

การเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างด้วยวิธี ERA

Damage Evaluation Based On Structural Health Monitoring
Data Using ERA Techniques



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Damage Evaluation Based On Structural Health Monitoring
Data Using ERA Techniques



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 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างด้วยวิธี ERA
DAMAGE EVALUATION BASED ON STRUCTURAL HEALTH
MONITORING DATA USING ERA TECHNIQUES

นักศึกษา นายกฤษณะ พลชา รหัสนักศึกษา 59010044
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ฉิรเศรษฐ์	 พระจอมเกล้าลาดกระบัง
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ผศ.ดร.อภิวุฒิ	สุจริตพงศ์	
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรุงเกียรติ	
ดร.ณัฐดนัย	สินสมุทรผดุง	
อ.ทรงกลด	แช่อึ้ง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างด้วยวิธี ERA
DAMAGE EVALUATION BASED ON STRUCTURAL HEALTH
MONITORING DATA USING ERA TECHNIQUES

นักศึกษา นายกฤษณะ พลชา รหัสนักศึกษา 59010044

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ธีรเศรษฐ์
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร
ผศ.ดร.อภิญญาวิทย์	สุจิตพงษ์
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรัสเกียรติ
ดร.ณัฐดนัย	สินสมุทรผดุง
อ.ทรงกลด	แซ่อึ้ง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างด้วยวิธี ERA

นายฤกษ์ พลชา รหัสนักศึกษา 59010044

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทพดุง

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันจำนวนสะพานในประเทศไทยมีมากกว่า 8,000 แห่งที่มีอายุมากกว่า 15 ปี ซึ่งสะพานที่มีอายุช่วงนี้อยู่ในช่วงที่ควรจะได้รับ การดูแลและตรวจสอบเพื่อความปลอดภัยต่อการใช้งาน ซึ่งวิธีการตรวจสอบโดยปกติแล้วการตรวจสอบจะมีระยะห่าง 5 ปี ซึ่งในช่วงระยะเวลา 5 ปีก็อาจจะมากพอสมควร ถ้าหากมีการตรวจพบความผิดปกติได้ช้า ก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้เช่นกัน และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ราคาการซ่อมแซมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากปัญหาดังกล่าว ทางออกคือ SHM ประกอบกับในปัจจุบันเทคโนโลยีเซนเซอร์มีพัฒนาการที่สามารถวัดข้อมูลการสั่นได้ จึงทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ตามเวลาจริง และสามารถควบคุมผ่านระยะไกลโดยไม่ต้องไปตรวจสอบที่สะพานเอง จึงมีการศึกษาโดยการนำข้อมูลการสั่นของคาน ที่เปรียบเสมือนสะพาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM ไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์และตีความ เพื่อหาความความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยเทคนิควิธี ERA โดยแบบจำลองที่ใช้จะเริ่มต้นจากคานช่วงเดียวแบบ Line element วิเคราะห์แบบ Free-Vibration เพื่อเรียนรู้การเลือกใช้จำนวน element ในการวิเคราะห์และพบว่าตำแหน่งของแรงกระทำมีผลต่อการเกิดรูปร่างการสั่นและค่าความถี่ธรรมชาติ จากนั้นศึกษาคานช่วงเดียวแบบ Solid Element เรียนรู้การเลือกตำแหน่งของข้อมูลที่เลือกใช้ในการนำข้อมูลการสั่นออกจากคาน จากนั้นแบบจำลองที่ใช้ใกล้เคียงกับสะพานมากที่สุดจะเป็นคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เพื่อวิเคราะห์แบบ Force-Vibration นั่นคือเปรียบเสมือนมีรถขนาด 2 ตันวิ่งผ่านคานดังกล่าว จากการวิเคราะห์พบว่าเทคนิค ERA สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้ แต่จะมีโหมดการสั่นที่ 2 ที่เทคนิค ERA ไม่สามารถหาได้เนื่องจาก ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดดังกล่าวกับโหมดการสั่นที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก หลังจากนั้นเมื่อคานดังกล่าวเริ่มมีความเสียหายของชิ้นส่วน ในการศึกษาจะใช้รูปแบบความเสียหายของชิ้นส่วนแบบ Transverse เพื่อวิเคราะห์ดูความเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น โดยจากการวิเคราะห์พบว่า มีความเป็นไปได้ว่าเมื่อชิ้นส่วนมีความเสียหายตั้งแต่ 25% ขึ้นไปเทคนิค ERA จะสามารถเห็นความแตกต่างทั้งในความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของคาน เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นเมื่อคุณสมบัติของคานเป็น 100% การศึกษาโครงการนี้เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของโครงสร้างต่อไปในอนาคตได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Damage Evaluation based on structural health monitoring using era techniques

Mr. Kritsana Polcha Student ID. 59010044

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุงที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการ แก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใน ความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอด ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและ การดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการ ทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการ สนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง ในพระคุณเป็นอย่างสูง

กฤษณะ พลชา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 สะพานในประเทศไทย.....	4
2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS) ..	5
2.2.1 ประโยชน์ของ BMMS	5
2.2.2 ขั้นตอนของระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน	6
2.2.3 การตรวจสอบสะพาน (Inspection).....	6
2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology).....	7
2.3.1 Accelerometer Sensor	9
2.4 Structural Health monitoring	12
2.5 Time domain Method.....	13
2.6 Frequency domain method	15
2.7 Fourier Transformation	15
2.7.1 Discrete Fourier transform (DFT).....	16
2.7.2 Fast Fourier Transform (FFT)	17
2.8 Eigensystem realization algorithm	17
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนการศึกษา.....	20
3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา.....	20
3.2.1 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของโปรแกรมและคานช่วงเดียวมีน้ำหนักกระทำตรงกลางแบบ Free-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element.....	20
3.2.2 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element.....	23
3.2.3 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element.....	23
3.2.4 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration.....	24
3.2.5 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆทั้งความยาวคาน.....	25
3.2.6 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆในแต่ละช่วงของคาน.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของโปรแกรมและคานช่วงเดียวมีน้ำหนักกระทำตรงกลางแบบ Free-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element.....	27
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear Perturbation.....	29
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT.....	30
4.1.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA.....	31
4.2 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element.....	32
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT.....	32
4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA.....	33
4.2.3 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ FFT/ERA.....	34
4.3 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element.....	35
4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA.....	36
4.3.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ FFT/ERA	37
4.4 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration	37
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Linear Perturbation	37
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA.....	38
4.4.3 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ ERA.....	39
4.5 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆทั้งความยาวคาน	40
4.5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี ERA.....	40
4.5.2 รูปร่างการสั่นของโครงสร้างจากวิธี ERA ที่โหมดการสั่นที่ 1	42
4.5.3 รูปร่างการสั่นของโครงสร้างจากวิธี ERA ที่โหมดการสั่นที่ 2.....	43
4.6 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆในแต่ละช่วงของคาน	44
4.6.1 เมื่อชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงซ้ายของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง	44
4.6.2 เมื่อชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงขวาของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง.....	48
4.6.3 เมื่อชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงกลางของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	55
5.1 สรุปผลการศึกษา	55
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย	55
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก ก	58
ภาคผนวก ข	59
ประวัติผู้เขียน	63

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	จำนวนสะพานที่อายุต่างในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)	4
รูปที่ 2.2	จำนวนสะพานในแต่ละประเภท (อ้างอิงกรมทางหลวง)	5
รูปที่ 2.3	เทคโนโลยีเซนเซอร์	8
รูปที่ 2.4	โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic	10
รูปที่ 2.5	โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric	11
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ของ Time domain และ Frequency domain	13
รูปที่ 2.7	สัญญาณในรูปแบบของ (ก) Time domain และ (ข) Frequency domain	14
รูปที่ 2.8	แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA	17
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล	18
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน	20
รูปที่ 3.2	แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำตรงกลาง	21
รูปที่ 3.3	แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำตรงกลางในโปรแกรม ABAQUS	21
รูปที่ 3.4	ตำแหน่งของ sensor ในแบบจำลอง	22
รูปที่ 3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา ในลักษณะของ Free-Vibration	22
รูปที่ 3.6	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบแบบ Free-Vibration	22
รูปที่ 3.7	แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคาน	23
รูปที่ 3.8	แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS	23
รูปที่ 3.9	แบบจำลองคานช่วงเดียว แบบ Solid Element	24
รูปที่ 3.10	แบบจำลองคานต่อเนื่อง 3 ช่วง	24
รูปที่ 3.11	แบบจำลองการทำ Force-Vibration บนคานต่อเนื่อง 3 ช่วง	24
รูปที่ 3.12	ตำแหน่งชิ้นส่วนความเสียหายบนคาน (1) ทุกระยะ 1.0 เมตร, (2) ทุกระยะ 2.5 เมตร, (3) ทุก ระยะ 4.0 เมตรและ (4) ทุกระยะ 6 เมตร	25
รูปที่ 3.13	การใส่ชิ้นส่วนความเสียหายที่มีระยะห่าง 2.5 เมตร (1) ความเสียหายอยู่ในช่วงซ้ายของคาน, (2) ความเสียหายอยู่ในช่วงขวาของคาน, (3) ความเสียหายอยู่ในช่วงกลางของคาน	26
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งตัวกับระยะทาง	27
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งตัวกับเวลา	28
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา	28
รูปที่ 4.4	ค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี FFT ของคานช่วงเดียว น้ำหนักกระทำตรงกลาง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5	รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำตรงกลางด้วยวิธี ERA	31
รูปที่ 4.6	ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี FFT ของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคาน.....	32
รูปที่ 4.7	รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 5.....	33
รูปที่ 4.8	รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 4, (2) โหมดที่ 5.....	34
รูปที่ 4.9	ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี FFT ของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคาน (Solid)	35
รูปที่ 4.10	รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA (Solid) (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมดที่ 3, (4) โหมดที่ 5	36
รูปที่ 4.11	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation	37
รูปที่ 4.12	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA	38
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA	40
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA	40
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA	41
รูปที่ 4.16	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ	42
รูปที่ 4.17	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 10%และ 25% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ	42
รูปที่ 4.18	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 2 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ	43
รูปที่ 4.19	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 2 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25%และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ	43
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA.....	44
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA.....	45
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA.....	45
รูปที่ 4.24	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%และ 10% ที่ ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมด ที่ 4	46
รูปที่ 4.25	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25%และ 40% ที่ ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมด ที่ 4	47
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA.....	48
รูปที่ 4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA.....	48
รูปที่ 4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA.....	49
รูปที่ 4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA.....	49
รูปที่ 4.30	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%และ 10% ที่ ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงขวาของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมด ที่ 4	50
รูปที่ 4.31	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25%และ 40% ที่ ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมด ที่ 3, (4) โหมดที่ 4	51
รูปที่ 4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA 52
รูปที่4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA 53
รูปที่4.35	รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%,10%,25%และ40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงกลางของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 4..... 54
รูปที่4.36	ชิ้นส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ของสะพาน (1) ส่วนของผิวทางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้,..... 56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และXของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงสร้างพื้นฐานประเภทสะพานได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อตอบสนองระบบขนส่งเนื่องจากการขยายตัวของเมือง ในอนาคตอันใกล้ โครงสร้างสะพานจำนวนมากกำลังจะมีอายุมากกว่า 15 ปีซึ่งโครงสร้างดังกล่าวต้องการการตรวจสอบสภาพและซ่อมแซม เพื่อความปลอดภัยของระบบขนส่ง อย่างไรก็ตามงบประมาณและกำลังคนนั้นมีอยู่อย่างจำกัดในแต่ละปี ดังนั้นการตรวจสอบงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องจำเป็น

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

ซึ่งจากข้อมูลการติดตามโครงสร้างสะพานที่ได้กระทำกันมาอย่างต่อเนื่องเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟวงจรชีวิตของโครงสร้างและค่าบำรุงรักษาพบว่า ในขณะที่เมื่อเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพและคุณภาพของโครงสร้างจะลดลง ในเช่นเดียวกันค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซมกลับมากขึ้นด้วย ถ้าเปรียบเทียบกับตรวจสอบแบบพิเศษที่จะกระทำทุกๆ 2-5 ปี พบว่าในช่วงเวลา 2-5 ปีนั้น สามารถเกิดเหตุการณ์ได้หลากหลาย เช่นเดียวกันถ้าหากสะพานเกิดเสียหายในช่วงเวลาปีที่ 1-2 จะทำให้ไม่สามารถแก้ไขสะพานได้จนกว่าจะมีการมาตรวจสอบสะพานอีกครั้งเมื่อครบ 5 ปี ในกรณีที่เลวร้ายถ้าหากประชาชนกำลังใช้งานสะพานดังกล่าวอยู่แล้วสะพานเกิดการชำรุดเสียหายอย่างรุนแรงโดยที่ไม่ทันได้ตั้งตัวนั้นหมายความว่าชีวิตของประชาชนกำลังมีความเสี่ยง จึงเป็นสาเหตุที่บางที่การตรวจสอบทุก 5 ปีอาจจะสายเกินไป

ด้วยเหตุผลที่ว่า การตรวจสอบทุก 2-5 ปีนั้นอาจจะสายเกินไป และด้วยข้อจำกัดที่ว่า งบประมาณในการตรวจสอบนั้น มีอย่างจำกัด และในเรื่องของกำลังคนที่ใช้ตรวจสอบ อีกทั้งในการตรวจสอบแต่ละครั้งนั้น จะต้องมี การเดินทางไปตรวจสอบหรือทำการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเก็บข้อมูลนั้น มาวิเคราะห์เป็นไปได้อีก ทางเลือกของการแก้ไขปัญหานี้ เพื่อพัฒนาการตรวจสอบสภาพสะพานด้วยสายตา จึงมีระบบการเฝ้าระวังโครงสร้าง (Structural Health Monitoring) ด้วยเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความเร่ง การกระจัด และความเค้น ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อ การตรวจพบความผิดปกติของโครงสร้างด้วยข้อมูลตามเวลาจริง (Real Time) ในทางปฏิบัติระบบดังกล่าวยังถูกใช้ในการแจ้งเตือนการตรวจสอบสภาพของสะพาน เช่น ถ้าค่าความเร่งหรือความเค้นมีค่าสูงผิดปกติ ระบบจะแจ้งเตือนหน่วยดูแลสะพานให้มีการออกไปตรวจสอบสภาพ ณ สะพานจริง

เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานนั้น เกี่ยวข้องกับการสั่นไหวจากยานพาหนะ, แรงลม, แรงแผ่นดินไหว จึงมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการใช้พฤติกรรมการสั่นไหว อาทิ เช่น ค่าความถี่สั่นพ้อง (Natural frequency) และรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง (Modal shape) ในการตรวจพบความเสียหายของโครงสร้าง และมีการใช้หลักการดังกล่าวในระบบเฝ้าระวังสะพานอยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้นการประมวลผลภายหลังของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง เพื่อให้ได้มาซึ่งดัชนีวัดการสั่นไหวจึงเป็นความคิดที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิธีการประเมินความเสียหายร่วมกับระบบเฝ้าระวังโครงสร้าง

ทางผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ทำการวิจัยในหัวข้อนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตในการทำวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และลำดับการทำวิจัยนั้นได้แสดงในหัวข้อต่อไป

1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิควิธี Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้คานช่วงเดียว และคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ในการศึกษาเป็นตัวแทนโครงสร้างสะพาน

1.3.2 ใช้โมเดลแบบเส้น และโมเดลแบบ 3 มิติในการศึกษาทางพลศาสตร์และการศึกษาด้วยเทคนิค Linear perturbation

1.3.3 ใช้ข้อมูลความเร่งในกระบวนการติดตามความเสียหายของโครงสร้างด้วยเทคนิค ERA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถจัดแบ่งกระบวนการศึกษาได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่

1.4.1 ใช้การสร้างโมเดลด้วย Finite Element เป็นตัวแทนให้กับโครงสร้างสะพาน

1.4.2 หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจากเทคนิค Linear perturbation

1.4.3 หาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาในแต่ละจุดที่เป็นตัวแทนของ sensor และนำไปเข้ากระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm

1.4.4 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจากเทคนิค 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

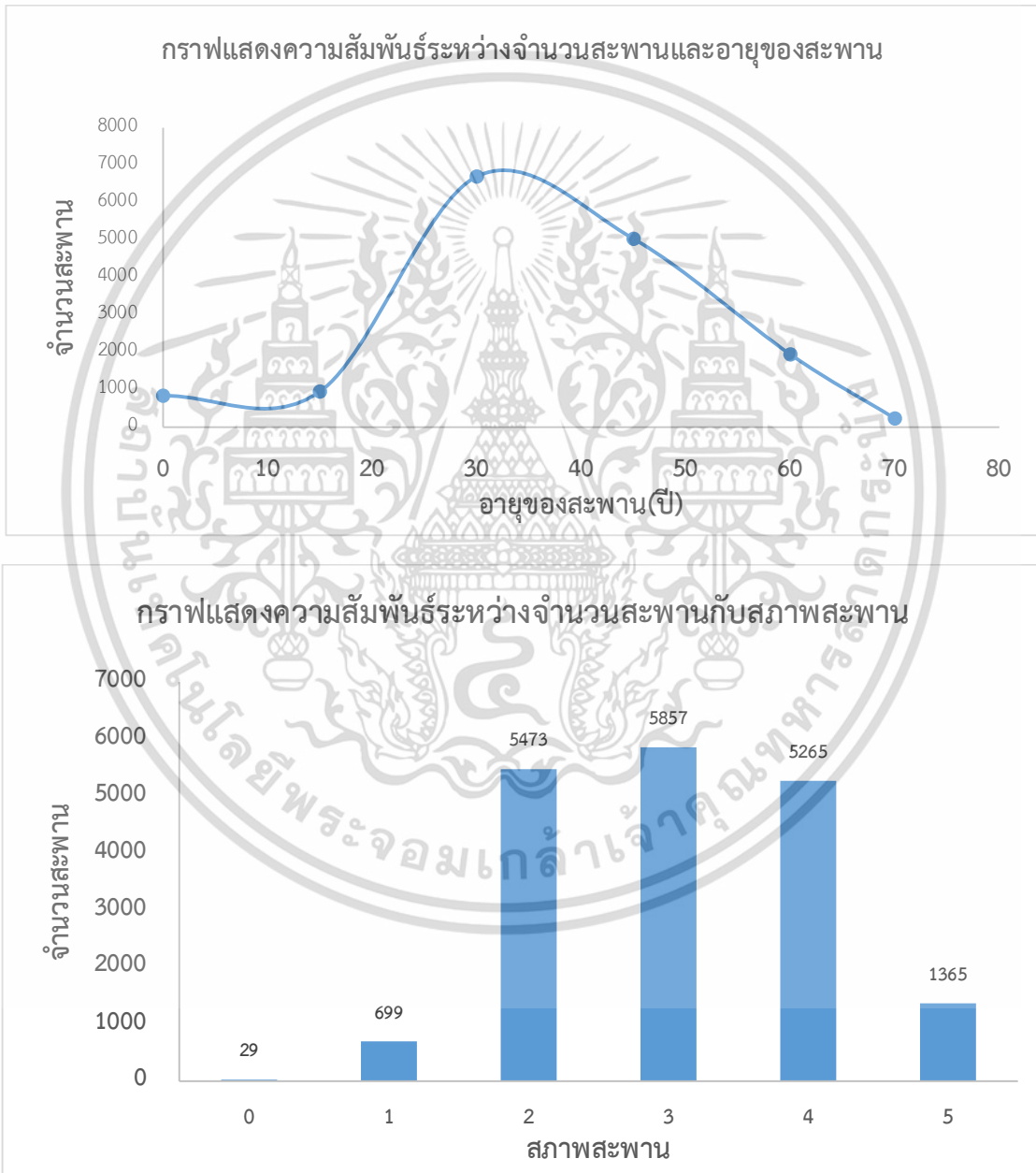
1.5.4 ทางองค์กรที่เป็นหน่วยงานสำหรับติดตามและซ่อมแซมสะพาน จะสามารถจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับการซ่อมแซมสะพานในแต่ละครั้ง

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 สะพานในประเทศไทย

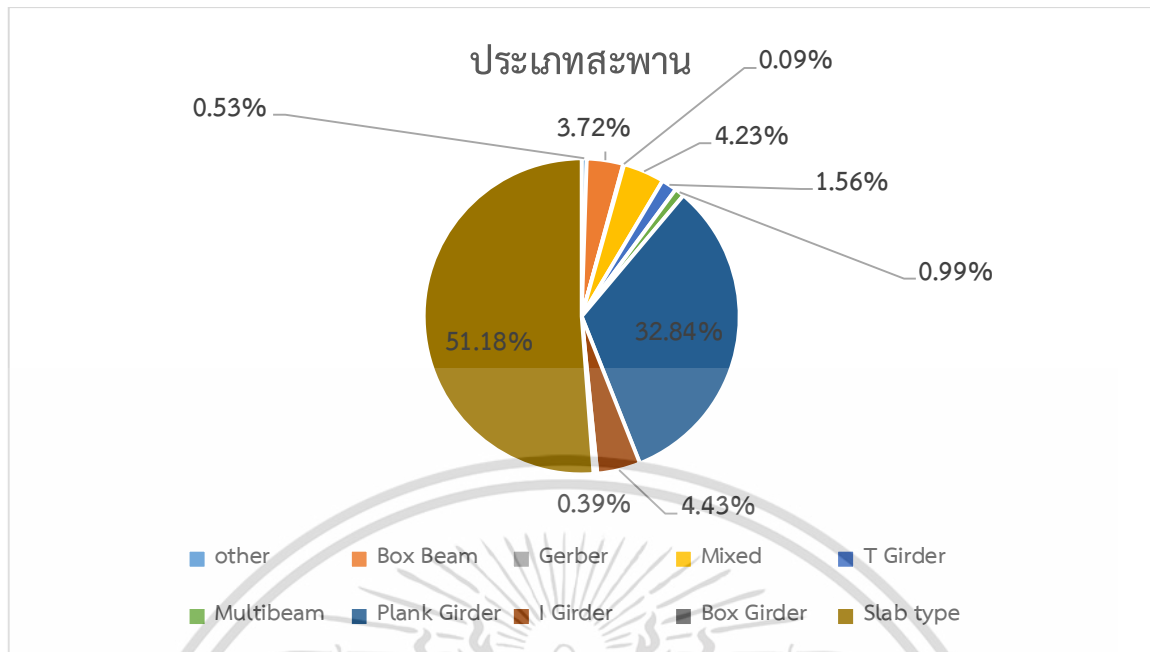
ปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานเป็นจำนวนมากกว่า 10,000 แห่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชาชน และปัจจุบันสะพานมีอายุที่แตกต่างกันไปหลายช่วงแสดงดังกราฟดังกล่าว



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

รูปที่ 2.1 จำนวนสะพานที่อายุต่างในประเทศไทย (อ้างอิงจากกรมทางหลวง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 จำนวนสะพานในแต่ละประเภท (อ้างอิงกรมทางหลวง)

2.2 ระบบบริหารบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS)

คือระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพานช่วยบริหารจัดการข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมตรวจสอบ คัดราคาซ่อม การประเมินอายุของสะพาน การรับน้ำหนักของสะพาน การจัดลำดับความสำคัญของสะพานเพื่อเสนอของบประมาณ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 5 ห่วงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 การเชื่อมความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน

-Model อายุที่เหลือของสะพาน

-การคิดราคาค่าซ่อมแซมรายปีตามราคาวีสดุที่เปลี่ยนไป

-การคิดราคาค่าขนส่งตามระยะทางจริง

-การจัดลำดับความสำคัญของสะพาน

2.2.3 การตรวจสอบสะพาน (Inspection)

ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานภายหลังการก่อสร้างหรือการเปิดใช้งานสะพาน ประกอบด้วย กระบวนการทางานต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การวางแผนการตรวจสอบ การตรวจสอบ การวางแผนการ ซ่อมแซม การซ่อมแซม และการปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้าง เป็นวงจรต่อเนื่องและสนับสนุนซึ่งกันและกันด้วยระบบ ฐานข้อมูลเพื่อใช้พิจารณาประกอบการดำเนินการ โดยระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานที่มีประสิทธิภาพนั้นมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้การดำเนินการต่างๆ ทุกๆ ขั้นตอนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เป็นไปได้อย่างมีความเหมาะสม รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณ ทั้งนี้ เพื่อความมั่นคงแข็งแรงของสะพาน ตลอดจนความปลอดภัยของผู้ใช้บริการสะพาน ผู้ที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนของ

การตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วย ขั้นตอน และรายละเอียดต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบ และชิ้นส่วนที่ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบควรจะต้องมีความรู้ความชำนาญในวิธีการตรวจสอบ และความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมสะพาน การตรวจสอบ สามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะตามความถี่ในการตรวจสอบดังนี้

1. การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด เช่น การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เพื่อให้ทราบถึงสภาพของสะพานในช่วงเวลาต่างๆ หากสะพานเริ่มเกิดความเสียหาย จะได้มีมาตรการตรวจสอบความเสียหายเพิ่มเติม ซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาอื่นๆ ได้ทันเวลาที่ โดยทั่วไปมักจะเป็นทดสอบทางกายภาพที่ใช้ระยะเวลาและงบประมาณต่อหนึ่งสะพานไม่มากนัก

2. การตรวจสอบพิเศษ (Special Inspection) เป็นการตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลังที่ทราบว่าสะพานเกิดความเสียหายขึ้น เป็นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดความเสียหาย ติดตามการขยายตัวของความเสียหาย หรือประเมินความสามารถของสะพานอย่างละเอียด เป็นต้น การตรวจสอบพิเศษในบางกรณีเป็นวิธีเฉพาะ มีข้อควรระวังและเทคนิควิธีการที่ละเอียดซับซ้อน จำเป็นต้องตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

3. การตรวจสอบฉุกเฉิน (Emergency Inspection) เป็นการตรวจสอบเมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินเกิดขึ้นกับสะพานเช่น ไฟไหม้ สารเคมีรั่วไหล รถยนต์หรือเรือชนสะพาน หรือแผ่นดินไหว เป็นต้น การตรวจสอบแบบฉุกเฉินนี้จะกระทำไปพร้อมๆ กับมาตรการบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวสะพาน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนที่อยู่โดยรอบหรือต้องใช้สะพานในการสัญจรน้อยที่สุด ประกอบด้วยวิธีการตรวจสอบประเมินความเสียหายในหลายระดับขึ้นอยู่กับสภาพความร้ายแรงของความเสียหาย

2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology)

เซนเซอร์ (Sensor) คือ ชุดอุปกรณ์ วงจร หรือ ระบบ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือลักษณะของสิ่งต่างๆ โดยรอบวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลจำนวนมหาศาล (Big Data) ที่ได้จากการตรวจวัด เข้าสู่กระบวนการแจกแจง และวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลง ประมวลผลเป็นองค์ความรู้และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ให้มนุษย์สามารถนำองค์ความรู้มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน



รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีเซนเซอร์

ปัจจุบันมีการนำระบบ sensor มาใช้บนโทรศัพท์มือถือ ในหลายรูปแบบ เช่น G-sensor ระบบตรวจจับความเคลื่อนไหว , Accelerometer Sensor ระบบหมุนภาพ อัตโนมัติ, Orientation Sensor เซ็นเซอร์ปรับมุมมองหน้าจอ, Sound Sensor เซ็นเซอร์ตรวจจับระดับเสียง, Magnetic Sensor ตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก, 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 , ฮอร์โมน, สารสื่อประสาท เป็นต้น

2. เซนเซอร์ด้านเคมี (Chemical Sensor) คือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสารเคมีต่างๆ โดยอาศัยปฏิกิริยาจำเพาะทางเคมี และมีการแปลงเป็นข้อมูลหรือสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดสารเคมีปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หรือดินและน้ำเซนเซอร์ และ อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบ สัมพันธ์กันอย่างไร?ทิศทางการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทดสอบมีแนวโน้มจะประยุกต์เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านผลได้ง่าย แสดงผลเป็นระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 8 องค์กรอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิทัลหรือตัวเลข โดยไม่จำ เป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์และอ่านผลผู้ใช้สามารถใช้ อุปกรณ์ดังกล่าวได้ด้วยตัวเอง (Point-of-Care: PoC) จากลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ที่สามารถใช้เป็น อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ที่มีขนาดพกพาสะดวกและใช้งานง่ายนั้น จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ใน อุตสาหกรรมต่างๆ

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

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

ประเทศไทย 4.0 กำลังเตรียมมุ่งเข้าสู่เศรษฐกิจดิจิทัล รับรองได้ว่า เทคโนโลยีเซนเซอร์ มีความจำเป็นต้อง ลงทุนอย่างจริงจัง และเชื่อว่าในอีกไม่เกิน 10 ปีข้างหน้า จำนวนเซนเซอร์ทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นจากหลัก พันล้านตัว (billion) ไปสู่หลักล้านล้านตัว (trillion) จนเรียกได้ว่า เทคโนโลยีนี้เข้าสู่ยุค Trillion Sensors จากแนวโน้มของเทคโนโลยีเซนเซอร์ ที่มีชิปเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กลง และมีความฉลาดและเป็น อัจฉริยะเพิ่มขึ้น จนสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลเป็นองค์ความรู้และสร้างปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เพื่อพัฒนาให้เกิดเป็นนวัตกรรมฝีมือคนไทย และนักวิจัยมีบทบาทในเวที นวัตกรรมด้านเซนเซอร์ของโลกต่อไป

2.3.1 Accelerometer Sensor

Accelerometer คือ เครื่องวัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ค้นเคยดีในมือถือสมาร์ต โฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกมนั้น เป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่อง

โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง

มิเตอร์วัดความเร่งนี้โดยหลักๆแล้วจะแบ่งเป็น 2 ชนิด

1. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซมิกแมส (seismic mass accelerometer) มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงกระทำยิ่งมีแรงกระทำมาก ก็จะมี ความเร่งมาก ในขณะที่เดียวกันแรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วยนอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่มากกระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมากระยะขจัดยิ่งมาก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซซมิกแมส ในการตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุในเทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น

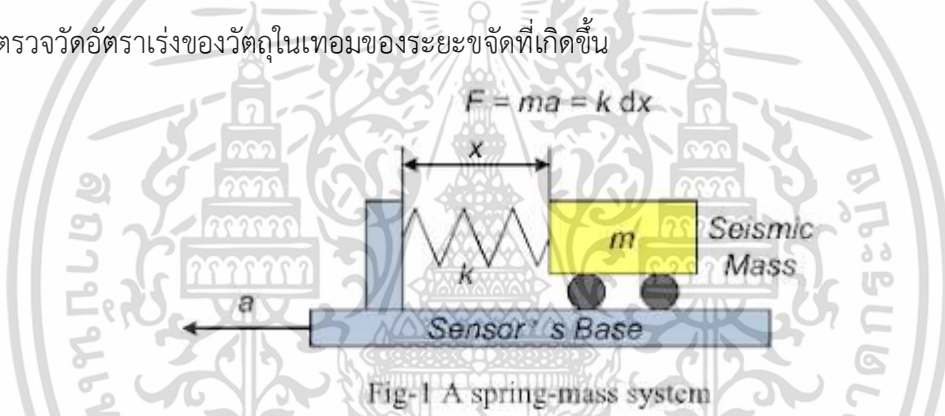


Fig-1 A spring-mass system

รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ seismic

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

เมื่อตัวเซนเซอร์ตัวนี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล m เคลื่อนที่ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ x และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์

ดังนั้นอัตราเร่ง a ของวัตถุสามารถคำนวณค่าได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$a = x(k/m) \text{ โดยที่}$$

a คือ อัตราเร่งของวัตถุ หน่วย เมตร/วินาที

x คือ ระยะขจัดของมวล m หน่วย เมตร

k คือ ค่าคงที่ของสปริง หน่วย นิวตัน/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 10 อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m คือ น้ำหนักของมวล m หน่วย กิโลกรัม

จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า

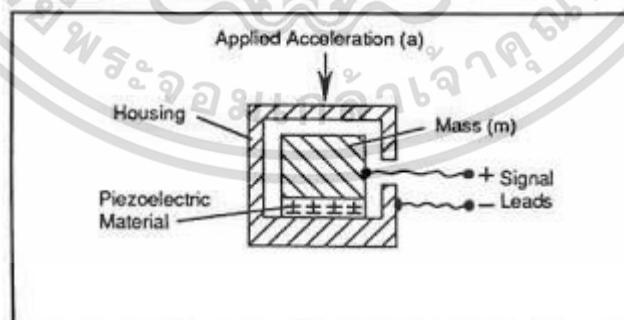
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะขจัดของมวล m มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง ทำให้มวล m เคลื่อนที่ไปต้นสปริง
- เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล m เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง)

แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล m ได้โดยอาศัยมิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง คือมิเตอร์วัดระยะขจัดเชิงเส้น (LVDT, potentiometer)

2. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer)

คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในราวปี ค.ศ.1880 ซึ่งเจ้า piezoelectric crystal นี้มันมีคุณสมบัติพิเศษคือ เมื่อมันถูกแรงทางกลมากระทำ มันจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำนั้น ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้สร้างอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น ใช้เป็นแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับนาฬิกาข้อมือดิจิตอลที่เราใช้ทั่วไป และยังใช้สร้างมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย

โครงสร้างของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วย seismic mass ยึดติดกับ piezoelectric crystal และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดย piezoelectric crystal ที่นิยมนำมาใช้งานได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโปตัสเซียมตาเตรต (sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ และราคาไม่แพงมากนัก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric

จากรูปแสดงโครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer) สามารถอธิบายการทำงานง่ายๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 11 อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.4 Structural Health monitoring

การตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง (SHM) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ในทุกช่วงเวลาของชีวิตของ โครงสร้างการวินิจฉัยของ "รัฐ" ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของที่แตกต่างกันขึ้นส่วนและจากการประกอบ อย่างเต็มรูปแบบของขึ้นส่วนเหล่านี้ประกอบเป็นโครงสร้างโดยรวมสถานะของโครงสร้างจะต้องคง อยู่ใน โดเมนที่ระบุในการออกแบบแม้ว่าสิ่งนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยอายุปกติเนื่องจากการใช้งานโดยการ กระทำของสภาพแวดล้อมและโดยเหตุการณ์ที่ไม่ได้ตั้งใจ ขอบเขตเวลาของการตรวจสอบซึ่งทำให้ เป็นไปได้ที่จะพิจารณาฐานข้อมูลประวัติแบบเต็มของโครงสร้างและด้วยความช่วยเหลือของ ตรวจสอบ การใช้งานมันยังสามารถให้การพยากรณ์โรค (วิวัฒนาการของความเสียหายชีวิตที่เหลือ ฯลฯ)

หากพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันแรกการวินิจฉัยสามารถประมาณได้ว่าการตรวจสอบสุขภาพ โครงสร้างเป็นวิธีใหม่และปรับปรุงในการประเมินผลแบบไม่ทำลาย ที่กล่าวมาเป็นความจริงบางส่วน แต่ SHM นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการรวมกันของเซ็นเซอร์, วัสดุที่ชาญฉลาด, การส่งข้อมูล, การคำนวณ พลังงานและความสามารถในการประมวลผลภายในโครงสร้าง ทำให้สามารถพิจารณาได้อีกครั้งการ ออกแบบโครงสร้างและการจัดการเต็มรูปแบบของโครงสร้างตัวเองและของโครงสร้างถือเป็นส่วนหนึ่งของ ระบบที่กว้างขึ้น

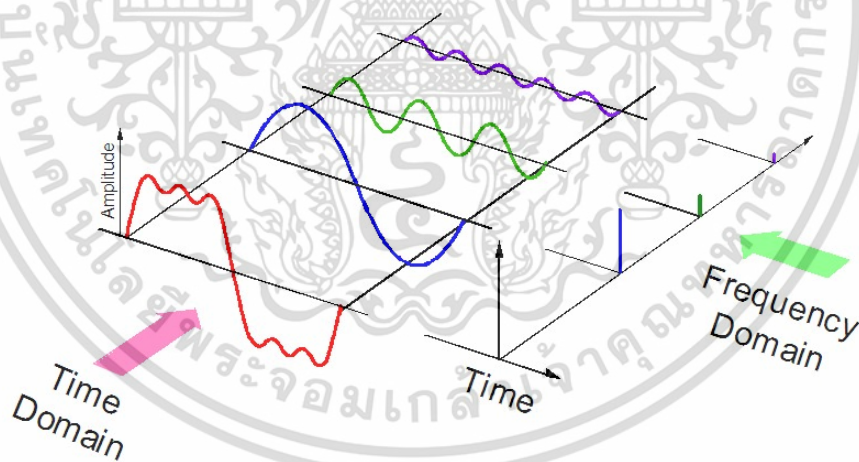
รายละเอียดการจัดระเบียบของระบบ SHM ทั่วไปส่วนแรกของระบบซึ่งสอดคล้องกับการ ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ฟังก์ชันสามารถกำหนดโดย:

- i) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับความเสียหายซึ่ง ตรวจสอบโดยเซ็นเซอร์
- ii) ประเภทของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เซ็นเซอร์ใช้เพื่อสร้างสัญญาณ (โดยทั่วไปคือ ไฟฟ้า) ที่ส่งไปยัง

การได้มาและการจัดเก็บระบบย่อย เช่น เซอร์หลายตัวที่เป็นชนิดเดียวกัน เครือข่ายสามารถ มัลติเพล็กซ์และข้อมูลของพวกเขาพร้อมกับผู้ที่มาจากประเภทอื่น ๆ อาจเป็นไปได้ว่าเซ็นเซอร์อื่น ๆ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมทำให้มัน เป็นไปได้ที่จะดำเนินการฟังก์ชันการตรวจสอบการใช้งาน สัญญาณที่ส่ง มอบโดย การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบย่อยควบคู่ไปกับข้อมูลที่ลงทะเบียนก่อนหน้านี้คือ ใช้โดย คอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างการวินิจฉัย การผสมข้อมูลของความซื่อสัตย์ การตรวจสอบระบบย่อยด้วยของ การใช้งานระบบย่อยการตรวจสอบและกับความรู้ตามกลไกความเสียหายและกฎหมายพฤติกรรมทำให้ เป็นไปได้

กำหนดการพยากรณ์โรค (ชีวิตที่เหลือ) และการจัดการสุขภาพของโครงสร้าง(การจัดองค์กรของ การบำรุงรักษาการดำเนินการซ่อมแซม ฯลฯ) ในที่สุดโครงสร้างที่คล้ายกันระบบการจัดการที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งเป็นประเภทของสุดยอดระบบ (กองทัพเรือของเครื่องบินกลุ่มของสถานีพลังงาน ฯลฯ) ทำให้สุขภาพเป็นไปได้การจัดการของระบบซัพเปอร์ แน่นอนว่าระบบที่ใช้การได้สามารถตั้งค่าได้แม้ว่าไม่ ครอบคลุมอย่างที่อธิบายไว้

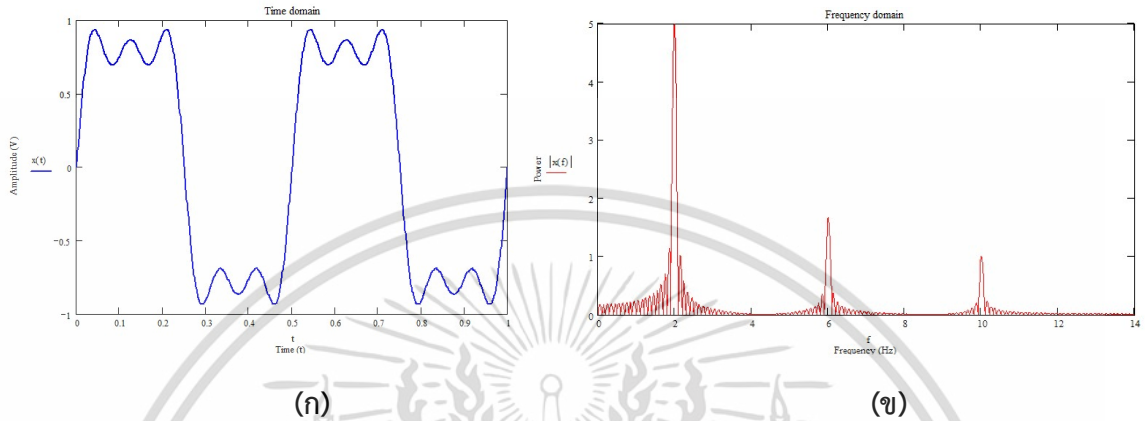
2.5 Time domain Method



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของ Time domain และ Frequency domain

โดเมน หมายถึงการอธิบายความหมายต่าง ๆ คือหากการอธิบายหรือการทำงานนั้นกระทำภายใต้ ตัวแปรของเวลา (t) ก็จะใช้เรียกว่า Time domain หรือ โดเมนเวลา หรือถ้าหากการทำงานนั้นกระทำ ภายใต้ตัวแปรของความถี่ (f) ก็จะใช้เรียกว่า Frequency domain หรือ โดเมนความถี่ เป็นต้น ในการ วิเคราะห์สัญญาณเดียวกันนั้นคุณสมบัติบางอย่างอาจมองได้เด่นชัดในอีกโดเมนหนึ่ง เช่น จากรูปที่ 3 ใน Time domain เราสามารถจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและขนาดของสัญญาณในขณะที่เวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 13 อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน แต่จะบอกได้ยากว่าสัญญาณนั้นประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง แต่ใน Frequency domain นั้นเราสามารถที่ระบุได้ว่าสัญญาณนั้นประกอบด้วยความถี่ใดบ้างแต่ละความถี่นั้นมีพลังงานเท่าไร



รูปที่ 2.7 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

FDE เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของผลตอบสนองที่อยู่ในตัวแบบเชิงพหุนาม (Polynomial Model) เป็นฟังก์ชันที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์ผ่านปัจจัย การจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีนี้ต้องการจำนวนครั้งการทำจำลองระบบเพียง 2 ถึง 3 ครั้งเท่านั้นก็สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยมีที่อิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือไม่ สิ่งสำคัญในการใช้โดเมนความถี่ในการคัดเลือกปัจจัยประกอบไปด้วย

รูปแบบปัญหา

FDE ใช้ประโยชน์ในระบบที่ไม่ทราบความความสัมพันธ์ที่แน่นอน (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 $\tau_1 = x_1^2x_2^4$ จะไม่อยู่ในเทอมของสมการเพราะเลขชี้กำลัง $2 + 4$ มากกว่า 5 เป็นต้น

β_j เป็นสัมประสิทธิ์ของเทอม τ_j ถ้าเทอมของ τ_j ใดๆ ที่มีความหมายต่อฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์ β_j จะไม่มีค่าเป็นศูนย์ และ

q เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดของฟังก์ชันผลตอบสนอง

2.7 Fourier Transformation

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

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

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

$s(t)$, $S(\omega)$, 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 ใช้ได้กับสัญญาณเวลาที่เป็นระยะและไม่ตรงตามเวลาซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขั้นต่ำ เกือบทุกสัญญาณในโลกแห่งความจริงสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้

2.7.1 Discrete Fourier transform (DFT)

ดิสครีตสเปกตรัม การแทนสัญญาณรายคาบหนึ่งๆด้วยอนุกรมฟูเรียร์ก็คือการแจกแจงให้เห็นองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณรายคาบนั้นว่ามีองค์ประกอบทางความถี่ที่ฮาร์โมนิกส์อะไรบ้างและแต่ละฮาร์โมนิกส์มีขนาดและเฟสเป็นเท่าไรซึ่งสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรม เมื่อนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์มาพล็อตบนแกนของความถี่ จะเรียกว่า การ พล็อตสเปกตรัม ซึ่งสามารถพล็อตได้ทั้งขนาด เรียกว่า แอมพลิจูดสเปกตรัม (amplitude spectrum) หรือสเปกตรัมเชิงขนาด และพล็อตเฟสเรียกว่า เฟสเป็กตรัม (phase spectrum) ถ้า พล็อตทั้งขนาดและเฟส เรียกว่า การพล็อตสเปกตรัมของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณรายคาบประกอบไปด้วยความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องจึงเรียก สเปกตรัมที่ได้ว่า ไลน์สเปกตรัม (line spectra) หรือ ดิสครีตสเปกตรัม (discrete spectra)

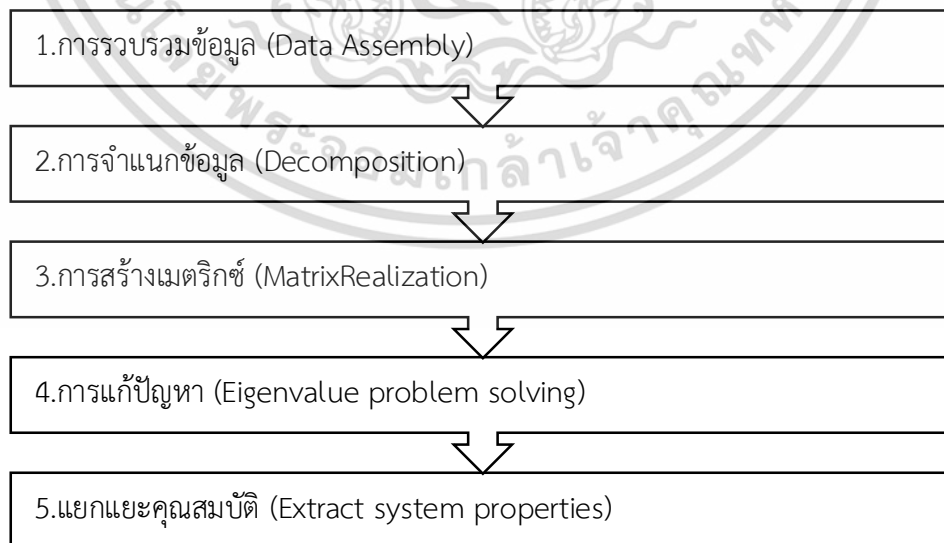
2.7.2 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier transform (FFT) เป็นอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณ DFT เนื่องจาก DFT ต้องการเวลาในการคำนวณมากเกินไปด้วยเฉพาะเมื่อต้องการตัวอย่างจำนวนมาก (N) โดยที่ FFT บังคับให้มีการสันนิษฐานเพิ่มเติมอีกครั้งหนึ่งว่า N เป็นจำนวนเต็มจำนวนเต็มของ 2 ซึ่งจะช่วยให้สมมาตรบางอย่างเกิดขึ้นเพื่อลดจำนวนการคำนวณ (โดยเฉพาะการคูณ) ซึ่งจะต้องทำ

2.8 Eigensystem realization algorithm

เป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบสุขภาพโครงสร้าง ERA สามารถใช้เป็นที่นิยมในการวิเคราะห์แบบ 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.

2.8.1 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

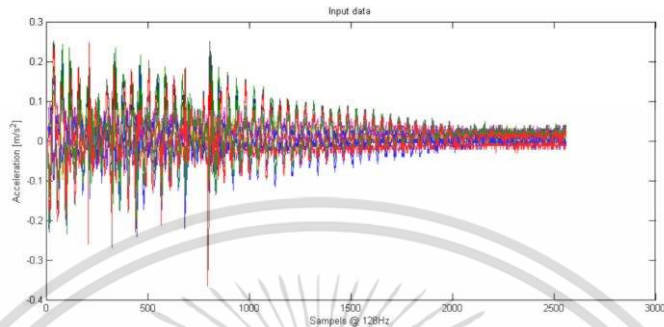


รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนของเทคนิค ERA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1.1 การรวบรวมข้อมูล (Data Assembly)

เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการวัดตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นจะนำข้อมูลมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ Hankel Matrix และ Shift Hankel Matrix



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการรวบรวมข้อมูล

จากนั้นจะนำข้อมูลมาสร้างเมทริกซ์ฮังเคิล (Hankel matrix) คือเมทริกซ์จัตุรัสที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกัน และแนวขนานเส้นทแยงมุมรองเป็นค่าเดียวกันในแต่ละแนว ตัวอย่างเช่น

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

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

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

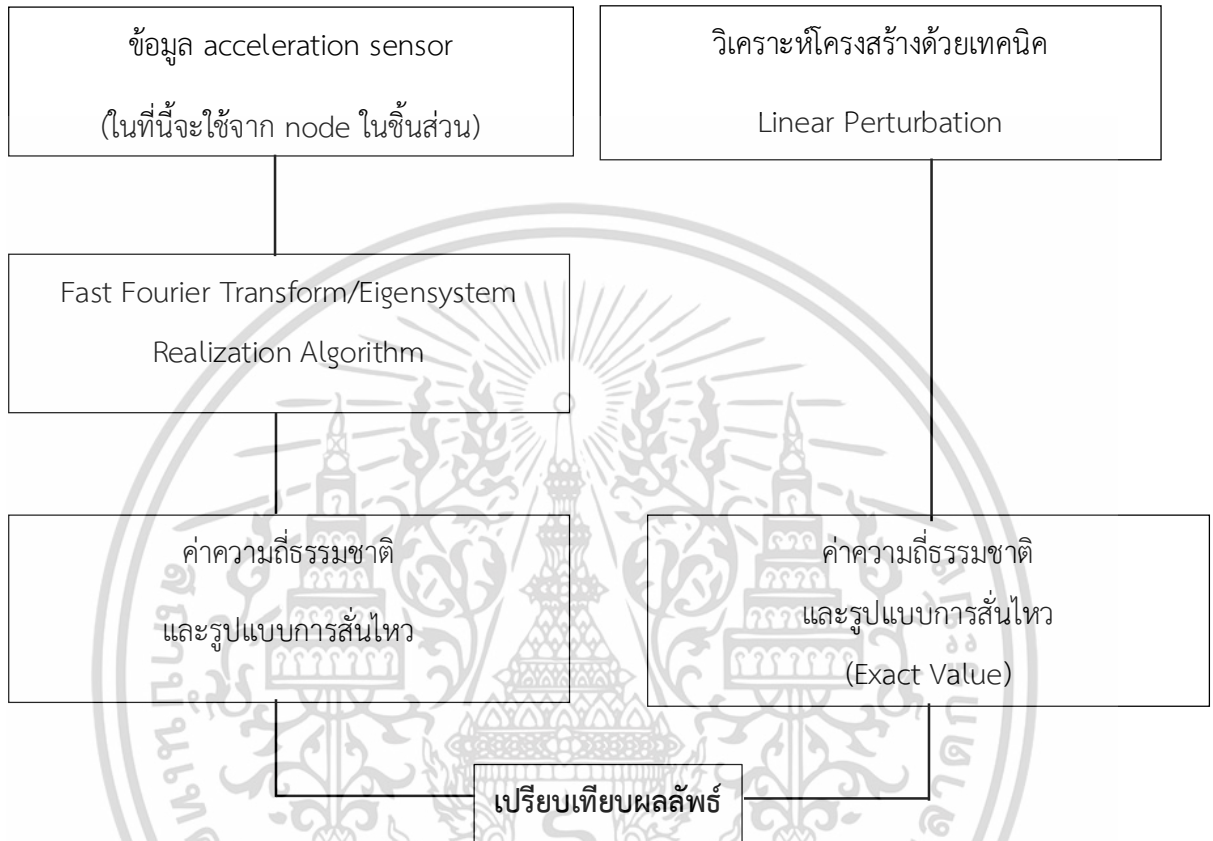
2.8.1.2 การจำแนกข้อมูล (Decomposition)

จะเป็นการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) คือ เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งจะแบ่งออกมาให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่เท่ากันจำนวน 3 เมทริกซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการและขั้นตอนในการศึกษา

3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

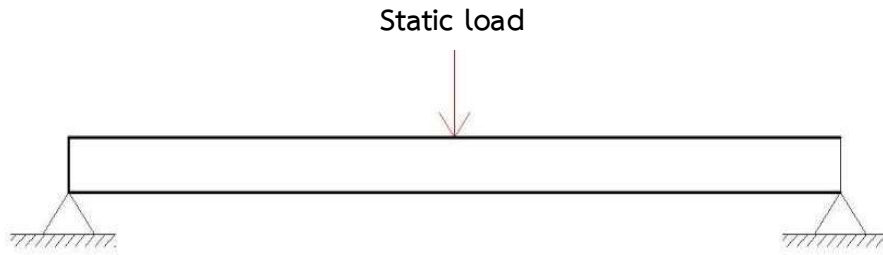


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน

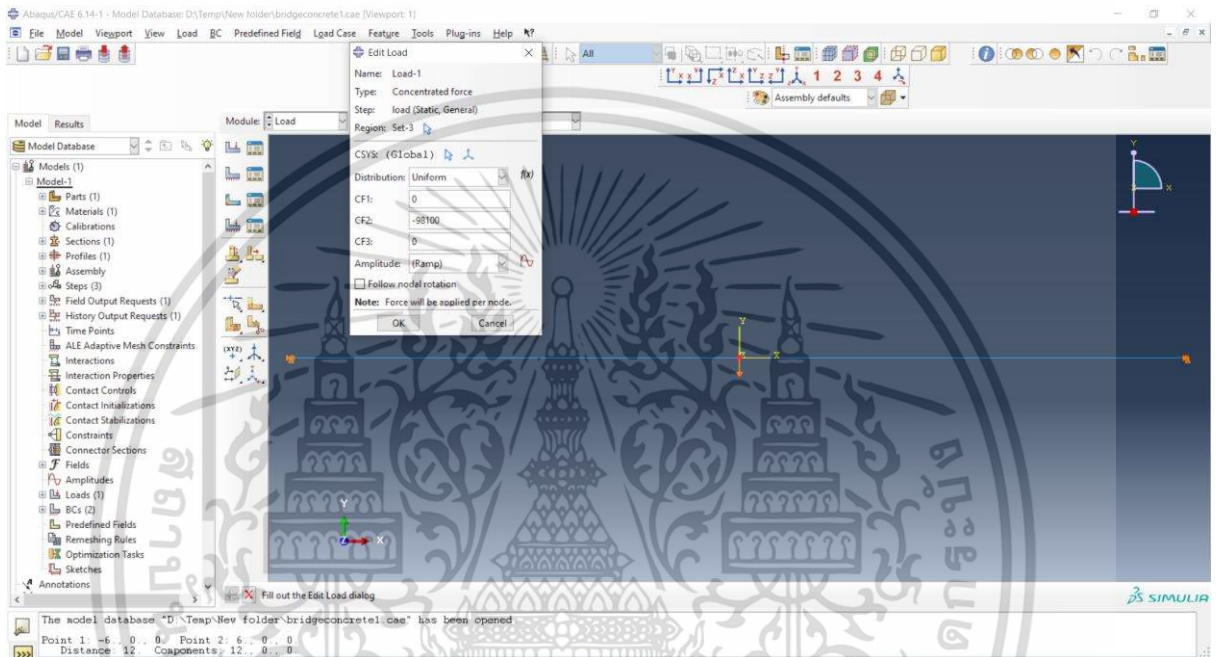
3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

3.2.1 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของโปรแกรมและคานช่วงเดียวมีน้ำหนักกระทำตรงกลางแบบ Free-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด 1.0X0.6 ตารางเมตร ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 27.2 จิกะปาสคาล และค่าอัตราส่วนปัวซองคือ 0.15 โดยมีแรงกระทำที่กึ่งกลางคานคานเท่ากับ 98100 นิวตัน



รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำตรงกลาง



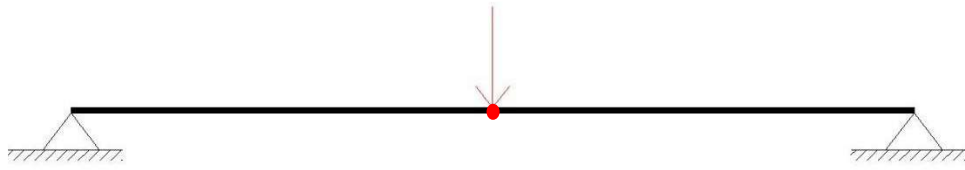
รูปที่ 3.3 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำตรงกลางในโปรแกรม ABAQUS

จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนตัวจากการคำนวณ

โดยคำนวณการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง ตามลำดับ $y = \frac{Px^2}{6EI}(3l-x)$ และ $\delta_{max} = \frac{Pl^3}{48EI}$

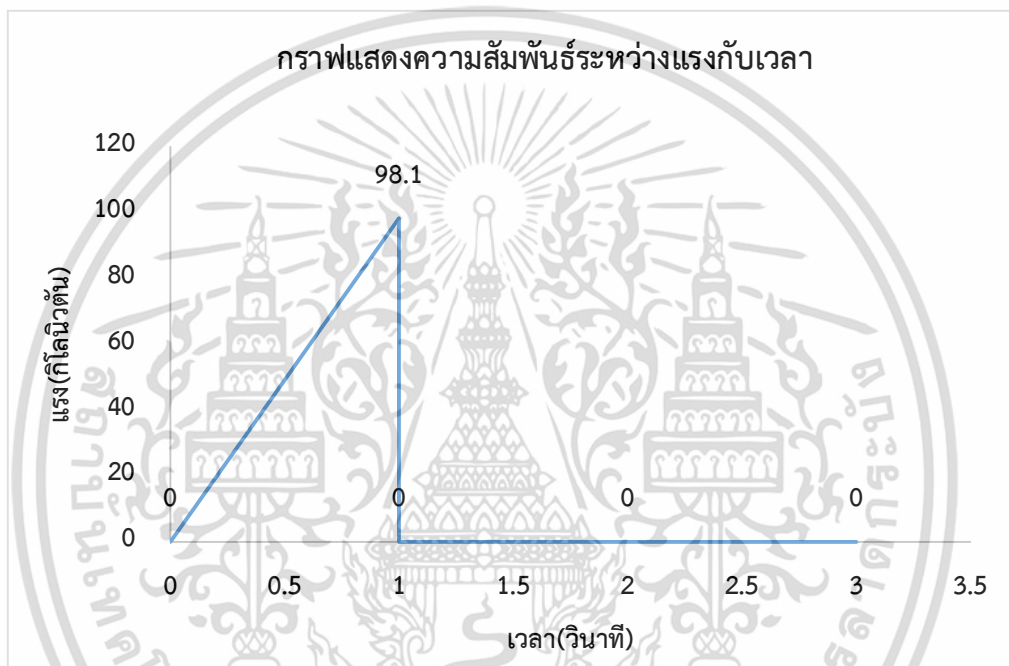
เมื่อเรียนรู้การใช้จำนวน Element ที่เหมาะสม ทางผู้วิจัยได้ทำการหาการเคลื่อนที่แบบ Free-Vibration เมื่อมีแรงกระทำที่กึ่งกลางคานขนาด 98100 นิวตันจากนั้นได้นำแรงดังกล่าวออกเมื่อทำการดูการเคลื่อนตัวของคานช่วงเดียว โดยการกำหนดหน้าตัดคานให้เหมาะสมนั้น จากวิทยานิพนธ์หลายฉบับพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1-10 Hz ดังนั้นในการวิเคราะห์ครั้งนี้ จะกำหนดหน้าตัดคานช่วงเดียวดังนี้ ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 9.0x1.1 ตารางเมตร ความยาว 30 เมตร ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นคือ 27.2 จิกะปาสคาล โดยจะพิจารณาผลลัพธ์ที่จุดกึ่งกลางคาน เปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ตรงกึ่งกลางคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 21 งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

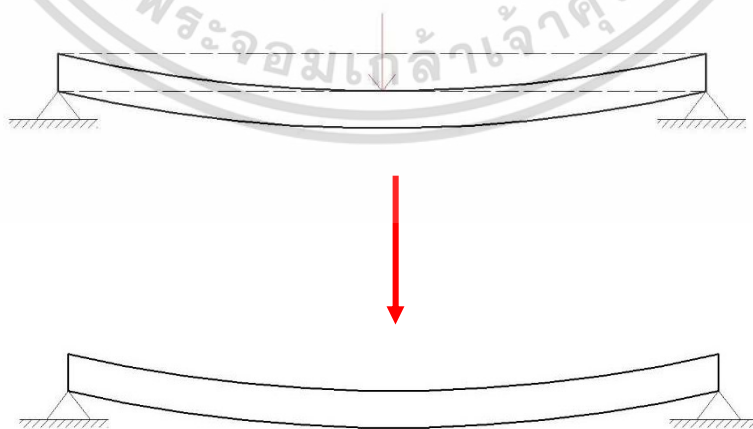


รูปที่3.4 ตำแหน่งของ sensor ในแบบจำลอง

โดยที่ Free-vibration คือการที่มีขนาดของแรงมากระทำแบบ static ในช่วงเริ่มต้นจากนั้นได้นำแรงดังกล่าวออก โดยขนาดของแรงแสดงดังกราฟข้างล่าง



รูปที่3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา ในลักษณะของ Free-Vibration



รูปที่3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบแบบ Free-Vibration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 22 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด 1.0X0.6 ตารางเมตร ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 25.4 จิกะปาสคาล และโดยทแรงกระทำคานเท่ากับ 196200 นิวตัน ความยาวของคาน 30 เมตรและเปรียบเสมือนกับการติดเซนเซอร์ไว้ 10 บนคาน โดยยึดตำแหน่งที่แบ่งชิ้นส่วนเป็นตัวแทนการแบ่งเซนเซอร์



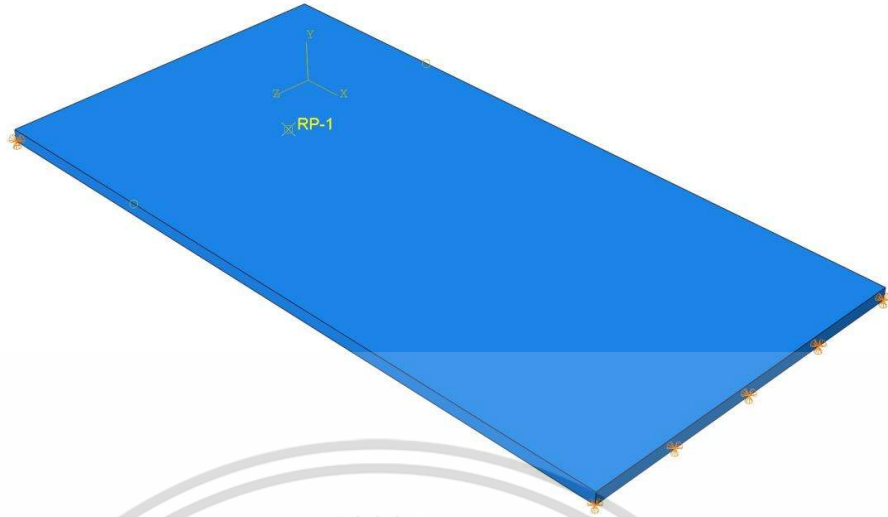
รูปที่3.7 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ 1/4 ของความยาวคาน



รูปที่3.8 แบบจำลองที่คานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำ 1/4 ของความยาวคานในโปรแกรม ABAQUS

3.2.3 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4 ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

ทำการสร้างโครงสร้างคอนกรีตแบบคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดขนาด 1.0X0.35 ตารางเมตร ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 23 จิกะปาสคาล และโดยแรงกระทำคานเท่ากับ 20000 นิวตัน ความยาวของคาน 20 เมตร เลือกตำแหน่งของเซนเซอร์ไว้ที่ตรงกลางคาน 10 จุด มีระยะห่างเท่ากัน ตอบสนองกับความเป็นจริงว่าตรงกลางคานจะสามารถติดตั้งได้ง่ายกว่า



รูปที่ 3.9 แบบจำลองคานช่วงเดียว แบบ Solid Element

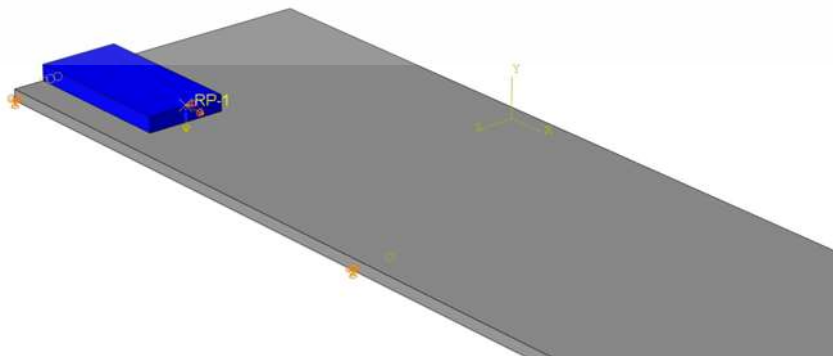
3.2.4 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับสะพานมากขึ้น จึงได้ใช้แบบจำลองที่มีลักษณะเป็นคานต่อเนื่อง 3 ช่วง มีหน้าตัดขนาด 10X0.35 ตารางเมตร ความหนาแน่น คือ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ,ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 23 จิกะปาสคาล โดยช่วงที่ 1 และช่วงที่ 3 มีความยาว 15 เมตร และช่วงที่ 2 มีความยาว 20 เมตร รวมความยาวทั้งสะพาน 50 เมตร



รูปที่ 3.10 แบบจำลองคานต่อเนื่อง 3 ช่วง

Force-Vibration ที่ใช้ในการวิเคราะห์กำหนดให้ใช้ขนาดของกล่อง 2.5x5.0 ตารางเมตร ที่มีน้ำหนักเท่ากับ 2 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วขนาด 16 เมตร/วินาที



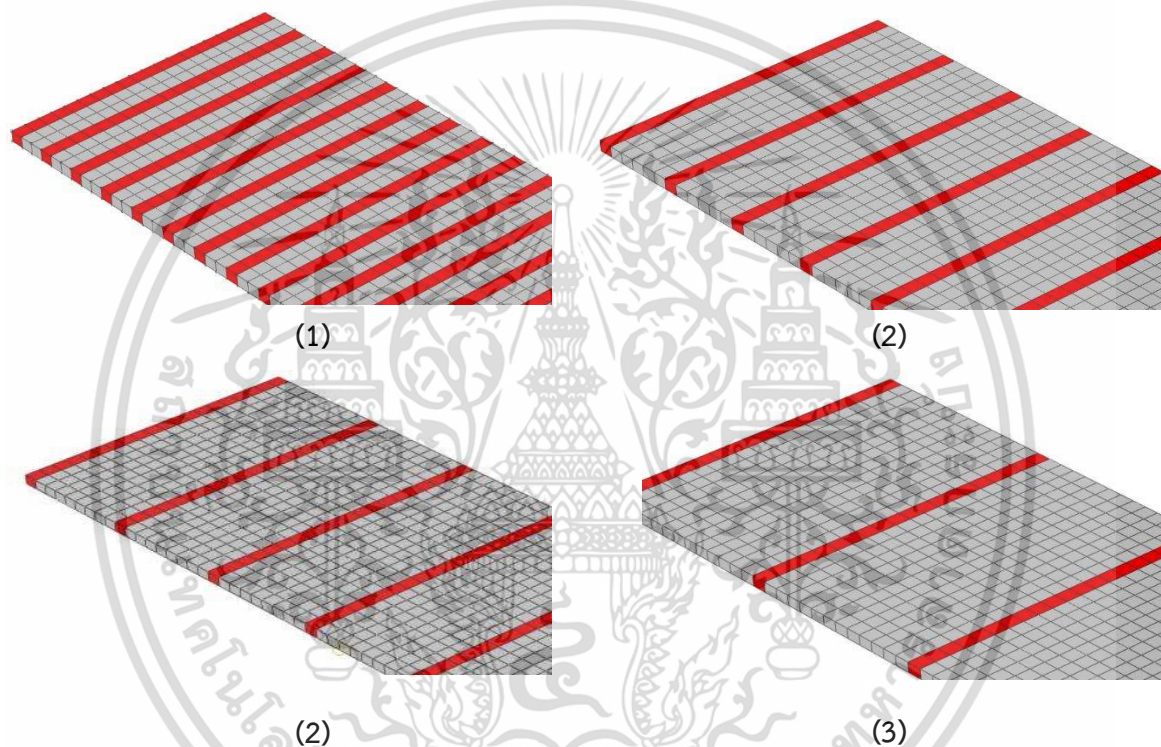
รูปที่ 3.11 แบบจำลองการทำ Force-Vibration บนคานต่อเนื่อง 3 ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการค้าไม่ปรากฏชัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 24 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆทั้งความยาวคาน

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนกับการการความเสียหายของของสะพาน หรือการเกิด crack บนสะพานในที่นี่จะใช้ลักษณะการเกิดความเสียหายแบบ Transverse (Transverse crack) จะมี Transverse crack 3 รูปแบบ คือ ระยะห่างระหว่าง crack 1.0, 2.5, 4.0 และ 6.0 เมตร จะกระจายความเสียหายไว้ทั่วความยาวคาน

โดยที่จะใช้ความเสียหายโดยการลดค่า Modulus 'Young ลงเป็น 10%, 25% และ 40%

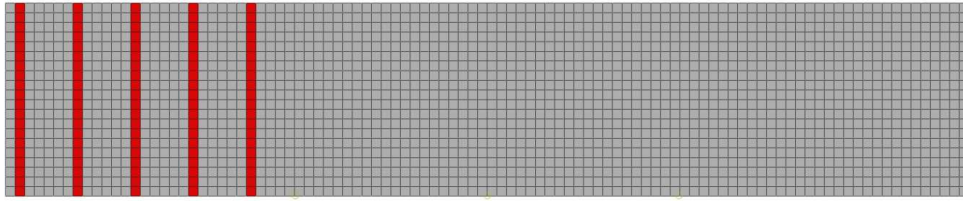


รูปที่ 3.12 ตำแหน่งชิ้นส่วนความเสียหายบนคาน (1) ทุกระยะ 1.0 เมตร, (2) ทุกระยะ 2.5 เมตร, (3) ทุกระยะ 4.0 เมตรและ (4) ทุกระยะ 6 เมตร

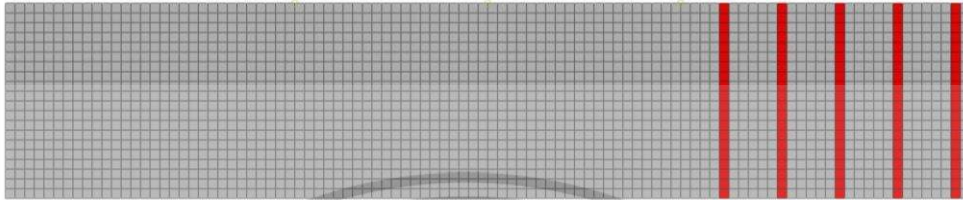
3.2.6 วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆในแต่ละช่วงของคาน

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนกับการการความเสียหายของของสะพาน หรือการเกิด crack บนสะพานในที่นี่จะใช้ลักษณะการเกิดความเสียหายแบบ Transverse (Transverse crack) จะมี Transverse crack 3 รูปแบบ คือ ระยะห่างระหว่าง crack 1.0, 2.5, 4.0 และ 6.0 เมตร ซึ่งจะกระจายความเสียหายไปไว้เพียงแคในแต่ละช่วงความยาวคาน

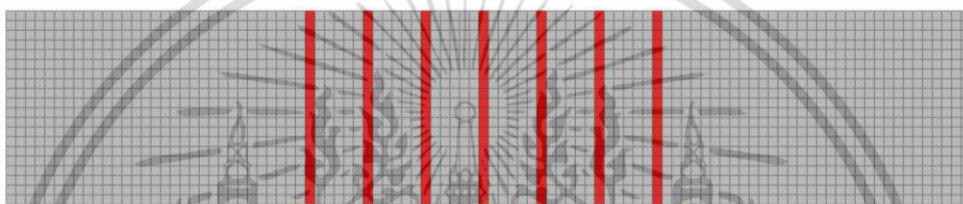
โดยที่จะใช้ความเสียหายโดยการลดค่า Modulus 'Young ลงเป็น 10%, 25% และ 40% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 25 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



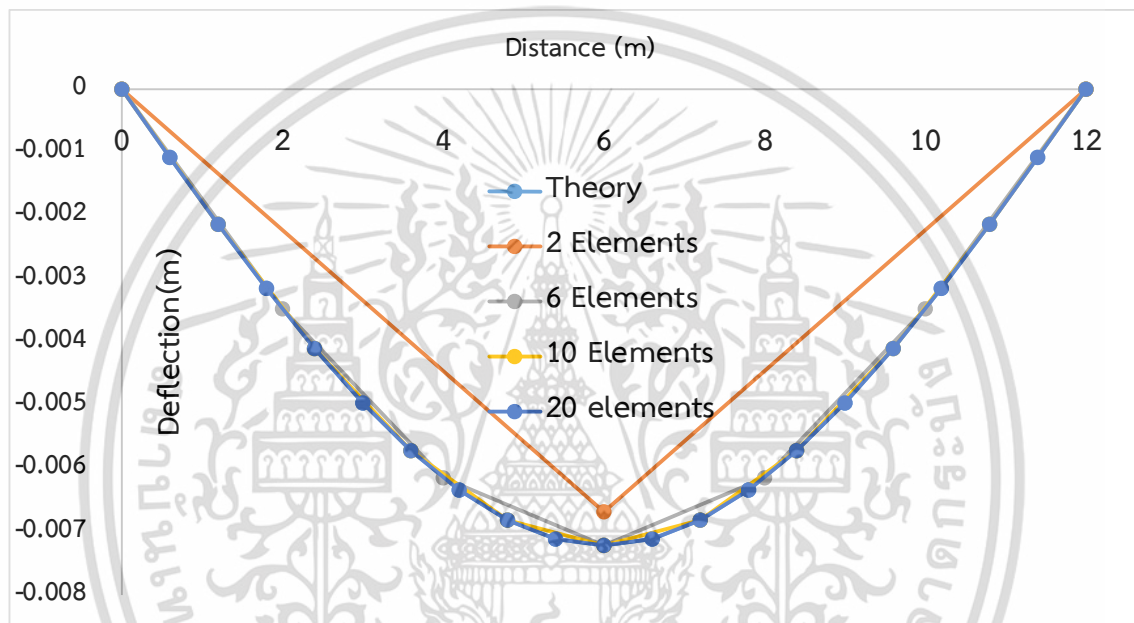
(3)

รูปที่ 3.13 การใส่ชิ้นส่วนความเสียหายที่มีระยะห่าง 2.5 เมตร (1) ความเสียหายอยู่ในช่วงชายของคาน, (2) ความเสียหายอยู่ในช่วงขวาของคาน, (3) ความเสียหายอยู่ในช่วงกลางของคาน

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของโปรแกรมและคานช่วงเดียวมีน้ำหนักระทำตรงกลางแบบ Free-Vibration โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element

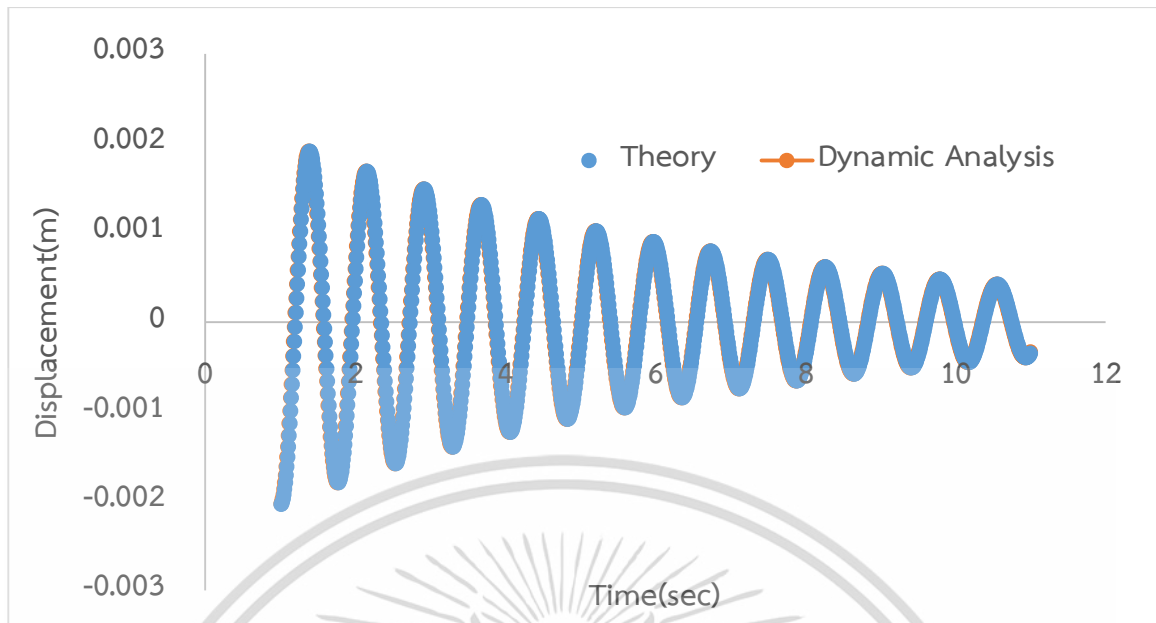
วิธี Finite Element จะมีการแบ่ง element โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่ง element เป็น 2,6,10,20 elements ตามลำดับ เพื่อใช้ในการหาค่าการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งตัวกับระยะทาง

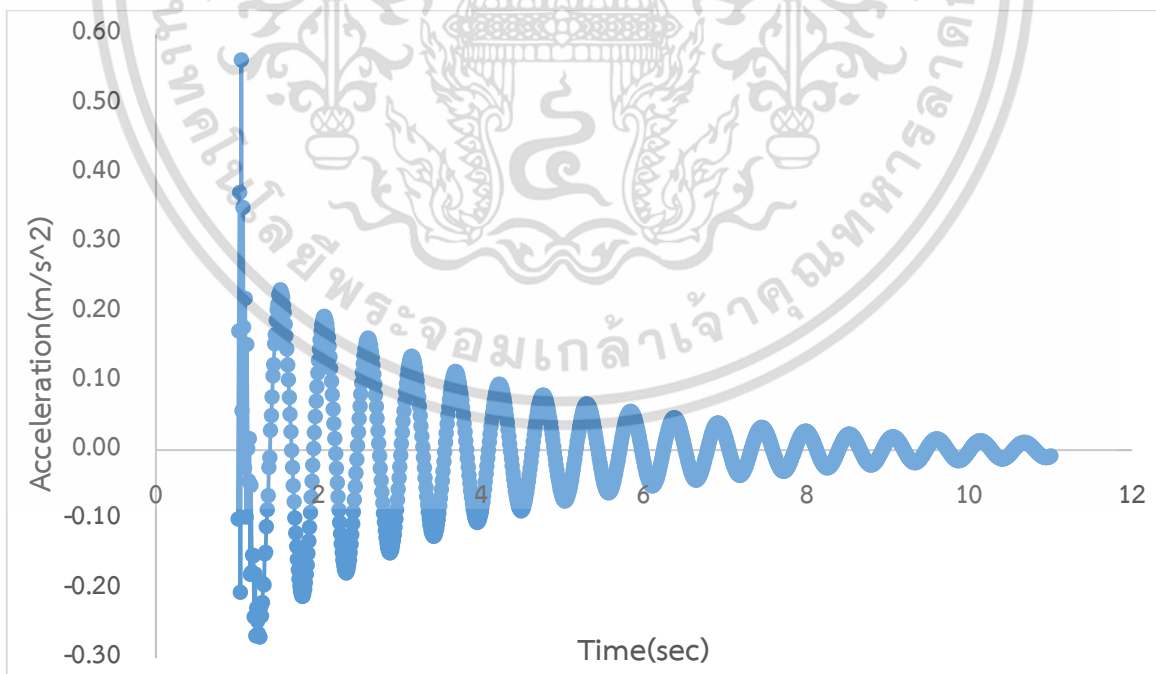
จากกราฟพบว่า เมื่อมีการแบ่งจำนวน elements มากขึ้น ค่ายิ่งเข้าใกล้ทฤษฎีมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเรียนรู้การใช้โปรแกรม และสามารถเลือกใช้จำนวน Element ในการวิเคราะห์ลำดับถัดไปให้มีความเหมาะสมมากขึ้น

เมื่อทำการทดสอบแบบ Free-Vibration แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element ได้ผลการเคลื่อนตัวกับเวลาและเพื่อความถูกต้องและแม่นยำ จึงทำการดูการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วย Finite Element เปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวจากทฤษฎี แสดงดังกราฟข้างล่าง



รูปที่4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งตัวกับเวลา

จากกราฟพบว่า การเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณจากทฤษฎี ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วย FEM มีความถูกต้องและสามารถใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ได้ และข้อมูลผลของความเร่งกับเวลา จากการวิเคราะห์แบบ Free-Vibration ด้วยวิธี FEM แสดงดังกราฟข้างล่าง



รูปที่4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear

Perturbation

โหมดที่ 1



ความถี่ธรรมชาติ 0.9810 Hz

โหมดที่ 2



ความถี่ธรรมชาติ 3.9442 Hz

โหมดที่ 3



ความถี่ธรรมชาติ 8.9035 Hz

โหมดที่ 4



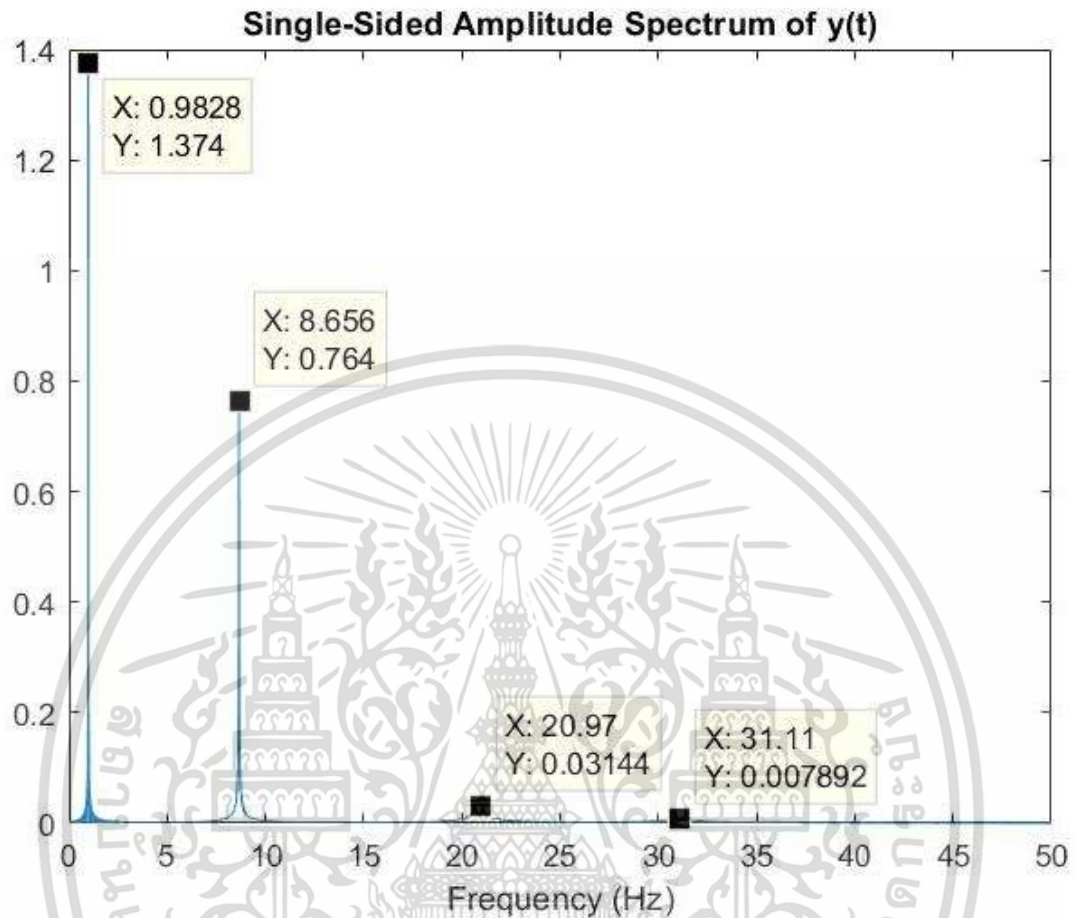
ความถี่ธรรมชาติ 15.895 Hz

โหมดที่ 5



ความถี่ธรรมชาติ 24.943 Hz

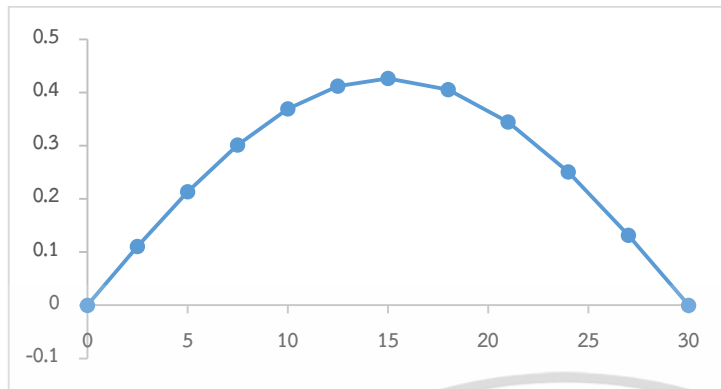
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT



รูปที่ 4.4 ค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี FFT ของคานช่วงเดียว น้ำหนักกระทำตรงกลาง

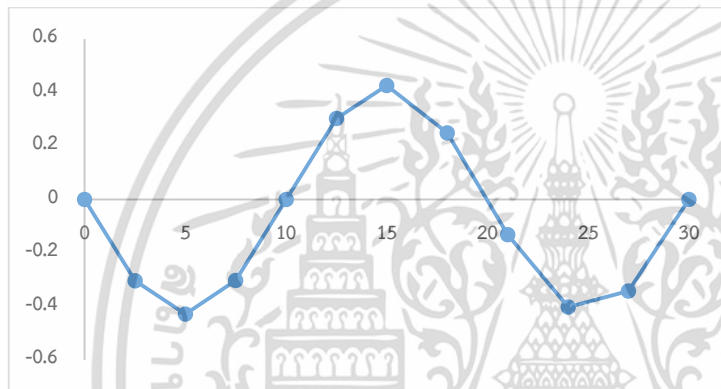
ผลที่ออกมาจะแสดงเพียงค่าความถี่เท่านั้น แต่การดูจากกราฟเพียงอย่างเดียวไม่สามารถตัดสินใจได้ว่า ค่าดังกล่าวเป็นค่าความถี่ธรรมชาติที่โหมดการสั่นเท่าใด

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA



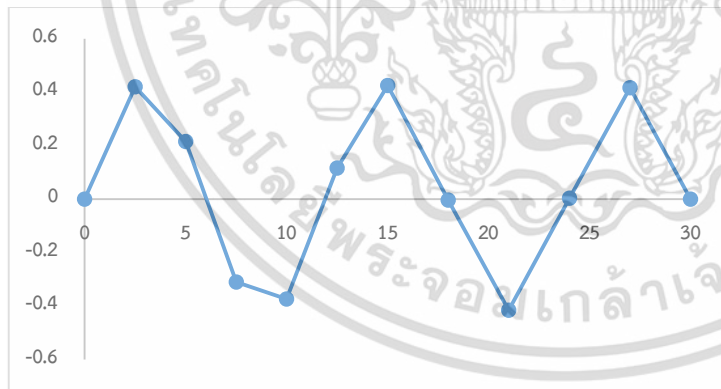
โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.984 Hz

(1)



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 8.838 Hz

(2)



โหมดที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 23.64Hz

(3)

รูปที่ 4.5 รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำตรงกลางด้วยวิธี ERA

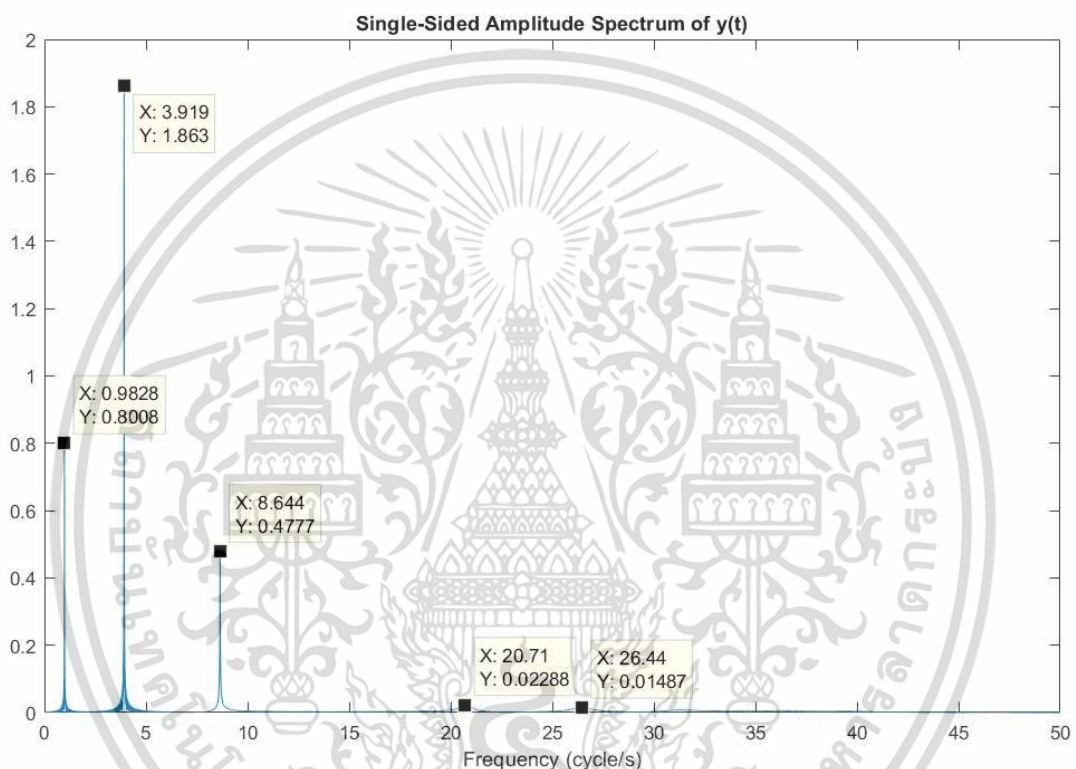
(1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 5

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า โหมดการสั่นที่ 2 และ โหมดการสั่นที่ 4 ไม่แสดงผลทั้งในวิธี FFT และ ERA จึงได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งแรงกระทำไปกระทำหนึ่งในสี่ของความยาว

4.2 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ $\frac{1}{4}$ ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Line element

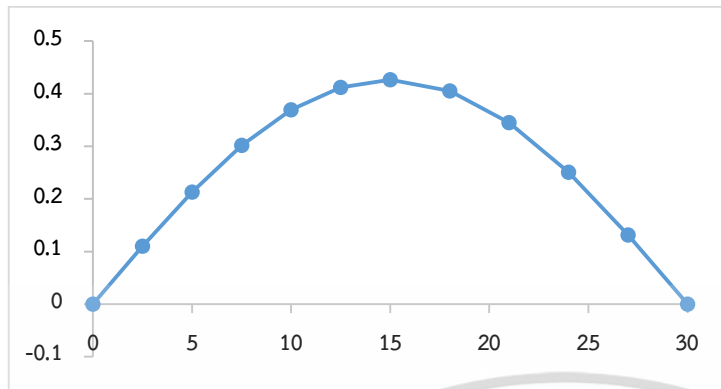
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ รูปร่างการสั่นออกไม่ครบ จึงได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งของแรงกระทำในขณะที่ ลักษณะและคุณสมบัติของคานยังมีลักษณะเช่นเดิม

4.2.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT



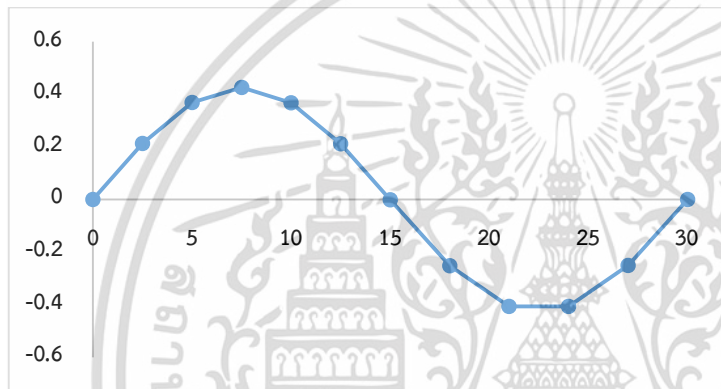
รูปที่ 4.6 ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี FFT ของคานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคาน

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA



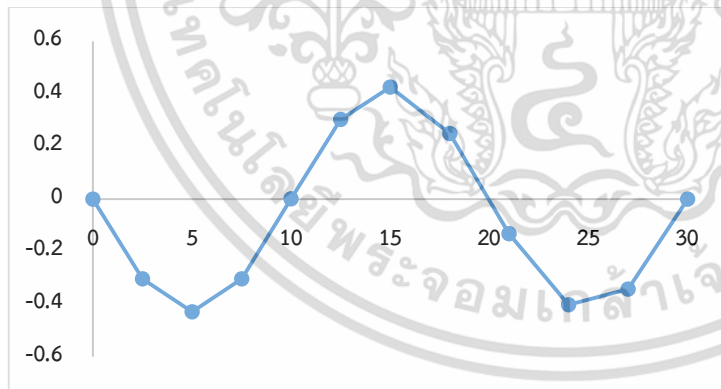
โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.984 Hz

(1)



โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 3.938 Hz

(2)

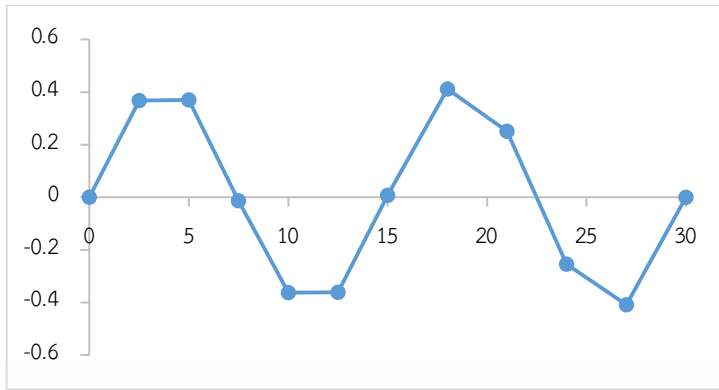


โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 8.838 Hz

(3)

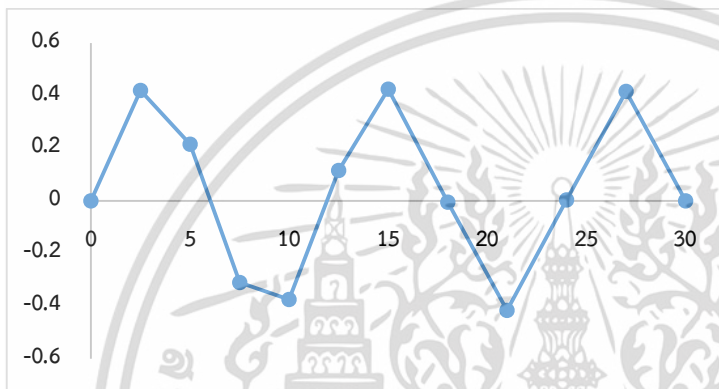
รูปที่ 4.7 รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA

(1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 5



โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 15.50 Hz

(1)



โหมดที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 23.64 Hz

(2)

รูปที่ 4.8 รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA

(1) โหมดที่ 4, (2) โหมดที่ 5

4.2.3 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ FFT/ERA

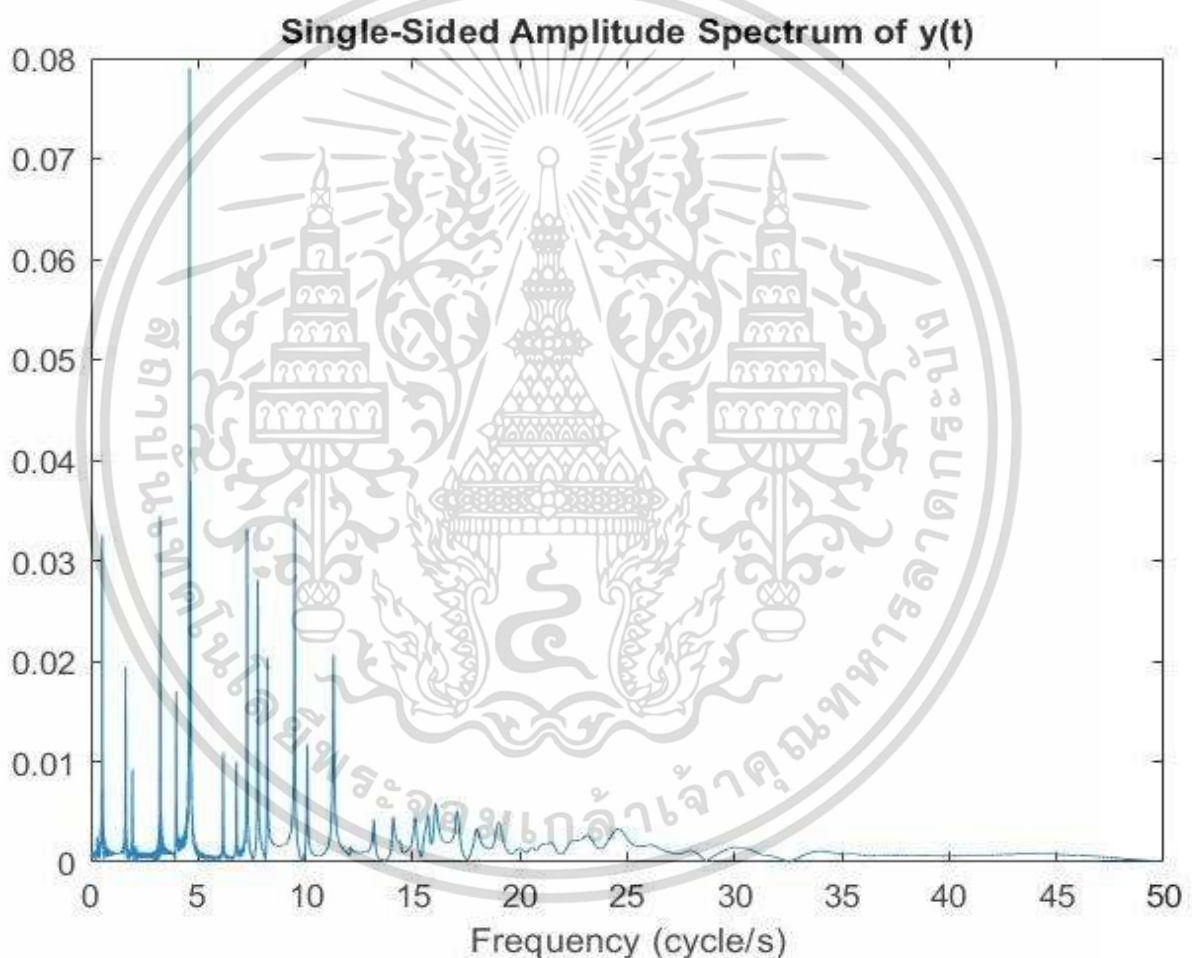
	FFT	ERA
Mode 1	0.13%	0.01%
Mode 2	0.58%	0.16%
Mode 3	2.78%	0.74%
Mode 4	30.29%	2.48%
Mode 5	19.63%	5.22%

จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า เมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และสงวนอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานช่วงเดียวแบบ Free-Vibration เมื่อน้ำหนักกระทำ 1/4ของความยาวสะพาน โดยใช้แบบจำลองแบบ Solid Element

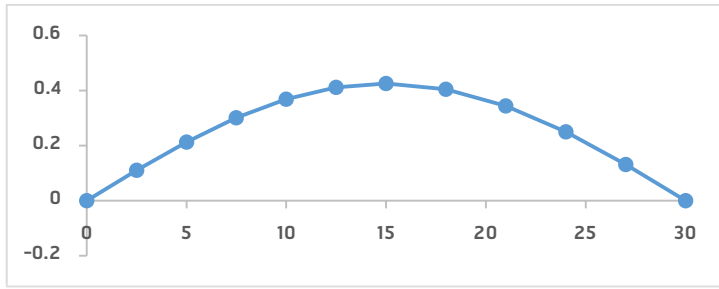
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้เห็นได้ว่าการใช้วิธี ERA นั้น จะต้องใช้ข้อมูลการสั่นจากหลายจุด หรือหลายตำแหน่ง ถึงจะทำให้สามารถเขียนรูปร่างการสั่นได้ เมื่อมีการทำแบบจำลองเป็นลักษณะ Solid ผู้ทำการศึกษาจึงได้เลือกตำแหน่งของเซนเซอร์ไว้ที่ตรงกลางคาน 10 จุดมีระยะห่างเท่ากัน ตอบสนองกับความเป็นจริงว่าตรงกลางคานจะสามารถติดตั้งได้ง่ายกว่า

4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี FFT



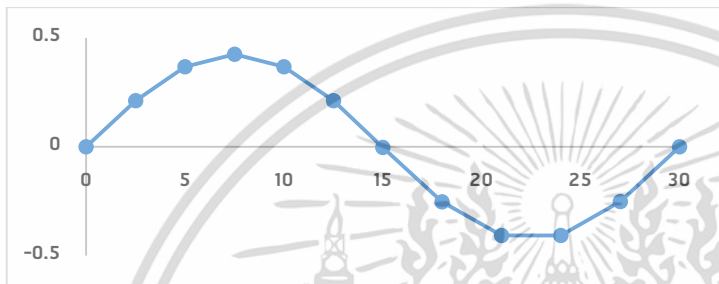
รูปที่ 4.9 ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี FFT ของคานช่วงเดียวน้ำหนักกระทำที่ 1/4 ของความยาวคาน (Solid)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA



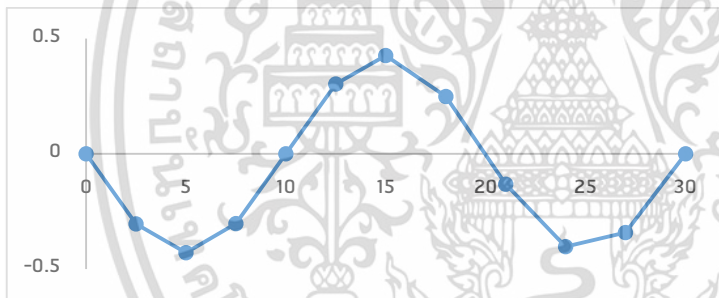
โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.300 Hz

(1)



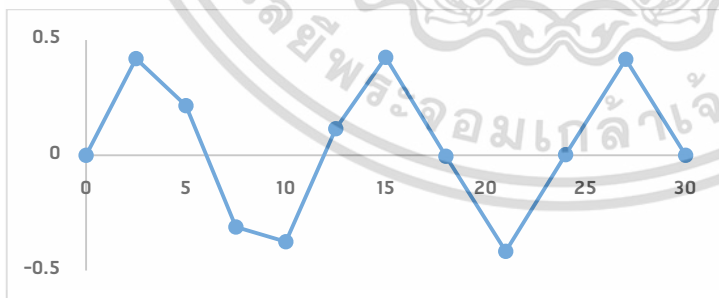
โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 0.531 Hz

(2)



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 1.621 Hz

(3)



โหมดที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 3.979 Hz

(4)

รูปที่ 4.10 รูปร่างการสั่นของคานช่วงเดียน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคานด้วยวิธี ERA (Solid)

(1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมดที่ 3, (4) โหมดที่ 5

4.3.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ FFT/ERA

	FFT	ERA
Mode 1	-	0.01%
Mode 2	1.07%	0.02%
Mode 3	0.09%	0.10%
Mode 4	7.57%	-
Mode 5	19.18%	0.59%

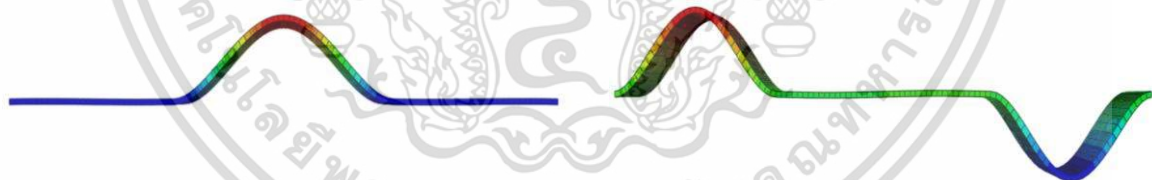
จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า เมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

4.4 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration

4.4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี Linear Perturbation

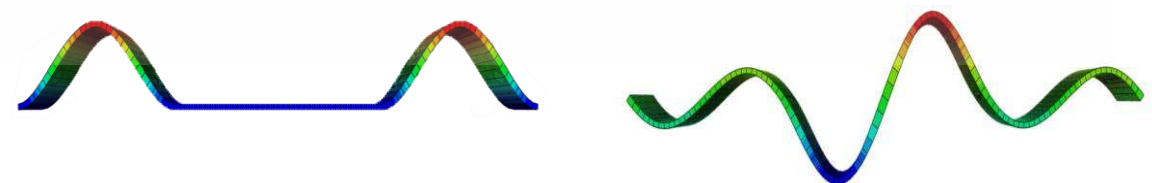
โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.3002 Hz

โหมดที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 0.5340 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 0.5340 Hz

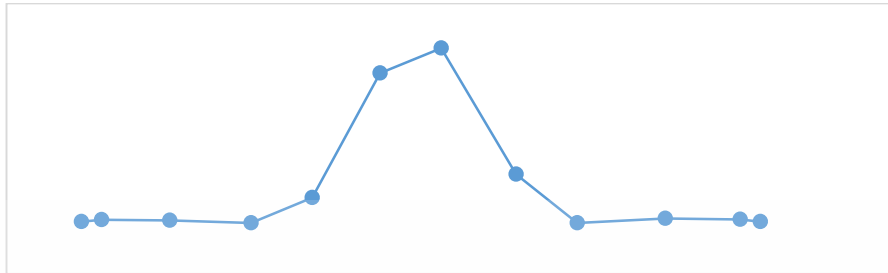
โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 0.6718 Hz



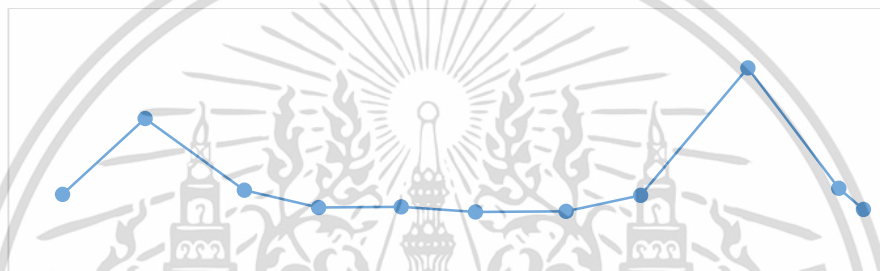
รูปที่ 4.11 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ด้วยวิธี Linear perturbation

4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA

โหมดที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 0.3002 Hz



โหมดที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 0.5344 Hz



โหมดที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 0.6913 Hz



รูปที่ 4.12 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ด้วยวิธี ERA

จะเห็นได้ว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 จากวิธี ERA ไม่สามารถแสดงค่าออกมาได้ เนื่องด้วยจากการสั่นในโหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 มีความคล้ายคลึงกัน จึงทำให้วิธี ERA แสดงออกมาเพียงค่าเดียว

4.4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง Linear Perturbation กับ

ERA

Natural Frequency	Linear Perturbation	ERA	%ความผิดพลาด
Mode 1	0.3002	0.3002	0%
Mode 2	0.5340	-	-
Mode 3	0.5340	0.5344	0.075%
Mode 4	0.6718	0.6913	2.903%

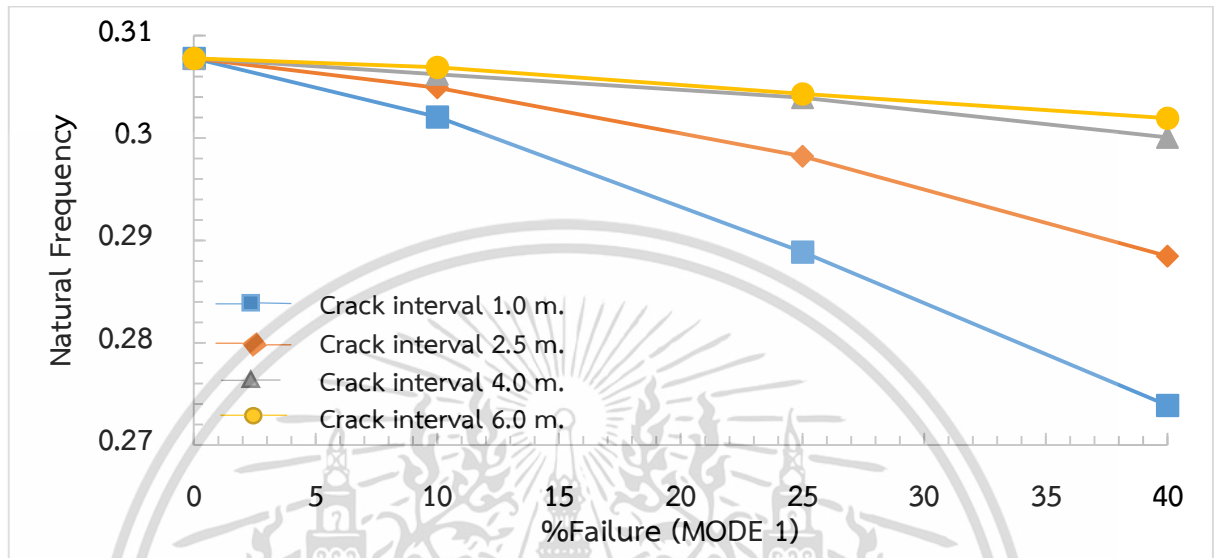
จากผลการเปรียบเทียบ จะพบว่า ยิ่งเมื่อโหมดการสั่นที่สูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

และจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากวิธี ERA มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้แทนการหาค่าดังกล่าวจากวิธี Linear Perturbation

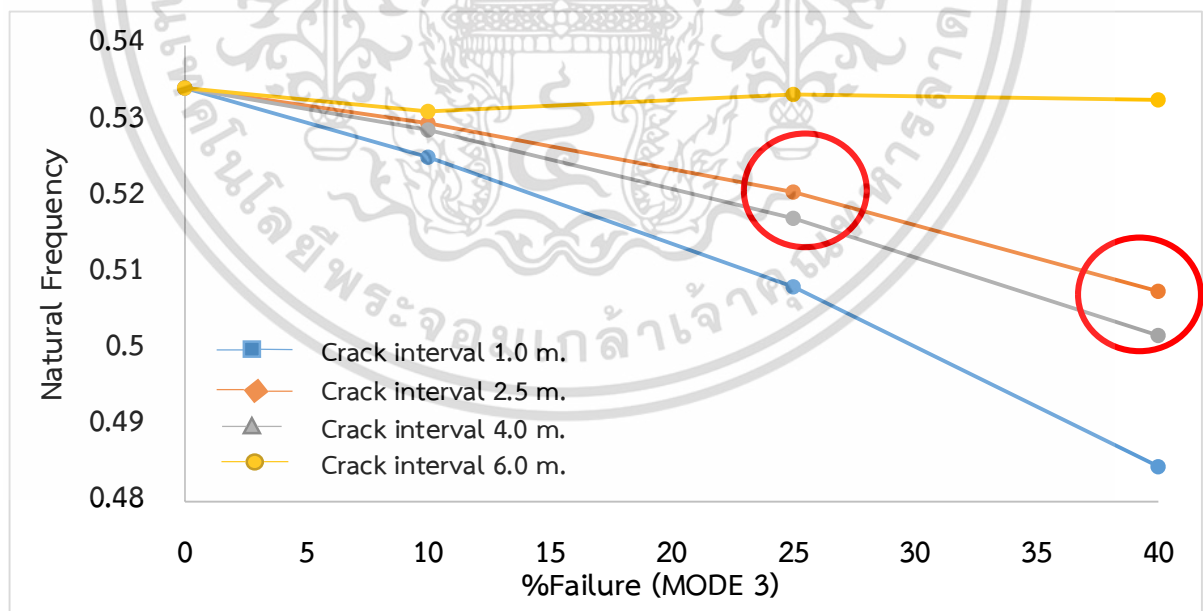
ดังนั้นผลการทดลองในหัวข้อต่อไปนี้จะศึกษาผลที่ได้จากวิธี ERA เพื่อความเป็นไปได้ในการประเมินและตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง

4.5 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆทั้งความยาวคาน

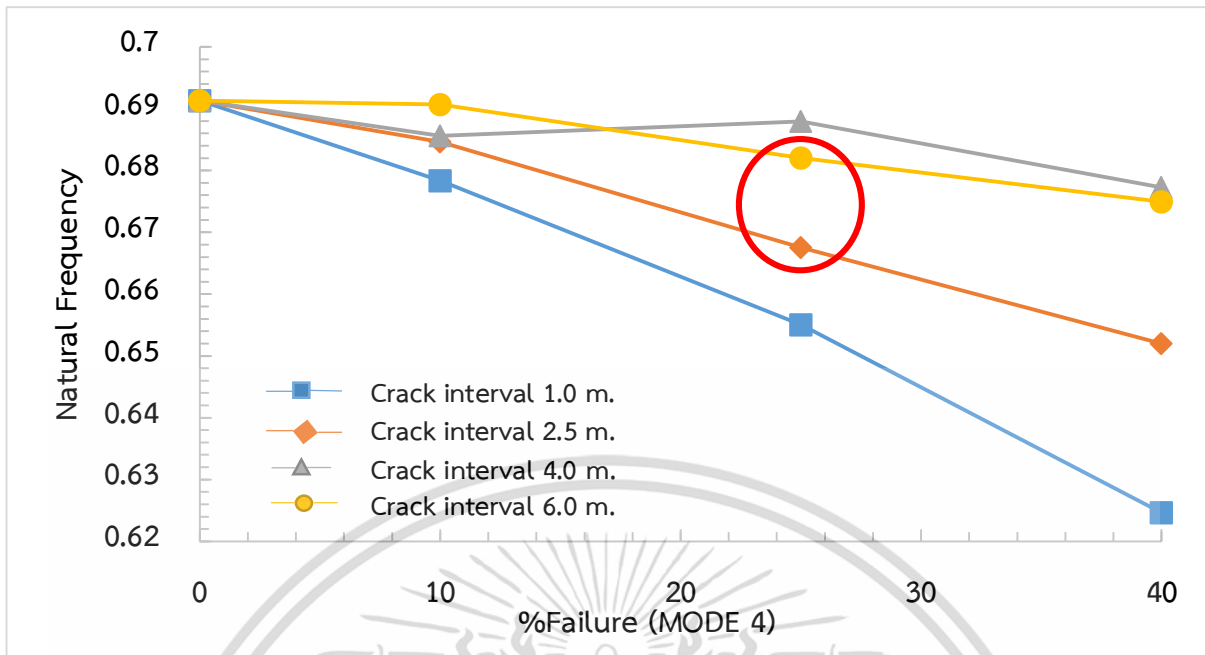
4.5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี ERA



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA

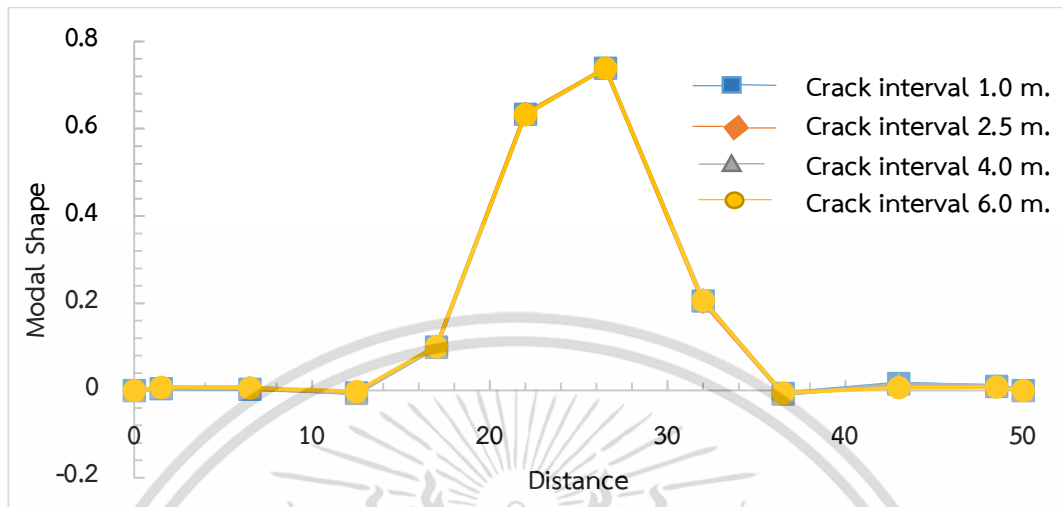


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน
เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆ ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA

จากรูปพบว่า เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนมากขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง และระยะห่างระหว่างความเสียหายมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น แต่จะมีบางจุดที่ไม่เป็นไปตามผลดังกล่าว เนื่องด้วยตำแหน่งของความเสียหายไปตรงกับตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนของคาน ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ออกมามีความผิดปกติได้ หรือค่าสูงกว่าปกติได้

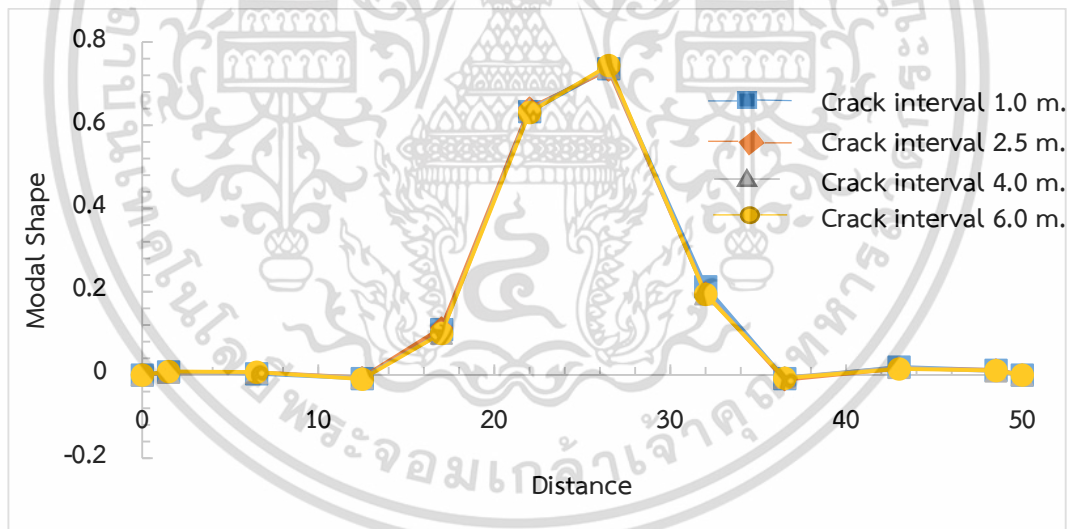
4.5.2 รูปร่างการสั่นของโครงสร้างจากวิธี ERA ทีโหมตการสั่นที่ 1

เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนเป็น 0% และ 10%



รูปที่ 4.16 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ

เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนเป็น 25% และ 40%

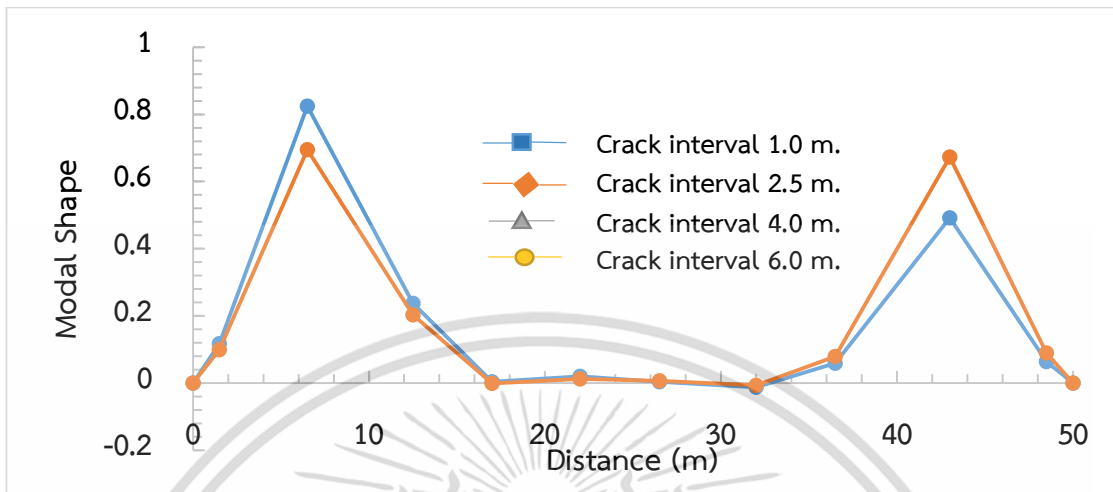


รูปที่ 4.17 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 1 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 10% และ 25% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ

จากกราฟรูปร่างการสั่นจะเห็นได้ว่า ทีโหมตการสั่นที่ 1 ถึงแม้ว่าระยะห่างของความเสียหายจะมากขึ้น แต่รูปร่างการสั่นยังคงเหมือนเดิม และถึงแม้ความเสียหายของชิ้นส่วนจะมากขึ้นรูปร่างการสั่นก็ยังคงเหมือนเดิม

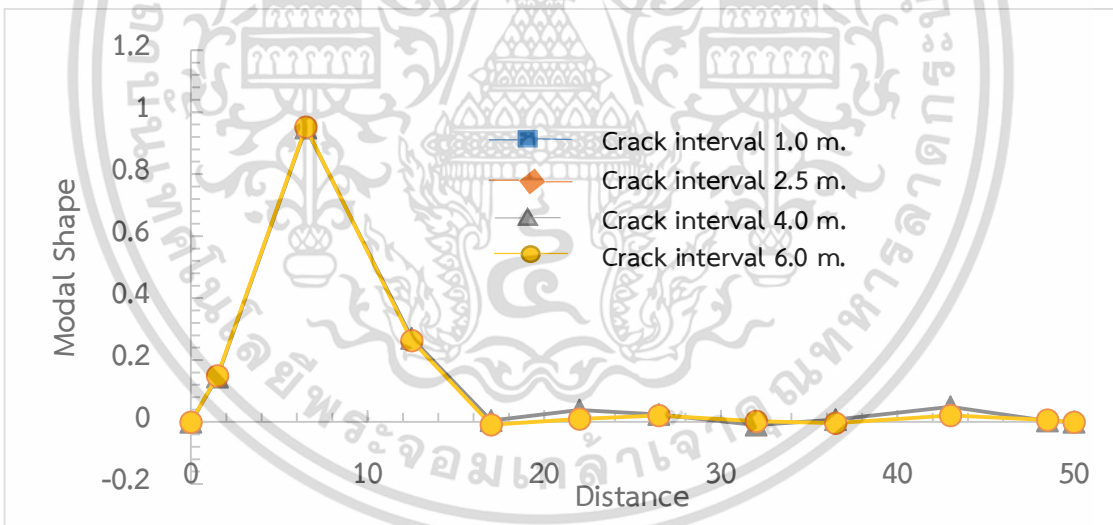
4.5.3 รูปร่างการสั่นของโครงสร้างจากวิธี ERA ที่โหมดการสั่นที่ 2

เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนเป็น 0% และ 10%



รูปที่ 4.18 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 2 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ

เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนเป็น 25% และ 40%



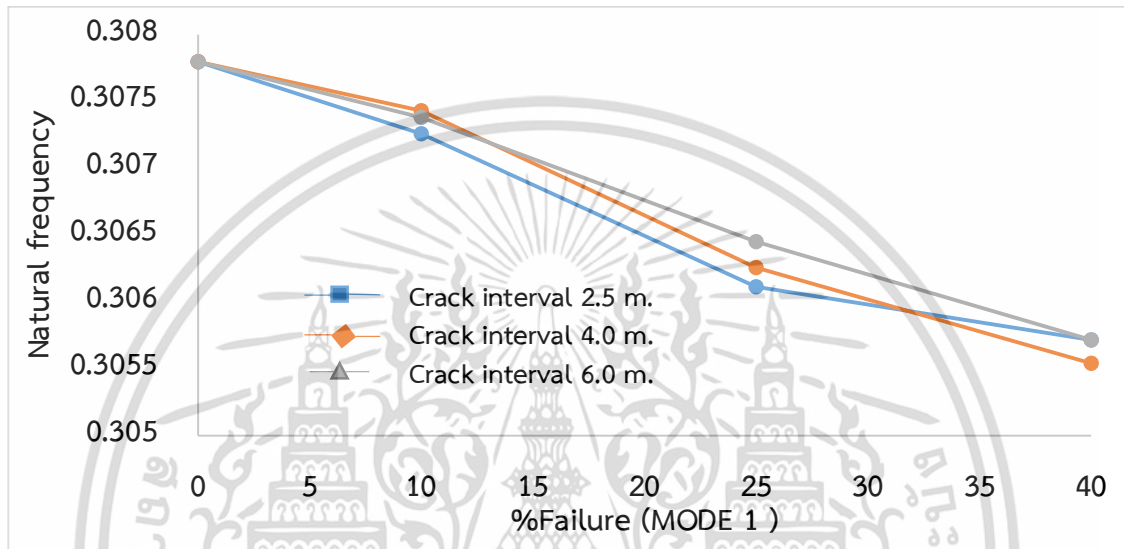
รูปที่ 4.19 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วงในโหมดที่ 2 เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ

ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า รูปร่างการสั่นในโหมดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วนที่ 25% ขึ้นไป และถึงแม้ว่าระยะห่างของความเสียหายจะเปลี่ยนแปลงไป แต่รูปร่างการสั่นก็ไม่มีเปลี่ยนแปลงไปด้วย

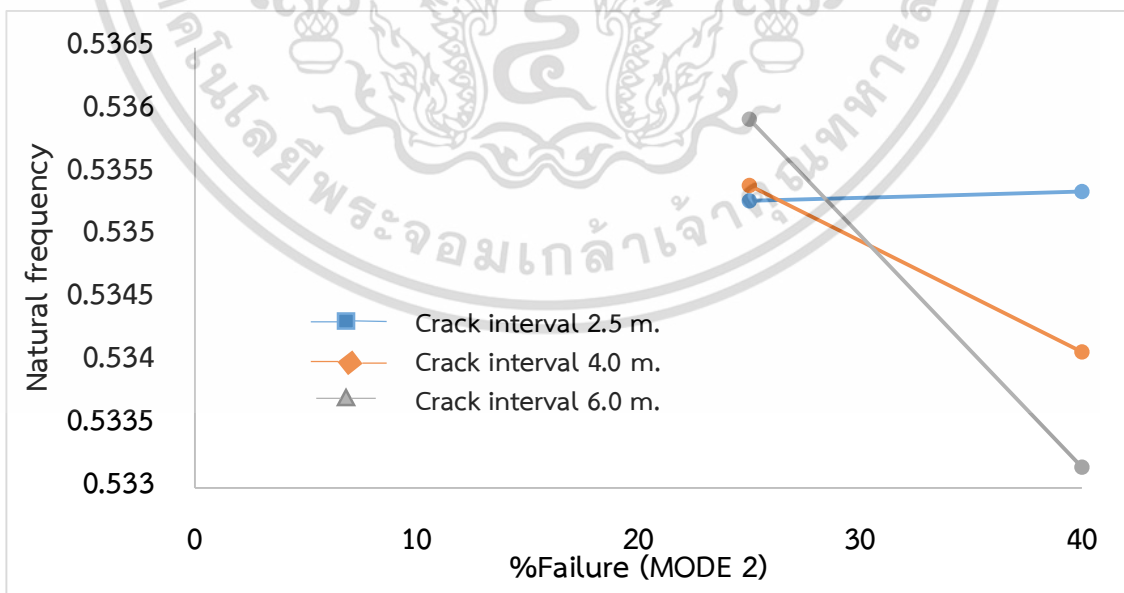
4.6 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคานต่อเนื่อง 3 ช่วง แบบ Force-vibration เมื่อมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนแบบเว้นระยะห่างเท่ากันๆในแต่ละช่วงของคาน

4.6.1 เมื่อชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงซ้ายของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง

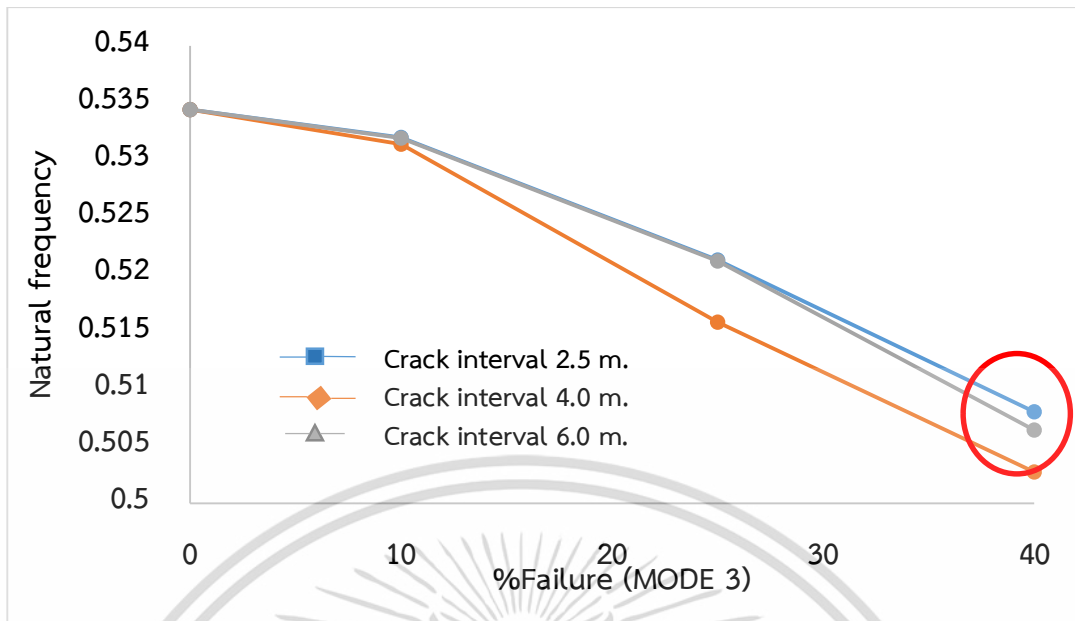
4.6.1.1 ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี ERA



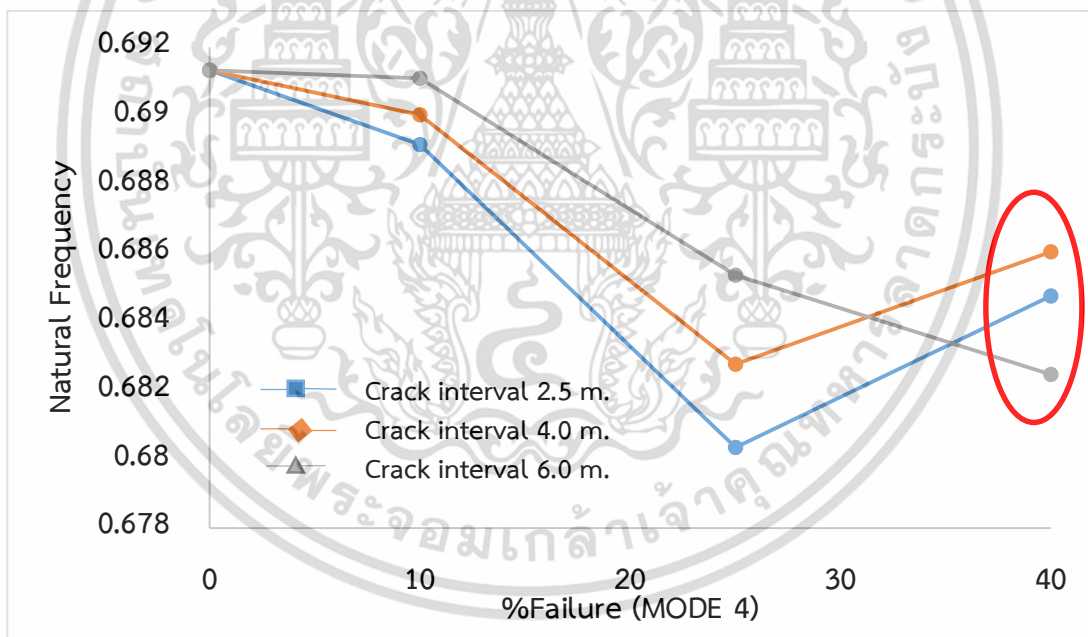
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA

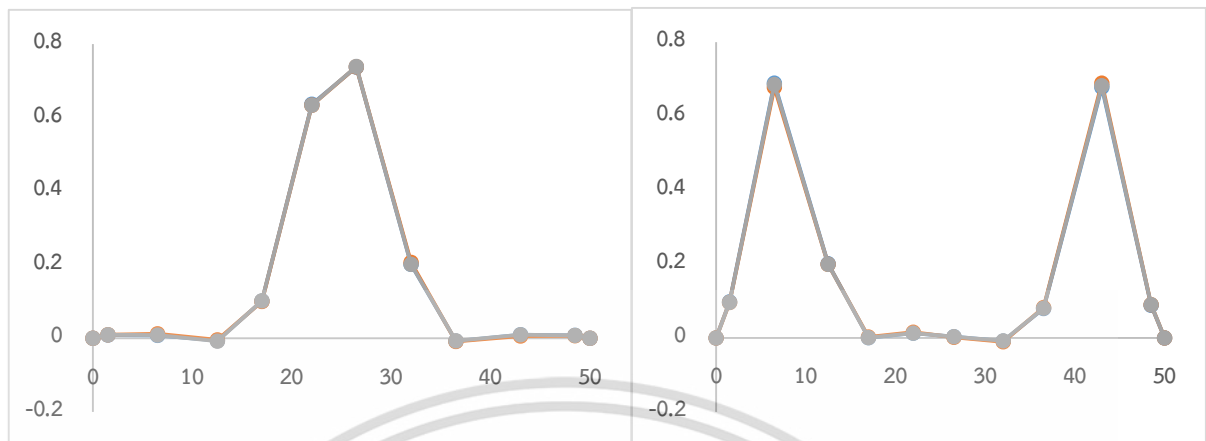


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงซ้ายของคาน ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA

จากรูปพบว่า เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนมากขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง และ ระยะห่างระหว่างความเสียหายมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น แต่จะมีบางจุดที่ไม่เป็นไปตาม ผลดังกล่าว เนื่องด้วยตำแหน่งของความเสียหายไปตรงกับตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนของคาน ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ออกมาไม่มีความผิดปกติได้ หรือค่าสูงกว่าปกติได้

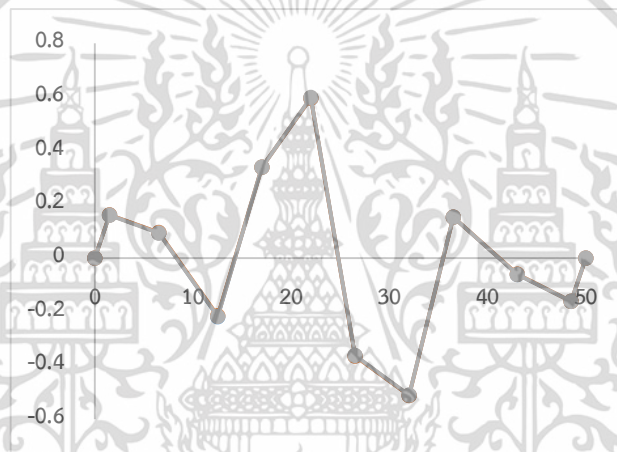
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 45 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.2 รูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA เมื่อความเสียหายชิ้นส่วนเป็น 0% และ 10%



(1)

(2)

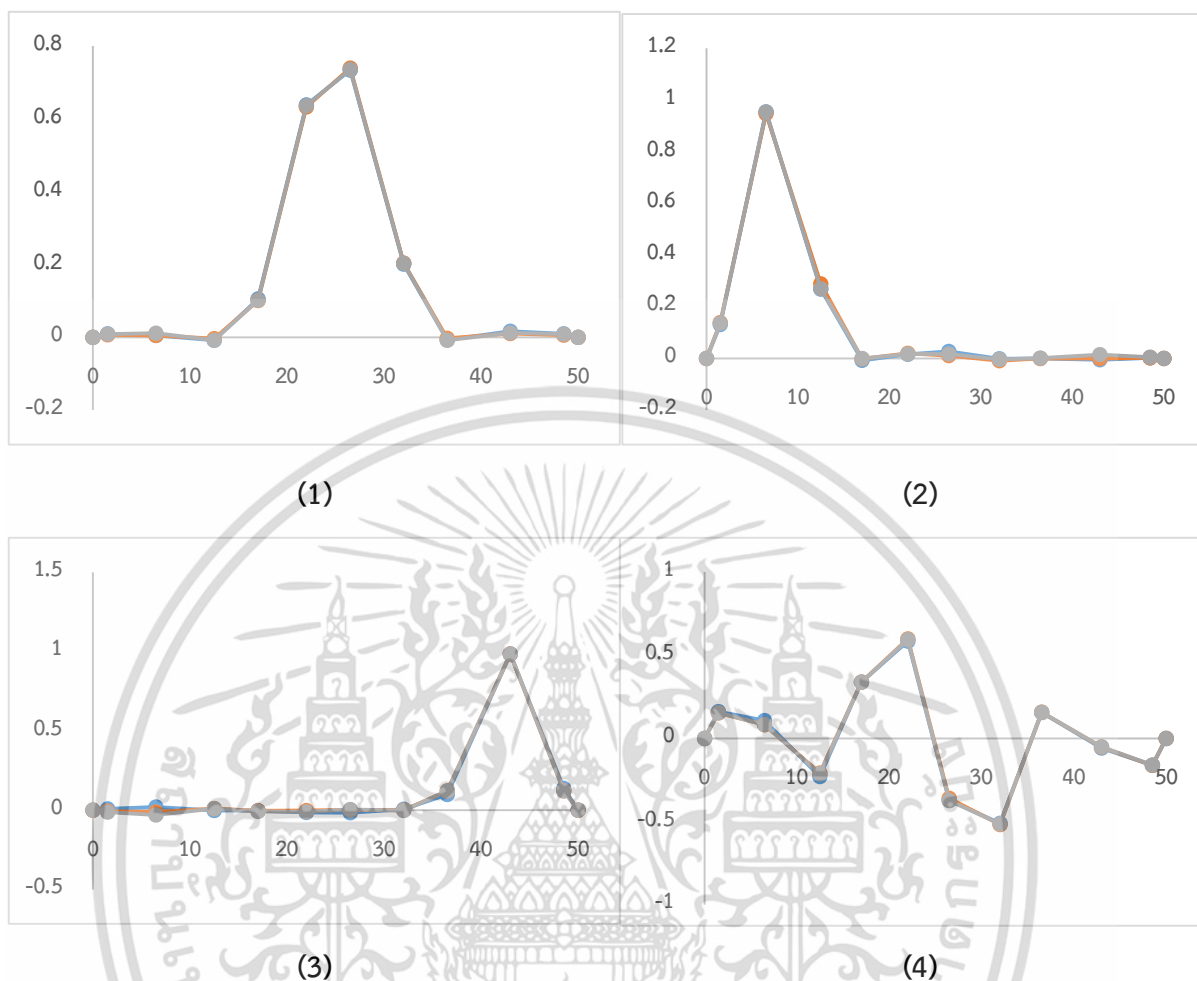


(3)

รูปที่ 4.24 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0% และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA

(1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 4

4.6.1.3 รูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA เมื่อความเสียหายชิ้นส่วนเป็น 25% และ 40%

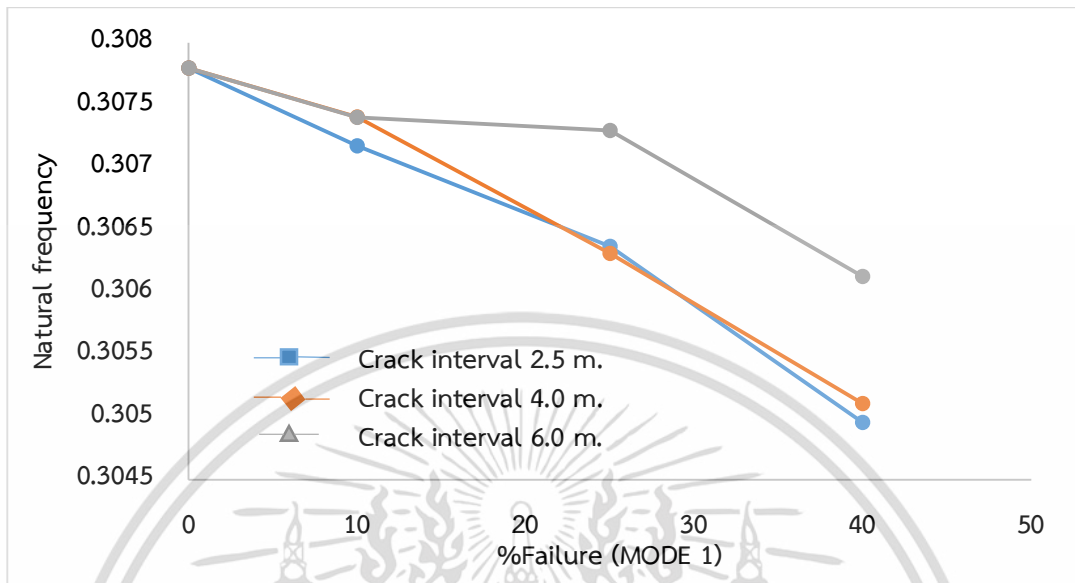


รูปที่ 4.25 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 4

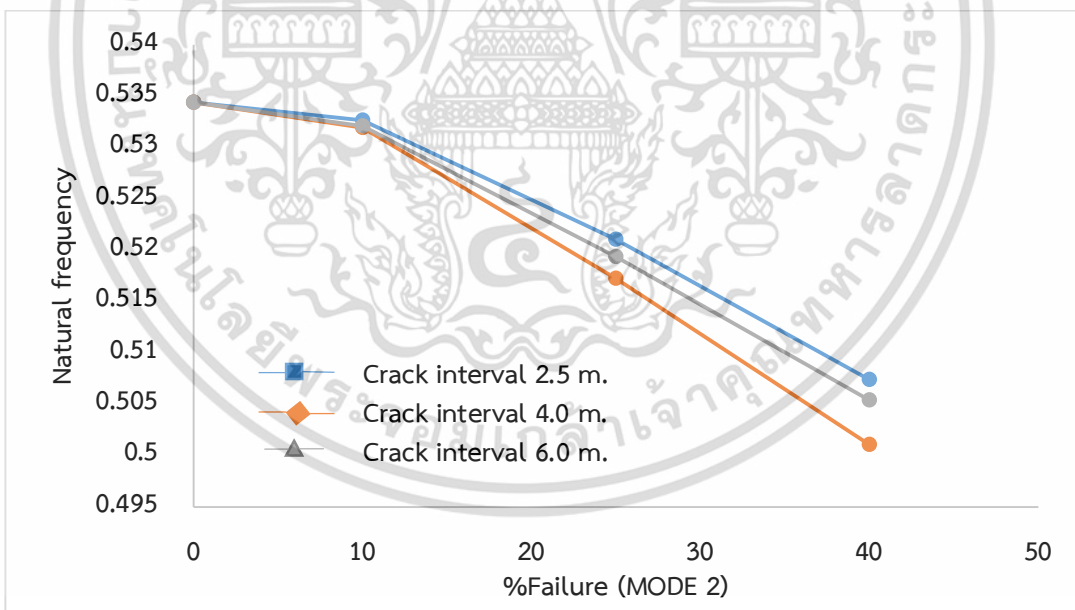
จากรูปร่างการสั่นในหัวข้อที่ 4.6.1.2 และ 4.6.1.3 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างการสั่นที่โหมด 2 ที่ความเสียหายตั้งแต่ 25% ขึ้นไปและการที่โหมดที่ 2 มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงซ้ายของสะพาน แสดงให้เห็นถึงว่าช่วงซ้ายมีความอ่อนแอกว่าช่วงอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการใส่ความเสียหายไว้ทางช่วงซ้ายของคาน

4.6.2 เมื่อชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงขวาของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง

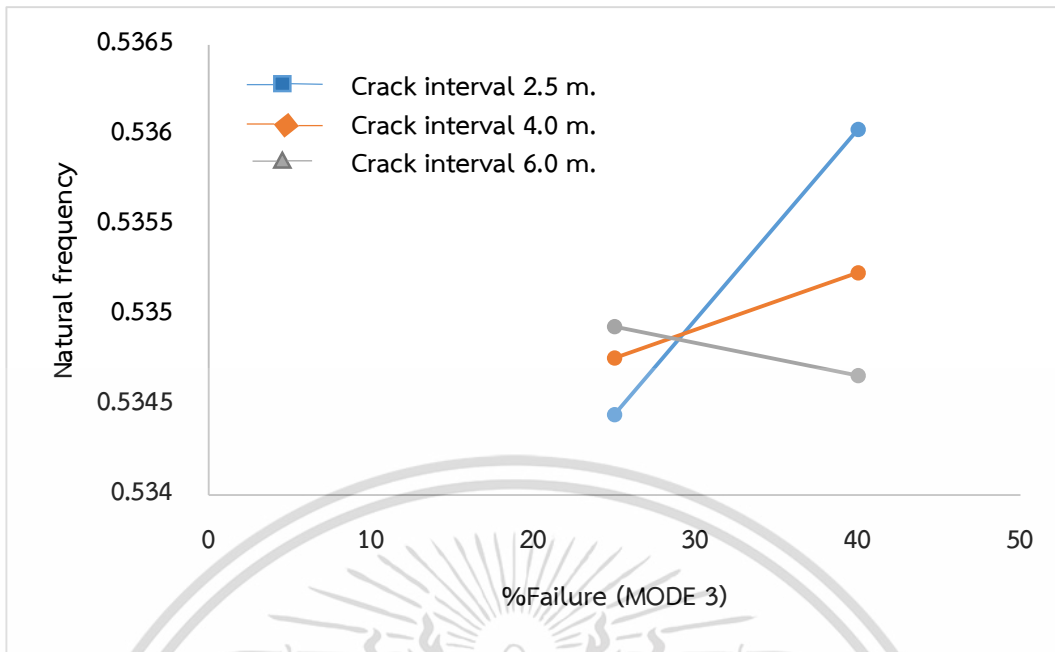
4.6.2.1 ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี ERA



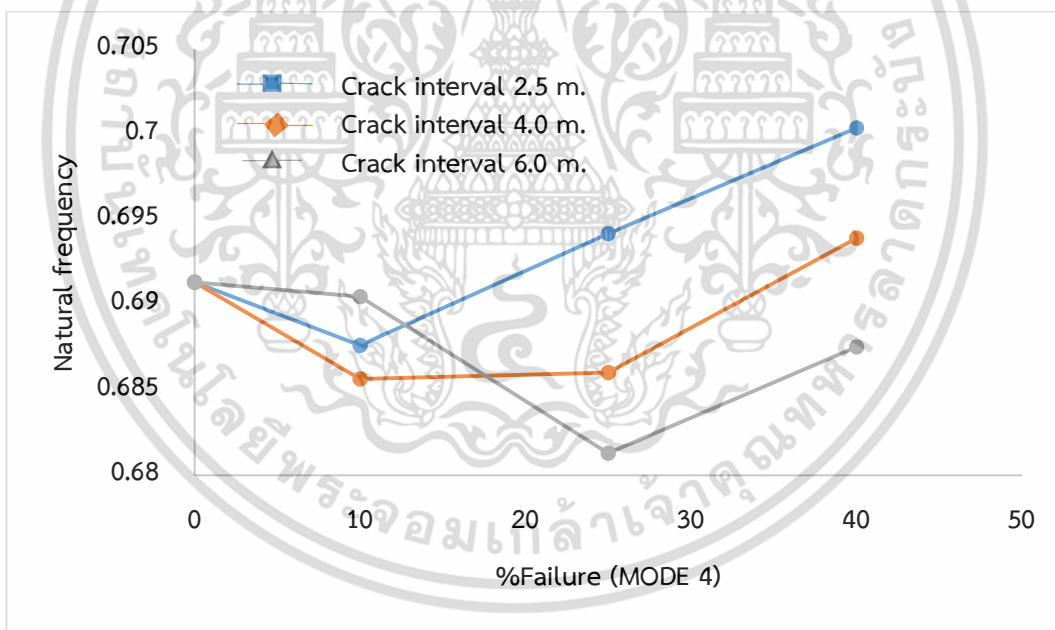
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA

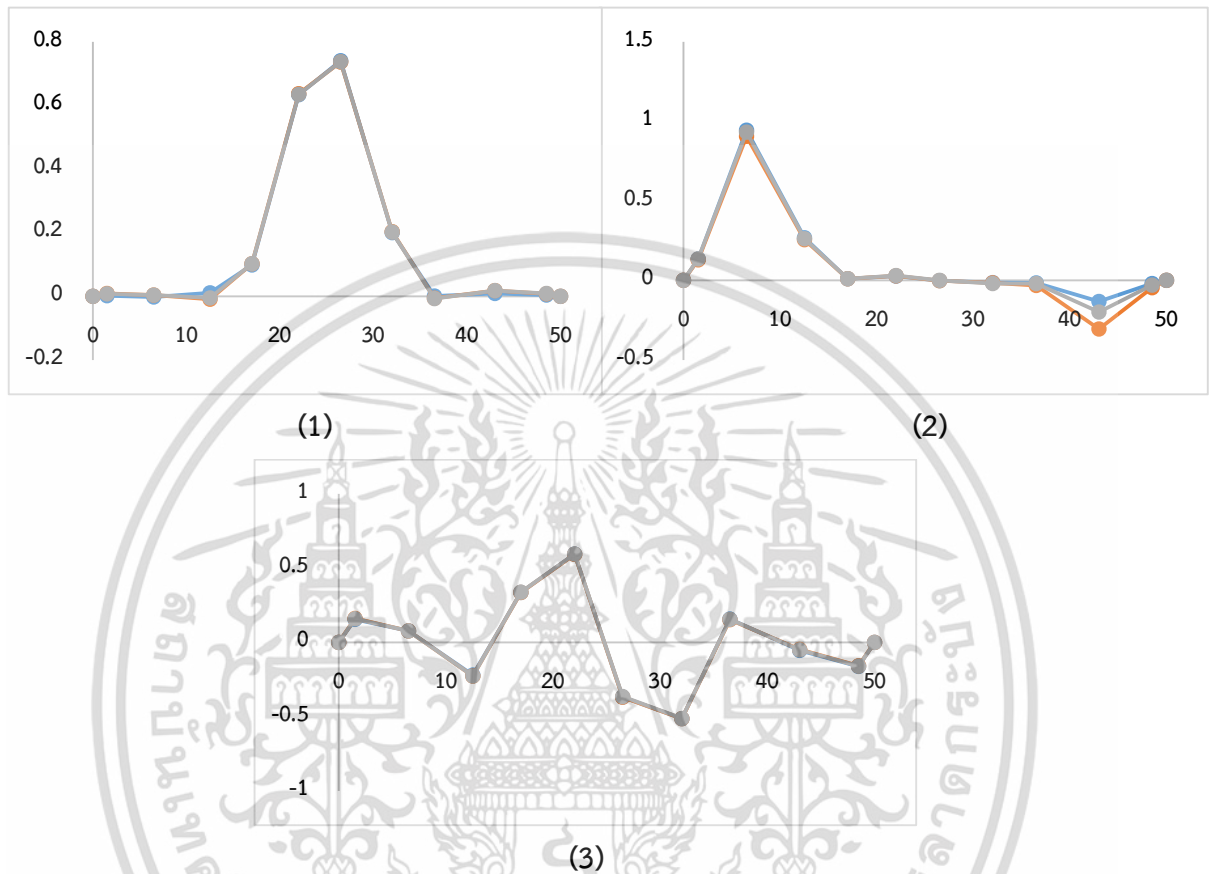


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงขวาของคาน ในโหมดที่ 4 ด้วยวิธี ERA

จากรูปพบว่า เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนมากขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง และ ระยะห่างระหว่างความเสียหายมากขึ้นก็ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น แต่จะมีบางจุดที่ไม่เป็นไปตาม ผลดังกล่าว

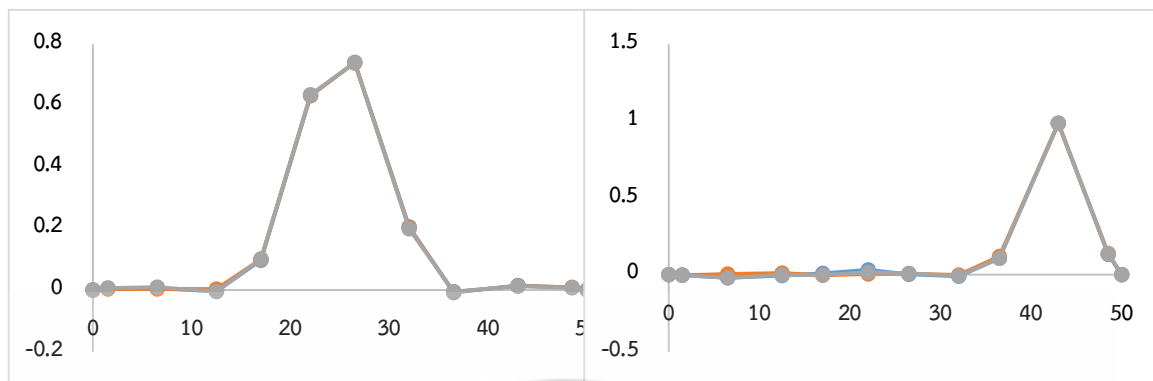
เนื่องด้วยตำแหน่งของความเสียหายไปตรงกับตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนของคาน ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ออกมา มีความผิดปกติได้ หรือค่าสูงกว่าปกติได้

4.6.2.2 รูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA เมื่อความเสียหายขึ้นส่วนเป็น 0% และ 10%



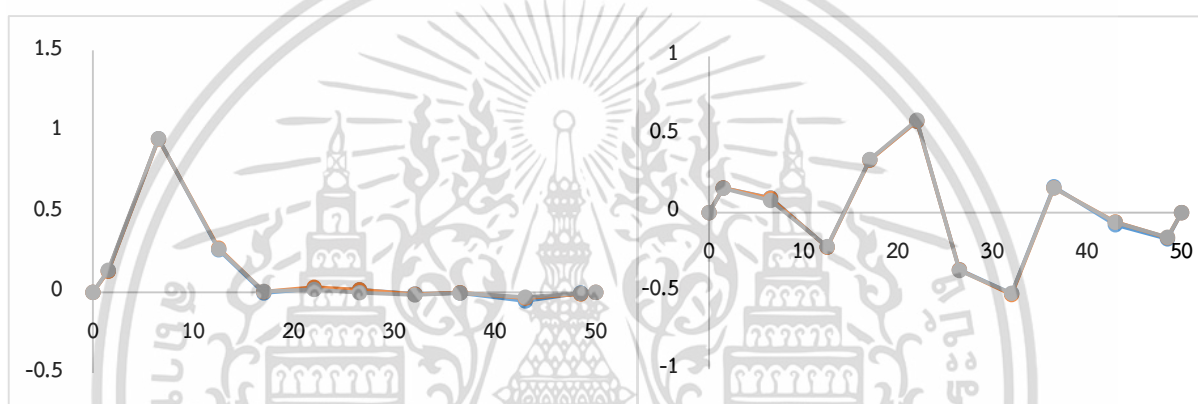
รูปที่ 4.30 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของขึ้นส่วน 0% และ 10% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงขวาของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมดที่ 4

4.6.2.3 รูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA เมื่อความเสียหายขึ้นส่วนเป็น 25% และ 40%



(1)

(2)



(3)

(4)

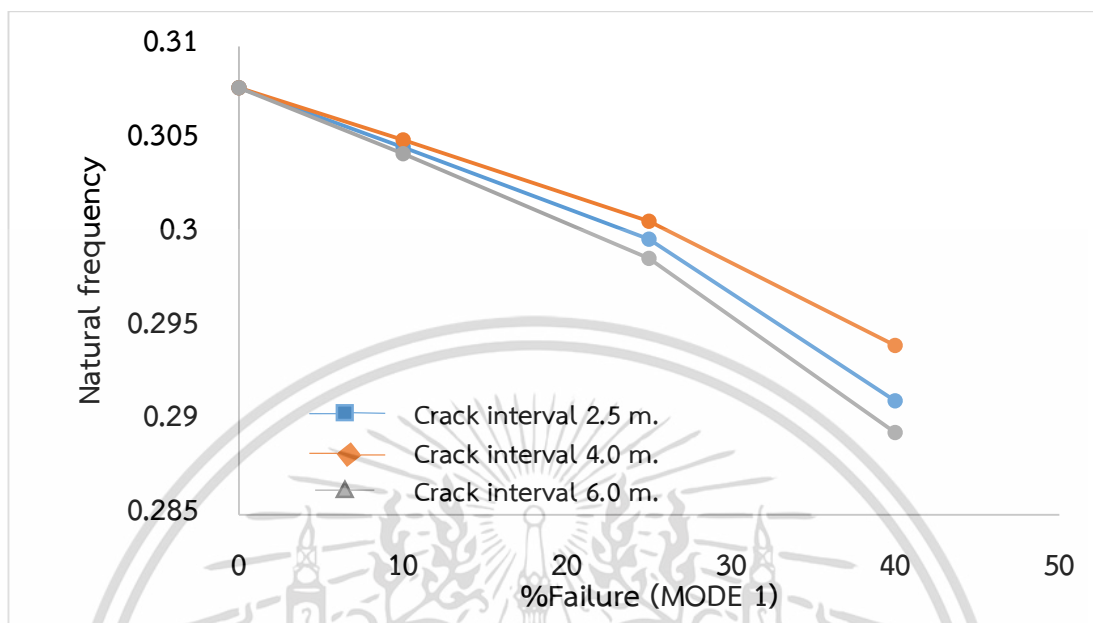
รูปที่ 4.31 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 25% และ 40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงซ้ายของคาน ด้วยวิธี ERA

(1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 2, (3) โหมดที่ 3, (4) โหมดที่ 4

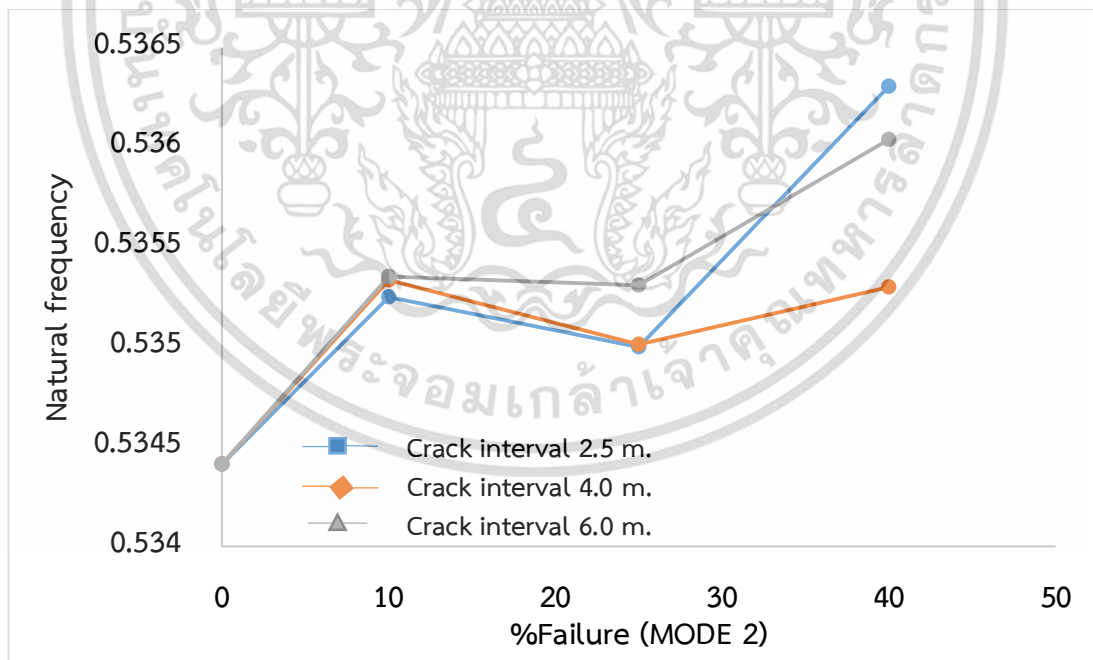
จากรูปร่างการสั่นในหัวข้อที่ 4.6.1.2 และ 4.6.1.3 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างการสั่นที่โหมด 2 ที่ความเสียหายตั้งแต่ 25% ขึ้นไป และการที่โหมดที่ 2 มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงขวาของสะพาน แสดงให้เห็นถึงว่าช่วงขวามีความอ่อนแอกว่าช่วงอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการใส่ความเสียหายไว้ทางช่วงขวาของคาน

4.6.3 เมื่อชั้นส่วนความเสียหายอยู่ในช่วงกลางของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง

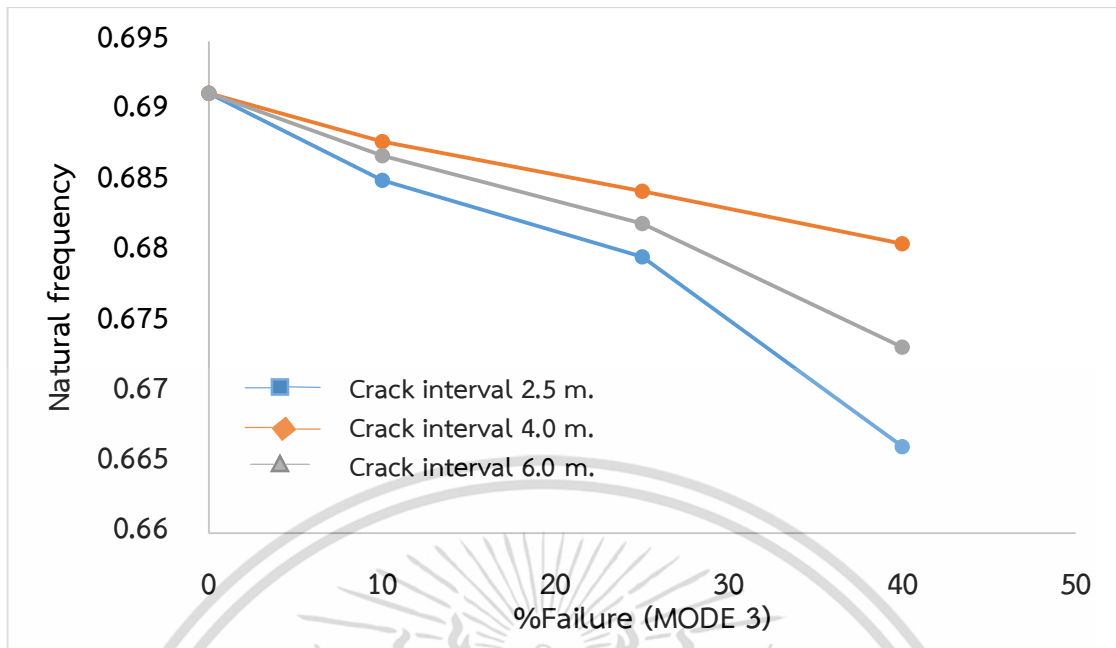
4.6.3.1 ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชั้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 1 ด้วยวิธี ERA



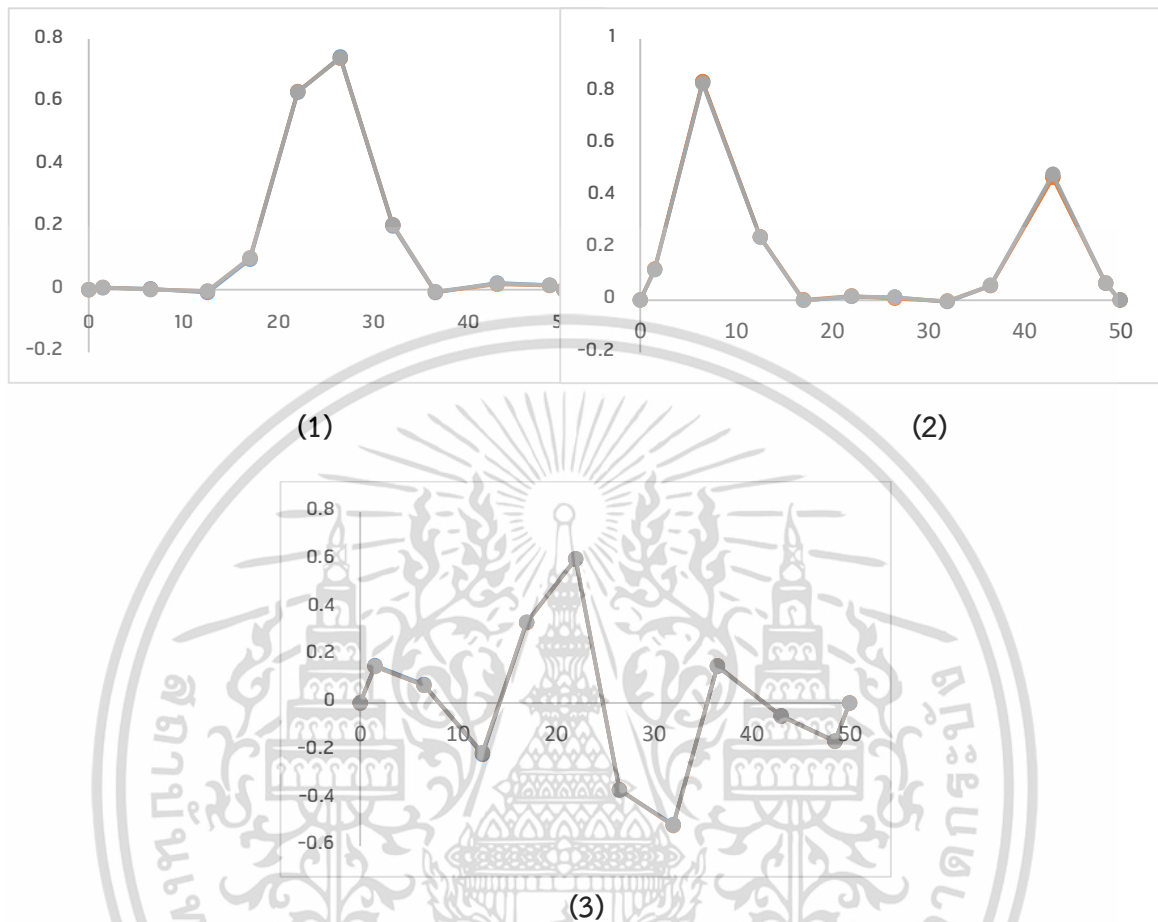
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชั้นส่วน เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 2 ด้วยวิธี ERA



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความเสียหายของชิ้นส่วน
เมื่อมีระยะห่างระหว่างความเสียหายต่างๆอยู่ในช่วงกลางของคาน ในโหมดที่ 3 ด้วยวิธี ERA

จากรูปพบว่า เมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนมากขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง และ
ระยะห่างระหว่างความเสียหายมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น แต่จะมีบางจุดที่ไม่เป็นไปตาม
ผลดังกล่าว เนื่องด้วยตำแหน่งของความเสียหายไปตรงกับตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนของคาน ทำให้ค่าความถี่
ธรรมชาติที่ออกมามีความผิดปกติได้ หรือค่าสูงกว่าปกติได้

4.6.3.2 รูปร่างการสั่นด้วยวิธี ERA เมื่อความเสียหายชิ้นส่วนเป็น 0%,10%,25% และ 40%



รูปที่ 4.35 รูปร่างการสั่นของคานต่อเนื่อง 3 ช่วง เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วน 0%,10%,25%และ40% ที่ระยะห่างความเสียหายต่างๆ อยู่ในช่วงกลางของคาน ด้วยวิธี ERA (1) โหมดที่ 1, (2) โหมดที่ 3, (3) โหมดที่ 4

จากรูปร่างการสั่นจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของชิ้นส่วนและระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนแล้วก็ตาม

ซึ่งจากการศึกษาในหัวข้อ 4.6 แสดงให้เห็นถึงว่า ตำแหน่งของความเสียหายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการสั่น และด้วยวิธีนี้ความเป็นไปได้ที่วิธี ERA จะสามารถเจอนั้นคือเมื่อความเสียหายของชิ้นส่วนเป็น 25% ขึ้นไป

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 เพื่อเป็นตัวแทนอย่างง่ายของสะพานที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนแบบ Transverse ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

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

5.1.2 เทคนิค Eigensystem Realization Algorithm (ERA) มีความเป็นไปได้ที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการสั่น (Modal shape) เมื่อมีความเสียหายของชิ้นส่วนตั้งแต่ 25% ขึ้น

5.1.3 ในรูปร่างการสั่นที่โหมดต่ำ มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโครงสร้างได้ หรือใช้ระบุการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของชิ้นส่วนได้

5.1.4 ในรูปร่างการสั่นที่โหมดสูง มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาต่อไปใช้ในการระบุถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย

5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

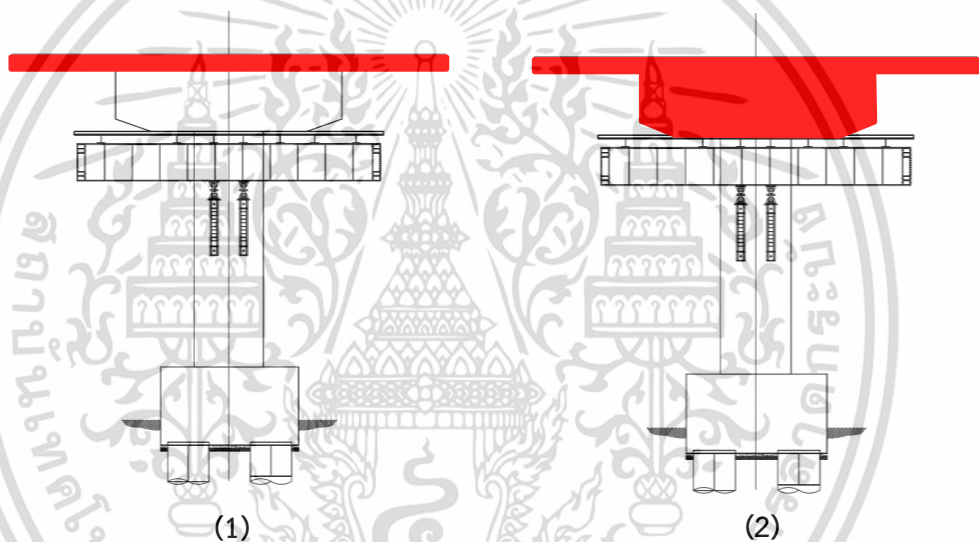
จากประสบการณ์ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมได้ดังนี้

5.2.1 การสร้างความเสียหายชิ้นส่วนแบบ Transverse ไม่สามารถให้เห็นความแตกต่างของค่าความถี่ธรรมชาติได้อย่างชัดเจน ถ้าชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในจุดที่เป็นจุดอ่อนของคาน จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน แต่ในขณะที่ชิ้นส่วนความเสียหายอยู่ในจุดที่เป็นจุดแข็งของสะพานก็อาจจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติ

5.2.2 ในขณะนี้การศึกษาได้ใช้แบบจำลองของรถที่มีขนาดเพียง 2 ตัน ควรจะมีการเพิ่มขนาดรถหรือนำหนักรถเพื่อตรวจสอบว่าเทคนิค ERA นั้นยังสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นได้หรือไม่

5.2.3 ในการใช้ความยาวช่วงของสะพานที่มีค่าเท่ากัน จะทำให้ความแตกต่างของรูปร่างการสั่นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากเทคนิค ERA นั้นจะทำการรวมรูปร่างเข้าไปไว้ในรูปเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้

5.2.4 ในขณะนี้รูปแบบที่ใช้จำลองสะพาน ใช้เป็นแค่แผ่นพื้นที่วางอยู่บนคานเท่านั้น เพื่อให้เข้าใจความเป็นจริงมากขึ้น สะพานควรมีส่วนรองรับด้านล่างด้วย ดังนั้นควรจะใช้โมเดลที่มีส่วนรองรับดังกล่าวนี้ด้วยเช่นกันแสดงดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 4.36 ชั้นส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ของสะพาน (1) ส่วนของผิวทางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้, (2) เพิ่มเติมส่วนรองรับสำหรับการศึกษาในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] Infrastructure Monitoring and management system. (-). **Bridge maintenance Database system**. Retrieved August 30,2019. Available online ; <http://www.immsgroup.com/>
- [2] Bridge Construction Bureau, Department of Highways (2018). **Data about age of bridge**. Retrieved October 3,2019. Available online ; <http://bridge.doh.go.th/bmms/>
- [3] Daniel BALAGEAS. (-). **Introduction Structural Health Monitoring**. Retrieved October 3,2019. Available online ; <http://bridge.doh.go.th/bmms/>
- [4] Xuan Kong, Chun-Sheng Cai and Jiexuan Hul. (2017). **The State-of-the-Art on Framework of Vibration-Based Structural Damage Identification for Decision Making**. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University.
- [5] Mojtaba Valinejadshoubi, Ashutosh Bagchi, Osama Moselhi. (2016). **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.
- [6] Adam B. Noel, Abderrazak Abdaoui, Tarek Elfouly. (2017). **Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey**. IEEE COMMUNICATIONS-SURVEYS & TUTORIALS
- [7] LONG QIAO. (2009). **Structural Damage Detection Using Signal-Based Pattern recognition**. Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kansas State

ภาคผนวก ก

Code วิธี Fast Fourier Transform ในโปรแกรม MATLAB

```
clear ;  
clc;  
fs=100; %Sampling frequency  
load interval5_E.mat  
ydata=interval5_E;  
y=ydata';  
L=length(ydata);  
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y  
Y = fft(y,NFFT)/L;  
f = linspace(0,fs/2,NFFT/2);  
figure(2)  
plot(f,abs(Y(1:NFFT/2)));  
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')  
xlabel('Frequency (Hz)')
```

ภาคผนวก ข

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';
    [outputs,start]=size(Y);
end
% Find block sizes
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
    end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 59 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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
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
        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
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
    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;
Result.Matrices.A=A;
Result.Matrices.B=B;
Result.Matrices.C=C;

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายกฤษณะ พลชา
วัน-เดือน-ปี เกิด 12 เมษายน 2541
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 400/3 ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์
53000
การศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร

