ SHM ประกอบกับในปัจจุบันเทคโนโลยีเซนเซอร์มีพัฒนาการที่สามารถวัดข้อมูลการสั่นได้ จึงทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ตามเวลาจริง และสามารถควบคุมผ่านระยะไกลโดยไม่ต้องไปตรวจสอบที่สะพานเอง จึงมีการศึกษาโดยการนำข้อมูลการสั่นของคาน ที่เปรียบเสมือนสะพาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM ไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์และตีความเพื่อหาความความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยเทคนิควิธี ERA โดยแบบจำลองที่ใช้จะเริ่มต้นจากคานช่วงเดียวแบบ Line element วิเคราะห์แบบ Free-Vibration เพื่อเรียนรู้การเลือกใช้งานจำนวน element ในการวิเคราะห์และพบว่าตำแหน่งของแรงกระทำมีผลต่อการเกิดรูปร่างการสั่นและค่าความถี่ธรรมชาติ จากนั้นศึกษาคานช่วงเดียวแบบ Solid Element เรียนรู้การเลือกตำแหน่งของข้อมูลที่เลือกใช้ในการนำข้อมูลการสั่นออกจากคาน จากนั้นแบบจำลองที่ใช้ใกล้เคียงกับสะพานมากที่สุดจะเป็นคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เพื่อวิเคราะห์แบบ Force-Vibration นั่นคือเปรี้ยไสมีอนมีรขนาด 2 ตันวิ่งผ่านคานดังกล่าว จากการวิเคราะห์พบว่าเทคนิค ERA สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้ แต่จะมีโหมดการสั่นที่ 2 ที่เทคนิค ERA ไม่สามารถหาได้เนื่องจาก ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดดังกล่าวกับโหมดการสั่นที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก หลังจากนั้นเมื่อคานดังกล่าวเริ่มมีความเสียหายของชิ้นส่วน ในการศึกษาจะใช้รูปแบบความเสียหายของชิ้นส่วนแบบ Transverse โดยจากการวิเคราะห์พบว่า มีความเป็นไปได้ว่าเมื่อชิ้นส่วนมีความเสียหายตั้งแต่ 25% ขึ้นไปเทคนิค ERA จะสามารถเห็นความแตกต่างทั้งในความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการสืบค้นนี้ขึ้น สิ่งนี้ยังเป็นตัวอย่างของเนื้อหาและข้อมูลซึ่งอาจแตกต่างกันไปในการนำไปใช้

คำสำคัญ: SHM (Structural Health Monitoring), เทคโนโลยีเซนเซอร์, เทคนิค ERA

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Damage Evaluation of Box Girder Bridge based on Structural Health Monitoring Data using ERA Technique

Mr. Sirinuttapong Tuamak Student ID 60010977

Ms. Siriwan Hamemapan Student ID 60010982

Mr. Anek Dara Student ID 60011144

Advisor: Dr. Nathaniel Sinsamutpadung

Academic Year 2019

ABSTRACT

Currently, there are more than 8,000 bridges in Thailand that are over 15 years old. The bridges in this period should be inspected which the inspection method, normally the inspection will have a inspection gap of 5 years, which during the 5 years may be more reasonable. If the abnormality is detected slowly will also cause damage to far. Due to said reason, the solution is SHM method. The beginning of method is born up the sensor that can be used to measure vibration data. Also have advantage monitoring the bridge real-time data and remotely access by sensor. Therefore, studies by using the beam vibration data which data obtained from FEM method and data go to evaluation and interpretation using ERA technique. The model is starting from a simple beam using Line element and analysis method, Free-Vibration to learn how to sensitivity analysis and found that the position of the force affects natural frequency and mode shape. Then, study the simple beams using the Solid Element. Learn to choose the location of the data. From then, the model that is most like the bridge will be 3 continuous beams for analysis. Force-Vibration That is like a car that runs past the beam. From the analysis, it is found that the ERA technique can determine the natural frequency and the vibration shape. But there is a second mode that the ERA technique cannot find. After that, when this beam started to have damage. Found that, it is possible that when parts are damaged by 25% or more, the ERA technique will be able to find the difference in both the natural frequency and the mode shape. This project study is possible to investigate structural damage in the future.

KEYWORDS: SHM (Structural Health Monitoring), Sensor Technology, ERA Techniques

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร. ณ์ภูธรณ์ สินสมุทรผดุงที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไข ปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความ อนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอด ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการ ดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำ โครงาน รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาทั้งหมดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการ สนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใน พระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 สะพานในประเทศไทย.....	4
2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS).....	5
2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology).....	7
2.4 Structural Health Monitoring.....	11
2.5 Time Domain Method.....	12
2.6 Frequency domain method.....	13
2.7 Fourier Transformation.....	14
2.8 Eigensystem realization Algorithm.....	15
2.9 Bridge Structure.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

2.10 ระบบพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder).....	18
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนในการศึกษา.....	19
3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน.....	19
3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา.....	19
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	26
4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพานโดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	26
4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ช่วงเดียวแบบ Free-vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพาน และผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ช่วงเดียวแบบ Force-vibration โดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	28
4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ช่วงเดียวแบบ Free-vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพานโดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	39
4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ช่วงเดียวแบบ Force-vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพานโดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	30
4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Free-vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพานโดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	32
4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพานโดยใช้แบบจำลอง Solod Element.....	34
4.7 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-Box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเนระยะห่างเท่า ๆ กัน.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.1 สรุปผลการศึกษา.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัยและแนวทางในการดำเนินการศึกษาในอนาคต.....	40
บรรณานุกรม.....	42
ภาคผนวก.....	43
ประวัติผู้เขียน.....	47

สารบัญญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 จำนวนสะพานที่อายุต่างๆในประเทศไทย.....	4
รูปที่ 2.2 จำนวนสะพานในแต่ละประเภท.....	5
รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic.....	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric.....	10
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของ Time domain และ Frequency domain.....	12
รูปที่ 2.7 สัญญาณในรูปแบบของ (ก) Time domain และ (ข) Frequency domain.....	13
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA.....	16
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล.....	16
รูปที่ 2.10 ระบบพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง.....	18
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน.....	19
รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่คานช่วงเดียน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน.....	19
รูปที่ 3.3 แบบจำลองที่คานช่วงเดียน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน ในโปรแกรม ABAQUS.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แบบจำลองที่คาน Pre-Box Girder ช่วงเดียน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

ในโปรแกรม ABAQUS.....	21
รูปที่ 3.6 แบบจำลองที่คาน Pre-Box Girder ช่วงเดียน้ำหนักเคลื่อนที่บนคาน	
ในโปรแกรม ABAQUS.....	21
รูปที่ 3.7 แบบจำลองคาน Box Girder.....	22
รูปที่ 3.8 แบบจำลองที่คาน Box Girder ช่วงเดียน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน	
ในโปรแกรม ABAQUS.....	22
รูปที่ 3.9 แบบจำลองที่คาน Box Girder ช่วงเดียน้ำหนักเคลื่อนที่บนคาน	
ในโปรแกรม ABAQUS.....	22
รูปที่ 3.10 แบบจำลองที่คาน Box Girder สามช่วงน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน	
ในโปรแกรม ABAQUS.....	24
รูปที่ 3.11 แบบจำลองที่คาน Box Girder ช่วงเดียน้ำหนักเคลื่อนที่บนคาน	
ในโปรแกรม ABAQUS.....	24
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งชิ้นส่วนความเสียหายบนคานทุกระยะ 2.5 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตร.....	25
รูปที่ 4.1 รูปร่างการสั่นของคาน 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation.....	26
รูปที่ 4.1 รูปร่างการสั่นของคาน 1 ช่วง ด้วยวิธี ERA.....	27
รูปที่ 4.3 รูปร่างการสั่นของคาน Pre-Box Girder ต่อเนื่อง 1 ช่วง	
ด้วยวิธี Linear perturbation.....	28
รูปที่ 4.4 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation.....	29
รูปที่ 4.5 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี ERA.....	30
รูปที่ 4.6 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation.....	31
รูปที่ 4.7 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี ERA.....	32
รูปที่ 4.8 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation.....	33
รูปที่ 4.9 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation.....	34
รูปที่ 4.11 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA.....	35
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย	
เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA.....	36
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย	
เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA.....	37
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย	
เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA.....	37
รูปที่ 4.15 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน	
0% 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.16 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 3 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน	
0% 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.17 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 4 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน	
0% 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content VIII and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content **IX** and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงสร้างพื้นฐานประเภทสะพานได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อตอบสนองระบบขนส่งเนื่องจากการขยายตัวของเมือง ในอนาคตอันใกล้ โครงสร้างสะพานจำนวนมากกำลังจะมีอายุมากกว่า 15 ปีซึ่งโครงสร้างดังกล่าวต้องการการตรวจสอบสภาพและซ่อมแซม เพื่อความปลอดภัยของระบบขนส่ง อย่างไรก็ตามงบประมาณและกำลังคนนั้นมีอยู่อย่างจำกัดในแต่ละปี ดังนั้นการจัดสรรงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องจำเป็น

โดยทั่วไป ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสะพานนั้นจะแปรผันตรงกับระดับความเสียหาย ถ้าหน่วยงานที่ดูแลสะพานสามารถตรวจพบความเสียหายและซ่อมแซมได้ก่อนที่ความเสียหายจะขยายตัวกลายเป็นความเสียหายขนาดใหญ่ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสะพานได้ ในทางปฏิบัติ การตรวจสอบสภาพสะพานนั้นจะทำด้วยประเมินทางสายตาในทุกๆ 2-5 ปีเพื่อประเมินสภาพของสะพานและจัดลำดับความรุนแรงของความเสียหาย จากนั้นงบประมาณจะถูกจัดสรรไปตามกระบวนการจัดลำดับความสำคัญของสะพาน ในบางครั้ง ความเสียหายของสะพานอาจจะไม่ถูกตรวจพบในระหว่าง 2-5 ปี ที่รอการตรวจสอบสภาพสะพานส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเพิ่มขึ้น ดังนั้นการตรวจพบความเสียหายของสะพานได้ก่อนที่ความเสียหายจะขยายตัว จะสามารถช่วยให้การจัดสรรงบประมาณในการดูแลสะพานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งความเสียหายบางประเภทอาจไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยสายตา เช่น รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในชั้นทางคอนกรีต สนิมในเหล็กเสริม สนิมในคานเหล็ก ความเสื่อมสภาพของยางที่ฐานรองรับสะพาน วิธีการตรวจพบนอกจากการประเมินทางสายตาควรถูกพัฒนา

ซึ่งจากข้อมูลการติดตามโครงสร้างสะพานที่ได้กระทำกันมาอย่างต่อเนื่องเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟวงจรชีวิตของโครงสร้างและค่าบำรุงรักษาพบว่า ในขณะที่เมื่อเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพและคุณภาพของโครงสร้างจะลดลง ในเช่นเดียวกันค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซมกลับมากขึ้นด้วย ถ้าเปรียบเทียบกับการตรวจสอบแบบพิเศษที่จะกระทำทุกๆ 2-5 ปี พบว่าในช่วงเวลา 2-5 ปีนั้น สามารถเกิดเหตุการณ์ได้หลากหลาย เช่นเดียวกันถ้าหากสะพานเกิดเสียหายในช่วงเวลาปีที่ 1-2 จะทำให้ไม่สามารถแก้ไขสะพานได้จนกว่าจะมีการมาตรวจสอบสะพานอีกครั้งเมื่อครบ 5 ปี ในกรณีที่เลวร้ายถ้าหากประชาชนกำลังใช้งานสะพานดังกล่าวอยู่แล้วสะพานเกิดการชำรุดเสียหายอย่างรุนแรงโดยที่ไม่ทันได้ตั้งตัว นั้นหมายความว่าถึงชีวิตของประชาชนกำลังมีความเสี่ยง จึงเป็นสาเหตุที่บางที่การตรวจสอบทุก 5 ปีอาจจะสายเกินไป

เอกสารนี้เป็นด้วยเหตุผลที่ว่า การตรวจสอบทุก 2-5 ปีนั้นอาจจะสายเกินไป และด้วยข้อจำกัดที่ว่างงบประมาณในการคำนวณว่า การตรวจสอบนั้นมีอย่างจำกัด และในเรื่องของกำลังคนที่ใช้ตรวจสอบ อีกทั้งในการตรวจสอบแต่ละครั้งนั้นไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะต้องมีการเดินลงไปตรวจสอบหรือทำการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเก็บข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์เป็นไปได้อย่าง
ทางเลือกของการแก้ไขปัญหา เพื่อพัฒนาการตรวจสอบสภาพสะพานด้วยสายตา จึงมีระบบการเฝ้าระวัง
โครงสร้าง(Structural Health Monitoring) ด้วยเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความเร่ง การกระจัดและความ
เค้น ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อ การตรวจพบความผิดปกติของโครงสร้างด้วยข้อมูลตามเวลาจริง(Real Time) ในทาง
ปฏิบัติระบบดังกล่าวยังถูกใช้ในการแจ้งเตือนการตรวจสอบสภาพของสะพาน เช่น ถ้าค่าความเร่งหรือความ
เค้นมีค่าสูงผิดปกติ ระบบจะแจ้งเตือนหน่วยดูแลสะพานให้มีการออกไปตรวจสอบสภาพ ณ สะพานจริง

เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานนั้นเกี่ยวข้องกับการสั่นไหวจากยานพาหนะ,แรงลม,แรง
แผ่นดินไหว จึงมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการใช้พฤติกรรมการสั่นไหว อาทิ เช่น ค่าความถี่สั่นพ้อง
(Natural frequency) และรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง(Modal shape) ในการตรวจพบความเสียหาย
ของโครงสร้าง และมีการใช้หลักการดังกล่าวในระบบเฝ้าระวังสะพานอยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้นการประมวลผล
ภายหลังของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อให้ได้มาซึ่งดัชนีวัดการสั่นไหวจึงเป็นความคิดที่น่าสนใจใน
การนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิธีการประเมินความเสียหายร่วมกับระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง

ทางผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ทำการวิจัยในหัวข้อนี้ซึ่งมี
วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตในการทำวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และลำดับการทำวิจัยนั้นได้
แสดงในหัวข้อต่อไป

1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างสะพานแบบ Box Girder ด้วยเทคนิควิธี
Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้คานช่วงเดียว และคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ในการศึกษาเป็นตัวแทนโครงสร้างสะพาน
- 1.3.2 ใช้โมเดลแบบ Box Girder และโมเดลแบบ 3 มิติในการศึกษาทางพลศาสตร์และการศึกษาด้วย
เทคนิค Linear perturbation
- 1.3.3 ใช้ข้อมูลความเร่งในกระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิค ERA

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถจัดแบ่งกระบวนการศึกษาได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่

- 1.4.1 ใช้การสร้างโมเดลด้วย Finite Element เป็นตัวแทนให้กับโครงสร้างสะพาน
- 1.4.2 หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจากเทคนิค Linear perturbation

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

1.4.3 หาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาในแต่ละจุดที่เป็นตัวแทนของ sensor และนำไปเข้ากระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm

1.4.4 เปรียบค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจากเทคนิค linear perturbation กับเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

1.5.1 สามารถพัฒนาเทคนิค ERA ให้มาประยุกต์ใช้ได้จริงกับโครงสร้างสะพานในการเฝ้าระวังและติดตามความเสียหาย

1.5.2 สามารถนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาต่อให้เป็นระบบ และสร้างโปรแกรมที่เป็นมาตรฐานและใช้งานได้อย่างสะดวก

1.5.3 สร้างความปลอดภัยและมั่นใจมากขึ้นในการใช้งานสะพานที่มีอายุค่อนข้างมาก

1.5.4 ทางองค์กรที่เป็นหน่วยงานสำหรับติดตามและซ่อมแซมสะพาน จะสามารถจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับการซ่อมแซมสะพานในแต่ละครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

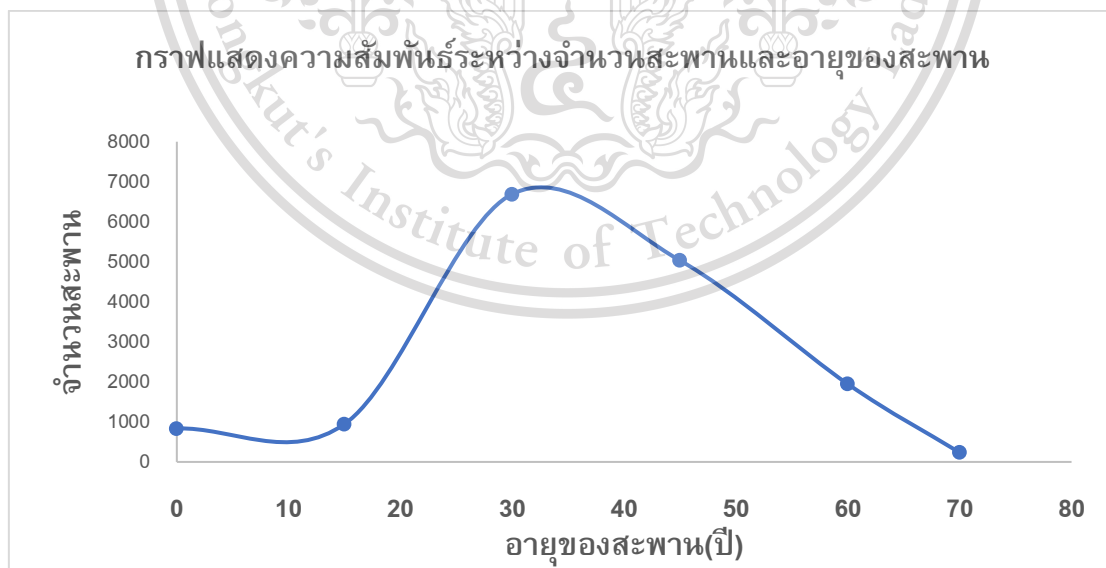
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 สะพานในประเทศไทย

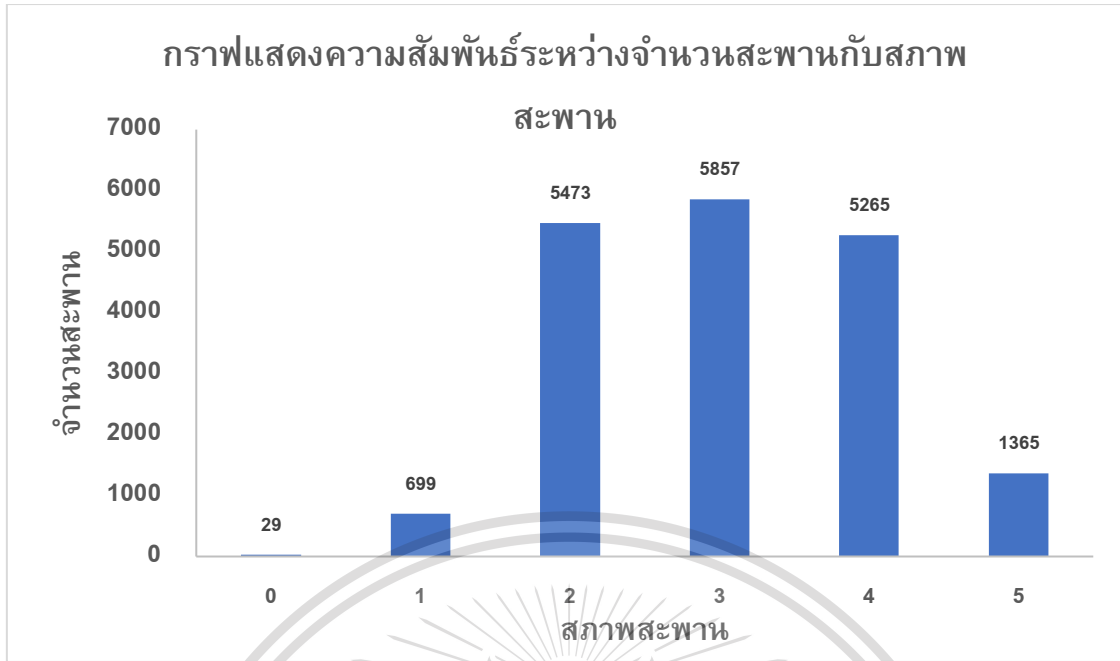
ปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานเป็นจำนวนมากกว่า 10,000 แห่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชาชน และปัจจุบันสะพานมีอายุที่แตกต่างกันไปหลายช่วงแสดงดังกราฟดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

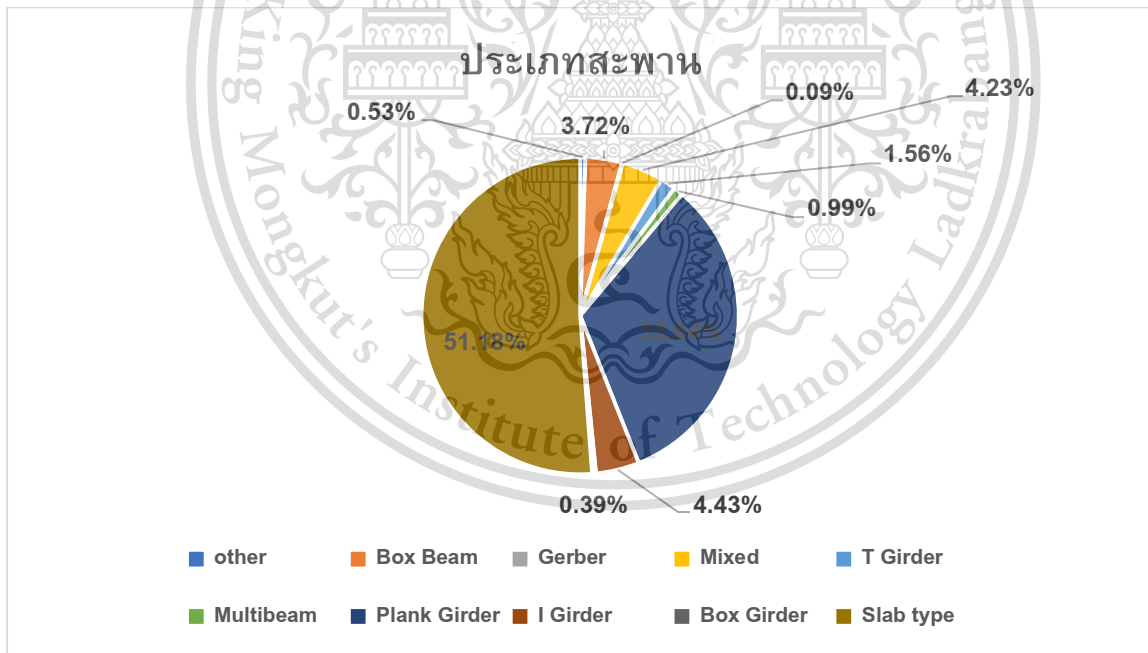
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



0-วิบัติ, 1-วิกฤติ, 2-ชำรุด, 3-พอใช้, 4-ดีพอใช้, 5-ดีมาก

รูปที่ 2.2 จำนวนสะพานที่อายุต่างในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)



รูปที่ 2.3 จำนวนสะพานในแต่ละประเภท (อ้างอิงกรมทางหลวง)

2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System,

เอกสาร BMMS) เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

คือระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพานช่วยบริหารจัดการข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรม ตรวจสอบ คิตรายาค่อม การประเมินอายุของสะพาน การรับน้ำหนักของสะพาน การจัดลำดับความสำคัญของ สะพานเพื่อเสนอของบประมาณ และการใช้ข้อมูลเชิงบริหาร

2.2.1 ประโยชน์ของ BMMS

2.2.1.1 ด้านประสิทธิภาพในการบริหาร

- รวดเร็ว ไม่ซ้ำซ้อน เพิ่มประสิทธิภาพ
- เพิ่มความปลอดภัยสะพานบนโครงข่ายทางหลวง

2.2.1.2 ด้านการบริหารงบประมาณ

- ได้ภาพรวมการซ่อมบำรุงรักษา
- มีข้อมูลสนับสนุนที่มาของงบ เช่น ค่าซ่อมสะพาน
- บริหารงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพ
- แจกแจงและเปรียบเทียบงบประมาณ

2.2.2 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน



2.2.2.1 ข้อมูล INPUT

- ข้อมูลทั่วไปของสะพาน เช่น ตำแหน่งที่ตั้ง, ปริมาณการจราจร, ข้อมูลที่ตั้ง, ปีที่สร้าง
- ข้อมูลการตรวจสอบสะพาน เช่น รูปถ่ายลักษณะชิ้นส่วนสะพาน,
 - ข้อมูลลักษณะเฉพาะสะพาน เช่น ความยาวสะพาน, จำนวนช่วงสะพาน, ความกว้าง
 - ข้อมูลประมาณราคาค่าซ่อม เช่น ราคาน้ำมัน, ราคาค่าแรง, ราคาวีสดุ

2.2.2.2 กระบวนการ

- Model การเสื่อมความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน
- Model อายุที่เหลือของสะพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่-การคิดราคาค่อมแซมรายปีตามราคาวีสดุที่เปลี่ยนไปไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น -การคิดราคาค่าขึ้นส่งตามระยะทางจริง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

-การจัดลำดับความสำคัญของสะพาน

2.2.3 การตรวจสอบสะพาน (Inspection)

ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานภายหลังการก่อสร้างหรือการเปิดใช้งานสะพาน ประกอบด้วย กระบวนการทำงานต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การวางแผนการตรวจสอบ การตรวจสอบ การวางแผน การซ่อมแซม การซ่อมแซม และการปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้าง เป็นวงจรต่อเนื่องและสนับสนุนซึ่งกันและกันด้วยระบบ ฐานข้อมูลเพื่อใช้พิจารณาประกอบการดำเนินการ โดยระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษา สะพานทมีประสิทธิภาพนั้นมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้การดำเนินการต่างๆ ทุกๆ ขั้นตอนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เป็นไปได้อย่างมีความเหมาะสม รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณ ทั้งนี้เพื่อความมั่นคงแข็งแรงของ สะพาน ตลอดจนความปลอดภัยของผู้ใช้บริการสะพาน ผู้ที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนของ

การตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วยขั้นตอน และรายละเอียดต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบ และขั้นส่วนที่ทำการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบควรจะต้องมีความรู้ความชำนาญในวิธีการตรวจสอบ และความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมสะพาน การตรวจสอบ สามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะตามความถี่ในการตรวจสอบดังนี้

1.การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด เช่น การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เพื่อให้ทราบถึงสภาพของสะพานในช่วงเวลาต่างๆ หาก สะพานเริ่มเกิดความเสียหาย จะได้มีมาตรการตรวจสอบความเสียหายเพิ่มเติม ซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาอื่นๆ ได้ทันท่วงที โดยทั่วไปมักจะเป็นทดสอบทางกายภาพที่ใช้ระยะเวลาและงบประมาณต่อหนึ่งสะพานไม่มากนัก

2.การตรวจสอบพิเศษ(Special Inspection) เป็นการตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลังที่ทราบว่าสะพาน เกิดความเสียหายขึ้น เป็นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดความเสียหาย ติดตามการขยายตัวของ ความเสียหาย หรือประเมินความสามารถของสะพานอย่างละเอียด เป็นต้น การตรวจสอบพิเศษในบางกรณี เป็นวิธีเฉพาะ มีข้อควรระวังและเทคนิควิธีการที่ละเอียดซับซ้อน จำเป็นต้องตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

3.การตรวจสอบฉุกเฉิน(Emergency Inspection) เป็นการตรวจสอบเมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินเกิดขึ้นกับสะพานเช่น ไฟไหม้ สารเคมีรั่วไหล รถยนต์หรือเรือชนสะพาน หรือแผ่นดินไหว เป็นต้น การตรวจสอบ แบบฉุกเฉินนี้จะกระทำไปพร้อมๆ กับมาตรการบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวสะพาน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดผล

กระทบกับประชาชนที่อยู่โดยรอบหรือต้องใช้สะพานในการสัญจรน้อยที่สุด ประกอบด้วยวิธีการตรวจสอบปลະ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ประเมินความเสียหายในหลายระดับขึ้นอยู่กับสภาพความร้ายแรงของความเสียหาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology)

เซนเซอร์ (Sensor) คือ ชุดอุปกรณ์ วงจร หรือ ระบบ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือลักษณะของสิ่งต่างๆ โดยรอบวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลจำนวนมากมหาศาล (Big Data) ที่ได้จากการตรวจวัด เข้าสู่กระบวนการแจกแจง และวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลง ประมวลผลเป็นองค์ความรู้ และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ให้มนุษย์สามารถนำองค์ความรู้มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน



รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีเซนเซอร์

ปัจจุบันมีการนำระบบ sensor มาใช้บนโทรศัพท์มือถือ ในหลายรูปแบบ เช่น G-sensor ระบบตรวจจับความเคลื่อนไหว, Accelerometer Sensor ระบบหมุนภาพ อัตโนมัติ, Orientation Sensor เซ็นเซอร์ปรับมุมมองหน้าจอ, Sound Sensor เซ็นเซอร์ตรวจวัดระดับเสียง, Magnetic Sensor ตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก, Light Sensor ตรวจจับแสงสว่างสำหรับการปรับแสงบนหน้าจออัตโนมัติ และ Proximity Sensor ระบบเปิด/ปิดหน้าจออัตโนมัติขณะสนทนาแบบหู เป็นต้น ซึ่งเรามักพบคุณสมบัติเหล่านี้ได้กับโทรศัพท์มือถือ แบบ Smartphone ทั้งในระบบ iOS และ Android OS

อุปกรณ์เซนเซอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามคุณสมบัติในการตรวจวัด ประกอบด้วย

1. เซนเซอร์ด้านกายภาพ (Physical Sensor) คือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้เซลล์พิเศษที่มีความไว ต่อ แสง, การเคลื่อนไหว, อุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก, แรงโน้มถ่วง, ความชื้น, การสั่นสะเทือน, แรงดัน, สนามไฟฟ้า, เสียง และลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ของสภาพแวดล้อมภายนอก/ภายใน เช่น แรงยึด, การเคลื่อนไหวของอวัยวะ รวมทั้ง สารพิษ, สารอาหาร, และสภาพแวดล้อมการเผาผลาญภายใน เช่น ระดับน้ำตาล, ระดับออกซิเจน, ฮอโมน, สารสื่อประสาท เป็นต้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

2. เซนเซอร์ด้านเคมี (Chemical Sensor) คือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสารเคมีต่างๆ โดยอาศัยปฏิกิริยาจำเพาะทางเคมี และมีการแปลงเป็นข้อมูลหรือสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดสารเคมีปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หรือดินและน้ำ เซนเซอร์ และ อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบสัมพันธ์กันอย่างไร?ทิศทางการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบมีแนวโน้มจะประยุกต์เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านผลได้ง่าย แสดงผลเป็นระบบดิจิทัลหรือตัวเลข โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์และอ่านผลผู้ใช้สามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้ด้วยตัวเอง (Point-of-Care: PoC) จากลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ที่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ที่มีขนาดพกพาสะดวกและใช้งานง่ายนั้น จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

3. เซนเซอร์ทางชีวภาพ (Biosensor) คือ เซนเซอร์ที่อาศัยเทคนิคการนำ สารชีวภาพ (Biological Recognition Material) มาเป็นตัวทำปฏิกิริยาจำเพาะกับสารเป้าหมาย เช่น เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับน้ำตาลในเลือด

ในยุค 4.0 เทคโนโลยี Sensor มีความสำคัญมากต่อการทำงานกับระบบเก็บข้อมูลอัตโนมัติต่างๆ ผ่านเครือข่ายของวัตถุที่เรียกว่า อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) และ AI เนื่องจาก ระบบ Sensor ในปัจจุบันมีทิศทางที่คาดว่าจะก้าวสู่ คำว่า วัตถุอัจฉริยะ (Smart Objects) โดยปัจจุบันได้มีการเชื่อมโยงและสื่อสารเข้ากับวัตถุต่างๆ รอบตัว ไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน และแม้แต่สัตว์เลี้ยงที่บ้าน ก็สามารถเชื่อมโยงสื่อสาร และตอบสนองผ่าน IoT ซึ่งทั้งหมดต้องอาศัยเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็กลง ผลิตขึ้น และราคาที่ถูกลง ซึ่งมีการคาดการณ์ว่า วัตถุอัจฉริยะที่เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจะมีมากถึง 13 ล้านล้านตัวภายในปี 2025 สำหรับระบบอัจฉริยะต่างๆ รวมทั้ง บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) ระบบขนส่งอัจฉริยะ (intelligent transport) เมืองอัจฉริยะ (Smart City) เกษตรกรรมอัจฉริยะ (Smart Agriculture) ระบบดูแลสุขภาพอัจฉริยะ (Smart Healthcare) เป็นต้น

ประเทศไทย 4.0 กำลังเตรียมมุ่งเข้าสู่เศรษฐกิจดิจิทัล รับรองได้ว่า เทคโนโลยีเซนเซอร์ มีความจำเป็นต้องลงทุนอย่างจริงจัง และเชื่อว่าในอีกไม่เกิน 10 ปีข้างหน้า จำนวนเซนเซอร์ทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นจากหลักพันล้านตัว (billion) ไปสู่หลักล้านล้านตัว (trillion) จนเรียกได้ว่า เทคโนโลยีนี้เข้าสู่ยุค Trillion Sensors จากแนวโน้มของเทคโนโลยีเซนเซอร์ ที่มีชิปเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กลง และมีความฉลาดและเป็นอัจฉริยะเพิ่มขึ้น จนสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลเป็นองค์ความรู้และสร้างปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เพื่อพัฒนาให้เกิดเป็นนวัตกรรมฝีมือคนไทย และนักวิจัยมีบทบาทในเวทีนวัตกรรมด้านเซนเซอร์ของโลกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.3.1 Accelerometer Sensor

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

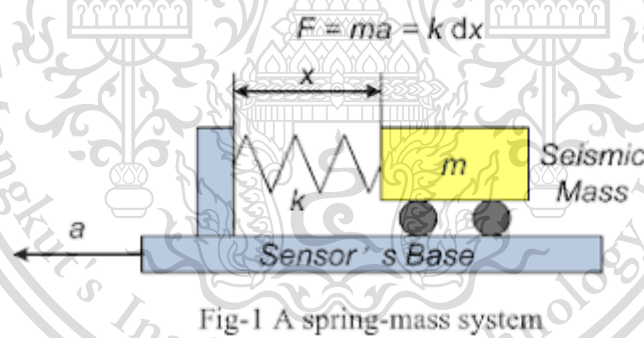
Accelerometer คือ เครื่องตัววัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ คำนวณโดยในมือถือสมาร์ทโฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกมนั้นล้วนเป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่อง

โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง

มิเตอร์วัดความเร่งนี้โดยหลักๆแล้วจะแบ่งเป็น 2 ชนิด

1. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมส (seismic mass accelerometer) มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงกระทำที่ยิ่งมีแรงกระทำมาก ก็จะมีมีความเร่งมาก ในขณะที่ความเร่งต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วยนอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่มากกระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมากระยะขจัดยิ่งมาก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมสในการตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุในเทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic

จากรูป แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมส โครงสร้างนี้มีมวล m ที่เรียกว่ามวลตรวจการสั่นไหว (seismic mass) ยึดติดอยู่กับสปริงที่มีค่า spring constant เท่ากับ k และมวลนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับได้ซึ่งหลักการทำงานก็ง่ายๆ ไม่ได้ซับซ้อนอะไร

เมื่อตัวเซนเซอร์ตัวนี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล m เคลื่อนที่ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ x และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความรู้ในวงจำกัด การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = x(k/m) \text{ โดยที่}$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

a คือ อัตราเร่งของวัตถุ หน่วย เมตร/วินาที

x คือ ระยะขจัดของมวล m หน่วย เมตร

k คือ ค่าคงที่ของสปริง หน่วย นิวตัน/เมตร

m คือ น้ำหนักของมวล m หน่วย กิโลกรัม

จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า

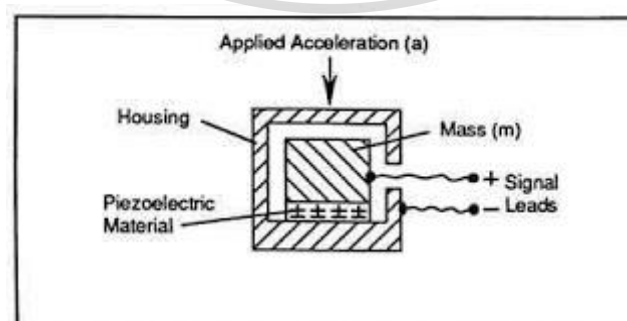
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะขจัดของมวล m มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง ทำให้มวล m เคลื่อนที่ไปดันสปริง
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล m เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง)

แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล m ได้โดยอาศัยมิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง คือ มิเตอร์วัดระยะขจัดเชิงเส้น (LVDT, potentiometer)

2. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer)

คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในราวปี ค.ศ.1880 ซึ่งเจ้า piezoelectric crystal นี้มันมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อมันถูกแรงทางกลมากระทำ มันจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำนั้น ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้สร้างอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับนาฬิกาข้อมือดิจิทัลที่เราใช้ทั่วไป และยังใช้สร้างมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย

โครงสร้างของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วย seismic mass ยึดติดกับ piezoelectric crystal และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดย piezoelectric crystal ที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโพแทสเซียมทาร์เตรต (sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ และราคาไม่แพงมากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

จากรูปแสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer) สามารถอธิบายการทำงานง่ายๆ ได้ดังนี้

เมื่อ seismic mass (m) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์

มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง 250,000 m.s⁻²

2.4 Structural Health monitoring

การตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง (SHM) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ในทุกช่วงเวลาของชีวิตของโครงสร้าง การวินิจฉัยของ "รัฐ" ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของที่แตกต่างกันขึ้นขึ้นส่วนและจากการประกอบอย่างเต็มรูปแบบของชิ้นส่วนเหล่านี้ประกอบเป็นโครงสร้างโดยรวมสถานะของโครงสร้างจะต้องคงอยู่ในโดเมนที่ระบุในการออกแบบแม้ว่าสิ่งนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยอายุปกติเนื่องจากการใช้งานโดยการกระทำของสภาพแวดล้อมและโดยเหตุการณ์ที่ไม่ได้ตั้งใจ ขอบเขตมิติเวลาของการตรวจสอบซึ่งทำให้เป็นไปได้ที่จะพิจารณาฐานข้อมูลประวัติแบบเต็มของโครงสร้างและด้วยความช่วยเหลือของ ตรวจสอบการใช้งานมันยังสามารถให้การพยากรณ์โรค (วิวัฒนาการของความเสียหายชีวิตที่เหลือ ฯลฯ)

หากพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันแรกการวินิจฉัยสามารถประมาณได้ว่าการตรวจสอบสุขภาพโครงสร้างเป็นวิธีใหม่และปรับปรุงในการประเมินผลแบบไม่ทำลาย ที่กล่าวมาเป็นความจริงบางส่วน แต่ SHM นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการรวมกันของเซ็นเซอร์, วัสดุที่ชาญฉลาด, การส่งข้อมูล, การคำนวณพลังงานและความสามารถในการประมวลผลภายในโครงสร้าง ทำให้สามารถพิจารณาได้อีกครั้งการออกแบบโครงสร้างและการจัดการเต็มรูปแบบของโครงสร้างตัวเองและของโครงสร้างถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่กว้างขึ้น

รายละเอียดการจัดระเบียบของระบบ SHM ทั่วไปส่วนแรกของระบบซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ฟังก์ชันสามารถกำหนดโดย:

- i) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับความเสียหายซึ่งตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยเซ็นเซอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

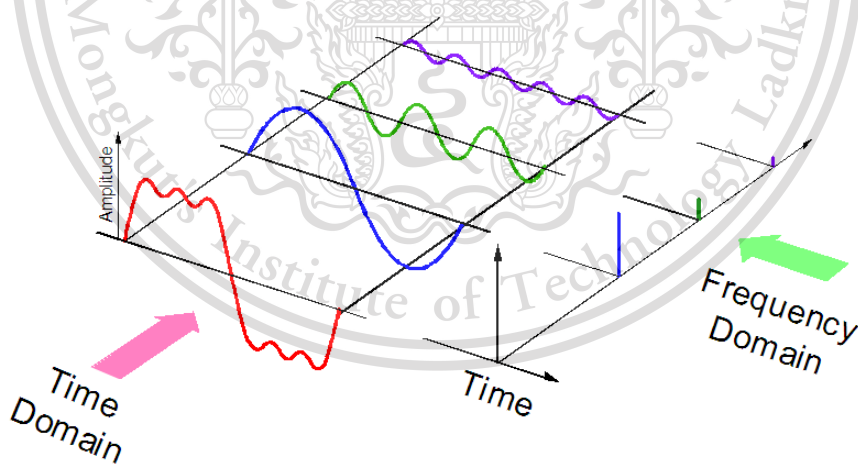
Forbidden to modify the content and cite the document when use.

- ii) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เซ็นเซอร์ใช้เพื่อสร้างสัญญาณ (โดยทั่วไปคือไฟฟ้า) ที่ส่งไปยัง

การได้มาและการจัดเก็บระบบย่อย เซ็นเซอร์หลายตัวที่เป็นชนิดเดียวกัน เครือข่ายสามารถ มีลติเพิล็กซ์และข้อมูลของพวกเขารวมกับผู้ที่มาจากประเภทอื่น ๆ อาจเป็นไปได้ว่าเซ็นเซอร์อื่น ๆ ตรวจสอบ สภาพแวดล้อมทำให้มัน เป็นไปได้ที่จะดำเนินการฟังก์ชันการตรวจสอบการใช้งาน สัญญาณที่ส่งมอบโดย การ ตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบย่อยควบคู่ไปกับข้อมูลที่ลงทะเบียนก่อนหน้านี้คือ ใช้โดยคอนโทรลเลอร์เพื่อ สร้างการวินิจฉัย การผสมข้อมูลของความเชื่อสัตย์ การตรวจสอบระบบย่อยด้วยการใช้งานระบบย่อยการ ตรวจสอบและกับความรู้ตามกลไกความเสียหายและกฎหมายพฤติกรรมทำให้เป็นไปได้

กำหนดการพยากรณ์โรค (ชีวิตที่เหลือ) และการจัดการสุขภาพของโครงสร้าง(การจัดองค์ประกอบของการ บำรุงรักษาการดำเนินการซ่อมแซม ฯลฯ) ในที่สุดโครงสร้างที่คล้ายกันระบบการจัดการที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งเป็นประเภทของสื่อยอดระบบ (กองทัพเรือของเครื่องบินกลุ่มของสถานีพลังงาน ฯลฯ) ทำให้สุขภาพเป็นไปได้การจัดการของระบบซูปเปอร์ แน่นนอนว่าระบบที่ใช้การได้สามารถตั้งค่าได้แม้ว่าไม่ ครอบคลุมอย่างที่อธิบายไว้

2.5 Time domain Method

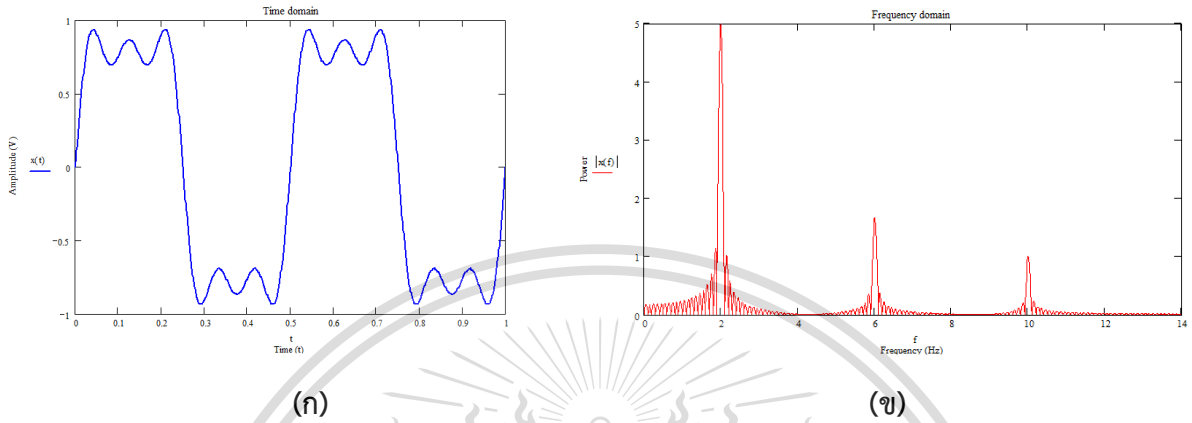


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของ Time domain และ Frequency domain

โดเมน หมายถึงการอธิบายความหมายต่าง ๆ คือหากการอธิบายหรือการทำงานนั้นกระทำภายใต้ตัวแปรของเวลา (t) ก็จะใช้เรียกว่า Time domain หรือ โดเมนเวลา หรือถ้าหากการทำงานนั้นกระทำภายใต้ตัวแปรของความถี่ (f) ก็จะใช้เรียกว่า Frequency domain หรือ โดเมนความถี่ เป็นต้น ในการวิเคราะห์สัญญาณเดียวกันนั้นคุณสมบัติบางอย่างอาจมองได้เด่นชัดในอีกโดเมนหนึ่ง เช่น จากรูปที่ 3 ใน Time domain เรา

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สามารถจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและขนาดของสัญญาณในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน แต่จะบอกได้ยากว่าสัญญาณนั้นประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง แต่ใน Frequency domain นั้นเราสามารถที่ระบุได้ว่าสัญญาณนั้นประกอบด้วยความถี่ใดบ้างแต่ละความถี่นั้นมีพลังงานเท่าไร



รูปที่ 2.8 สัญญาณในรูปแบบของ (ก) Time domain และ (ข) Frequency domain

จากรูป (ก) เป็นสัญญาณในรูปแบบของ Time domain ซึ่งใช้ Oscilloscope เป็นเครื่องมือวัด สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและขนาดของสัญญาณในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปได้ แต่ไม่สามารถรู้ได้ว่าสัญญาณที่วัดได้ประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง ดังนั้นในรูปที่ 4 (ข) เป็นสัญญาณในรูปแบบของ Frequency domain ซึ่งใช้ Spectrum เป็นเครื่องมือวัด จะเห็นได้ว่ามีความถี่ใดบ้างเป็นส่วนประกอบในที่นี้ การเปลี่ยนจาก Time domain ไปเป็น Frequency domain นั้นในทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยการ Fourier Transformation ส่วนการแปลงจาก Frequency domain ไปเป็น Time domain นั้นทำได้โดยการ Inverse Fourier Transformation ซึ่งแสดงสมการได้ดังนี้

Fourier Transformation
$$X(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Inverse Fourier Transformation
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

เมื่อ $x(t)$ คือ สมการในรูปแบบของ Time domain

$X(\omega)$ คือ สมการในรูปแบบของ Frequency domain

2.6 Frequency domain method

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use. 14

FDE เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของผลตอบสนองที่อยู่ในตัวแบบเชิงพหุนาม (Polynomial Model) เป็นฟังก์ชันที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์ผ่านปัจจัย การจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีนี้ ต้องการจำนวนครั้ง การทำการจำลองระบบเพียง 2 ถึง 3 ครั้งเท่านั้นก็สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือไม่ สำคัญในการใช้โดเมนความถี่ในการคัดเลือกปัจจัยประกอบไปด้วย

รูปแบบปัญหา

FDE ใช้ประโยชน์ในระบบที่ไม่ทราบความสัมพันธ์ที่แน่นอน (Black Box) โดยความสัมพันธ์ในระบบจะถูกสมมติให้มีความสัมพันธ์แบบพหุนามลำดับที่ k เมื่อกำหนดให้ปัจจัยมีจำนวน p ตัว นั่นคือ x_1, x_2, \dots, x_p ผลตอบสนองกำหนดให้เป็นเป็นตัวแปร y ค่าคาดหวังของผลตอบสนองคือ $E(y)$ เป็นฟังก์ชันของทุกตัวแปร x ดังนั้นตัวแบบมีสมการพหุนามลำดับที่ k เป็นดังนี้

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1\tau_1 + \beta_2\tau_2 + \dots + \beta_q\tau_q \quad (1)$$

หรือ $E(y) = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j\tau_j$

เมื่อ $E(y)$ เป็นค่าคาดหวังของผลตอบสนอง

τ_j เป็นเทอมในพหุนาม ลำดับที่ k โดยผลรวมของเลขชี้กำลังของตัวแปรไม่มากกว่าค่า k ยกตัวอย่างเช่น ในเทอม $j = 1$ และถ้า $k = 5$ แล้ว $\tau_1 = x_1^2x_2^4$ จะไม่อยู่ในเทอมของสมการ เพราะเลขชี้กำลัง $2 + 4$ มากกว่า 5 เป็นต้น

β_j เป็นสัมประสิทธิ์ของเทอม τ_j ถ้าเทอมของ τ_j ใดๆ ที่มีความหมายต่อฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์ β_j จะไม่มีค่าเป็นศูนย์ และ

q เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดของฟังก์ชันผลตอบสนอง

2.7 Fourier Transformation

จุดประสงค์ของการหาอนุกรมฟูเรียร์และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มก็เพื่อที่จะดูว่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่มักจะเห็นในรูปของอาณาจักรของเวลา (time domain) มีองค์ประกอบทางความถี่ (frequency components) ในอาณาจักรของความถี่ (frequency domain) ที่ความถี่ใดบ้าง การแปลงข้อมูลจากระบบของเวลา ให้กลายเป็นระบบของความถี่ จะใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการแปลงไปกลับได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt$ นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f t} df$$

$s(t)$, $S(\omega)$, คือสัญญาณในระบบของเวลา , จาก $\omega = 2\pi f$, จะได้ว่า

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

และเพื่อความถูกต้องเนื่องจากความสมมาตร จะได้ว่า

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

บางครั้งการใช้ Fourier transform สามารถใช้กับสัญญาณจริงหรือสัญญาณเชิงซ้อน และโดยทั่วไปสัญญาณเชิงซ้อนจะอยู่ในรูปของ ω (หรือ f).

Fourier transform ใช้ได้กับสัญญาณเวลาที่เป็นระยะและไม่ตรงตามเวลาซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขั้นต่ำเกือบทุกสัญญาณในโลกแห่งความจริงสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้

2.8 Eigensystem realization algorithm

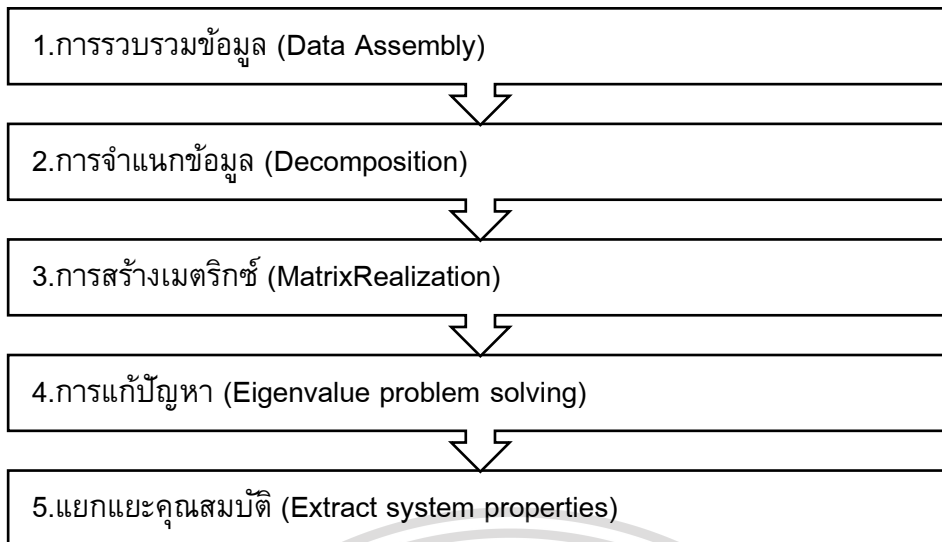
เป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง ERA สามารถใช้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบ Modal และสร้างการรับรู้ของระบบโดยใช้การตอบสนองของโดเมนเวลา (multi-) input และ (multi-) data output ERA ถูกเสนอโดย Juang และ Pappa และถูกนำมาใช้เพื่อระบุระบบโครงสร้างการบินและอวกาศเช่นยานอวกาศกาลิเลโอ, กังหัน, โครงสร้างพลเรือนและระบบอื่น ๆ อีกมากมาย ในวิศวกรรมโครงสร้าง ERA ใช้เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติ, รูปร่างโหมดและอัตราส่วนการทำให้หมด ๆ มักใช้ ERA ร่วมกับ Natural Excitation Technique (NExT) เพื่อระบุพารามิเตอร์ของโมดัลจากการสั่นสะเทือนรอบข้าง เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้กับอาคารสะพานและระบบโครงสร้างอื่น ๆ อีกมากมาย ในด้านการติดตามตรวจสอบสุขภาพเชิงโครงสร้าง ERA และเทคนิคการระบุตัวตนอื่น ๆ มีบทบาทสำคัญในการพัฒนารูปแบบของโครงสร้างจากข้อมูลการทดลอง การแทนค่าสถานะพื้นที่หรือพารามิเตอร์ modal ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติมและระบุความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยใช้ Natural frequencies, mode shapes and damping ratios.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

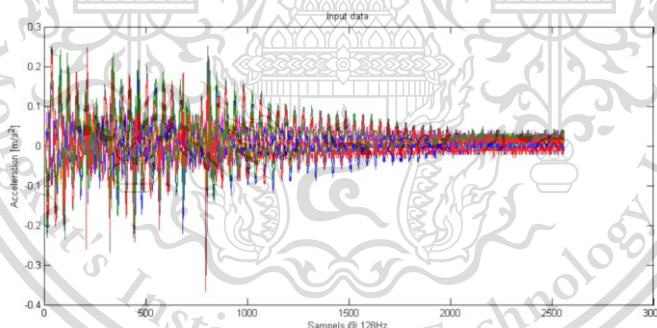
Forbidden to modify the content and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

2.8.1.1 การรวบรวมข้อมูล (Data Assembly)

เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการวัดตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นจะนำข้อมูลมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ Hankel Matrix และ Shift Hankel Matrix



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล

จากนั้นจะนำข้อมูลมาสร้างเมทริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมทริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว ตัวอย่างเช่น

$$\text{Data} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_{n+k+1}]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

$$\text{Hankel Matrix [H0]} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n+1} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_n & y_{n+1} & y_{n+2} & \dots & y_{n+k} \end{bmatrix}$$

$$\text{Shift Hankel Matrix [H1]} = \begin{bmatrix} y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n+1} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n+2} \\ y_4 & y_5 & y_6 & \dots & y_{n+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n+1} & y_{n+2} & y_{n+3} & \dots & y_{n+k+1} \end{bmatrix}$$

2.8.1.2 การจำแนกข้อมูล (Decomposition)

จะเป็นการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) คือ เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกมาให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่เท่ากันจำนวน 3 เมทริกซ์ ยกตัวอย่างเช่น มีเมทริกซ์จัตุรัส A ขนาด N×N จะแยกออกเป็น เมทริกซ์ U, V และ D ซึ่ง A = UDV^T โดยที่ V^T คือ ทรานเวิร์สเมทริกซ์ของเมทริกซ์ V

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V} \end{pmatrix}^T$$

$$\text{SVD (A)} = [\mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}].$$

$$\text{SVD (A)} = \lambda_1 \mathbf{U}_1 \mathbf{V}_1^T + \lambda_2 \mathbf{U}_2 \mathbf{V}_2^T + \dots + \lambda \mathbf{U} \mathbf{V}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T.$$

2.8.1.3 การสร้างเมทริกซ์ (Matrix Realization)

เมทริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือ [เมทริกซ์จัตุรัส](#) ที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

หน้าที่ของโครงสร้างส่วนล่าง คือชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างส่วนล่างจะต้านน้ำหนักทั้งในแนวดิ่งและแนวราบที่ ถูกถ่ายเทมาจากโครงสร้างส่วนบนชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนล่างมีดังนี้ คานรัดหัวเสา(Cap Beam) ค้ำยัน ตอม่อ (Bracing) เสาตอม่อ (Pier) กำแพงตอม่อ (Pier Wall) ฐานราก (Footing) เสาเข็ม (Pile)

2.9.3 ส่วนประกอบรอง (Secondary Components)

เป็นชิ้นส่วน ที่ช่วยเสริมในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อสะพาน หรือมีประโยชน์ต่อสะพานด้านอื่นๆ เช่น ผิวทาง (Wearing Surface)ช่วยรับน้ำหนักจากล้อรถและกระจายแรงสู่ระบบพื้นและคาน ระบบระบายน้ำ (Drainage) ช่วยในการระบายน้ำที่ซังออกจากผิวทาง ซึ่งส่วนประกอบรองมีดังนี้หูช้าง (Wing Wall) เชนลาด สะพาน (Approach) แผ่นรองรับคาน (Bearing) รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint) ผิวทาง (Wearing Surface) แผงกั้นจราจร (Traffic Barrier) ราวสะพาน (Railing) ทางเท้า (Sidewalk)ระบบระบายน้ำ (Drainage) กำแพงกันดิน (Retaining Wall) ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection)

2.10 ระบบพื้นสะพานแบบคานกริดอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder)

เป็นระบบพื้นสะพานที่ใช้กับสะพานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงสูงสุด 20 เมตร ซึ่งพื้นสะพานระบบนี้จะมี ความหนามากกว่าระบบพื้นสะพานแบบ Plank Girder ที่ใช้สำหรับก่อสร้างสะพานที่มีความยาวช่วงประมาณ 10 เมตร โดยการก่อสร้างสะพานระบบนี้จะเริ่มจากการหล่อโครงสร้างคานคานกริดอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder) จากโรงงานและอาศัยการอัดแรงโดยวิธีการดึงลวดก่อน (Pre-Tension) จากนั้นจึงนำไปติดตั้ง บริเวณหน้างาน โดยทั่วไปการก่อสร้างพื้นสะพานระบบนี้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งไม้แบบ ทั้งนี้การติดตั้งคานอัดแรง รูปกล่องจะเริ่มจากการจัดเรียงคานสำเร็จรูปให้ติดกันแล้วเชื่อมด้วยเหล็กรับแรงเฉือนระหว่างคาน จากนั้นจึง เทคอนกรีตทับหน้าหนาประมาณ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.10 ระบบพื้นสะพานแบบคานกริดอัดแรงรูปกล่อง

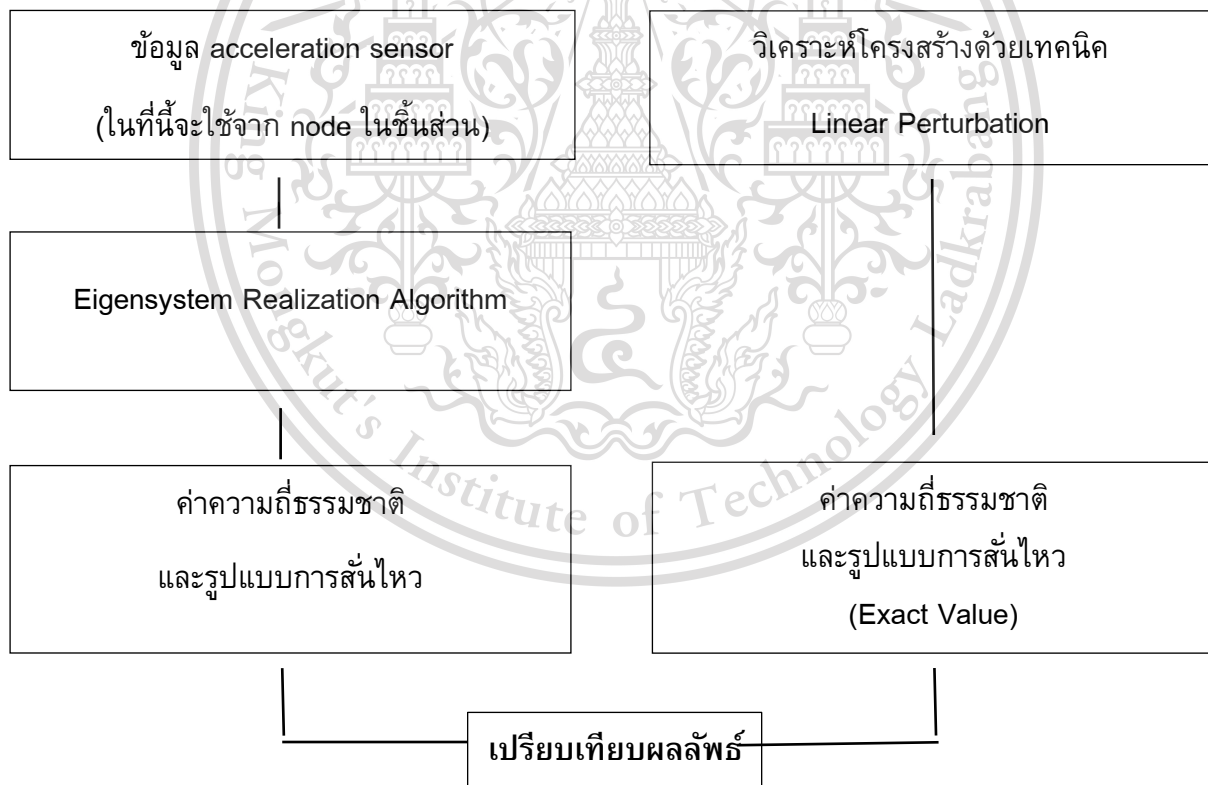
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

บทที่ 3
วิธีการและขั้นตอนในการศึกษา

3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

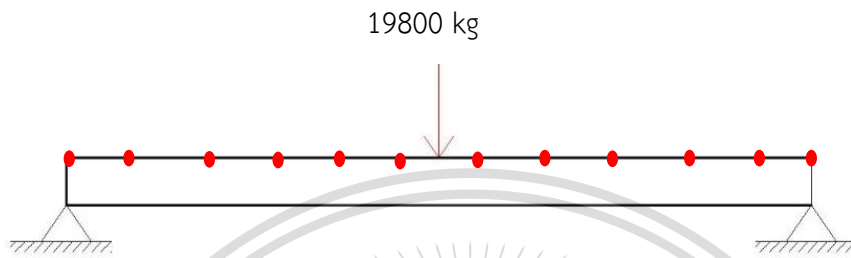
ไม่ว่ากรณีใด 3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา 3.2.1 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2

ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

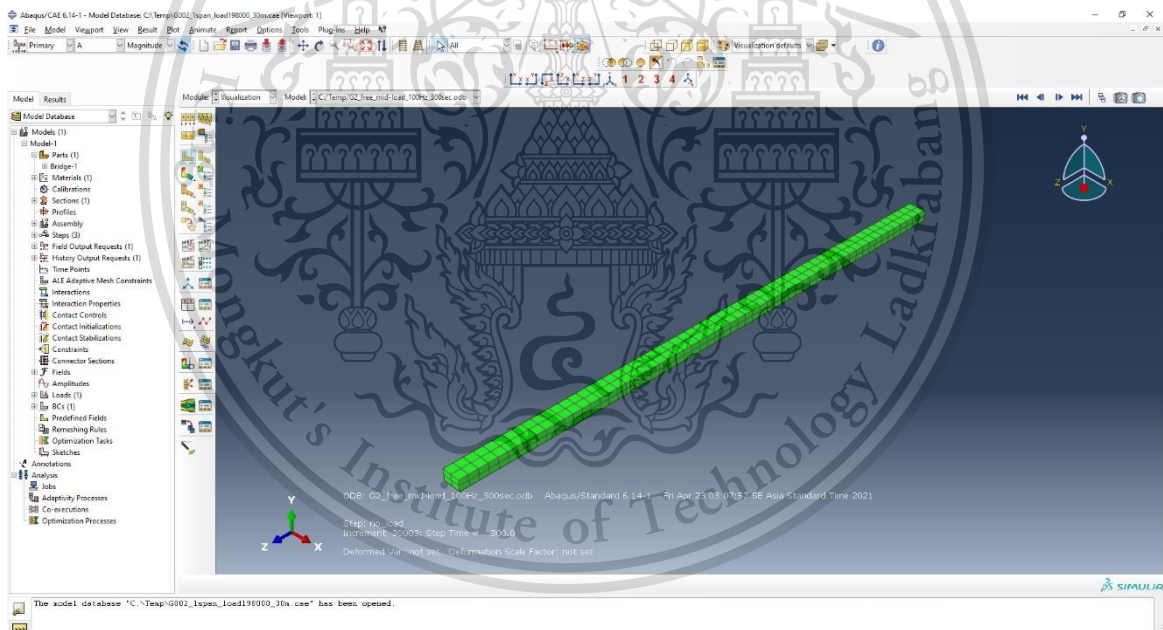
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด 1.0X0.6 ตารางเมตร ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และ โดยทแรงกระทำคานเท่ากับ 19800 กิโลกรัม ความยาวของคาน 30 เมตรและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 20 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



รูปที่3.2 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคาน



รูปที่3.3 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS

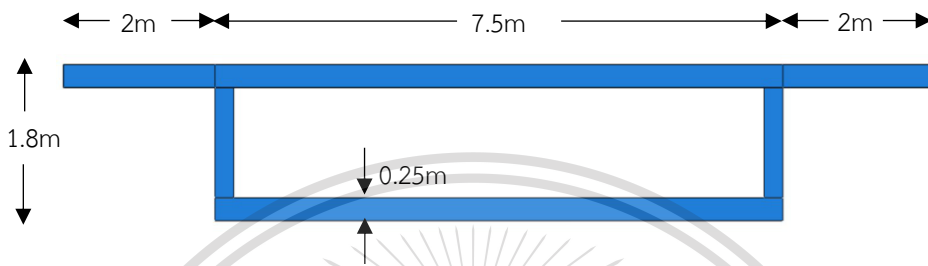
3.2.2 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-box girder ช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

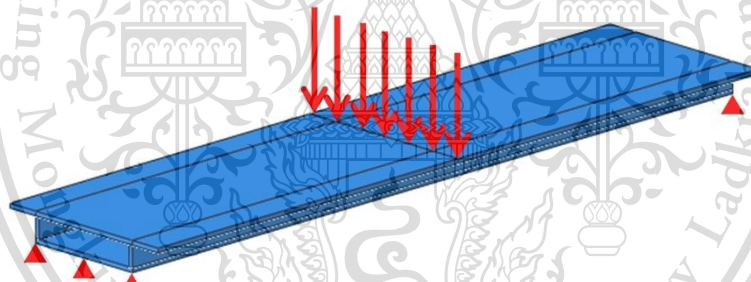
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่3.4 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยที่แรงกระทำคาน เท่ากับ 19800 กิโลกรัม ความยาวของคาน 45 เมตรและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 10 บนคาน โดย ยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



รูปที่3.4 แบบจำลองที่คานPre-box girder



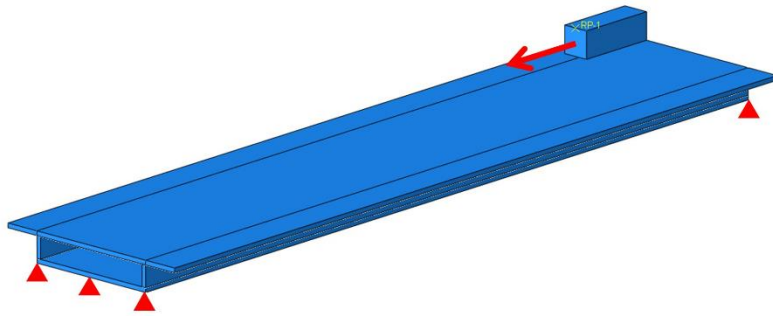
รูปที่3.5 แบบจำลองที่คานPre-box girder ช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS

3.2.3 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-box girder ช่วงเดียวแบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่3.4 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยมีแรงที่เคลื่อนที่ บนคานเท่ากับ 19800 กิโลกรัม ด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความยาวของคาน 45 เมตรและ เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า เปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 10 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

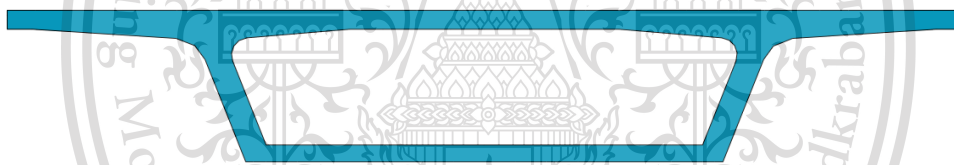
Forbidden to modify the content and cite the document when use.



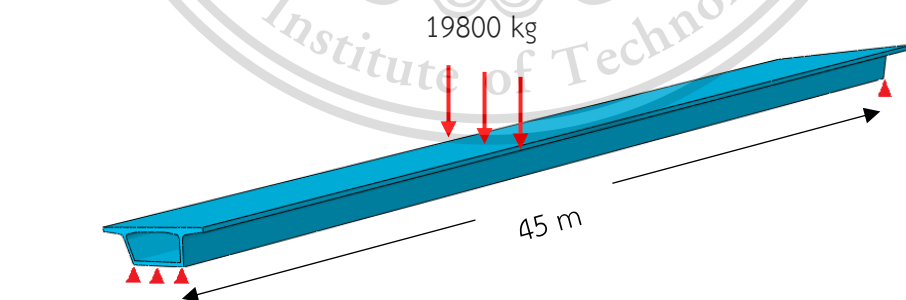
รูปที่3.6 แบบจำลองที่คาน Pre-box girder ช่วงเดี่ยวน้ำหนักเคลื่อนที่บนคานในโปรแกรม ABAQUS

3.2.4 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ช่วงเดี่ยวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดี่ยว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่3.7 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยทแรงกระทำคาน เท่ากับ 19800 กิโลกรัม ความยาวของคาน 45 เมตรและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 10 บนคาน โดย ยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



รูปที่3.7 แบบจำลองที่คาน Box girder



รูปที่3.8 แบบจำลองที่คาน Box girder ช่วงเดี่ยวน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS

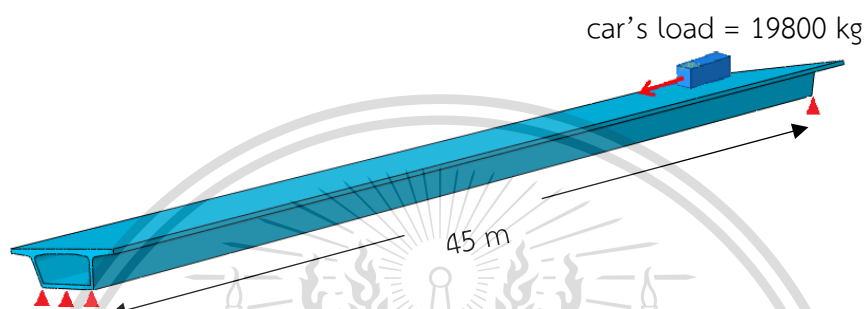
3.2.5 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ช่วงเดี่ยวแบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้อัปเดตเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

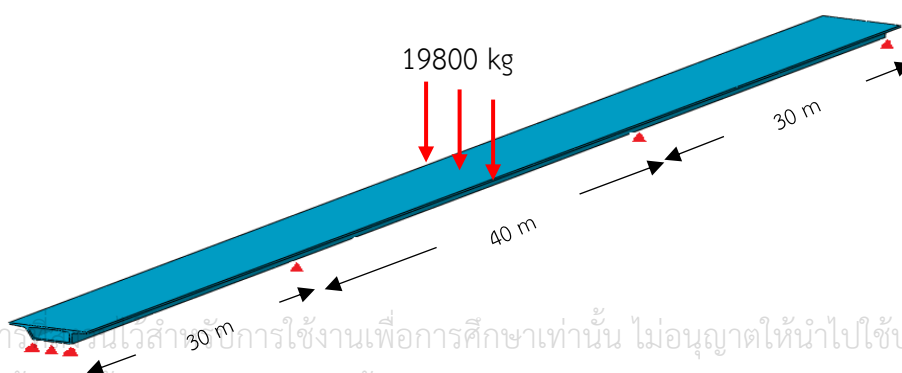
ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่3.7 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยมีแรงที่เคลื่อนที่บนคานเท่ากับ 19800 กิโลกรัม ด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความยาวของคาน 45 เมตรและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 10 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



รูปที่3.9 แบบจำลองที่คาน Box girder ช่วงเดียวมีน้ำหนักเคลื่อนที่บนคานในโปรแกรม ABAQUS

3.2.6 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ1/2ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่3.7 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยที่แรงกระทำคานเท่ากับ 19800 กิโลกรัม ความยาวของคานเป็นสามช่วง 30-40-30 เมตรตามลำดับและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 22 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

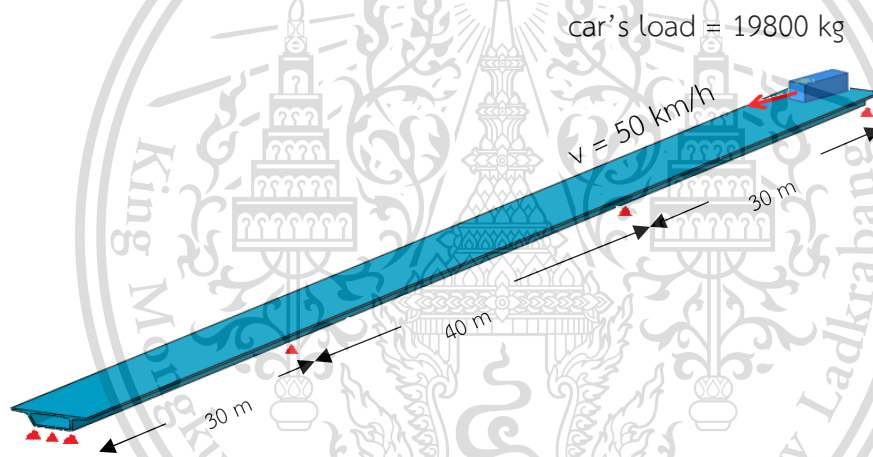
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

รูปที่ 3.10 แบบจำลองที่คาน Box girder สามช่วงน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS

3.2.7 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด ตามรูปที่ 3.7 ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6 จิกะปาสคาล และโดยมีแรงที่เคลื่อนที่บนคานเท่ากับ 19800 กิโลกรัม ด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความยาวของคานสามช่วง 30-40-30 เมตรตามลำดับและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 22 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



รูปที่ 3.11 แบบจำลองที่คาน Box girder ช่วงเดียวมีน้ำหนักเคลื่อนที่บนคานในโปรแกรม ABAQUS

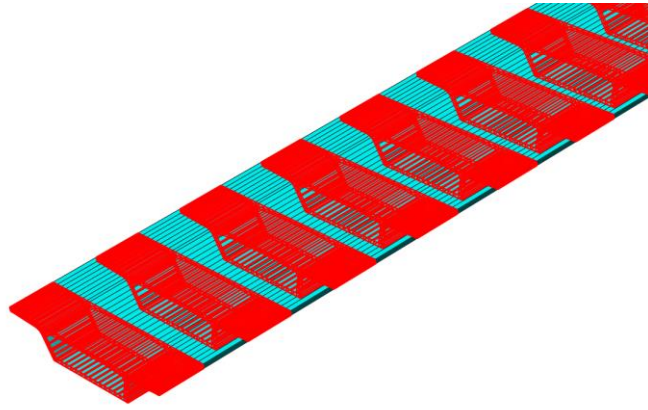
3.2.8 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆ ทั้งความยาวคาน

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนกับการการความเสียหายของของสะพาน หรือการเกิด crack บนสะพานในที่นี่จะใช้ลักษณะการเกิดความเสียหายแบบ Transverse (Transverse crack) จะมี Transverse crack 3 รูปแบบ คือ ระยะห่างระหว่าง crack 2.5, 5.0, และ 10.0 เมตร จะกระจายความเสียหายไว้ทั่วความยาวคาน

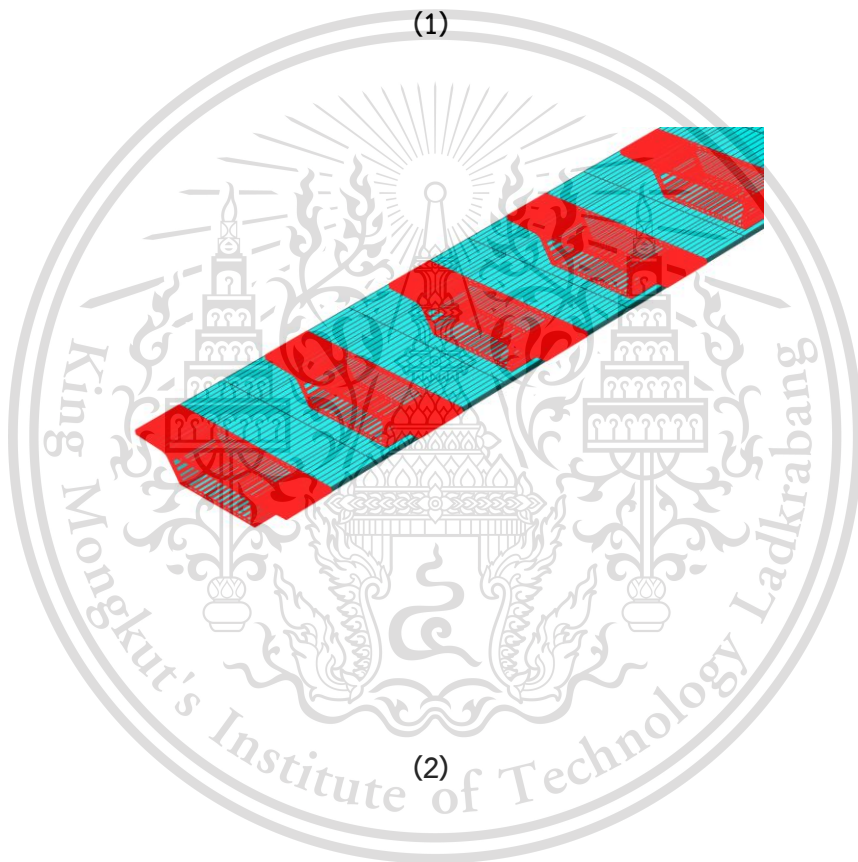
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่จะใช้ความเสียหายโดยการลดค่า Modulus 'Young ลงเป็น 10%, 25% และ 40% ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.



(1)



(2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในของมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

(3)

รูปที่ 3.12 ตำแหน่งชิ้นส่วนความเสียหายบนคาน (1) ทุกระยะ 2.5 เมตร,(2) ทุกระยะ 5.0 เมตร,(3) ทุกและระยะ 10.เมตร



บทที่ 4

ผลการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 1.4308 Hz

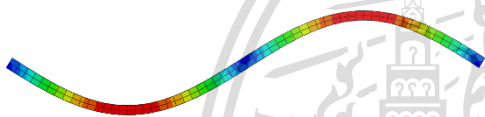
โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 2.3214 Hz



NOT INDICATE

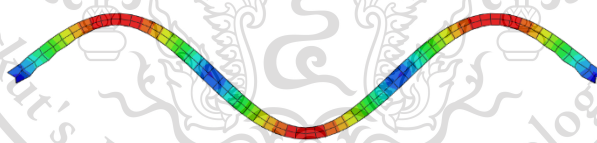
โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 3.7845 Hz

โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 7.2753 Hz



NOT INDICATE

โหมดที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 9.2317 Hz



รูปที่ 4.2 รูปร่างการสั่นของคาน 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 1.4243 Hz

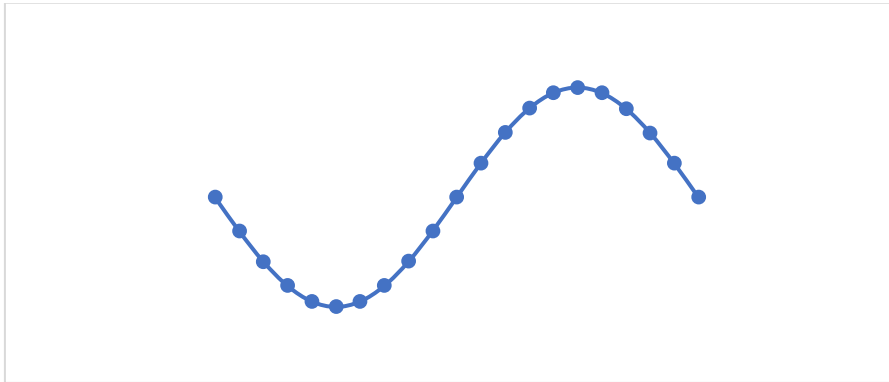


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

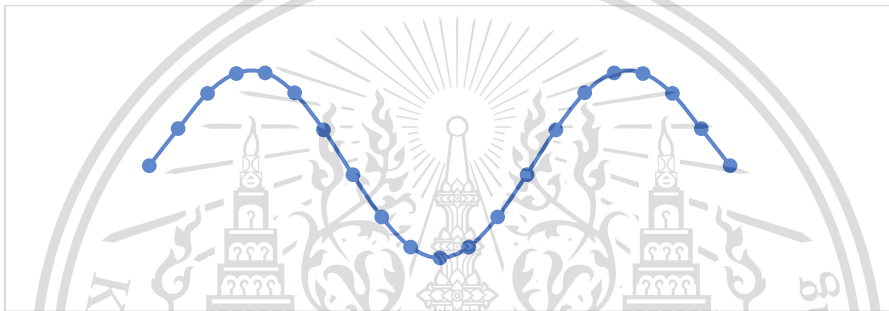
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 3.7548 Hz



โหมดที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 8.9452 Hz



รูปที่ 4.3 รูปร่างการสั่นของคาน 1 ช่วง ด้วยวิธี ERA

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 และ 4 จากวิธี จาก Linear Perturbation นั้นไม่แสดงออกมา เป็นเพราะโมเมนต์อินเนอร์เซียร์ ทั้งสองแกนของหน้าตัด ค่าต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการบิดทางด้านข้างด้วย จึงเปรียบเทียบกับ ERA เพียง โหมดที่ 1 3 และ 5

4.1.1 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	1.4308	1.4243	0.455
Mode 2	2.3214	-	-
Mode 3	3.7845	0.5344	0.782
Mode 4	7.2753	-	-
Mode 5	9.2317	8.9452	3.103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้ตัดแปด และต้อง 8.9452 ถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

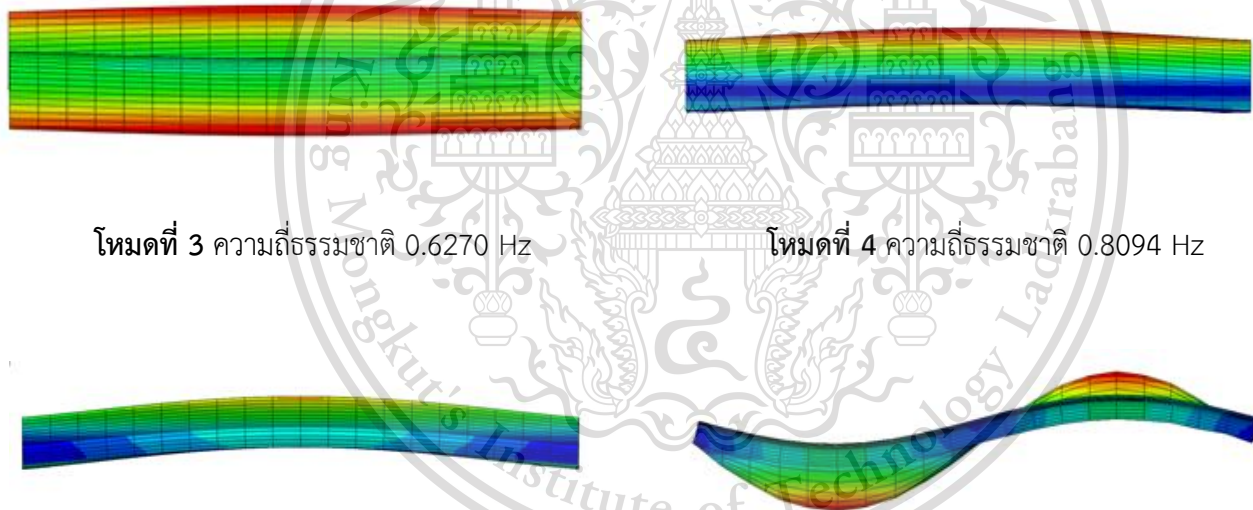
จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-box girder ช่วงเดี่ยวยแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ $1/2$ ของความยาวสะพาน และผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน Pre-box girder ช่วงเดี่ยวยแบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.4919 Hz

โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 0.5131 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 0.6270 Hz

โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 0.8094 Hz

รูปที่ 4.3 รูปร่างการสั่นของคาน Pre-Box Girder ต่อเนื่อง 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นที่ได้จาก Linear Perturbation ของแบบจำลองสะพานที่เป็น Pre-Box Girder ในรูปแบบของแรงที่กระทำแบบ Free Vibration และ Force Vibration นั้น รูปร่างการสั่น โดนมอดการบิด อันเนื่องมาจากแบบจำลองที่ไม่ได้สัดส่วนตามความจริง ดังนั้นเราจึงทำการพัฒนาแบบจำลองให้เกิดความมากขึ้น โดยใช้มาตรฐาน AASHTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

4.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ช่วงเดียวแบบ Free -Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/2 ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.3.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 2.3709 Hz

โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 3.6116 Hz



NOT INDICATE

โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.00674 Hz

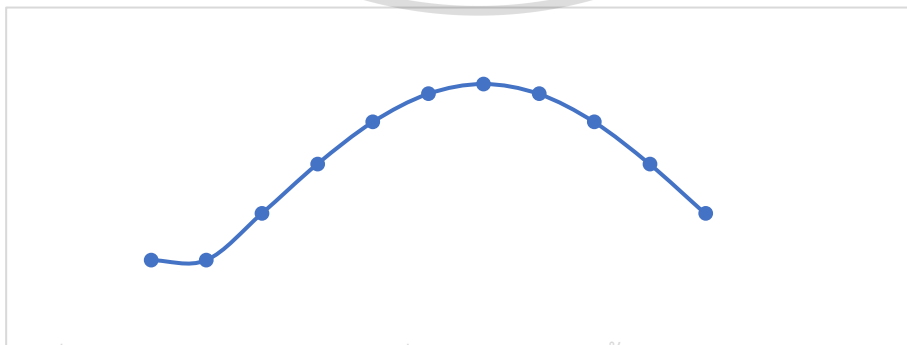
โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 5.8806 Hz



รูปที่ 4.4 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.3.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 2.3709 Hz

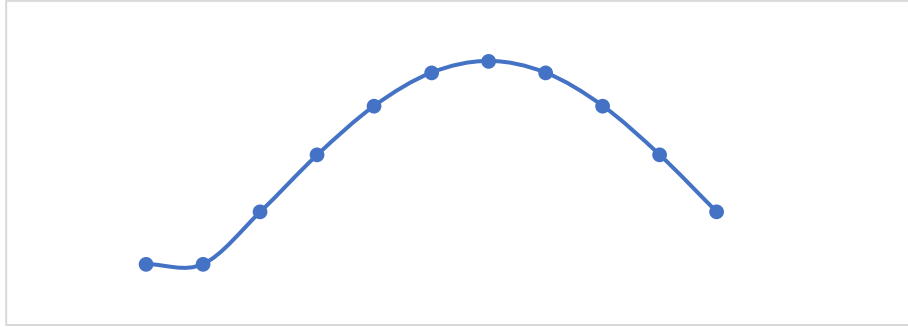


โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.0674 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงเนื้อหาใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.



รูปที่4.5 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี ERA

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 จากวิธี จาก Linear Perturbation นั้นไม่แสดงออกมา เป็น เพราะโมเมนต์อินเนอร์เซียร์ ทั้งสองแกนของหน้าตัด ค่าต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการบิดทางด้านข้างด้วย จึง เปรียบเทียบกับ ERA เพียง โหมดที่ 1 และ 3

4.3.6 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	2.3709	2.3659	0.271
Mode 2	3.6116	-	-
Mode 3	5.0374	5.0196	0.9432
Mode 4	5.8806	-	-

จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

4.4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ช่วงเดียวแบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.4.6 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องขออภัยเป็นอย่างสูงต่อการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.



NOT INDICATE

โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.00674 Hz

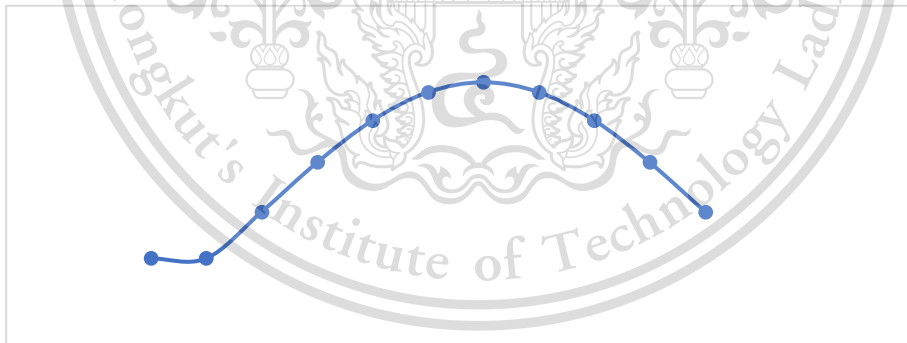
โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 5.8806 Hz



รูปที่ 4.6 รูปร่างการสั่นของคานBox Girder 1 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.4.7 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 2.3645 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.0062 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 5.7857 Hz

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 จากวิธี จาก Linear Perturbation นั้นไม่แสดงออกมา เป็น เพราะโมเมนต์อินเนอร์เชียร์ ทั้งสองแกนของหน้าตัด ค่าต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการบิดทางด้านข้างด้วย จึง เปรียบเทียบกับ ERA เพียง โหมดที่ 1 3 และ 4

4.4.2 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	2.3709	2.3645	0.271
Mode 2	3.6116	-	-
Mode 3	5.0374	5.0062	1.208
Mode 4	5.8806	5.7857	1.614

จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

4.5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ $1/2$ ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.5.8 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 3.8669 Hz

โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 5.5218 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOT INDICATE

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.9200 Hz

โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 6.1120 Hz



รูปที่ 4.8 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.5.9 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 2.3645 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.0062 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.9 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 จากวิธี จาก Linear Perturbation นั้นไม่แสดงออกมา เป็น เพราะโมเมนต์อินเนอร์เชียร์ ทั้งสองแกนของหน้าตัด ค่าต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการบิดทางด้านข้างด้วย จึง เปรียบเทียบกับ ERA เพียง โหมดที่ 1 และ3

4.5.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	3.8669	3.8455	0.555
Mode 2	5.5218	-	-
Mode 3	5.9200	6.0289	1.839
Mode 4	6.1120	-	-

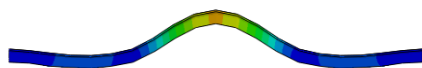
จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

4.6 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

4.6.10 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วย Linear perturbation

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 3.8669 Hz

โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 5.5218 Hz

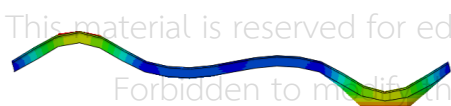


NOT INDICATE

โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.9200 Hz

โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 6.1120 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



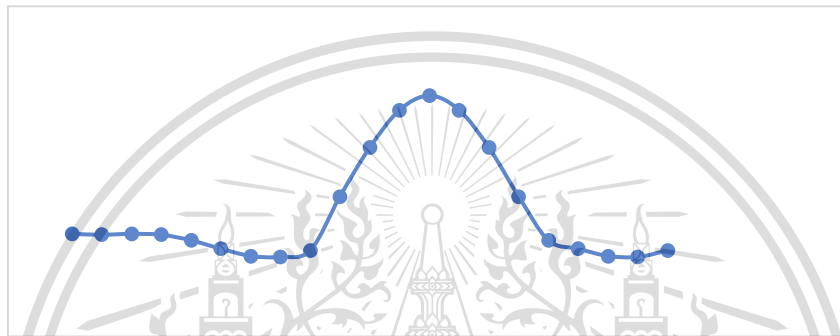
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

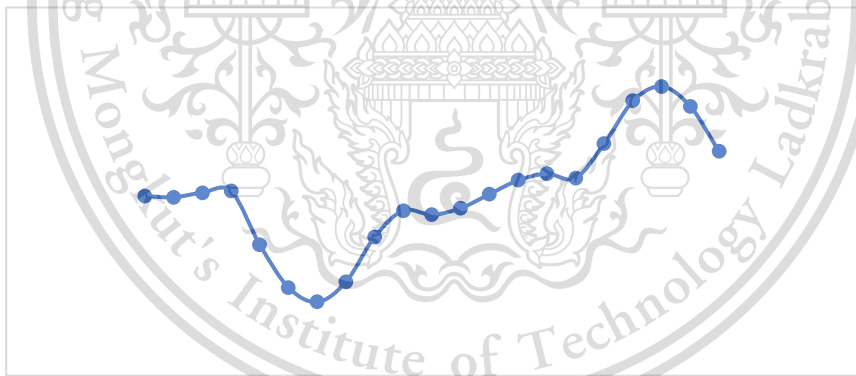
รูปที่ 4.10 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.6.11 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

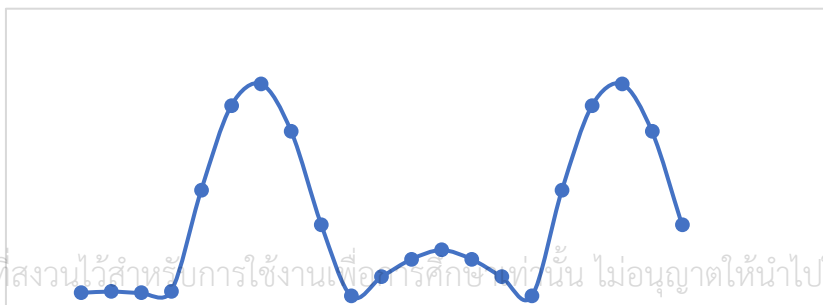
โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 2.3645 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 5.0062 Hz



โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 5.0062 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

รูปที่ 4.11 รูปร่างการสั่นของคาน Box Girder 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 จากวิธี จาก Linear Perturbation นั้นไม่แสดงออกมา เป็น เพราะโมเมนต์อินเนอร์เชียร์ ทั้งสองแกนของหน้าตัด ค่าต่างกันไม่มาก จึงทำให้เกิดการบิดทางด้านข้างด้วย จึง เปรียบเทียบกับ ERA เพียง โหมดที่ 1 3 และ 4

4.6.4 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	3.8669	3.8455	0.555
Mode 2	5.5218	-	-
Mode 3	5.9200	6.0289	1.839
Mode 4	6.1120	-	-

จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

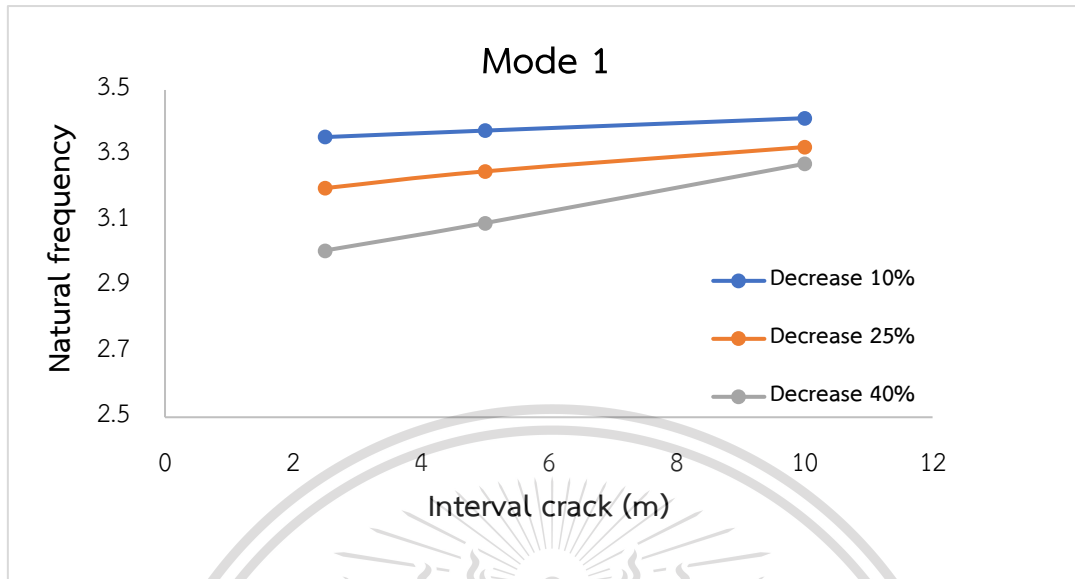
4.7 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคาน box girder ต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆ ทั้ง ความยาวคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

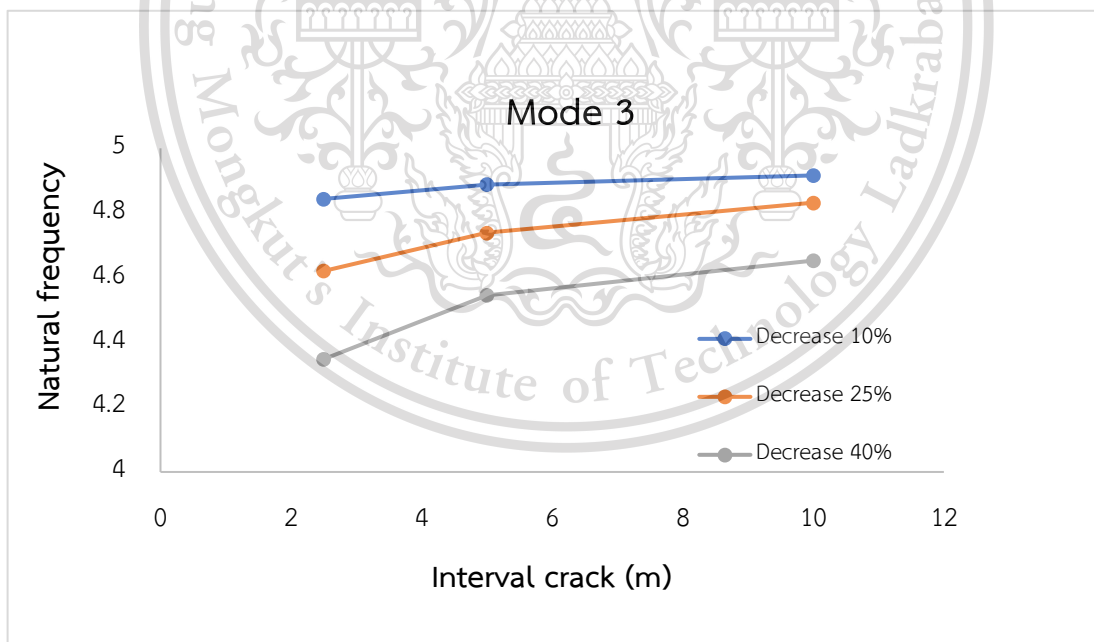
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

4.7.1 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จาก ERA



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆ ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA

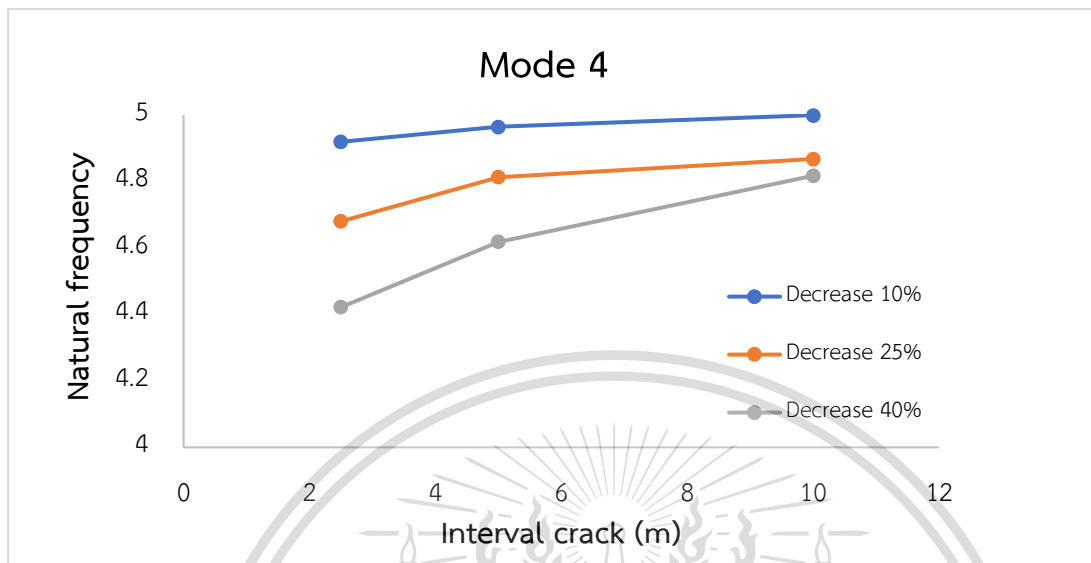


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

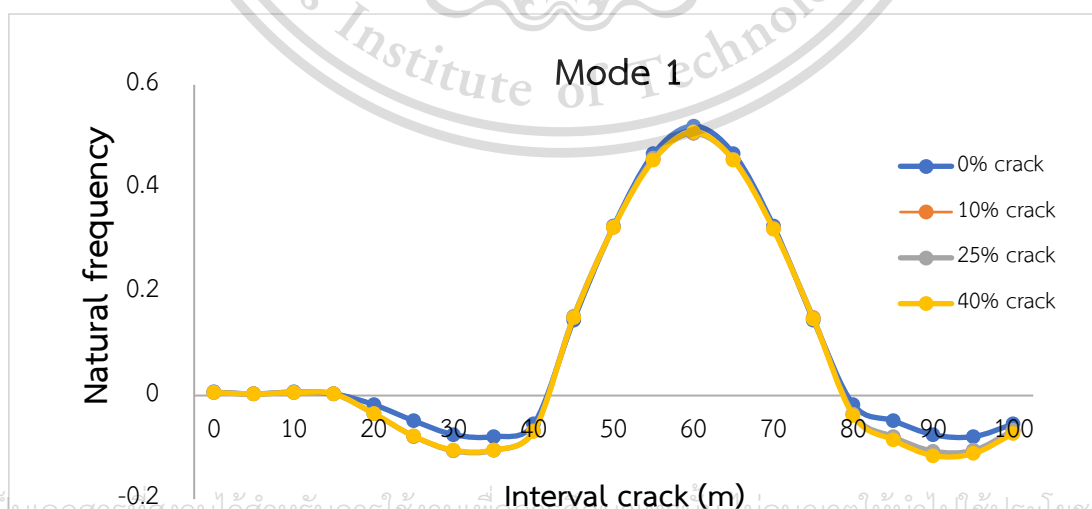
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆ ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและระยะห่างความเสียหาย เมื่อมีสัดส่วนความเสียหายที่ค่าต่างๆ ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA

จากรูปพบว่า เมื่อค่าความเสียหายมากเท่าไร แนวโน้มของค่า ความถี่ธรรมชาติก็ยิ่งน้อยลงเช่นกัน อีกนัยหนึ่ง ยิ่งระยะห่างของความเสียหายน้อยเท่าไร ค่าความถี่ธรรมชาติก็น้อยลงเช่นกัน

4.7.2 รูปแบบการสั่น (Modal shape) ที่ได้จาก ERA

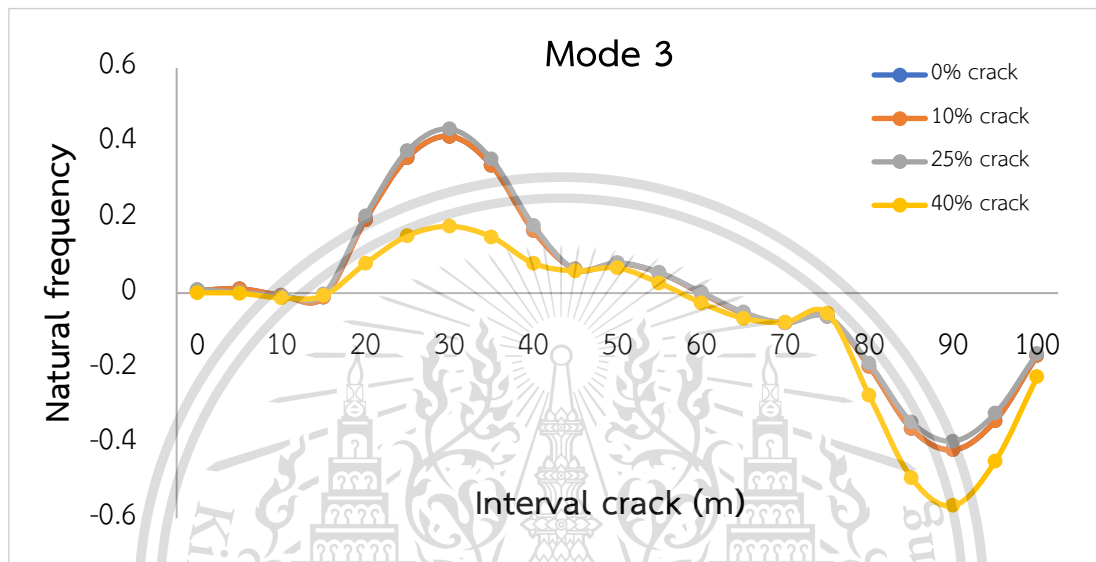


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

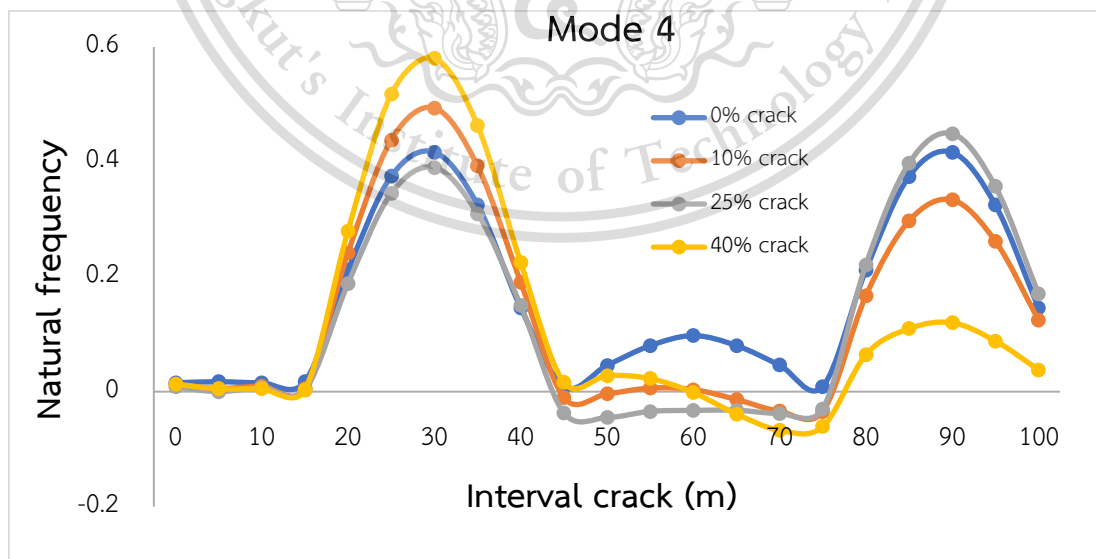
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

รูปที่ 4.15 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ



รูปที่ 4.16 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 3 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

รูปที่ 4.17 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 4 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ

จากผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 3 ขึ้นไปจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วนที่ 25% ขึ้นไป และถึงแม้ว่าระยะห่างของความเสียหายจะเปลี่ยนแปลงไป แต่รูปร่างการสั่นก็ไม่มีการเปลี่ยนไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิควิธี Eigensystem Realization Algorithm (ERA) เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานในอนาคต เพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน อีกทั้งเพื่อความรวดเร็วและประเมินความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างทันเวลา

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยมีลำดับหัวข้อการนำเสนอ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาในแบบจำลองหลายๆแบบ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น เพื่อเป็นตัวแทนสะพานที่มีหน้าตัด Box Girder ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนแบบ Transverse ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

5.1.1 แบบจำลอง FEM สะพานแบบ Box Girder ตามมาตรฐานของ AASHTO สามารถพัฒนาสำหรับในการวิเคราะห์แบบไดนามิกและ Linear pertubaion ได้

5.1.2 ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) ของแบบจำลองสะพานแบบ Box Girder ได้รับจาก Linear pertubaion

5.1.3 การวิเคราะห์แบบ Dynamic ของแบบจำลองสะพานแบบ Box Girder นั้น ใช้กับเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm (ERA) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use. 44

5.1.4 เทคนิค Eigensystem Realization Algorithm (ERA) สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น (Modal shape) จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา (acceleration and time) ได้

5.1.5 เทคนิค Eigensystem Realization Algorithm (ERA) มีความเป็นไปได้ท ในรูปร่างการสั่นที่โหมดสูง มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาต่อไปใช้ในการระบุถึงตำแหน่งผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการสั่น (Modal shape) ในขั้นที่สูง

5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย และแนวทางในการดำเนินการศึกษาในอนาคต

จากประสบการณ์ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมได้ดังนี้

5.2.1. ในการสร้างโมเดล ถ้าสัดส่วนของสะพานไม่ถูกต้องจะทำให้เกิด torsion mode ซึ่งจะทำได้ไม่สมารถเปรียบเทียบกับ ERA ได้

5.2.2. ระยะห่างของความเสียหาย (interval crack) และการลดการลดค่า YOUNG modulus ยิ่งระยะห่างยิ่งน้อย และลดค่า YOUNG modulus มากๆ ยิ่งทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติน้อยลง

5.2.3. ในขณะนี้การศึกษาได้ใช้แบบจำลองของรถนั้น ยังเป็นเพียงรถคันเดียว ควรจะมีการเพิ่มจำนวนรถ เพื่อตรวจสอบว่าเทคนิค ERA นั้นยังสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้หรือไม่ อีกทั้งสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของสะพานเป็นเหล็ก (Steel) แล้วดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดสนิมกับโครงสร้างสะพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

บรรณานุกรม

[1] Infrastructure Monitoring and management system. (-).**Bridge maintenance Database system**. Retrieved August 30,2020. Available online ; <http://www.immsgroup.com/>

[2] Bridge Construction Bureau, Department of Highways (2018). **Data about age of bridge**. Retrieved October 3,2020. Available online ; <http://bridge.doh.go.th/bmms/>

[3] Daniel BALAGEAS. (-).**Introduction Structural Health Monitoring**. Retrieved October 3,2020. Available online ; <http://bridge.doh.go.th/bmms/>

[4] American Segmental Bridge Institute.(-).**AASHTO Segmental Box Girder Standards**. Retrieved November 10,2020. Available online ; [https://www.asbi-
assoc.org/index.cfm/resources/aashto](https://www.asbi-
assoc.org/index.cfm/resources/aashto)

[5] Kritsana Polcha. (2019).

Damage Evaluation Based On Structural Health Monitoring Data Using ERA Techniques.

Department of Civil and Environmental Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[6] Mojtaba Valinejadshoubi, Ashutosh Bagchi, Osama Moselhi. (2008).

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Parameter Estimation For Linear Dynamical Systems with Applicants To Experiment Modal Analysis. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering.

[7] Cem Ayyildiz, H. Emre Erdem, Tamer Dirikgil, Oguz Dugenci, Taskin Kocak, Fatih Altun, V. Cagri Gungor. (2019).

Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. IEEE COMMUNICATIONS-SURVEYS & TUTORIALS



ภาคผนวก

Code วิธี Eigensystem Realization Algorithm ในโปรแกรม MATLAB

```
clc; clear;
load interval3_E_load5t.mat;
Y=interval3_E_load5t;
cols=5500;
rows=4500;
cut=30;
shift=10;
inputs=1;
fs=100; %Frequency Sample
[outputs,start]=size(Y); % Computes the size of matrix Y
if outputs > start % Check if Y matrix size is proper or should be transposed
    Y=Y';
end
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% Find block sizes
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

```

brows=fix(rows/outputs); % brows = how many output blocks.
rows=outputs*brows; % Redefine the row numbers.
bcols=fix(cols/inputs); % bcols = how many time steps.
cols=inputs*bcols; % Redefine the column numbers.
m=inputs; % inputs number.
q=outputs; % outputs number.
% Form the Hankel matrix H(0).
H0=zeros(rows,cols);
for ii=1:brows
    for jj=1:bcols
        if ii==brows || jj==bcols
            sh=shift;
        else
            sh=1;
        end
        if ii==brows && jj==bcols
            sh=2*shift-1;
        end
        H0([(ii-1)*q+1:ii*q],[:(jj-1)*m+1:jj*m])=Y(:,(sh-1+(jj-1)+ii-1)*m+1:(sh-1+(jj)+ii-1)*m);
    end
end
% Decompose the data matrix
[R1,Sigma1,S1]=svd(H0,0);
sv=diag(Sigma1);
% Truncate the matrices using the cutoff
D=diag(sqrt(sv(1:cut))); % build square root of the singular values.
Dinv=inv(D); % (sigma)^(-1/2)
Rn=R1(:,1:cut); % use only the principal eigenvectors
Sn=S1(:,1:cut); % use only the principal eigenvectors
% Build the second Hankel matrix H(1).

```

H1=zeros(rows,cols);

```

for ii=1:brows
    for jj=1:bcols

```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

```

    if (ii==brows || jj==bcols)
        sh=shift;
    else
        sh=1;
    end
    if ii==brows && jj==bcols
        sh=2*shift-1;
    end
    H1([(ii-1)*q+1:ii*q] ,[(jj-1)*m+1:jj*m] )=Y(:,(sh-1+(jj-1)+ii)*m+1:(sh-1+(jj)+ii)*m);
end
end

% Calculate the realization of A and find eigenvalues and eigenvectors
A=Dinv*Rn'*H1*Sn*Dinv; % build A as per ERA.
B=D*Sn';B=B(:,1:m); % build B as per ERA.
C=Rn*D; C=C(1:q,:); % build C as per ERA.
% Extract the modal frequencies , damping ratios and natural frequencies
[Vectors,Values]=eig(A); % Eigenvalues and Eigenvectors
Lambda=diag(Values); % roots in the Z-plane
s=log(Lambda).*fs; % Laplace roots
zeta=-real(s)./abs(s)*100; % damping ratios
fd=(imag(s)./2./pi); % damped natural freq;
shapes=C*Vectors; % Mode shapes.
% Sort into ascending order
[fd,l]=sort(fd);
zeta=zeta(l);
shapes=shapes(:,l);
s=s(l);
% Remove the negative frequencies and frequencies>fs/2
lower=1;
upper=cut;
for ii=1:cut
    if fd(ii) <= 0
        lower=ii+1;
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

```

end
if fd(cut-ii+1) >= 0.499*fs
    upper=cut-ii;
end
end
fd1=fd(lower:upper);
zeta1=zeta(lower:upper);
fd1=fd1./sqrt(1-(zeta1/100).^2);    % Calculate the undamped natural frequency
Lambda1=s(lower:upper);
shapes=shapes(:,lower:upper);
% Sort again
[fd1,ii]=sort(fd1);
zeta1=zeta1(ii);
shapes=shapes(:,ii);
Lambda1=Lambda1(ii);
% Normalize modeshapes
Phi=shapes;
HH = size(Phi);
[C1,II] = max(abs(Phi));
for jj = 1:HH(2)
    b = -angle(Phi(II(jj),jj));
    ModeShapeS(:,jj) = real(Phi(:,jj)*exp(1i*b));
    ModeShapeS(:,jj) = ModeShapeS(:,jj)/norm(ModeShapeS(:,jj));
end
shapes=ModeShapeS;
% Output format *
NaFreq=fd1;    % Natural frequencies vector
DampRatio=zeta1;    % Damping ratios vector
ModeShape=shapes;    % Mode shape matrix
%Froming Result structure
Result.Parameters.NaFreq=NaFreq;
Result.Parameters.DampRatio=DampRatio;
Result.Parameters.ModeShape=ModeShape;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการแก้ไขที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้หรือไม่ก็ตาม ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Result.Matrices.A=A;

Result.Matrices.B=B;

Result.Matrices.C=C;



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายอนก ดารา
วัน-เดือน-ปี เกิด	10 มกราคม 2542
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 12 หมู่ 8 ตำบลสวนกล้วย อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110
การศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
ชื่อ – สกุล	นายศิริณัฐพงศ์ ต้วมวก
วัน-เดือน-ปี เกิด	22 เมษายน 2542
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 12 หมู่ 8 ตำบลสวนกล้วย อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110
การศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
ชื่อ – สกุล	นางสาวศิริวรรณ เหมพันธ์
วัน-เดือน-ปี เกิด	17 กุมภาพันธ์ 2542
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 12 หมู่ 8 ตำบลสวนกล้วย อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110
การศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.