การศึกษาการสั่นสะเทือนจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักรต่อโครงสร้างอาคาร

นาย สมนึก จรูญจิตเสถียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-834-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T158009 18

A STUDY OF VIBRATION INDUCED BY MACHINE UNBALANCED FORCE ON A BUILDING STRUCTURE

MR. SOMNUK JAROONJITSATHIAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-332-834-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการสั่นสะเทือนจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักรต่อโครงสร้างอาคาร
โดย	นาย สมนึก จรูญจิตเสถียร
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล ปานงาม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงษ์)

สมนึก จรูญจิตเสถียร : การศึกษาการสั่นสะเทือนจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักรต่อโครงสร้างอาคาร (A STUDY OF VIBRATION INDUCED BY MACHINE UNBALANCED FORCE ON A BUILDING STRUCTURE) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ ; 181 หน้า. ISBN 974-332-834-3.

งานวิจัยนี้ศึกษาการสั่นสะเทือนจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักรต่อโครงสร้างอาคาร ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกได้แก่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ TFRAME สำหรับวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักร ด้วยโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน ส่วนที่สองใช้โปรแกรม TFRAME ศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นที่สมมติขึ้น เป็นอาคารทำจากวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดสูง 12 เมตร กว้าง 4 เมตร และลึก 4 เมตร ส่วนสุดท้ายทำการทดลองเปรียบเทียบผลการคำนวณกับโปรแกรม TFRAME โดยจำลองโครงสร้าง 3 ชั้น 2 เสา ทำจากเหล็กมีขนาดสูง 1.80 เมตร และกว้าง 0.60 เมตร กับเครื่องจักรไม่สมดุลเป็นพัดลมดูดอากาศความเร็วรอบประมาณ 1300 รอบต่อนาที

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารที่ประมาณเป็นโครงข่ายแบบ 2 มิติ (Plane frame structure) อาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณส่วนประกอบหลักของโครงสร้างเป็นคานแบบออยเลอร์ใน 2 มิติ เพื่อสร้างระบบสมการเชิงอนุพันธ์แทนการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร จากนั้นใช้วิธีการคอนเวนชัน (Conventional method) รวมระบบของตัวแยกการสั่นสะเทือนเข้าไปในระบบสมการของโครงสร้างอาคาร แล้วหาคำตอบโดยใช้วิธีการแปลงด้วยเมตริกซ์โมแดล (Modal analysis)

การศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น โดยใช้โปรแกรม TFRAME ซึ่งแบ่งโครงสร้างออกเป็น 39 เอลิเมนต์ ขนาด 117 ระดับขั้นความเสรี (Degree of freedoms) พบว่าโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นที่สมมติขึ้นนั้น มีค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นใน 3 โหมดแรก เป็นการสั่นทางด้านข้างของอาคาร และ 3 โหมดถัดมาเป็นการสั่นแบบสมมาตรในแนวดิ่ง ส่วนการเพิ่มน้ำหนักเข้าไปในโครงสร้างนั้นจะทำให้ความถี่ธรรมชาติของอาคารลดต่ำลงในทุก ๆ โหมด โดยเฉพาะในตำแหน่งที่โหมดเชพมีขนาดการขจัดสูงด้วยแล้ว ค่าความถี่ธรรมชาติโหมดนั้นจะลดต่ำลงมาก สำหรับการติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลในโครงสร้างโดยตรง ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ของแรงไม่สมดุลของเครื่องจักร ความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพของโครงสร้างอาคาร และตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องจักร โดยผลตอบสนองสูงสุดของอาคารในพิกัดต่าง ๆ จะมีลักษณะใกล้เคียงกับโหมดเชพของอาคารในโหมดที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของแรงไม่สมดุล และการติดตั้งเครื่องจักรในตำแหน่งที่โหมดเชพ ณ ความถี่นั้นมีค่าสูงด้วยแล้ว จะทำให้ผลตอบสนองสูงสุดในทุก ๆ พิกัดมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนการติดตั้งเครื่องจักรบนชุดแยกการสั่นสะเทือนในอาคารเป็นผลให้ความถี่ธรรมชาติของอาคารในทุก ๆ โหมดเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าความถี่ธรรมชาติและมวลของชุดแยกการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะเมื่อความถี่ธรรมชาติของชุดแยกการสั่นสะเทือนใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติโหมดใดโหมดหนึ่งของอาคารแล้วจะทำให้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอาคารรวมเครื่องจักรเปลี่ยนแปลงไปมาก แนวโน้มของผลตอบสนองสูงสุดเหมือนกับกรณีที่ติดตั้งเครื่องจักรโดยตรงแต่จะมีขนาดน้อยกว่า ยกเว้นในกรณีที่ความถี่ธรรมชาติของชุดแยกการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคารในโหมดที่มีทิศทางการสั่นทางเดียวกัน จะทำให้ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารมีค่าสูง สำหรับการเพิ่มมวลของเครื่องจักรบนชุดแยกการสั่นสะเทือนนั้นจะช่วยลดขนาดของผลตอบสนองสูงสุดได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล	**ลายมือชื่อนิสิต** สมนึก จรูญจิตเสถียร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2542	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

3971953421 MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: STRUCTURAL VIBRATION / VIBRATION MEASUREMENT / VIBRATION ISOLATION / FINITE ELEMENT METHOD

SOMNUK JAROONJITSATHIAN : A STUDY OF VIBRATION INDUCED BY MACHINE UNBALANCED FORCE ON A BUILDING STRUCTURE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WITTHAYA YONGCHAREON, Ph.D. 181 pp. ISBN 974-332-834-3.

The purpose of this thesis was to study the effects of vibration due to machine unbalanced force on a building structure. The thesis consists mainly of three parts. First, developing a computer program "TFRAME" to analyze the natural frequencies, mode shapes and maximum responses of general structures subjected to harmonic loads by using FORTRAN language. Second, calculating the vibration responses of a 3-storey reinforcement concrete building of height 12 m., width 4 m. and depth 4 m. by using TFRAME. Last , comparing the results between program "TFRAME" and experimental structure made from steel of height 1.80 m. and width 0.60 m. with a small fan having angular velocity about 1300 RPM.

"TFRAME" has been developed for solving the force vibration problems on a plane frame structure, by using the finite element method which divides the overall structure into several 2-D Euler's beam elements and creates a system of simultaneous differential equation representing vibration properties of the structure. Then, combines the equations of the structure with the isolating properties by using the conventional method. Finally, solves the simultaneous differential equations by transforming the generalize coordinates to the principle coordinates using modal matrix.

The assuming structure with 39 beam components and 117 degree of freedoms analyzed by "TFRAME" showed that the structure has an finite number of natural frequencies. The first three modes of natural frequencies are lateral vibrations and the next three modes are symmetrical vibrations. Adding more weight in the structure will lower all natural frequencies especially where mode shape is higher. Next, direct installing of unbalanced machines on the structure indicated that the shape of maximum responses were similar to the shape of the nearest frequency between machine and the structure. And installing machine on the position where mode shape is higher, will increase all maximum responses. Finally, installing machine on an isolation base will changing all natural frequencies especially when the isolation frequency is tuned with the structural frequency in the same direction. The maximum responses behaved as same as direct installing but had less magnitude and higher weight of isolation base will lower magnitude of vibration.

ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	**ลายมือชื่อนิสิต**	สมนึก จรุญจิตรเสถียร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**	
ปีการศึกษา	2542	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งของ รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และหาแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยมาโดยตลอด ในเรื่องของโปรแกรมคำนวณผลนั้น ผู้วิจัยได้รับคำแนะนำในการแก้ปัญหาการคำนวณเชิงตัวเลขจาก ศ. ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อความกรุณาของอาจารย์ทั้งสองท่าน งานวิจัยนี้ได้รับความกรุณาในด้านอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน และ วิธีการวัด จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการควบคุมดูแลของ รศ. ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ผศ. ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านและหน่วยปฏิบัติการฯ เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผู้วิจัยได้รับคำแนะนำเป็นอย่างดีในส่วนของการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือ และมีน้ำใจเสมอมาตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่

ขอขอบคุณ คุณสุระชัย ฉายินทุ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ให้แก่ผู้วิจัยทำให้หนังสือวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ รวมทั้งความมีน้ำใจ กำลังใจจากพี่สาว พี่ชาย เพื่อน ๆ และสมาชิกชมรมกีฬาฟันดาบ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคน

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา จนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

ประโยชน์ที่จะพึงมีจากงานวิจัยนี้ ขอมอบให้แด่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านเทอญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ญ

สารบัญตาราง ..... ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ณ

รายละเอียดเนื้อหาในแต่ละบทโดยย่อ..... ต

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ทฤษฎีพลศาสตร์ของโครงข่ายแบบระนาบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 4

2.1 สมมติฐานของโครงสร้างอาคาร 4

2.2 การกำหนดเมตริกซ์มวล และเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของเอลิเมนต์ 5

2.3 การแปลงพิกัดของคาน 6

2.4 การประกอบระบบสมการของโครงสร้างจากสมการของเอลิเมนต์ 9

2.5 เงื่อนไขขอบเขต 11

2.6 การหาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพของโครงสร้าง 11

2.7 การหาผลตอบสนองโดยวิธีการแปลงพิกัดด้วยเมตริกซ์โมเดล 13

3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างอาคาร กับ เครื่องจักร 16

3.1 วิธีการคอนเวนชัน 17

3.2 การประมาณคุณสมบัติร่วมของระบบกรณีเครื่องจักรมีน้ำหนักเบา 20

3.3 กรณีระบบของเครื่องจักรมีความถี่สอดคล้องกับระบบโครงสร้างอาคาร
อย่างสมบูรณ์ 27

บทที่

4 ผลตอบสนองสภาวะคงตัวของระบบภายใต้ภาระกระทำ
จากการหมุนที่ไม่สมดุล 30
4.1 ผลตอบสนองสภาวะคงตัวภายใต้ภาระการกระทำ
จากการหมุนที่ไม่สมดุล 30
4.2 การแยกการสั่นสะเทือน 33

5 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร
ภายใต้ภาระกระทำแบบต่าง ๆ 38
5.1 ภาระที่กระทำต่อโครงสร้างแบบสถิตย์ 38
5.2 ภาระแบบฮาร์โมนิคจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักร..... 41

6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME 42
6.1 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม TFRAME 42
6.2 รายละเอียดของโปรแกรม TFRAME 45
6.3 ตัวอย่างการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมTFRAME 48
6.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมTFRAME กับวิธีการอื่น..... . 55

7 การศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารด้วย
โปรแกรมคอมพิวเตอร์TFRAME 57
7.1 ความถี่ธรรมชาติและโหมดเชฟของโครงสร้างเสาและคาน..... 57
7.2 ความถี่ธรรมชาติและโหมดเชฟของโครงสร้างเสาและคาน
เมื่อรับภาระเฉลี่ยจากแผ่นพื้น..... 61
7.3 ความถี่ธรรมชาติของอาคารเมื่อมีภาระแบบสถิตย์กระทำโดยตรงเนื่องจาก
น้ำหนักของเครื่องจักร..... 65
7.4 ผลตอบสนองของอาคารเมื่อรับภาระโดยตรงแบบไม่สมดุล
จากเครื่องจักกลแบบหมุน..... 67
7.5 ความถี่ของระบบโครงสร้างอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักร
ผ่านชุดแยกการสั่นสะเทือน..... 69
7.6 ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุล
ผ่านชุดแยกการสั่นสะเทือน..... 71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

8 การทดลองวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น จำลอง..... 74

8.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง 74

8.2 ขั้นตอนการทดลอง 77

8.3 ผลการทดลอง 79

9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 84

9.1 สรุปผลการวิจัย..... 84

9.2 ข้อเสนอแนะ..... 86

รายการอ้างอิง 88

ภาคผนวก 89

ภาคผนวก ก. 89

ภาคผนวก ข. 94

ภาคผนวก ค. 101

ภาคผนวก ง. 102

ภาคผนวก จ. 104

ภาคผนวก ฉ. 111

ภาคผนวก ช. 116

ภาคผนวก ซ. 150

ภาคผนวก ฌ. 160

ประวัติผู้วิจัย 181

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 ตัวอย่างแบบจำลองของโครงสร้างอาคารที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4

รูปที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงจากพิกัดทั่วไปของคานเป็นพิกัดอ้างอิงหลักของโครงสร้าง 7

รูปที่ 2-3 ตัวอย่างการกำหนดพิกัดหลักอ้างอิงของโครงสร้าง 9

รูปที่ 3-1 แสดงการประกอบชุดแยกการสั่นสะเทือนเข้ากับโครงสร้าง 16

รูปที่ 3-2 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของระบบร่วม 21

รูปที่ 3-3 กำลังสองของความถี่ใหม่เทียบกับความถี่เดิมหลังจากมีการติดตั้งเครื่องจักร 24

รูปที่ 4-1 แสดงแบบจำลองการสั่นสะเทือนของระบบที่มี 1 ระดับขั้นความเสรี 30

รูปที่ 4-2 ขนาดของการสั่นสะเทือนจากการหมุนที่ไม่สมดุล 32

รูปที่ 4-3 แสดงแบบจำลองของการแยกการสั่นสะเทือน 34

รูปที่ 4-4 แสดงอัตราส่วนการส่งผ่านแรงของตัวแยกการสั่นสะเทือน 35

รูปที่ 5-1 แบบจำลองของเอลิเมนต์โครงสร้างที่รับภาระสถิตย์แบบกระจาย..... 39

รูปที่ 5-2 แบบจำลองของเอลิเมนต์โครงสร้างที่รับภาระสถิตย์แบบจุด 40

รูปที่ 5-3 แบบจำลองของเอลิเมนต์โครงสร้างที่รับภาระสถิตย์จากเครื่องจักรบน isolation.. 41

รูปที่ 6-1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม TFRAME 43

รูปที่ 6-2 แสดงตัวอย่างปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง 48

รูปที่ 6.3 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบ..... 56

รูปที่ 7-1 แบบจำลองของโครงสร้างอาคารสมมติที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 57

รูปที่ 7-2 โหมดเชพของโครงสร้างเสาและคานที่แต่ละค่าความถี่ธรรมชาติ 60

รูปที่ 7-3 โหมดเชพของโครงสร้างเมื่อรับภาระเฉลี่ยจากน้ำหนักของพื้นคอนกรีต 63

รูปที่ 7-4 แบบจำลองของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นแบบอาคารรับแรงเฉือน..... 64

รูปที่ 7-5 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องจักร..... 65

รูปที่ 8-1 โครงสร้างของอาคารจำลอง 3 ชั้นที่ใช้ในการทดลอง..... 75

รูปที่ 8-2 ชุดเครื่องจักรไม่สมดุล และสปริงที่ใช้ในชุดตัวแยกการสั่นสะเทือน 75

รูปที่ 8-3 เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนพร้อมหัววัดการสั่นสะเทือนแบบแม่เหล็ก 76

รูปที่ 8-4 การติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลในโครงสร้างโดยตรง 78

รูปที่ 8-5 การติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลในโครงสร้างอาคารผ่านชุดแยกการสั่นสะเทือน 79

รูปที่ ก-1 พิกัดการขจัดของคานแบบออยเลอร์ใน 2 มิติ 1 เอลิเมนต์..... 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ ง-1 แบบจำลองอาคารรับแรงเฉือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น ทั่ว ๆ ไป..... 102
รูปที่ จ-1 โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณ..... 104
รูปที่ จ-2 การประมาณรูปร่างของโครงสร้างจากการสั่นบังคับแบบสมมาตร..... 105
รูปที่ ช-1 ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักรโดยตรง ตำแหน่งคงที่..... 116
รูปที่ ช-2 ผลต่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารก่อน-หลังติดตั้งเครื่องจักรโดยตรง ความถี่คงที่..... 118
รูปที่ ช-3 ผลตอบสนองสูงสุดของอาคารเมื่อติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรง..... 120
รูปที่ ช-4 ผลต่างของความถี่ก่อนและหลังติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ซึ่งมีมวล 10 กิโลกรัม..... 124
รูปที่ ช-5 ผลต่างของความถี่ก่อนและหลังติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ซึ่งมีมวล 100 กิโลกรัม..... 125
รูปที่ ช-6.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 126
รูปที่ ช-6.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 127
รูปที่ ช-6.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 128
รูปที่ ช-6.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 1 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 129
รูปที่ ช-7.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 130

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ ช-7.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 131

รูปที่ ช-7.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 132

รูปที่ ช-7.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 2 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 133

รูปที่ ช-8.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 134

รูปที่ ช-8.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 135

รูปที่ ช-8.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 136

รูปที่ ช-8.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 3 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 137

รูปที่ ช-9.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 138

รูปที่ ช-9.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 139

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ ช-9.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 140

รูปที่ ช-9.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 4 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 141

รูปที่ ช-10.1ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 142

รูปที่ ช-10.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 143

รูปที่ ช-10.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 5 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 144

รูปที่ ช-10.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 51 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 145

รูปที่ ช-11.1 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 146

รูปที่ ช-11.2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 50 t 147

รูปที่ ช-11.3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 10 กิโลกรัม ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 148

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ ช-11.4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างอาคารและเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุด
แยกการสั่นสะเทือน ตำแหน่งที่ 6 มวลของเครื่องจักร 100 กิโลกรัม
ขนาดของแรงไม่สมดุล 100 sin 200 t 149

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 6-1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก TFRAME กับวิธีการ Slope Deflection Method 56

ตารางที่ 7-1 ความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพของโครงสร้างเสาและคาน 59

ตารางที่ 7-2 ความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพของโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักเฉลี่ยของพื้นคอนกรีต 61

ตารางที่ 7-3 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติ 3 โหมดแรก ระหว่างแบบ Shear building กับ FEM 64

ตารางที่ 7-4 จำแนกค่าความถี่ธรรมชาติของชุดแยกการสั่นสะเทือนที่สมมติติดตั้งในอาคาร..... 74

ตารางที่ 8-1 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจำลอง 80

ตารางที่ 8-2 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างจำลองเมื่อติดตั้งเครื่องจักรโดยตรงในชั้นที่ 1 81

ตารางที่ 8-3 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างติดตั้งเครื่องจักรบนตัวแยกการสั่นสะเทือนชุดที่ 1 82

ตารางที่ 8-4 ผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างติดตั้งเครื่องจักรบนตัวแยกการสั่นสะเทือนชุดที่ 2 82

ตารางที่ จ-1 สัญลักษณ์ของสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการ 106

ตารางที่ จ-2 ค่าของสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการ 107

ตารางที่ จ-3 สัญลักษณ์แทนสัมประสิทธิ์ของการสั่นสะเทือนไม่สมมาตรแบบบังคับ 108

ตารางที่ จ-4 ค่าแทนสัมประสิทธิ์ของการสั่นสะเทือนไม่สมมาตรแบบบังคับ 109

ตารางที่ จ-5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม TFRAME และวิธีการสโลปดีเฟลคชัน 110

คำอธิบายสัญลักษณ์

q_i คือ พิกัดของการเคลื่อนที่ใด ๆ

T คือ พลังงานจลน์รวมของทั้งระบบ

U คือ พลังงานศักย์รวมของทั้งระบบ

Q_i คือ แรง หรือโมเมนต์ภายนอกที่มากระตุ้นระบบ

คือ พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์

E คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยแบบพื้นที่ของเอลิเมนต์

γ คือ มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเอลิเมนต์

r คือ รัศมีไจเรชัน รอบแกนการโก่งของเอลิเมนต์

l คือ ความยาวของเอลิเมนต์

$[m]_e$ คือ เมตริกซ์มวลย่อยของคาน วางตัวในแนวระดับ

$[k]_e$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็งย่อยของคาน วางตัวในแนวระดับ

$\{u_i\}_e$ คือ การขจัดของจุดต่อประกอบด้วยการขจัดตามแนวแกน การขจัดตามแนวดิ่ง และ การหมุน

$\{f_i\}_e$ คือ แรง หรือโมเมนต์ภายนอกที่กระทำ ณ จุดต่อ

$[I]$ คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)

$[R]$ คือ เมตริกซ์ที่ใช้แปลงเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งเกร็งย่อยที่วางตัวอยู่ในแนวระดับ ให้วางตัวทำมุมที่ต้องการ

$[\bar{m}]_e$ คือ เมตริกซ์มวลย่อยของคาน วางตัวทำมุมใด ๆ

$[\bar{k}]_e$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็งย่อยของคาน วางตัวทำมุมใด ๆ

$[A]_e$ คือ เมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้ประกอบกันเป็นเมตริกซ์ของโครงสร้าง

$[M]$ คือ เมตริกซ์มวลรวมของทั้งระบบในเทอมของพิกัดทั่วไป

$[K]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็งรวมของทั้งระบบในเทอมของพิกัดทั่วไป

$\{F_i\}$ คือ แรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างทั้งหมดในเทอมของพิกัดทั่วไป

$\{\phi_i\}$ คือ เวกเตอร์ของโหมดเชพ ณ ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ i

ω คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural frequencies)

$[\Phi]$ คือ เมตริกโมแดลได้มาจากการนำโหมดเชพทุก ๆ โหมดมาเขียนเรียงต่อกัน

$\{\delta_i\}$ คือ เวคเตอร์การขจัดในเทอมของพิกัดหลัก

$[C]$ คือ เมตริกซ์ความหน่วงโดยประมาณของทั้งระบบ

$[M_r]$ คือ เมตริกซ์แยงมุมของเมตริกซ์มวลในเทอมของพิกัดหลัก

$[C_r]$ คือ เมตริกซ์ทแยงมุมของเมตริกซ์ความหน่วง ประมาณความหน่วงแบบสัดส่วน

$[K_r]$ คือ เมตริกซ์ทแยงมุมของเมตริกซ์ความแข็งเกร็งในเทอมของพิกัดหลัก

$[M^*]$ คือ เมตริกซ์มวลที่มีการรวมคุณสมบัติของชุดแยกการสั่นสะเทือน

$[C^*]$ คือ เมตริกซ์ความหน่วงที่มีการรวมคุณสมบัติของชุดแยกการสั่นสะเทือน

$[K^*]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็งที่มีการรวมคุณสมบัติของชุดแยกการสั่นสะเทือน

α_i คือ แฟคเตอร์การขยายตัวสำหรับโหมดเชพของชุดแยกการสั่นสะเทือนเทียบกับตำแหน่งที่ติดตั้ง

m_e คือ มวลของชุดแยกการสั่นสะเทือน

ω_i^* คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบโครงสร้าง-อาคาร ซึ่งเป็นค่าที่มาจากโหมดเติมของโครงสร้างโหมดที่ i

ω_0^* คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบโครงสร้าง-อาคาร ซึ่งเป็นค่าที่มาจากโหมดของชุดแยกการสั่นสะเทือน

ω_e คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของชุดแยกการสั่นสะเทือน

β_i คือ พารามิเตอร์ความถี่ไม่สอดคล้อง (Detunning parameter) เป็นตัวที่แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ของอาคารแตกต่างจากค่าความถี่ของชุดแยกการสั่นสะเทือนมากน้อยเท่าไหร่

γ_i คือ ค่าอัตราส่วนมวลประสิทธิผล (Effective mass ratio)

λ คือ ค่าเจาะจงของการสั่นสะเทือน (Eigenvalue) มีค่าเท่ากับส่วนกลับของความถี่ธรรมชาติยกกำลังสอง

$\phi_i(x)$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างที่ใช้ในการประมาณลักษณะของฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์

รายละเอียดของเนื้อหาในแต่ละบทโดยย่อ

บทที่ 1 บทนำ

ที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ทฤษฎีพลศาสตร์ของโครงข่ายแบบระนาบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานแบบออยเลอร์ใน 2 มิติ เพื่อสร้างระบบสมการซึ่งใช้เป็นตัวแทนการสั่นสะเทือนของโครงข่ายแบบระนาบ (Plane frame structure) การหาค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพของโครงข่าย ตลอดจนการแก้ระบบสมการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยวิธีการโมแดลเพื่อหาผลเฉลยในรูปการขจัดสูงสุด

บทที่ 3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างอาคารกับเครื่องจักร

วิธีการเพอเทอร์เบชัน (Perturbation Method) สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโครงสร้างกับเครื่องจักรเมื่อติดตั้งชุดเครื่องจักรบนตัวแยกการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งใด ๆ ในโครงสร้าง และการประมาณคุณสมบัติการสั่นสะเทือนของ โครงสร้างที่เปลี่ยนไปหลังจากติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน

บทที่ 4 ผลตอบสนองสภาวะคงตัวของระบบภายใต้ภาระกระทำจากการหมุนที่ไม่สมดุล

วิเคราะห์ผลเฉลยเฉพาะของสมการการสั่นสะเทือนแบบที่มีแรงกระทำอยู่ในรูป F sin ωt หรือ F cos ωt รวมไปถึงการใช้ตัวแยกการสั่นสะเทือน (Vibration isolation)

บทที่ 5 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารภายใต้ภาระกระทำแบบต่าง ๆ

วิธีการประยุกต์ภาระกระทำแบบต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสมการการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร

บทที่ 6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME

อธิบายส่วนประกอบของโปรแกรม TFRAME ซึ่งพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบคาน รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลป้อนเข้า รายละเอียดของไฟล์แสดงผลลัพธ์ และตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม TFRAME

บทที่ 7 การศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิเคราะห์ผลการคำนวณจากโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME สมมติให้มีขนาดกว้าง 4 เมตร สูง 12 เมตร และลึก 4 เมตร คำนวณค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพของโครงสร้างอาคารกำหนดเงื่อนไขการติดตั้งเครื่องจักรไม่สมดุลแบบหมุน ในตำแหน่งและรูปแบบต่าง ๆ (ติดตั้งโดยตรงหรือติดตั้งบนตัวแยกการสั่นสะเทือน) เพื่อศึกษาผลตอบสนองสูงสุดสำหรับพิกัด ต่าง ๆ ในโครงสร้าง

บทที่ 8 การทดลองวัดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นจำลอง

จำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นขึ้นโดยใช้เหล็กหน้าตัดแบบ Channel มาตรฐาน JIS G 3192 มีขนาดความสูงประมาณ 1.80 เมตร และกว้างประมาณ 0.65 เมตร ทำการวัดค่าความถี่ธรรมชาติ และผลตอบสนองสูงสุดเมื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่หมุนด้วยอัตราเร็วรอบ ประมาณ 1300 รอบต่อนาที ซึ่งติดมวลเยื้องศูนย์ขนาดประมาณ 15.5 กรัม ทั้งแบบติดตั้งโดยตรง และติดตั้งบนตัวแยกการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นที่ 1 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME

บทที่ 9 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร