



## รายงานการวิจัย

# การทดสอบและพัฒนาการออกแบบระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเพื่อลด การสั่นสะเทือนเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ (Testing and Development the Design to Reduced Vibration of Precast Prestressed Concrete Slabs Due to Human Activities)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวพรพิไล กิติรัตน์ตระการ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2552

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548 และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่ พนักงานห้องปฏิบัติการคอนกรีต อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อใช้ในการทดสอบจนแล้วเสร็จ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประสานงานต่าง ๆ เกี่ยวกับงานวิจัย บุคคลากรสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาและตรวจทานรูปแบบรายงาน

ท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูงที่ได้ให้โอกาสกับคณะผู้ทำการวิจัยให้สามารถดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้แล้วเสร็จ

ผู้วิจัย

มงคล จิรวรรณเดช

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุปัญหาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ก่อสร้างจากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิตในประเทศไทย ในการศึกษาจะทำการทดสอบกับพื้นตัวอย่างคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจำนวน 3 แผ่นวางเรียงบนคานคอนกรีตแล้วทำการเทคอนกรีตทับหน้า ให้แรงกระทำแบบกระแทกกับตัวอย่าง ทำการบันทึกค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับพื้นตัวอย่าง วิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์นั้นจำลองให้ระบบพื้นเป็นพื้นทางเดียว มีจุดรองรับแบบง่าย ต่อจากนั้นทำการวิเคราะห์ความเร่งที่เกิดขึ้นกับระบบเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ 3 กิจกรรมคือ การเดิน แอโรบิก การวิ่งเหยาะๆ และการวิ่งธรรมดา ซึ่งจำลองเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาพื้นเป็นสัดส่วนขนาดจริง โดยให้สัดส่วนความยาว ต่อความกว้างดังนี้ 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2 นำค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน National Building Code of Canada ปี 1995 (NBCC 1995) จากการศึกษาพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเกณฑ์มาตรฐานแล้วพบว่าระบบพื้นที่มีสัดส่วน 1 : 0.5 ค่าส่วนใหญ่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน และสัดส่วน 1 : 2 มีบางส่วน จะเห็นว่าระบบพื้นควรมีการปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนในระบบพื้นต่อไป

## ABSTRACT

The proposed of this research is to define the vibration problem in Precast-Prestressed concrete slab (PC slab) which constructed by using the product of Thailand. The research is divided into the experiment and the analysis. In the experiment, we use 3 PC slabs lie on the concrete beam and cover with topping concrete. After the slab samples are completed, we leave the free fall loading to the slab and record time and acceleration of the samples then determine the natural frequency of the samples after that compared the natural frequencies from testing with the analysis. In the analysis, we model the system into one-way slab with simple supported. After comparing, the response in acceleration of the slab under human activities (aerobic, jogging and running) is determined. In this process, the slabs are considered in full size which the ratio of length and width of 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 and 1 : 2. Selected the maximum acceleration of each case compared with the National Building Code of Canada year 1995. The study shows that the natural frequencies of the slab in the experiment are nearly close to the analysis and from the comparing of maximum accelerations of the slab are show that the majority of slab with ratio of 1 : 0.5 are upper than the code and rarely in the ratio of 1 : 2. It can be concluded that the slab has the vibration problem with the human activities and should extend the research in the design of PC slab to reduce vibration which compatible with the code.

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ก    |
| บทคัดย่อ.....   | ข    |
| ABSTRACT.....   | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| สารบัญตาราง.....  | ช    |
| สารบัญรูป.....  | ฉ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์.....  | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ  | 25   |
| 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....                               | 1    |
| 2. วัตถุประสงค์.....  | 2    |
| 3. ขอบเขตของการวิจัย.....                                       | 2    |
| 4. วิธีดำเนินการวิจัย โดยย่อ.....                               | 3    |
| 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                               | 4    |
| บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                | 14   |
| 1. ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในองค์อาคาร.....               | 5    |
| 2. แรงพลวัตร์เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์.....                     | 6    |
| 3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                 | 6    |
| 4. แนวทางการวิจัย.....  | 13   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย                                      |      |
| 1. ขั้นตอนในการวิจัยโดยภาพรวม.....                              | 15   |
| 2. การดำเนินงานวิจัยเชิงทฤษฎี.....                              | 15   |
| 2.1 ขั้นตอนการวิจัย.....  | 15   |
| 2.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....                               | 15   |
| 2.3 ชนิดของกิจกรรมของมนุษย์ที่เลือกใช้ในการวิจัย.....           | 15   |
| 2.4 แบบจำลองระบบพื้นตัวอย่าง.....                               | 18   |
| 2.5 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นตัวอย่าง..... | 19   |
| 2.6 การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นตัวอย่าง.....              | 19   |
| 3. การดำเนินงานวิจัยเชิงทดลอง.....                              | 23   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....                                      | 23        |
| 3.2 อุปกรณ์ การติดตั้ง และการตรวจวัด.....                       | 23        |
| 3.3 การเก็บข้อมูล.....  | 24        |
| 3.4 การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นตัวอย่าง.....      | 24        |
| 3.5 การวิเคราะห์ค่าความถี่ของระบบพื้นตัวอย่าง.....              | 25        |
| 3.6 การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นตัวอย่าง.....              | 25        |
| 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง.....   | 25        |
| 5. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน.....                 | 25        |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล</b> .....       | <b>91</b> |
| 1. การวิจัยเชิงทฤษฎี.....                                       | 26        |
| 1.1 ข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....               | 26        |
| 1.2 ผลการวิเคราะห์.....   | 26        |
| 1.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์.....                                  | 33        |
| 2. การวิจัยเชิงทดลอง.....                                       | 34        |
| 2.1 ข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....               | 34        |
| 2.2 ผลการวิเคราะห์.....   | 34        |
| 2.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์.....                                  | 41        |
| 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง.....   | 41        |
| 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับมาตรฐาน.....                      | 49        |
| <b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>                                |           |
| 1. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....   | 53        |
| 2. พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป..... | 55        |
| 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน.....                 | 58        |
| 4. ข้อเสนอแนะ.....  | 59        |
| <b>บรรณานุกรม</b> .....   | <b>61</b> |
| <b>ภาคผนวก ก รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการทดสอบ</b>       |           |
| ก.1 การเตรียมตัวอย่าง.....                                      | 63        |
| ก.2 อุปกรณ์ การติดตั้งและการตรวจวัด.....                        | 65        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| ก.3 ตารางบันทึกข้อมูล.....  | 70   |
| ก.4 สัญญาณข้อมูลขณะทำการทดสอบ.....                                      | 73   |
| ภาคผนวก ข รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผล                    |      |
| ข.1 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....     | 79   |
| ข.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของพื้นตัวอย่าง.....                | 80   |
| ข.3 การวิเคราะห์ความเร่งและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด.....             | 81   |
| ข.4 วิธีการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบและผลการวิเคราะห์..... | 81   |
| ข.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าความเร่งจากการทดสอบ.....                     | 81   |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบ.....  | 91   |
| ประวัตินักวิจัย.....  | 93   |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้นสำหรับกิจกรรม<br>ที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์ (NBBC 1985) .....  | 10   |
| ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดความเร่งจำแนกตามการใช้งานอาคาร (ANSI A58.1-1982).....  | 10   |
| ตารางที่ 2.3 ตัวแปรต่างๆ ที่แนะนำในการออกแบบสำหรับกิจกรรมเข้าจังหวะ .....   | 11   |
| ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้น สำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์<br>(Allen ,1985).....   | 12   |
| ตารางที่ 3.1 ชื่อ และลักษณะของแรงกระทำเนื่องจากการกระโดด.....   | 17   |
| ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดความเร่งสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ระหว่าง 1.5 – 8 เฮิรต์ (NBCC1995).....  | 25   |
| ตารางที่ 4.1 ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบ.....  | 27   |
| ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....   | 27   |
| ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นตัวอย่าง.....   | 28   |
| ตารางที่ 4.4 ความเร่งสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่าง ๆ ตามขนาดของแรงกระทำ<br>ตั้งแต่ 40 – 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นขนาดต่าง ๆ.....  | 31   |
| ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่าง ๆ<br>ตามขนาดของแรงกระทำตั้งแต่ 40 – 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นขนาดต่าง ๆ.....  | 32   |
| ตารางที่ 4.6 ข้อมูลคอนกรีตเทปหน้าที่ใช้ในการทดสอบ.....  | 35   |
| ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....   | 35   |
| ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างจากการทดสอบ.....  | 35   |
| ตารางที่ 4.9 ค่าความแกร่ง (stiffness) ของระบบพื้นตัวอย่างจากการทดสอบ<br>(คิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเพียงแผ่นเดียว).....  | 37   |
| ตารางที่ 4.10 ความเร่งสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่างๆ ตามขนาดของแรงกระทำ<br>ตั้งแต่ 40 – 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นขนาดต่าง ๆ<br>(ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์).....   | 38   |
| ตารางที่ 4.11 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจากค่าเริ่มต้น<br>ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตฯ (ตารางที่ 4.1) ค่าที่ได้ทำการปรับแก้<br>ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการวัดจากตัวอย่างจริง (ตารางที่ 4.6)<br>และค่าจากการทดสอบจริง..... | 44   |
| ตารางที่ 4.12 ค่าความแกร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่าง.....  | 45   |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 4.13 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 3 เมตร..... | 46   |
| ตารางที่ 4.14 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 4 เมตร..... | 47   |
| ตารางที่ 4.15 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 5 เมตร..... | 48   |
| .....  | 11   |
| .....  | 16   |
| .....  | 17   |
| .....  | 18   |
| .....  | 20   |
| .....  | 22   |
| .....  | 23   |
| .....  | 28   |
| .....  | 28   |
| .....  | 29   |
| .....  | 30   |
| .....  | 36   |
| .....  | 36   |
| .....  | 37   |
| .....  | 39   |
| .....  | 40   |

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 การจัดเรียงแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในองค์อาคาร.....  | 5    |
| รูปที่ 2.2 แรงเนื่องจากการกระแทกเท้าสำหรับกิจกรรมการวิ่ง และการกระโดด.....  | 7    |
| รูปที่ 2.3 การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของมนุษย์.....  | 8    |
| รูปที่ 2.4 แรงเนื่องจากการกิจกรรมเข้าจังหวะ .....   | 11   |
| รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัย.....   | 16   |
| รูปที่ 3.2 แรงเนื่องจากการกระโดด โดยพิจารณาการกระแทกเท้า 1 ครั้ง.....   | 17   |
| รูปที่ 3.3 รูปแสดงหน้าตัดของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....   | 18   |
| รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบพื้น.....  | 20   |
| รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วง.....   | 22   |
| รูปที่ 3.6 การตอบสนองเนื่องจากอิมพัลส์.....   | 23   |
| รูปที่ 4.1 ความเร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างยาว 3 เมตร.....   | 28   |
| รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างยาว 3 เมตร.....  | 28   |
| รูปที่ 4.3 ความเร่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ.....  | 29   |
| รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ.....   | 30   |
| รูปที่ 4.5 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 3 เมตร.....  | 36   |
| รูปที่ 4.6 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 4 เมตร.....  | 36   |
| รูปที่ 4.7 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 5 เมตร.....  | 37   |
| รูปที่ 4.8 ความเร่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ.....  | 39   |
| รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ.....   | 40   |
| รูปที่ 4.10 ค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีช่วงเริ่มต้น<br>และปรับแก้เปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบ..... | 45   |
| รูปที่ 4.11 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่าง.....  | 49   |
| รูปที่ 4.12 ความเร่งสูงสุดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน NBCC 1995.....   | 51   |
| รูปที่ 4.13 ความเร่งสูงสุดจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน<br>NBCC 1995.....                                   | 52   |
| รูปที่ 5.1 ความแกร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ความยาวต่าง ๆ.....  | 54   |
| รูปที่ 5.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ความยาวต่าง ๆ.....  | 55   |

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.3 ความเร่งสูงสุดของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ความยาว 3 เมตร<br>ที่ตัดส่วนต่าง ๆ..... | 56   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์

|         |  |
|---------|--|
| aero2.1 | กิจกรรมการเดินแอโรบิค ที่ความถี่ของกิจกรรมเท่ากับ 2.1 เฮิร์ต       |
| jog2.5  | กิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ ที่ความถี่ของกิจกรรมเท่ากับ 2.5 เฮิร์ต        |
| PC-3    | การศึกษาทางทฤษฎีของตัวอย่างความยาว 3 เมตร                          |
| PC-3T   | การศึกษาทางการทดสอบของตัวอย่างความยาว 3 เมตร                       |
| PC-3TU  | การศึกษาทางการทดสอบและทำการปรับแก้ค่าแล้วของตัวอย่างความยาว 3 เมตร |
| PC-3U   | การศึกษาทางทฤษฎีและทำการปรับแก้ค่าแล้วของตัวอย่างความยาว 3 เมตร    |
| run3.2  | กิจกรรมการวิ่งธรรมดา ที่ความถี่ของกิจกรรมเท่ากับ 3.2 เฮิร์ต        |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีวัสดุและกรรมวิธีในการก่อสร้างได้เข้ามามีบทบาทเพื่อช่วยให้การก่อสร้างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพได้มาตรฐาน มีความปลอดภัย เพิ่มความสะดวก รวดเร็วและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปในงานก่อสร้างเป็นแนวโน้มทางเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากช่วยลดเวลาในการก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพ เป็นไปอย่างมีระบบมากขึ้น สำหรับในส่วนของโครงสร้างพื้นนั้น พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปถือเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีกำลังสูงและมีความสะดวกในการทำงานทำให้สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง นอกจากนี้ในท้องตลาดยังมีผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเป็นจำนวนมากให้เลือกโดยมีความยาวตั้งแต่ 2 – 14 ม. แม้ว่าแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะถูกออกแบบให้มีกำลังเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้อย่างปลอดภัย และมีค่าการแอ่นตัวไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน แต่เนื่องจากการที่แผ่นพื้นมีน้ำหนักน้อยและมีความยืดหยุ่นมาก เมื่อเทียบกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา รวมทั้งไม่ได้หล่อเป็นเนื้อเดียวกับโครงสร้าง ผลกระทบต่อโครงสร้างที่ตามมาก็คือ ความสั่นสะเทือนของโครงสร้างมีมากขึ้น ถึงแม้ว่าโครงสร้างจะมีความปลอดภัย แต่การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง จะมีผลต่อการรับรู้ของผู้อาศัยอยู่ในอาคาร ซึ่งทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบาย ความแรงในการสั่นสะเทือนอาจจะวัดออกมาในหลายรูปแบบเช่น ความถี่และช่วงเวลาของการสั่น ระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้ง และความเร่งในการสั่นสะเทือน ในส่วนของการรับรู้ของมนุษย์นั้นจะขึ้นอยู่กับอิริยาบถ เช่น การนอน ยืน หรือนั่ง และกิจกรรมของผู้รับรู้ที่กระทำอยู่ขณะนั้น นอกจากนี้ ความสั่นสะเทือนยังอาจก่อให้เกิดปัญหาในอาคารที่มีเครื่องมือซึ่งต้องการความละเอียดแม่นยำสูงอีกด้วย หากมีความสั่นสะเทือนมารบกวนมากอาจทำให้ความแม่นยำในการทำงานน้อยลงจนไม่สามารถปฏิบัติงานได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลที่ได้กับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศแคนาดาปี 1995 (National Building Code of Canada 1995)

แรงกระทำเนื่องจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์มีหลายแบบเช่น การเดิน การวิ่ง การกระโดด การออกกำลังกาย การชมคอนเสิร์ต แรงต่างๆ เหล่านี้ล้วนแต่เป็นแรงแบบพลศาสตร์ที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างทั้งสิ้น ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยและสร้างแบบจำลองของแรงออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้น Bachmann และ Ammann ได้ทำการรวบรวมแรงต่างๆ ไว้ในหนังสือ Vibration in Structures Induced by Man and Machine ความแรงของการสั่นสะเทือนในพื้นที่จะขึ้นกับความถี่ในการก้าวเท้า ความเร็วในการก้าว น้ำหนักและเพศของคน ชนิดของสัน

รองเท้า สภาพผิวพื้น ขนาดและรูปแบบของแรงกระทำ ซึ่งผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นอาจจะมีความรู้สึกที่พื้นมีการสั่นหรือบางคนอาจจะไม่รู้ ขึ้นกับอิริยาบถและกิจกรรมของผู้ใช้อาคารอยู่ขณะนั้น ได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรับรู้ของมนุษย์อันเนื่องจากการสั่นสะเทือน และสรุปเป็นเกณฑ์ต่างๆ หลายเกณฑ์ ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจมาใช้เป็นตัวบ่งชี้แบ่งระดับความรู้สึกจะเป็น ความถี่ของการสั่น ระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้ง ความเร่งในการสั่น เป็นต้น สำหรับการเลือกใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและผู้ใช้แต่ละท่าน Allen (1990) ได้ทำการศึกษาอาคารที่มีปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือนมีค่ามากจนผู้ใช้รู้สึกไม่ปลอดภัย โดยพื้นอาคารทำจากโครงเหล็กอาคารดังกล่าวมีห้องสำหรับออกกำลังกายและจะมีการเดินแอโรบิกเป็นประจำ ซึ่งในการแก้ปัญหาในอาคารที่ก่อสร้างมีหลายวิธีแต่ค่อนข้างทำได้ยาก และเสียค่าใช้จ่ายมากหรือบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนชนิดของกิจกรรม จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าโครงสร้างเหล็กนั้นค่อนข้างมีความไวต่อการสั่นสะเทือนเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและหน้าตัดค่อนข้างเล็ก ความสามารถในการต้านทานการสั่นจะน้อย เมื่อพิจารณาระบบพื้นที่ทำจากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนับว่ามีความน่าสนใจ เพราะว่ามีการผลิตและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา กำลังสูงและติดตั้งได้ง่าย ทั้งนี้สำหรับพื้นคอนกรีตธรรมดา ได้มีผู้ทำการศึกษาแล้วคือ กิตติศักดิ์ กุลธวิชัย (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตช่วงยาว เนื่องจากการเดิน แผ่นพื้นเป็นพื้นคอนกรีตขนาด 9.50x9.50 ม ใช้ความหนา 3 ค่าดังนี้ 0.24 0.26 และ 0.28 ม.

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่ายังไม่มีการศึกษาการสั่นสะเทือนในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์รวมถึงแนวทางในการลดการสั่นสะเทือน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงค่อนข้างมีความสำคัญในการริเริ่มที่จะมีการศึกษาและเสนอแนวทางในการออกแบบการเสริมเหล็กที่จุกรองรับเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนที่มากเกินไปก่อนที่จะทำการก่อสร้าง

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์

## 3. ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้น โดยเฉพาะค่าความถี่ธรรมชาติ และวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงระบบพื้นที่ต่อไป ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างที่นำมาจากบริษัทเชื้อถือได้ (ได้รับมาตรฐานอุตสาหกรรม) มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย ความยาวของตัวอย่างที่นำมาใช้คือ 3 4 และ 5 เมตร การติดตั้งแผ่นพื้น

ตัวอย่างจะติดตั้งที่ละ 3 แผ่น แต่น้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตจะใส่ที่กึ่งกลางของพื้นตัวกลางเท่านั้น (สำหรับแผ่นพื้นที่มีความยาวมากกว่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบท้อกลวง)

การทดสอบสนใจเฉพาะผลการตอบสนองของระบบในแนวตั้งเท่านั้น มิได้พิจารณาผลในทิศทางอื่น

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุจะกระทำตามมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องหรือให้ใกล้เคียงมากที่สุดเท่าที่เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องวิจัยทำได้

ผลการทดสอบที่ได้ นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีแล้วทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐานของประเทศแคนาดา ปี 1995 เพื่อดูแนวโน้มในการนำไปใช้ในอาคารประเภทต่างๆ แรงกระทำพลวัตเนื่องกิจกรรมของมนุษย์พิจารณาแรงกระทำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น โดยขนาดของแรงที่กระทำอยู่ระหว่าง 40 – 90 กิโลกรัม

#### 4. วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ

การวิจัยประกอบด้วย การวิจัยเชิงทฤษฎี และการวิจัยเชิงทดลอง

##### 4.1 การวิจัยเชิงทฤษฎี

- เลือกชนิดของตัวอย่างพื้น
- เลือกชนิดของน้ำหนักบรรทุกพลวัต
- สร้างแบบจำลองของระบบพื้น
- วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบ
- วิเคราะห์หาการตอบสนองของระบบพื้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB

##### 4.2 การวิจัยเชิงทดลอง

###### 4.2.1 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

- ทำการจัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุ เช่น wire mesh, เหล็กเส้น, ปูนซีเมนต์, แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

- ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ เช่น ชุด impact loading, ฐานติดตั้งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป, คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกและแปลงข้อมูล

###### 4.2.2 ขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ

- ทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต คุณสมบัติของเหล็กเส้น พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

- ติดตั้งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทำการเสริมเหล็กที่จุกรองรับในปริมาณที่ต้องการแล้วทำการเทคอนกรีตทับหน้า

- ติดตั้ง impact loading frame
- ทดสอบหาการตอบสนองของระบบ

#### 4.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผล

- นำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี
- สรุปแนวทางในการออกแบบเหล็กเสริมที่จู่รองรับเพื่อลดหรือป้องกันการสั่นสะเทือนจากกิจกรรมของมนุษย์

### 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากในกระบวนการออกแบบเพื่อลดหรือป้องกันการสั่นสะเทือนในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มากเกินไป โดยเฉพาะในอาคารที่มีใช้เป็นการสาธารณะหรือมีผู้ใช้อาคารมาก

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอาคารหรือมีการเผยแพร่วิธีการออกแบบอาคารและควบคุมการออกแบบ

#### หน่วยงานภาครัฐ

- สถาบันศึกษา
- กรมโยธาธิการ
- การเคหะแห่งชาติ
- กรมมลพิษ
- กรมอนามัยและสิ่งแวดล้อม
- กรมทางหลวง
- กรมอุตสาหกรรม

#### หน่วยงานภาคเอกชน

- บริษัทรับเหมาก่อสร้าง
- บริษัทออกแบบ
- บริษัทที่ปรึกษา

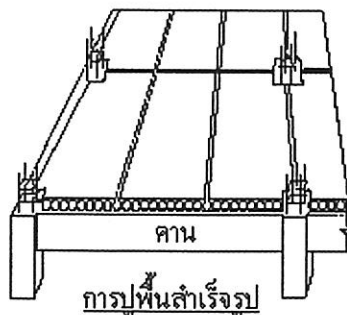


## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในองค์อาคาร

ระบบพื้นในองค์อาคารมีหลายชนิด เช่น พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก พื้นประกอบระหว่างคอนกรีตและเหล็ก พื้นคอนกรีตอัดแรงทั้งแบบดิ่งก่อนและดิ่งทีหลัง และพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหมายถึง ระบบพื้นที่ก่อสร้างโดยการนำแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบดิ่งเหล็กก่อนวางเรียงกันที่คานรองรับแล้วทำการเทคอนกรีตทับหน้า รูปที่ 2.1 แสดงการจัดเรียงแผ่นพื้นก่อนการเทคอนกรีตทับหน้า การจัดเรียงจะอยู่ในทิศทางตามยาวของแผ่นพื้น ดังนั้นจะมีแนวโน้มเป็นระบบพื้นทางเดียวมากกว่าระบบพื้นสองทาง และลักษณะของจุกรองรับยังมีความแข็งแรงน้อยกว่าระบบพื้นเทในที่มาก การวิเคราะห์ในเบื้องต้นจะพิจารณาจุกรองรับเป็นแบบง่าย (simple support) ระบบพื้นทางเดียวที่ความยาว 5 เมตร และมีจุกรองรับแบบง่ายตามมาตรฐานการออกแบบต้องมีความหนาอย่างน้อย 25 ซม. ( $L/20$ ) แต่สำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบท้องเรียบที่ความยาว 5 เมตร มีความหนา 5 ซม. และผู้ผลิตแนะนำให้เทคอนกรีตทับหน้าหนา 6 ซม. จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นว่าความหนาของระบบพื้นมีความต่างกัน 2 เท่าโดยประมาณ มวลของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจึงมีค่าน้อยกว่าพื้นหล่อในที่ประมาณ 2 เท่า นอกจากนี้การก่อสร้างยังสามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ต้องมีการตั้งแบบหล่อ เหตุผลเหล่านี้เป็นเหตุผลหลักในการตัดสินใจเลือกระบบพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้าง แต่ผลเสียที่ตามมาซึ่งมักจะถูกมองข้ามก็คือ ความสามารถในการต้านทานการสั่นสะเทือนน้อย เนื่องจากมวลของระบบค่อนข้างน้อย รวมถึงจุกรองรับค่อนข้างอ่อนแอเมื่อเทียบกับพื้นหล่อในที่ ทั้งนี้การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์ของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแสดงไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในองค์อาคาร

## 2. แรงพลวัตเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์

แรงพลวัตเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ มี 2 แบบ คือ แบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง โดยแบบต่อเนื่องจะเป็นกิจกรรมการเดิน และแบบไม่ต่อเนื่องได้แก่การวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ การเดินแอโรบิค เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้สนใจกิจกรรมแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของ load-time function ได้ดังรูปที่ 2.1 โดยสมการทางคณิตศาสตร์ (half-sine model) ใช้ semi-sinusoidal pulses สำหรับ 1 คาบได้ดังนี้

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot t / t_p) & \text{for } t \leq t_p \\ 0 & \text{for } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $F_p(t)$  = แรงขึ้นกับเวลา

$k_p$  =  $F_{p,\max}/G$  = dynamic impact factor

$F_{p,\max}$  = peak dynamic load

$G$  = น้ำหนักผู้ทำกิจกรรม (นิวตัน)

$t_p$  = ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น (contact duration)

$T_p$  = คาบของกิจกรรม ( $1/f_s$  = pace period)

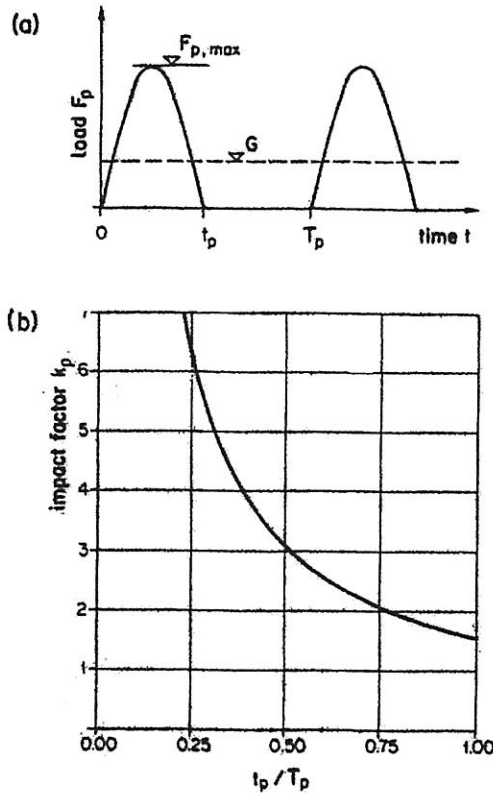
ค่า  $k_p$  ได้จากค่าคงที่จากการ integral ของ load-time function สำหรับ 1 คาบ ซึ่งต้องเท่ากับแรงกระทำขณะหยุดนิ่ง (static weight) ดังรูปที่ 2.2b แต่ละกิจกรรมจะมีค่าต่างๆ ในสมการต่างกัน โดยค่าที่เลือกแสดงดังตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3

## 3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Reiher and Meister (1946) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการรับรู้ของมนุษย์เนื่องจากการสั่นสะเทือน แบบ steady-state vertical vibration และ vibration generator ที่ใช้คือ MTS hydroelectric closed-loop ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบ Structural Dynamics Laboratory ของ Northwestern University โดยแบ่งการรับรู้ (Response Rating) ออกเป็น 5 ระดับคือ 1. Slightly perceptible 2. Distinctly perceptible 3. Strongly perceptible 4. Disturbing 5. Very disturbing ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.3 และได้ Mathematical Model ดังนี้

$$R = 6.82(FA)^{0.24}$$

โดย  $R$  คือ Response Rating  $F$  คือ ความถี่ หน่วยเป็นรอบต่อวินาที และ  $A$  คือ peak amplitude (displacement) หน่วยเป็นนิ้ว



รูปที่ 2.2 แรงเนื่องจากการกระแทกเข้าสำหรับกิจกรรมการวิ่ง และการกระโดด

(a) half-sine model (b) ตัวคูณการกระแทกและช่วงเวลาที่สัมผัสพื้น

(Bachmann and Ammann, 1987)

Wiss and Parmelee (1974) ทำการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ transient vibration และแบ่งการรับรู้ออกเป็น 5 ระดับเช่นเดียวกัน คือ 1. Imperceptible 2. Barely perceptible 3. Distinctly perceptible 4. Strongly perceptible 5. Severe การทดสอบเป็นการจำลองจาก one foot fall impact มีการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่าง ความถี่ peak amplitude (peak displacement) และเวลาในการสั่น ความหน่วง และได้ mathematical model ดังนี้

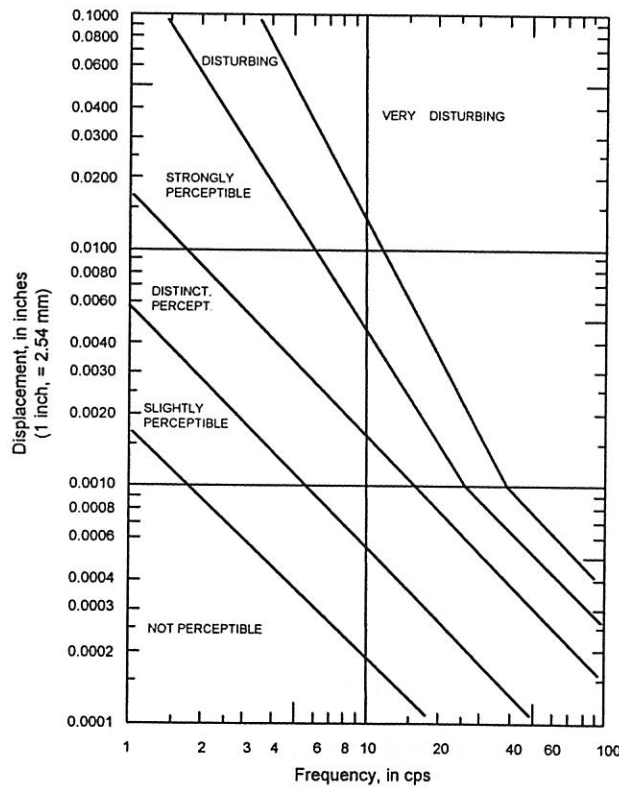
$$R = 5.08 \left( \frac{FA}{D^{0.217}} \right)^{0.265}$$

โดย  $R$ ,  $F$  และ  $A$  คือตัวแปรเดียวกับของ Reihner and Meister ส่วน  $D$  คือ Damping ratio

Murray (1981) ได้เสนอ Scale ใหม่ โดยได้ทดสอบกับตัวอย่าง พื้นคอนกรีตบนตงเหล็ก และ คานเหล็ก จำนวน 91 ตัวอย่าง ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะใช้คนหนักระหว่าง 170 – 190 lbs. ทำการ กระแทกเท้าลงพื้น แล้วจดบันทึกค่า amplitude (displacement) เริ่มต้น ( $A_0$ ) และ ความถี่ ( $f$ ) ได้ผล สรุปเป็น Scale ใหม่ ดังนี้

$$D \geq 3.5A_0f + 2.5$$

โดย  $D$  คือ percent of critical damping  $A_0$  คือ initial amplitude from a heel drop impact หน่วย นิ้ว  $f$  ได้คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบพื้น หน่วย เฮิรต์ (Hz) ถ้า  $D$  ไม่น้อยกว่า 5.5 - 6% ถือว่ายอมรับได้



รูปที่ 2.3 การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของมนุษย์

(Reiher and Meister ,1946)

Ellingwood and Tallin (1984) เสนอสูตรในการหาค่าความถี่ของระบบพื้นที่มีจุดรองรับแบบ ง่าย โดยใช้ค่าขีดจำกัดความเร่งในตารางที่ 2.1 ซึ่งได้จาก ANSI A58.1-1982 (ANSI : American National Standards Institute) แยกเป็น 2 กรณีคือ

กรณีพื้นอาคารรองรับกิจกรรมเข้าจังหวะลักษณะ Load เป็นแบบ sinusoidal ซึ่งมีความถี่  $f$

$$\ddot{x}_{\max} \approx (2\pi f)^2 \left( \frac{\alpha F_s}{k} \right) \frac{1}{\left| 1 - \left( \frac{f}{f_1} \right)^2 \right|}$$

โดยที่  $\ddot{x}$  คือ ความเร่ง ได้จากตารางที่ 2.2  $\alpha F_s$  คือ sinusoidal dynamic force หาได้จาก กราฟรูปที่ 2.4  $\frac{\alpha F_s}{k}$  คือ static deflection due to force โดย  $\alpha F_s$  ไม่ควรทำให้ค่าการโก่งตัวมีค่า เกิน 1 มม.  $f$  คือ frequency of rhythmic activity  $f_1$  คือ fundamental natural frequency of the floor กรณีพื้นอาคารรองรับ impulsive force

$$a_0 = \frac{2\pi f_1}{M} I_m$$

โดยที่  $M = 0.5\rho L$   $\rho = (W_D + pW_L)/g =$  the mass per unit length  $W_D, W_L =$  dead and live load per length  $p =$  the percentage of the nominal live load that actually participates in the dynamic motion  $I_m = 68 \text{ Ns}$   $a_0$  คือความเร่งได้จากตารางที่ 2.2

Allen, Rainer and Pernica (1985) เพิ่มเติมรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนของพื้นอาคารเมื่อใช้ในรองรับกิจกรรมเข้าจังหวะ ซึ่งเป็น dynamics load ในรูปแบบ sinusoidal ที่กล่าวถึงใน NBC 1985 (the National Building Code of Canada) โดย NBCC จะถูกนำมาใช้พิจารณาเมื่อพื้นอาคารที่ออกแบบมีความถี่  $< 6 \text{ Hz}$  ขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้ 1. เลือกชนิดของกิจกรรม ประมาณค่าความหนาแน่นของผู้ใช้แล้วหาค่า  $w_p$  โดยใช้ค่าแนะนำดังตารางที่ 2.3 2. เลือกค่าความถี่ของกิจกรรม ;  $f$  (ความถี่ของ dynamic force) และ dynamic load factor ;  $\alpha$  โดยดูได้จากตารางที่ 2.6 หรือจากข้อจำกัดอื่นที่เหมาะสม กรณีของ jumping exercise ให้พิจารณาทั้ง 1<sup>st</sup> harmonic และ 2<sup>nd</sup> harmonic แยกเป็น 2 กรณี 3. เลือกค่า acceptable limiting acceleration ( $a_0$ ) จากตารางที่ 2.4 หรือข้อจำกัดอื่นที่เหมาะสม ถ้าการสั่นสะเทือนไม่ได้เกิดที่ กึ่งกลางความยาว ให้คูณค่า acceleration criterion  $a_0$  ด้วย  $1/\sin(\pi x/L)$  4. ประมาณค่า น้ำหนักทั้งหมด ;  $w_t$  (เช่น dead load +  $w_p$ ) แล้วหาค่า lowest acceptable fundamental frequency ของพื้นจากสมการที่ 2.2 5. หาค่า  $f_0$  ของระบบพื้น โดยคือน้ำหนักพื้นและน้ำหนักอื่น ๆ ที่กระทำบนพื้นที่ทั้งหมด 6. ถ้า  $f_0$  จากขั้นตอนที่ 5 น้อยกว่าขั้นตอนที่ 4 ควรมีการเพิ่ม stiffener ให้กับโครงสร้าง หรือ เปลี่ยนตำแหน่งของกิจกรรม หรือ ควบคุมกิจกรรม เช่น ความถี่ หรือ จำนวนผู้ใช้กิจกรรม

$$f_0 \geq f \sqrt{1 + \frac{1.3\alpha w_p}{a_0/g w_t}} \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้นสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์  
(NBBC 1985)

| Activity or occupancy  | Limiting peak Acceleration $a_p/g$ |
|--|------------------------------------|
| Threshold of perception  | 0.001-0.002                        |
| Offices and residences (day time)  | 0.005                              |
| Dancing and dining   | 0.02                               |
| Physical exercise, sports, and lively concerts (gymnasias, arenas, stadia) | 0.05                               |

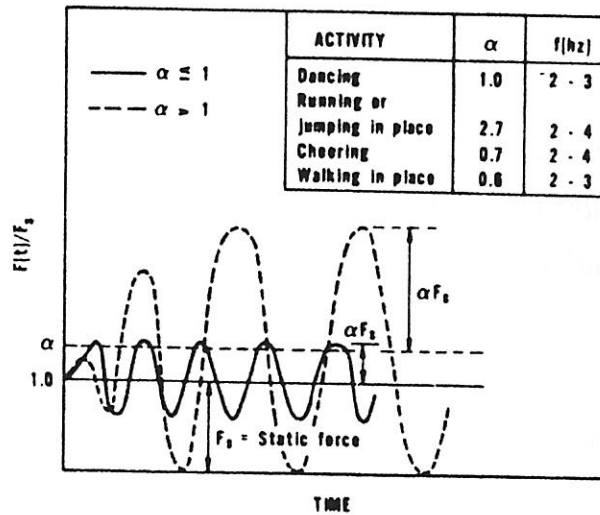
ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดความเร่งจำแนกตามการใช้งานอาคาร (ANSI A58.1-1982)

| Occupancy / activity               | ACCELERATION LIMIT ( g )                     |                      |                   |
|------------------------------------|--|----------------------|-------------------|
|                                    | Frequent<br>Steady-state RMS<br>acceleration | Infrequent Transient |                   |
|                                    |  | Damping              | Peak acceleration |
| Hospitals                          | 0.002  | 3                    | 0.005             |
| Laboratories                       |  | 6                    | 0.01              |
|                                    |  | 12                   | 0.02              |
| Hotels and multi-family apartments | 0.005  | 3                    | 0.02              |
| Offices                            |  | 6                    | 0.05              |
| School rooms                       |  | 12                   | 0.10              |
| Libraries                          | 0.01   |                      |                   |
| Dining rooms and restaurants       |  | 3                    | 0.05              |
| Assembly area, theaters            |  | 6                    | 0.10              |
| One- and two-family dwellings      | 0.02   | 12                   | 0.20              |
| Stores and shopping centers        |  | 3                    | 0.05              |
| Manufacturing, warehouses          |  | 6                    | 0.10              |
| Walkways, stairs and exitways      | 0.05   | 12                   | 0.20              |
| Dance halls and ballrooms          |  |                      |                   |
| Recreational areas                 |  |                      |                   |
| Gymnasiums                         |  |                      | N.A.              |
| Stadiums and arena bleachers       |  |                      |                   |
| Special assembly structures        |  |                      |                   |

Tolaymat (1988) ได้ทำการศึกษาตัวอย่างและผลการทดสอบของ Murray (1981) และได้เสนอสูตร scale เพิ่มเติมดังนี้

$$\frac{A_2}{A_1} \leq 1.15 \text{ โดย } A_{\max} \leq 0.05 \text{ นิ้ว}$$

และถ้า  $A_{\max} \cdot F \leq 0.05$  สามารถใช้สูตรของ Murray ได้



รูปที่ 2.4 แรงเนื่องจากการกิจกรรมเข้าจังหวะ (Allen, 1981)

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรต่างๆ ที่แนะนำในการออกแบบสำหรับกิจกรรมเข้าจังหวะ (Allen, 1985)

| Activity                       | Forcing frequency<br>$f$ , Hz | Weight of Participants<br>$w_p$ , kPa | Dynamic load Factor <sup>+</sup><br>$\alpha$ | Dynamic load<br>$\alpha w_p$ , kPa |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| Dancing                        | 1.5-3                         | 0.6 (2.5 m <sup>2</sup> /couple)      | 0.5  | 0.3                                |
| Lively concert or sports event | 1.5-3                         | 1.5 (0.5 m <sup>2</sup> /person)      | 0.25   | 0.4                                |
| Jumping exercises              | 1.5-3                         | 0.4 (2 m <sup>2</sup> /person)        | 1.5  | 0.6                                |
| (second harmonic)              | 3-6                           | 0.4 (2 m <sup>2</sup> /person)        | 0.25   | 0.1                                |

\*Density of participants is for commonly encountered conditions. For special events the density of participants can be greater.

+ Values of  $\alpha$  are based on commonly encountered events involving a minimum of about 20 participants. Values of  $\alpha$  should be increased for well-coordinated events (e.g., jump dances) or for fewer than 20 participants.

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้น สำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์ (Allen ,1985)

| Activity or occupancy   | Limiting peak acceleration ( $a_p/g$ ) |
|---|--|
| Threshold of perception   | 0.001-0.002                            |
| Offices and residences (day time)   | 0.005                                  |
| Dancing and dining  | 0.02                                   |
| Physical exercise, sports, and lively concerts (gymnasia, arenas, stadia) | 0.05                                   |

Allen (1990) ได้ทำการปรับปรุง NBC1985 code สำหรับการออกแบบพื้นเพื่อรับแรงกระทำ เนื่องจากการกิจกรรมเข้าจังหวะ ดังนี้ 1. ความเร่งจำกัดที่ใช้ในกิจกรรมแบบผสมเช่น กิจกรรมรับประทานอาหารและเดินรำ ที่อยู่รวมกัน ควรใช้ค่า 2%g 2. สำหรับแรงกระทำที่คิดเป็นแบบ sinusoidal harmonic ให้คิดผลถึง harmonic ที่ 3  $\sum_{i=1}^3 \alpha_i w_p \sin 2\pi i f t$  โดย  $\alpha_1 = 1.5$   $\alpha_2 = 0.6$   $\alpha_3 = 0.1$  และค่าความถี่มากที่สุดสำหรับการกระโดดอยู่ที่  $f = 2.75$  Hz และ  $w_p$  มากที่สุด = 0.2 kPa 3. การตอบสนองของพื้นเป็นไปตามสมการ (2.3) 4. ค่าความเร่งมากที่สุดสามารถหาได้จากสมการ(2.4) 5. การออกแบบพื้นกรณีคิดแรงกระทำที่ 3 harmonic ใช้สมการ(2.5) 6. การประมาณค่าความถี่ธรรมชาติใช้สมการ (2.6a) และ (2.6b)

$$\frac{a_i}{g} = \frac{1.3\alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_0}{if}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[2\beta \frac{f_0}{if}\right]^2}} \quad (2.3)$$

$$a_m = (a_1^{1.5} + a_2^{1.5} + a_3^{1.5})^{1/1.5} \quad (2.4)$$

$$f_0 \geq if \sqrt{1 + \frac{2}{a_0/g} \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (2.5)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{stiffness}}{\text{mass}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (2.6a)$$

$$\Delta = \frac{(\Delta_B + \Delta_G)}{1.3} + \Delta_S \quad (2.6b)$$

โดย  $\Delta_B$  คือ ระยะเวลาโค้งของดงตัวเนื่องจากแรงค้ำและแรงเฉือน  $\Delta_G$  คือ ระยะเวลาโค้งของคานหลักตัวเนื่องจากแรงค้ำและแรงเฉือน  $\Delta_S$  คือ ระยะเวลาทรุดตัวของเสาหรือกำแพงรับพื้นและคาน



Craig M. Favor and Thomas M. Murray (1997) ต้องการที่จะหาวิธีที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบพื้นเดิมที่มีอยู่แล้วเพื่อใช้ในกิจกรรมการเดินแอโรบิกหรือกิจกรรมเข้าจังหวะ จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบพื้นคอนกรีตลอยสำหรับการเดินแอโรบิก เพื่อป้องกันการส่งถ่ายแรงและการสั่นสะเทือนไปยังพื้นอาคารเดิม โดยพื้นคอนกรีตนี้จะติดตั้งอยู่บนสปริงความดัน แรงที่กระทำกับพื้นจะเป็นแรงที่เกิดจากการกระแทกเท้า (heel-drop excitation) การทดสอบจะนำไปสู่การหาคุณสมบัติการสั่นสะเทือนของพื้น และการส่งถ่ายแรงไปยังจตุรรองรับของระบบพื้นเปรียบ เทียบกับการตอบสนองของพื้นลอยต่อพื้นเดิมที่มีอยู่แล้ว จากการศึกษาพบว่าการติดตั้งพื้นลอยนี้สามารถช่วยลดความสั่นสะเทือนและแรงที่ส่งถ่ายไปยังจตุรรองรับ และสามารถนำไปใช้ได้จริง

Brownjohn J. M. W. and Zheng X. (2001) ศึกษาเรื่องกลุ่มคนกับการสั่นสะเทือนของพื้นขนาด 22.0x20.4 ม. พบว่าขณะที่ไม่มีคนอยู่พื้นมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.06 Hz. เมื่อมีกลุ่มคนอยู่ ความถี่ลดลง และค่าความหน่วงเพิ่มมากขึ้นจาก 3.6% เป็น 12-16% กลุ่มคนขณะนั่งมีค่าความหน่วงมากกว่าขณะยืน

กิตติศักดิ์ กุลธิยาวิชัย (2545) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตช่วงยาว เนื่องจากการเดิน แผ่นพื้นเป็นพื้นคอนกรีตขนาด 9.50x9.50 ม. ในการวิเคราะห์ใช้วิธี Finite element โดยแบ่งพื้นออกเป็น 256 element 289 node ในการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงค่า ความหนา ดังนี้ 0.24 0.26 และ 0.28 ม. Damping ratio 0% 1% 2% และ 3% ความถี่ของการเดิน 2 ค่าคือ 2 Hz และ 2.77 Hz ลักษณะของจตุรรองรับ 2 แบบ คือแบบ fixed supported และแบบ simply supported โปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ JAnalyser ผลการวิเคราะห์คือ ที่ความหนาน้อย damping ratio ต่ำ และจตุรรองรับเป็นแบบ simply supported จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและความเร่งสูงกว่า ที่ความหนามาก damping ratio สูง และจตุรรองรับเป็นแบบ fixed supported

พรพิไล กิติรัตน์ตระการ (2546) ได้ทำการศึกษาการสั่นสะเทือนในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยในการศึกษาได้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นพร้อมทั้งวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นเมื่อรับแรงกระทำได้ผลว่าระบบพื้นบางค่ามีความเร่งสูงสุดมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดใน National Building Code of Canada 1995 (NBCC 1995)

#### 4. แนวทางการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาแรงกระทำเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ที่เลือกจะเป็นแรงเนื่องจากการออกกำลังกายซึ่งต้องมีการกระโดด เป็นแรงแบบไม่ต่อเนื่องมีช่วงเวลาที่แรงเป็น 0 ขณะยกเท้าขึ้น ในการวิเคราะห์จะพิจารณาการกระแทกเท้าเพียง 1 ครั้ง โดย คน 1 คน หนัก 40 – 90 กิโลกรัม และ

การรับรู้การสั่นสะเทือนจะอยู่ในช่วงพื้นเดียวกัน กิจกรรมที่เลือกมี 3 กิจกรรมคือ การวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ และการเดินแอโรบิก และสำหรับเกณฑ์ในการรับรู้ของมนุษย์นั้นขึ้นกับการพิจารณาของผู้สนใจตามความเหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ National Building Code of Canada 1995 (NBCC1995) ทั้งนี้เนื่องจากมาตรฐานนี้ได้รวบรวมผลงานวิจัยและพิจารณาเกณฑ์อื่นๆ เกี่ยวกับเรื่องการสั่นสะเทือนของพื้นและการรับรู้ของมนุษย์ไว้แล้วสรุปออกมาเป็นมาตรฐาน ดังนั้นมาตรฐานนี้จึงมีความน่าเชื่อถือพอสมควร ระบบพื้นที่นำมาวิเคราะห์เลือกใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศไทยโดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรตลอดค้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 300 กก./ตร.ม (หลังจากที่เทคอนกรีตทับหน้าแล้ว) เนื่องจากเป็นค่าที่นิยมใช้ในการออกแบบพื้นอาคารโดยทั่วไป ในการวิเคราะห์พื้นคอนกรีตอัดแรงนี้เมื่อเทคอนกรีตทับหน้าแล้วจะวิเคราะห์เป็นหน้าตัดประกอบ (composite section) วิเคราะห์โดยใช้หน้าตัดแปลง วิเคราะห์เป็นพื้นทางเดียว (one way slab) พิจารณาแบบระดับความเสรีขึ้นเดียว (generalized single degree of freedom : generalized SDOF) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเดียว และแรงกระทำกระทำที่กึ่งกลางแผ่นพื้น จุดรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบง่าย (simple support) จากค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ รูปแบบของจุดรองรับสำหรับวิธีในการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและมีแรงภายนอกใดๆ มากระทำ โดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเอล (Duhamel integral method) และช่วงที่ยกทำขึ้นเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบแบบอิสระภายใต้ความหน่วง ในส่วนนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ต้องการดูค่าความเร่งสูงสุดเป็นหลัก ต่อจากนั้นทำการทดสอบกับพื้นตัวอย่างทดสอบ และนำผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและจากการทดสอบเปรียบเทียบกัน ต่อจากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับกับเกณฑ์มาตรฐานเพื่อดูว่าพื้นตัวอย่างสามารถใช้ได้กับอาคารชนิดใดได้บ้าง ทั้งนี้หากพื้นมีการสั่นสะเทือนอยู่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานในช่วงใดแสดงว่าการสั่นสะเทือนมีมากเกินไปทำให้เกิดความรำคาญกับผู้ใช้ แต่ความรำคาญนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีกิจกรรมบางกิจกรรมเท่านั้น ในการเลือกใช้พื้นที่ขึ้นกับการพิจารณาของผู้ออกแบบ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ภาพรวมของบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการวิจัย วิธีการปฏิบัติการทดสอบ วิธีการวิเคราะห์ ตัวแปรต่างๆ ข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักดังนี้ 1. ขั้นตอนในการวิจัยโดยภาพรวม 2. การดำเนินงานวิจัยเชิงทฤษฎี 3. การดำเนินงานวิจัยเชิงทดลอง 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง และ 5. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน

#### 1. ขั้นตอนในการวิจัยโดยภาพรวม

การวิจัยประกอบด้วยการวิจัยเชิงทฤษฎีและการวิจัยเชิงทดลอง ทั้งนี้เพื่อนำผลทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันให้เกิดความถูกต้องกับการวิเคราะห์มากขึ้น ต่อจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานเพื่อตรวจสอบดูว่าระบบพื้นที่ทำการวิจัยนี้ควรมีการปรับปรุงค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์เพื่อดำเนินงานการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นหรือไม่ สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมแสดงดังรูปที่ 3.1

#### 2. การดำเนินงานวิจัยเชิงทฤษฎี

##### 2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนแรกคือการเลือกตัวอย่างแผ่นพื้น พร้อมทั้งเลือกกิจกรรมของมนุษย์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิจัย ต่อจากนั้นทำการสร้างแบบจำลองของระบบพื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นตัวอย่าง แล้วทำการวิเคราะห์การสันสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ที่เลือกไว้ รายละเอียดของขั้นตอนแต่ละส่วนแสดงในหัวข้อต่อไป

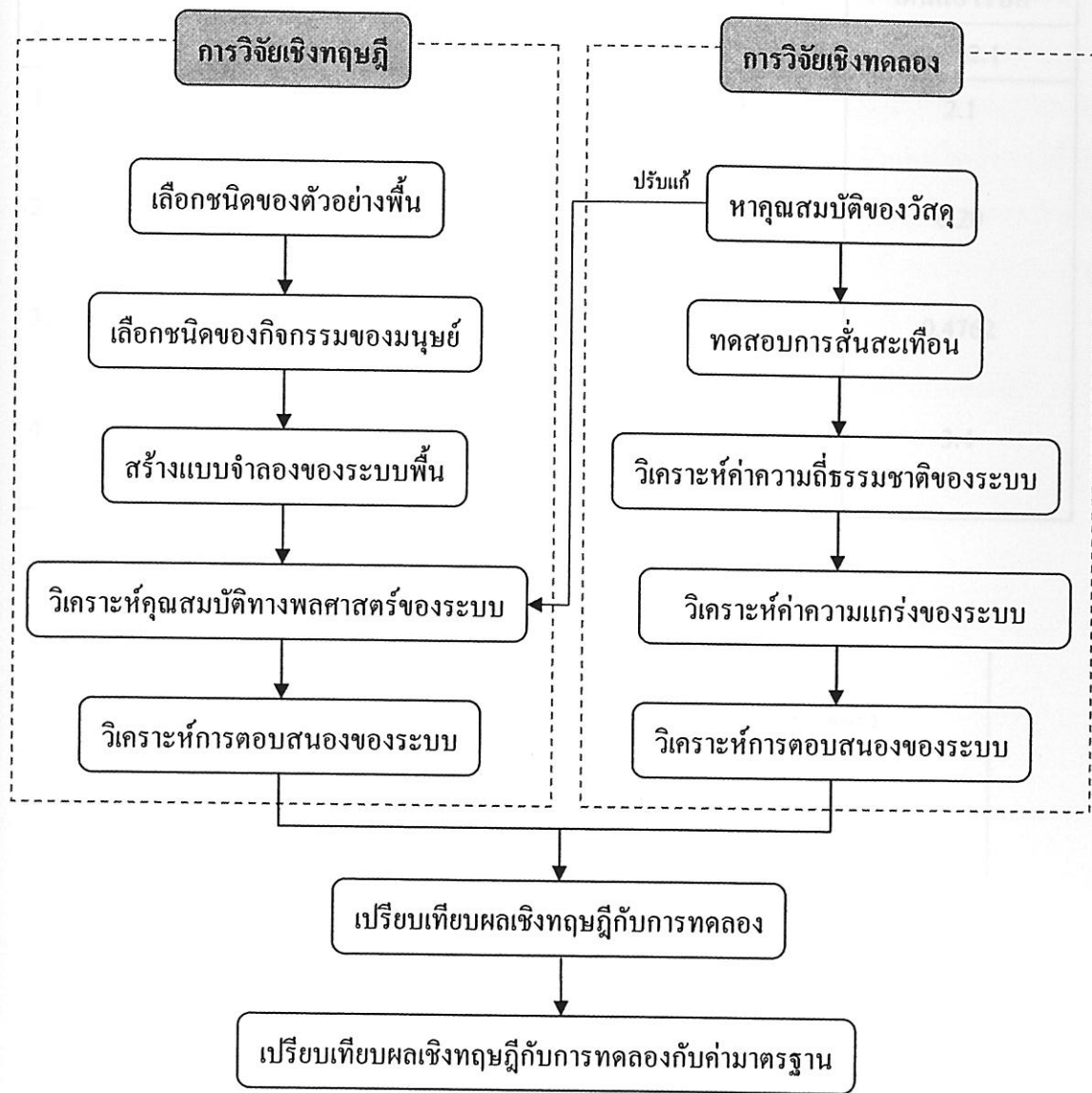
##### 2.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

แผ่นพื้นตัวอย่างที่เลือกมาใช้ในการวิจัยคือ แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ขนาดหน้าตัดกว้าง 35 ซม. หนา 5 ซม. ยาว 3 4 และ 5 เมตร

##### 2.3 ชนิดของกิจกรรมของมนุษย์ที่เลือกใช้ในการวิจัย

กิจกรรมของมนุษย์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของแรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 กิจกรรมคือ 1. การเดินแอโรบิก 2. การวิ่งเหยาะๆ และ 3. การวิ่งธรรมดา น้ำหนักของผู้ทำกิจกรรมอยู่ระหว่าง 40 – 90 กิโลกรัม โดยแต่ละกิจกรรมมีฟังก์ชันของแรงเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ในบทที่ 2 ความถี่ของกิจกรรม ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น ช่วงการก้าว และตัวคูณ

กระแทกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และตัวอย่างน้ำหนักผู้ทำกิจกรรมเท่ากับ 60 กิโลกรัมที่กิจกรรมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.2

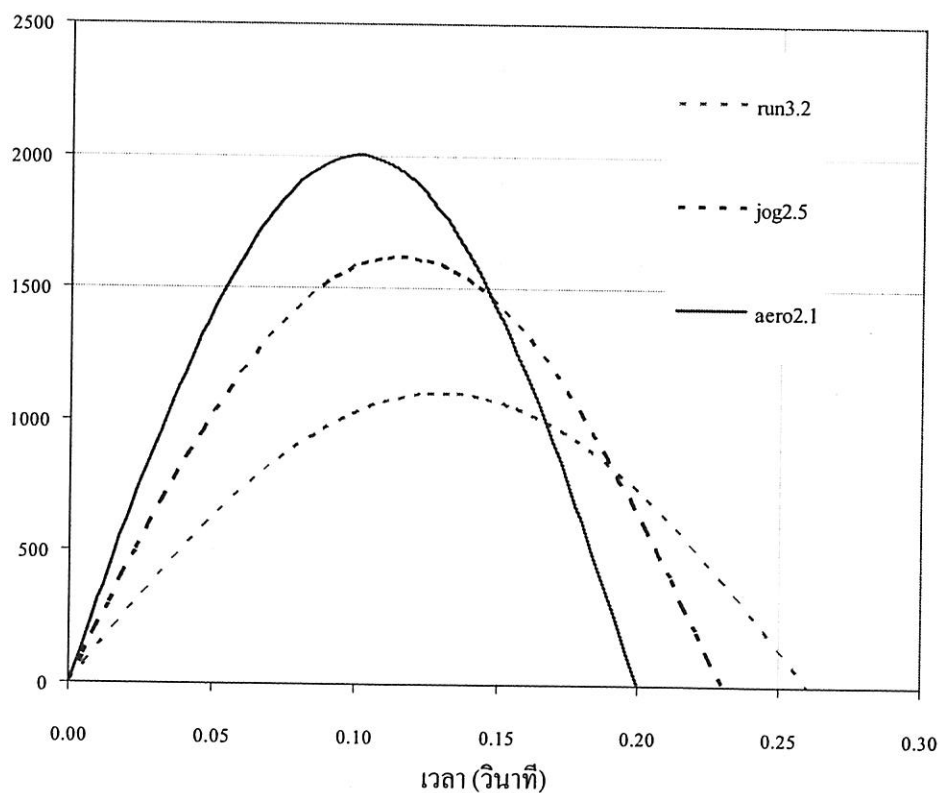


รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 ชื่อ และลักษณะของแรงกระทำเนื่องจากการกระโดด

| ชื่อ และชนิด<br>ข้อมูล  | กิจกรรม |            |             |
|---|---------|------------|-------------|
|   | วิ่ง    | วิ่งเหยาะๆ | เดินแอโรบิค |
|   | run3.2  | jog2.5     | aero2.1     |
| 1. ความถี่ของกิจกรรม, เฮิร์ต<br>(frequency : $f_s$ )                | 3.2     | 2.5        | 2.1         |
| 2. ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น, วินาที<br>(contact duration : $t_p$ ) | 0.26    | 0.23       | 0.20        |
| 3. ช่วงการก้าว, วินาที<br>(pace period : $T_p$ )                    | 0.3125  | 0.40       | 0.4762      |
| 4. ตัวคูณการกระแทก<br>(dynamic impact factor : $k_p$ )              | 1.875   | 2.75       | 3.4         |

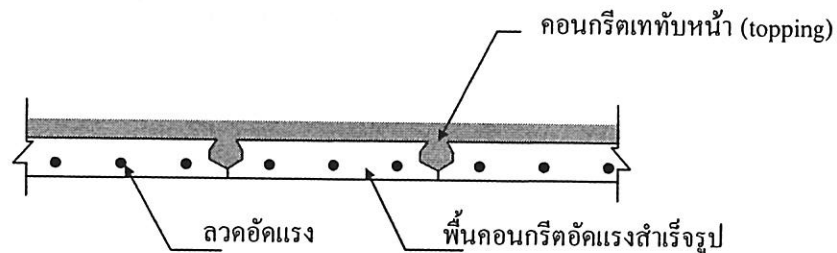
แรง (นิวตัน)



รูปที่ 3.2 แรงเนื่องจากการกระโดดโดยพิจารณาการกระแทกเท้า 1 ครั้ง

## 2.4 แบบจำลองระบบพื้นตัวอย่าง

ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ทำกรวิเคราะห์ที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ระบบพื้นนี้จะพิจารณาเป็นหน้าตัดประกอบ (composite section) การวิเคราะห์โครงสร้างคอมโพสิตภายใต้สถานะการใช้งานจะสมมติว่าโครงสร้างคอมโพสิตมีพฤติกรรมยึดหยุ่น การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรงตลอดหน้าตัด หน่วยแรงดึงและอัดของคอนกรีตเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับหน่วยการยึดหดตัวตามกฎของฮุก ในการวิเคราะห์หน้าตัดคอมโพสิตจะใช้วิธีของหน้าตัดแปลง (transformed section) โดยแปลงขนาดของหน้าตัดหรือความกว้างของหน้าตัดนิยมแปลงหน้าตัดของคอนกรีตในส่วนของพื้นที่หลัง (คอนกรีตเททับหน้า) เทียบเท่ากับส่วนของคอนกรีตอัดแรง และพื้นที่ของลวดอัดแรงเป็นคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ 3.3 รูปแสดงหน้าตัดของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

$$b_{tr} = b_c \frac{(E_c)_{slab}}{(E_c)_{precast}} = b_c \cdot n_c$$

$$A_{tr} = \frac{E_{wire}}{(E_c)_{precast}} A_{wire} = n_w \cdot A_{wire}$$

- โดย  $b_{tr}$  คือ ความกว้างเทียบเท่าของคอนกรีตเททับหน้า
- $(E_c)_{slab}$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเททับหน้า
- $(E_c)_{precast}$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ
- $n_c$  คือ อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเททับหน้าต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอัดแรง
- $b_c$  คือ ความกว้างประสิทธิภาพเดิมของคอนกรีตพื้นที่หลัง
- $A_{tr}$  คือ พื้นที่เทียบเท่าของลวดอัดแรง
- $E_{wire}$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง
- $A_{wire}$  คือ พื้นที่ของลวดอัดแรง

$n_w$  คือ อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรงต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอัดแรง

แบบจำลองมีข้อจำกัดและสมมติฐานดังนี้

- คอนกรีต และ เหล็กที่ใช้วิเคราะห์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (homogenous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic)
- พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เมื่อเทคอนกรีตทับหน้าแล้วอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (linear elastic) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law)
- ระยะสั้นขึ้นลงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย (small displacement)
- ผลของแรงเฉือน (shear deformation) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวตั้งมีค่าน้อยมาก
- พฤติกรรมของพื้นเป็นแบบพื้นทางเดียว (one-way slab)
- ขณะที่ยังไม่มีการเสริมเหล็กมีลักษณะของจุดรองรับเป็นแบบง่าย (simple support)
- การยึดของเหล็กเสริมที่ปลายแผ่นพื้นและคานมีความแข็งแรงมากพอจะไม่เกิดการหลุดออกจากกัน
- การแตกร้าวของคอนกรีตที่กึ่งกลางพื้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ปลายแผ่นพื้น
- คานมีความกว้างเพียงพอที่จะสามารถวางแผ่นพื้นและทำการเสริมเหล็กได้ (ความกว้างของคานไม่น้อยกว่า 20 ซม.)
- การสั่นสะเทือนของพื้นจะคิดผลเนื่องจากกิจกรรมของคน 1 คน กระแทกเท้าลงพื้น 1 ครั้ง กระทำกิจกรรมที่กึ่งกลางพื้น (mid span)
- การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับแรงกระทำ

## 2.5 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นตัวอย่าง

สมการการเคลื่อนที่ของระบบเป็นไปตามสมการที่ 3.1 ประกอบด้วยคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบคือ มวล ( $m$ ) ความหน่วง ( $c$ ) และความแกร่ง ( $k$ ) ตัวแปรเกี่ยวกับการเคลื่อนที่คือ ความเร่ง ( $\ddot{Z}(t)$ ) ความเร็ว ( $\dot{Z}(t)$ ) และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ( $Z(t)$ ) และตัวแปรของแรงภายนอก  $P_{eff}(t)$  โดยสมการนี้สร้างจากแบบจำลองของระบบดังรูปที่ 3.4

$$m \ddot{Z}(t) + c \dot{Z}(t) + k Z(t) + k_c Z(t) = P_{eff}(t) \quad (3.1)$$

$$\text{โดย } m^* = \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx = \text{generalized mass} \quad (3.1a)$$

$$c^* = a_1 \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx = \text{generalized damping} \quad (3.1b)$$

$$k^* = \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx = \text{generalized flexural stiffness} \quad (3.1c)$$

$$k_G^* = N \int_0^L \psi'(x)^2 dx = \text{generalized geometric stiffness} \quad (3.1d)$$

$$\begin{aligned} p_{eff}^* &= \int_0^L p_{eff}(x,t) \psi(x) dx - Ne_e \int_0^L \psi''(x) dx \\ &= \text{generalized effective load} \end{aligned} \quad (3.1e)$$

จัดสมการที่ (3.1) ใหม่โดยการรวม 2 stiffness เข้าด้วยกันจะได้

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = p_{eff}^*(t) \quad (3.2)$$

ดังนั้น

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = \text{combined generalized stiffness} \quad (3.2a)$$

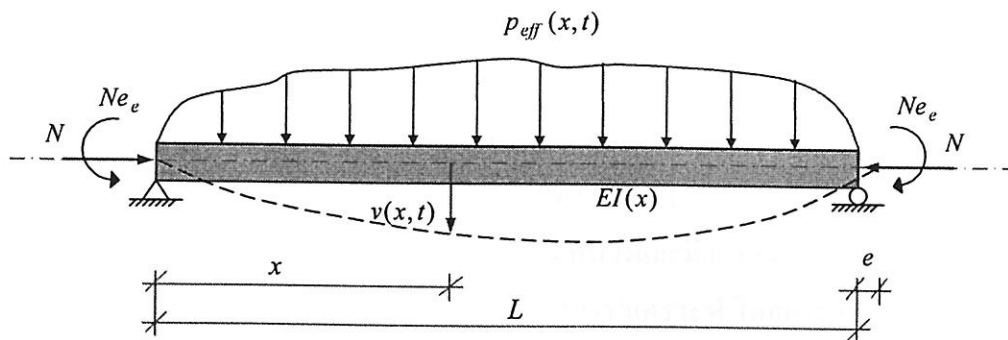
จากพรพิไล กิติรัตน์ตระการ (2546) ได้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ดังสมการต่อไปนี้

$$m^* = \frac{1}{2} \bar{m} L$$

$$k^* = EI \frac{\pi^4}{2L^3}$$

$$k_G^* = N \frac{\pi^2}{L}$$

$$p_{eff}^* = p_{eff}(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) + Ne_e \frac{\pi}{L} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$



รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบพื่น



ค่าสัดส่วนความหน่วงของพื้คอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.03 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าสัดส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.03 และค่าความถี่ธรรมชาติของระบบสามารถหาได้จากสมการ  $\omega^2 = \frac{\bar{k}^*}{m^*}$  โดย  $\omega$  คือค่าความถี่ธรรมชาติ หน่วยเรเดียนต่อวินาที

## 2.6 การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้ตัวอย่าง

การตอบสนองของระบบจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ 1. ช่วงที่มีแรงกระทำ และ 2. ช่วงที่ยกเท้าขึ้น

### 2.6.1 การตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและไม่มีแรงภายนอกกระทำ

รูปที่ 3.5 แสดงการตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและไม่มีแรงภายนอกกระทำ จากสมการการเคลื่อนที่ของระบบ สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$\ddot{Z}(t) + 2\xi\omega\dot{Z}(t) + \omega^2 Z(t) = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\xi = \frac{c^*}{c_c} = \frac{c^*}{2m\omega}$  = สัดส่วนความหน่วง (Damping ratio) และ  $c_c$  คือ ค่าความหน่วงวิกฤติ

โครงสร้างอาคารโดยทั่วไปมีค่า  $\xi < 1$  (underdamped) ดังนั้นจึงพิจารณาค่า  $\xi < 1$  จะได้การตอบสนองของระบบดังสมการ

$$Z(t) = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad (3.3)$$

แทนค่าเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t = 0$  คือ  $Z(0)$  และ  $\dot{Z}(0)$  ลงในสมการ (3.28) จะได้  $A = \left[ \frac{\dot{Z}(0) + \xi\omega Z(0)}{\omega_D} \right]$  และ  $B = Z(0)$  ดังนั้น จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามเวลา  $Z(t)$  ดังนี้

$$Z(t) = e^{-\xi\omega t} \rho \cos(\omega_D t - \theta) \quad (3.4)$$

โดย  $\rho = \left\{ \left[ \frac{\dot{Z}(0) + Z(0)\xi\omega}{\omega_D} \right]^2 + Z^2(0) \right\}^{\frac{1}{2}}$  และ  $\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\dot{Z}(0) + Z(0)\xi\omega}{\omega_D Z(0)} \right]$

### 2.6.2 การตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและมีแรงภายนอกกระทำ

นำวิธีอินทิกรัลของคูซามิตสึมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยการแบ่งแรงกระทำออกเป็นส่วนย่อยในลักษณะของอิมพัลส์ ดังรูปที่ 3.6 และการตอบสนองรวมของระบบคือการรวมการตอบสนองของแรงกระทำแต่ละส่วนย่อย ดังรูป 3.6 ข เข้าด้วยกัน

จากรูปที่ 3.6  $\tau$  คือ เวลาในขณะที่อิมพัลส์ย่อย  $p(\tau)d\tau$  เริ่มกระทำ และ  $t$  คือ เวลาที่ต้องการทราบขนาดของการตอบสนอง  $dZ$  และ  $p(\tau)$  เป็นความกว้างและความสูงของอิมพัลส์ ดังนั้นอิมพัลส์ย่อยจะมีขนาดเท่ากับ  $p(\tau)d\tau$  การตอบสนองของระบบโครงสร้างขณะที่มีอิมพัลส์ย่อยกระทำโดยมีค่า  $\xi < 1$  คือ

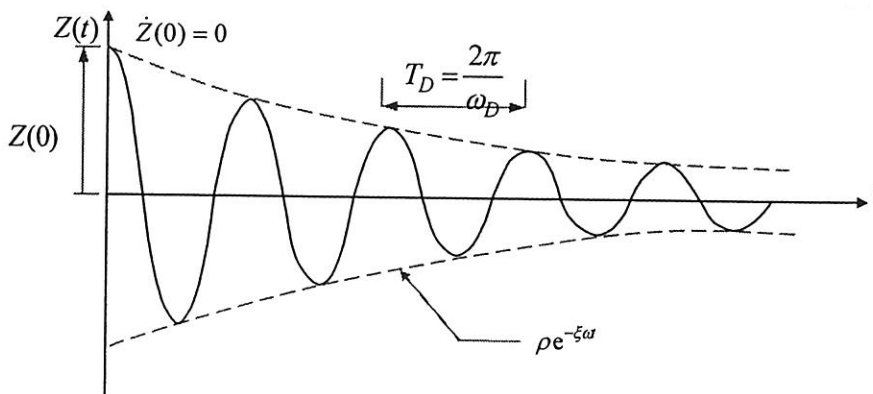
$$dZ(t) = p(\tau)d\tau \frac{1}{m \omega_D} e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t - \tau) = \frac{1}{m \omega_D} p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \quad (3.5)$$

ดังนั้น การตอบสนองรวมของระบบในขณะที่มีอิมพัลส์ย่อยทั้งหมดกระทำคือ

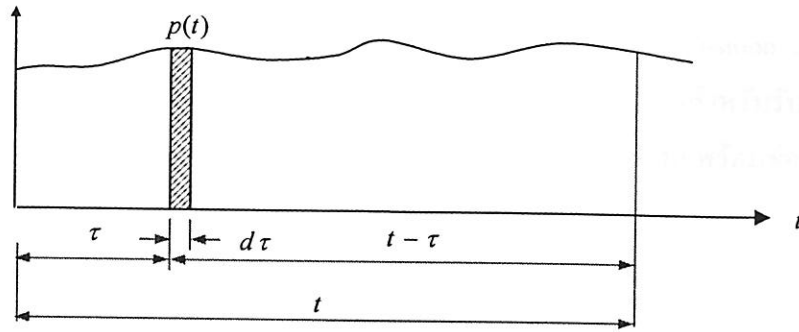
$$\begin{aligned} \int dZ(t) &= \int \frac{1}{m \omega_D} p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \\ Z(t) &= \frac{1}{m \omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (3.6)$$

แทนค่าเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t = 0$  คือ  $Z(0)$  และ  $\dot{Z}(0)$  ลงในสมการ (3.28) จะได้

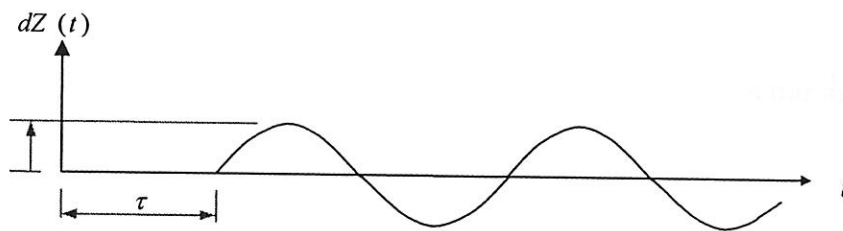
$$Z(t) = Z(0)e^{-\xi\omega t} \cos \omega_D t + \frac{1}{\omega_D} [\dot{Z}(0) + \xi\omega Z(0)] e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D t + \frac{1}{m \omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 การตอบสนองเนื่องจากอิมพัลส์ (ก) พิจารณาแรงกระทำใดๆ  $p(\tau)$  ช่วงเวลา  $d\tau$   
(ข) การตอบสนองของแรง  $p(\tau)$

### 3. การดำเนินงานวิจัยเชิงทดลอง

ขั้นตอนการวิจัยโดยภาพรวมแสดงดังรูปที่ 3.1 รายละเอียดในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการในการปฏิบัติโดยละเอียดดังนี้

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วย

3.1.1 การจัดเตรียมคานรองรับแผ่นพื้น ขนาดของคานต้องมีพื้นที่รองรับแผ่นพื้นจำนวน 3 แผ่น ขนาดที่ใช้มีความกว้าง 20 ซม. สูง 20 – 30 ซม. ยาว 1.20 เมตร

3.1.2 การจัดเรียงแผ่นพื้น นำแผ่นพื้นจำนวน 3 แผ่นวางเรียงบนคานที่จัดเตรียมไว้ โดยแผ่นพื้นต้องวางอยู่บนคานข้างละไม่น้อยกว่า 5 ซม.

3.1.3 การเทคอนกรีตทับหน้า ตัวอย่างความยาว 3 และ 4 เมตร เทหนา 5 ซม. ตัวอย่าง 5 เมตร เทหนา 6 ซม. เก็บตัวอย่างลูกปูนสำหรับทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 ซม. ที่ 28 วัน จำนวน 9 ตัวอย่าง

ขั้นตอนโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

#### 3.2 อุปกรณ์ การติดตั้งอุปกรณ์ และการตรวจวัด รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2

##### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (accelerometer sensor) จำนวน 3 ตัว ยี่ห้อ Crossbow LP series CXL04M3 ± 4g

2. อุปกรณ์แปลงสัญญาณ analog/digital (Data Acquisition : DAQ) ยี่ห้อ National Instrument รุ่น 6020E พร้อมคอมพิวเตอร์ notebook ซึ่งลงโปรแกรมสำหรับรับข้อมูลแล้ว

3. อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรงให้กับอุปกรณ์ตรวจวัด พร้อมช่องเสียบเปลี่ยนหัวสายสัญญาณเป็น BNC

4. เครื่องปล่อยแรงกระแทกพร้อมค้อนน้ำหนัก

### 3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และการตรวจวัด

1. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ผิวบนของคอนกรีตเททับหน้า 3 จุด ดังนี้ ที่ระยะ 1/4 1/2 และ 3/4 ของความยาวพื้น โดยนับจากด้านใดด้านหนึ่ง

2. ต่อสายไฟของอุปกรณ์ตรวจวัดเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟ และต่อสายสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (DAQ)

3. ต่อเครื่องแปลงสัญญาณ (DAQ) เข้ากับ notebook

4. จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ตรวจวัด เปิดเครื่องแปลงสัญญาณ (DAQ) พร้อมทั้งเปิดโปรแกรมสำหรับบันทึกข้อมูล ตั้งค่าการเก็บข้อมูลทุก 1/100 วินาที

5. ติดตั้งค้อนน้ำหนักกับเครื่องปล่อยแรงกระแทก

6. ปล่อยค้อนน้ำหนัก บันทึกผลการสั่นสะเทือน

7. ทดลองขั้นตอนที่ 5-6 ใหม่ โดยเปลี่ยนขนาดของค้อนน้ำหนักจนกระทั่ง

ครบ

8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 – 7 ใหม่ โดยเปลี่ยนแผ่นพื้นที่ความยาวอื่นจนครบ

3.3 การเก็บข้อมูล ทำควบคู่กับหัวข้อ 3.1.3 และ 3.2.2 ตัวอย่างตารางบันทึกข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก.3

3.3.1 ขนาดของตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความหนา

3.3.2 คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ กำลังอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตรูปทรงกระบอก 15 x 30 ซม. ของคอนกรีตเททับหน้า

3.3.3 ข้อมูลการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการปล่อยแรงกระแทก

3.3.4 สัญญาณข้อมูลขณะทำการทดสอบ ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.4

### 3.4 การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นตัวอย่าง

3.4.1 ปรับปรุงข้อมูลใหม่โดยใช้ข้อมูลความกว้าง ความหนา และความยาว ที่ได้จากข้อ 3.3.1 และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเททับหน้าที่ได้จากข้อ 3.3.2 นำไปวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติใหม่ โดยวิธีการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี ในหัวข้อ 2.5

3.4.2 แปลงสัญญาณข้อมูลที่วัดได้เป็นค่าความเร่งกับเวลา โดยใช้ข้อมูลข้อ 3.3.3 และ 3.3.4

3.4.3 หาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยนำข้อมูลจากข้อ 3.4.2 วิเคราะห์ทางความถี่ (Fast Fourier Transform) ของค่าความเร่งกับเวลา จะได้ความถี่หลักของระบบซึ่งคือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ

3.5 การวิเคราะห์ค่าความเร่งของระบบพื้นตัวอย่าง

ทำการปรับปรุงค่าความเร่งของระบบโดยนำค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่ได้จากข้อ 3.4.3 ไปวิเคราะห์หาค่าความเร่งจากสมการในหัวข้อ 2.5

3.6 การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นตัวอย่าง

ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์การตอบสนอง โดยใช้หลักการจากหัวข้อ 2.6

3.6.1 วิเคราะห์การตอบสนองจากค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติในหัวข้อ 3.4.1

3.6.2 วิเคราะห์การตอบสนองจากค่าความถี่ธรรมชาติจากข้อมูลความเร่งกับเวลาซึ่งได้จากการแปลงสัญญาณข้อมูลในหัวข้อ 3.4.2 และ 3.4.3

#### 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง

นำผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ ความเร่ง ความเร่งสูงสุดของระบบของทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกัน พร้อมทั้งอภิปรายผล

#### 5. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน

นำผลความเร่งสูงสุดของระบบของทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน NBCC 1995 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 พร้อมทั้งอภิปรายผล

ตารางที่ 3.2 ชีตจำกัดความเร่งสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ระหว่าง 1.5 – 8 เฮิรต์ (NBCC1995)

| Activity or occupancy             | Limiting peak Acceleration ( $a_p/g$ ) |
|-----------------------------------|--|
| Offices and residences (day time) | 0.004-0.007                            |
| Dancing and weightlifting         | 0.015-0.025                            |
| Rhythmic activity                 | 0.04-0.07                              |

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จึงประกอบด้วย 4 หัวข้อใหญ่ คือ 1. การวิจัยเชิงทฤษฎี 2. การวิจัยเชิงทดลอง 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง และ 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับมาตรฐาน โดยในหัวข้อที่ 1 และ 2 ในแต่ละหัวข้อจะกล่าวถึง ข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ผลการวิเคราะห์ และการอภิปรายผล หัวข้อที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง หัวข้อที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยกับมาตรฐาน National Building Code of Canada 1995 (NBCC 1995)

#### 1. การวิจัยเชิงทฤษฎี

##### 1.1 ข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบที่ใช้ในงานวิจัย โดยค่าที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยที่แสดงในตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.1

##### 1.2 ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของพื้นตัวอย่าง พิจารณาแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป 1 แผ่น แสดงผลดังตารางที่ 4.3 (ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงในบทที่ 3 และภาคผนวก ข.2) ต่อจากนั้นนำค่าที่ได้วิเคราะห์หาค่าความเร่งและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด เนื่องจากกิจกรรม 3 แบบ คือ 1. การเดินแอโรบิค 2. การวิ่งเหยาะๆ 3. การวิ่ง และรูปแบบการตอบสนองของระบบพื้นแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยรูปที่ 4.1 เป็นการตอบสนองของระบบพื้นแต่ละความยาวที่รองรับกิจกรรมชนิดเดียวกันและรูปที่ 4.2 เป็นการตอบสนองของระบบพื้นชนิดเดียวกันที่รองรับชนิดของกิจกรรมต่างกัน ทั้งสองรูปนี้พิจารณาแรงกระทำเท่ากันคือ 60 กิโลกรัม ต่อจากนั้นสรุปค่าความเร่งและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดของแต่ละกิจกรรมและขนาดของแรงกระทำต่างๆ ในตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ (ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงในบทที่ 3 และภาคผนวก ข.3) และนำค่าในตารางพล็อตลงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยรูปที่ 4.3 เป็นการพล็อตค่าความเร่งสูงสุดกับขนาดของแรงกระทำ และ รูปที่ 4.4 พล็อตค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดกับขนาดของแรงกระทำ โดยทั้งสองรูปจะแยกกราฟการตอบสนองของระบบพื้นแต่ละความยาวซึ่งรองรับกิจกรรมแต่ละชนิดที่สัดส่วนของความกว้างต่อความยาวขนาดต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบ

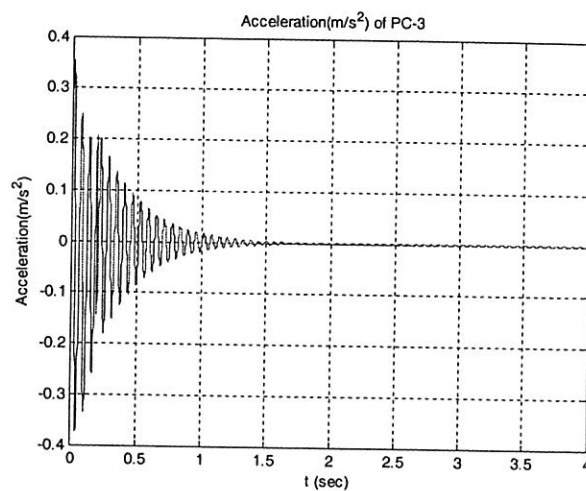
| ข้อมูล  | ชื่อแผ่นพื้น | PC-3               | PC-4               | PC-5               |
|---|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1. ช่วงความยาว (ม.)                           |              | 3.00               | 4.00               | 5.00               |
| 2. พื้นที่หน้าตัด                             |              |                    |                    |                    |
| - ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ชม.)               |              | 175                | 175                | 175                |
| 3. ขนาด                                       |              |                    |                    |                    |
| - กว้าง (ชม.)                                 |              | 35                 | 35                 | 35                 |
| - ความหนาแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง (ชม.)          |              | 5                  | 5                  | 5                  |
| - ความหนาคอนกรีตเททับหน้า (ชม.)               |              | 5                  | 5                  | 6                  |
| 4. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น            |              |                    |                    |                    |
| - ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)                  |              | 2.50               | 2.50               | 2.50               |
| 5. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ทรงกระบอก 28วัน) |              |                    |                    |                    |
| - คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ชม.)           |              | 350                | 350                | 350                |
| - คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ชม.)               |              | 150                | 150                | 150                |
| 6. ลวดอัดแรง                                  |              |                    |                    |                    |
| - จำนวน (เส้น)                                |              | 4                  | 6                  | 8                  |
| - ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)                  |              | 4                  | 4                  | 4                  |
| - กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)           |              | 175                | 175                | 175                |
| - โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ชม.)            |              | $2.04 \times 10^6$ | $2.04 \times 10^6$ | $2.04 \times 10^6$ |

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

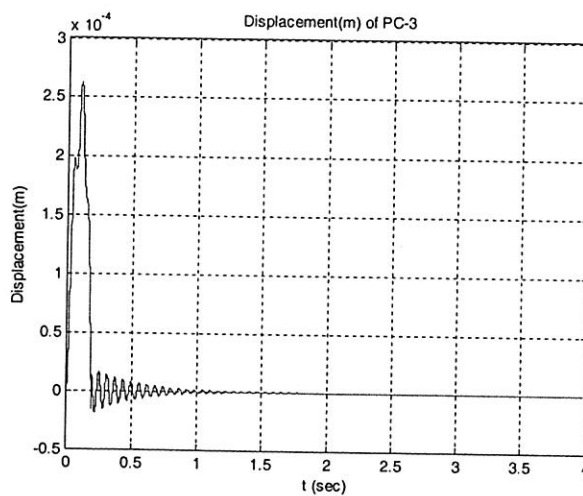
| ข้อมูล   | ชื่อแผ่นพื้น | PC-3                   | PC-4                   | PC-5                   |
|--|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1. พื้นที่หน้าตัดแปลง (ตร.ม.)                              |              | $29.32 \times 10^{-3}$ | $29.50 \times 10^{-3}$ | $29.68 \times 10^{-3}$ |
| 2. โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง (ม. <sup>4</sup> )      |              | $23.48 \times 10^{-6}$ | $23.55 \times 10^{-6}$ | $23.62 \times 10^{-6}$ |
| 3. มวลต่อหน่วยความยาว                                      |              |                        |                        |                        |
| - รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ ม.)                              |              | 84.0                   | 84.0                   | 92.4                   |
| 4. โมดูลัสความยืดหยุ่นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (นิวตัน/ตร.ม) |              | $27.9 \times 10^9$     | $27.9 \times 10^9$     | $27.9 \times 10^9$     |
| 5. แรงดึงในเส้นลวด (นิวตัน)                                |              | $48.30 \times 10^3$    | $74.29 \times 10^3$    | $96.65 \times 10^3$    |

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นตัวอย่าง

| ชื่อและชนิด  | PC-3      | PC-4    | PC-5    |
|--|-----------|---------|---------|
| คุณสมบัติทางพลศาสตร์                               |           |         |         |
| 1. generalize mass ( $m^*$ ), กก.                  | 126       | 168     | 231     |
| 2. generalize stiffness ( $\bar{k}^*$ ), นิวตัน/ม. | 1,340,596 | 678,799 | 532,875 |
| 3. ความถี่ธรรมชาติ                                 |           |         |         |
| ( $\omega$ ), เรเดียน/วินาที                       | 103.15    | 63.56   | 48.03   |
| ( $f$ ), Hz  | 16.42     | 10.12   | 7.64    |

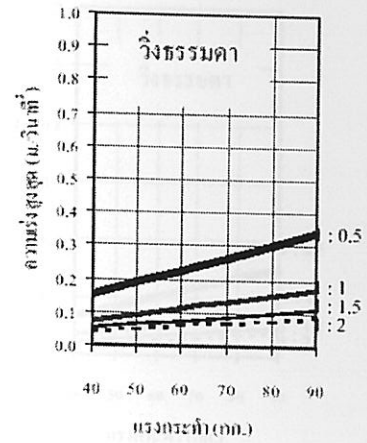
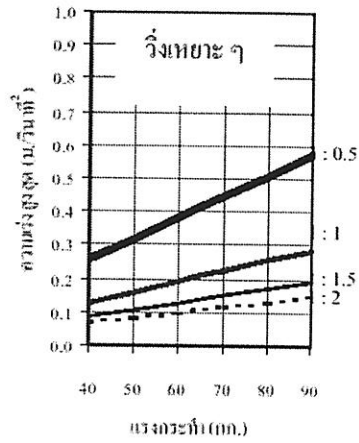
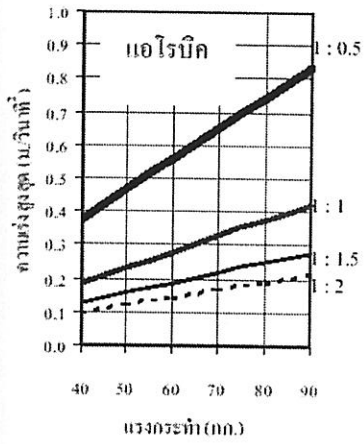


รูปที่ 4.1 ความเร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างยาว 3 เมตร (สัดส่วน 1 : 0.5) รองรับกิจกรรมการเดินแอโรบิค แรงกระทำ 40 กิโลกรัม

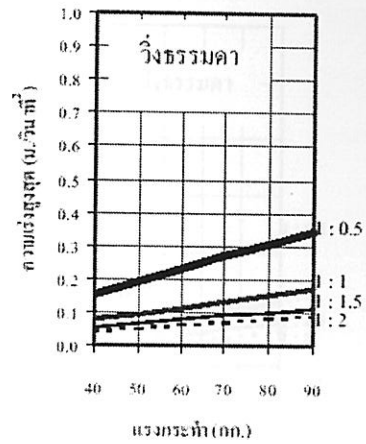
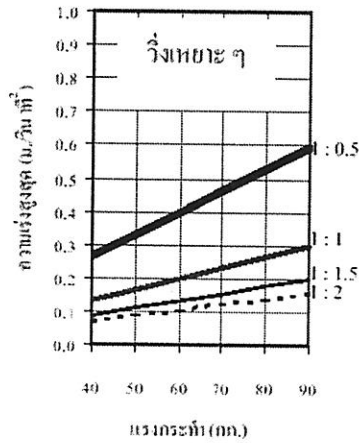
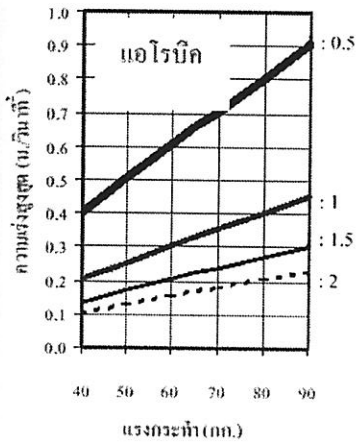


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างยาว 3 เมตร (สัดส่วน 1 : 0.5) รองรับกิจกรรมการเดินแอโรบิค แรงกระทำ 40 กิโลกรัม

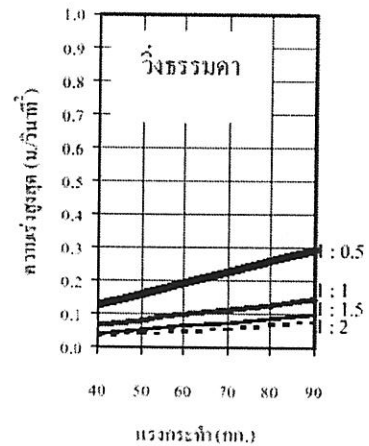
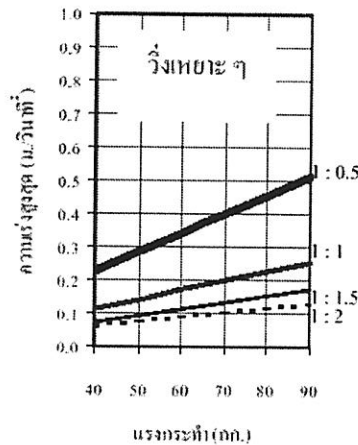
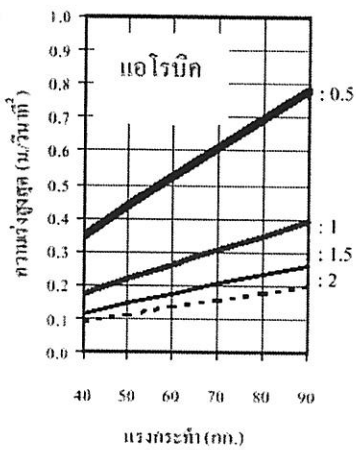




(ก) PC-3

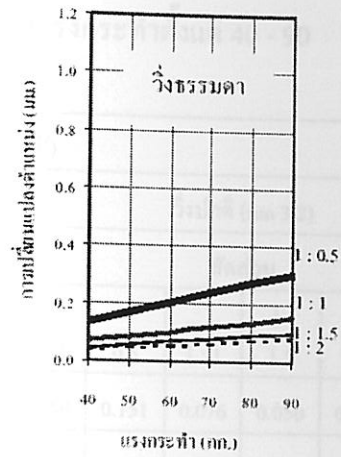
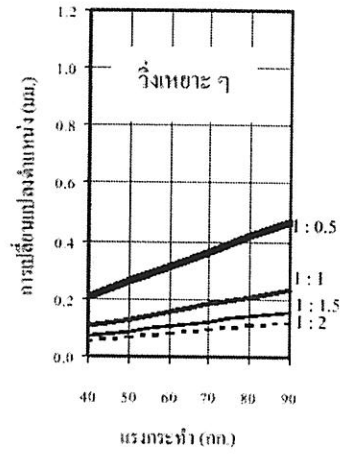
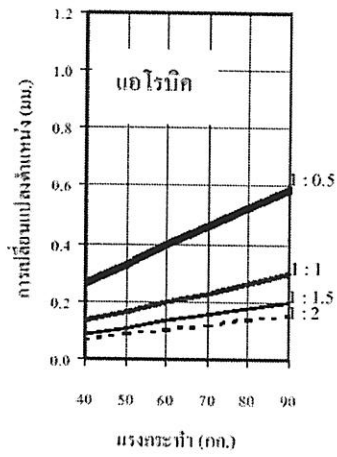


(ข) PC-4

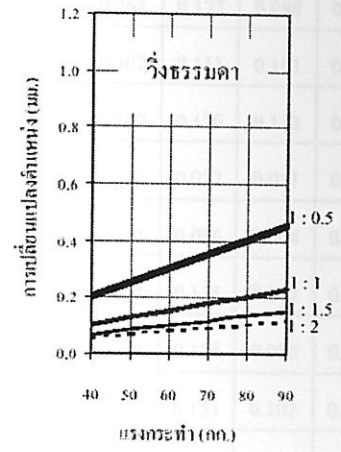
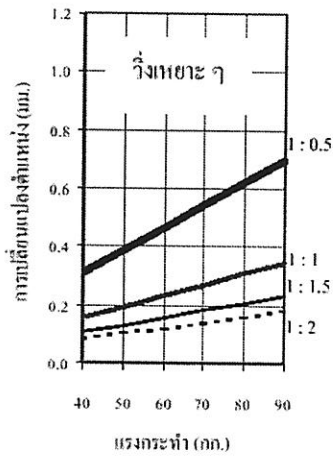
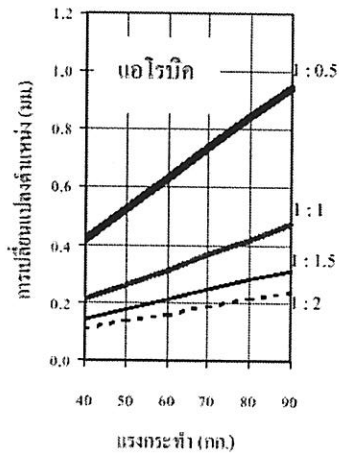


(ค) PC-5

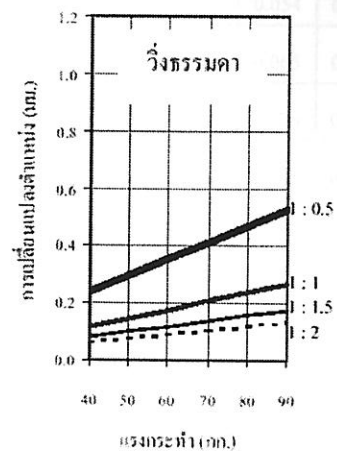
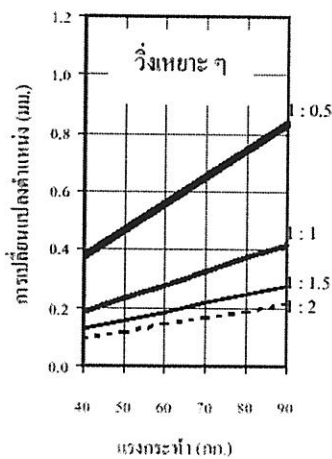
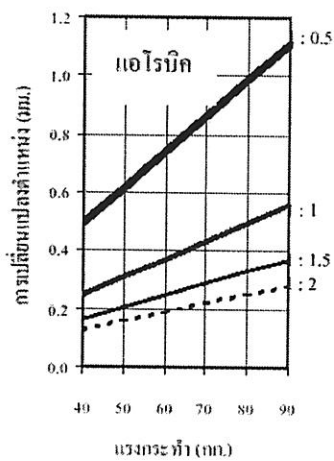
รูปที่ 4.3 ความเร่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ



(ก) PC-3



(ข) PC-4



(ค) PC-5

รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ความเร็วสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่าง ๆ ตามขนาดของแรงกระทำตั้งแต่ 40 - 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นที่ขนาดต่าง ๆ

| ความ<br>ยาว<br>(เมตร) | แรง<br>กระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร็วสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |            |       |                       |       |            |       |                    |       |            |       |
|-----------------------|----------------------------|--|-------|------------|-------|-----------------------|-------|------------|-------|--------------------|-------|------------|-------|
|                       |                            | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |            |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |            |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |            |       |
|                       |                            | สัดส่วน                                    |       |            |       | สัดส่วน               |       |            |       | สัดส่วน            |       |            |       |
|                       |                            | 1 :<br>0.5                                 | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 | 1 :<br>0.5            | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 | 1 :<br>0.5         | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 |
| 3.00<br>(PC-3)        | 40                         | 0.372                                      | 0.186 | 0.124      | 0.093 | 0.254                 | 0.127 | 0.085      | 0.064 | 0.151              | 0.076 | 0.050      | 0.038 |
|                       | 50                         | 0.466                                      | 0.233 | 0.155      | 0.116 | 0.318                 | 0.159 | 0.106      | 0.079 | 0.189              | 0.095 | 0.063      | 0.047 |
|                       | 60                         | 0.559                                      | 0.279 | 0.186      | 0.140 | 0.381                 | 0.191 | 0.127      | 0.095 | 0.227              | 0.113 | 0.076      | 0.057 |
|                       | 70                         | 0.652                                      | 0.326 | 0.217      | 0.163 | 0.445                 | 0.223 | 0.148      | 0.111 | 0.265              | 0.132 | 0.088      | 0.066 |
|                       | 80                         | 0.745                                      | 0.372 | 0.248      | 0.186 | 0.509                 | 0.254 | 0.170      | 0.127 | 0.302              | 0.151 | 0.101      | 0.076 |
|                       | 90                         | 0.838                                      | 0.419 | 0.279      | 0.209 | 0.572                 | 0.286 | 0.191      | 0.143 | 0.340              | 0.170 | 0.113      | 0.085 |
| 4.00<br>(PC-4)        | 40                         | 0.403                                      | 0.201 | 0.134      | 0.101 | 0.266                 | 0.133 | 0.089      | 0.066 | 0.153              | 0.077 | 0.051      | 0.038 |
|                       | 50                         | 0.503                                      | 0.252 | 0.168      | 0.126 | 0.332                 | 0.166 | 0.111      | 0.083 | 0.192              | 0.096 | 0.064      | 0.048 |
|                       | 60                         | 0.604                                      | 0.302 | 0.201      | 0.151 | 0.399                 | 0.199 | 0.133      | 0.100 | 0.230              | 0.115 | 0.077      | 0.058 |
|                       | 70                         | 0.705                                      | 0.352 | 0.235      | 0.176 | 0.465                 | 0.232 | 0.155      | 0.116 | 0.269              | 0.134 | 0.090      | 0.067 |
|                       | 80                         | 0.805                                      | 0.403 | 0.268      | 0.201 | 0.531                 | 0.266 | 0.177      | 0.133 | 0.307              | 0.153 | 0.102      | 0.077 |
|                       | 90                         | 0.906                                      | 0.453 | 0.302      | 0.227 | 0.598                 | 0.299 | 0.199      | 0.149 | 0.345              | 0.173 | 0.115      | 0.086 |
| 5.00<br>(PC-5)        | 40                         | 0.347                                      | 0.174 | 0.116      | 0.087 | 0.227                 | 0.114 | 0.076      | 0.057 | 0.130              | 0.065 | 0.043      | 0.032 |
|                       | 50                         | 0.434                                      | 0.217 | 0.145      | 0.108 | 0.284                 | 0.142 | 0.095      | 0.071 | 0.162              | 0.081 | 0.054      | 0.040 |
|                       | 60                         | 0.521                                      | 0.260 | 0.174      | 0.130 | 0.341                 | 0.170 | 0.114      | 0.085 | 0.194              | 0.097 | 0.065      | 0.049 |
|                       | 70                         | 0.607                                      | 0.304 | 0.202      | 0.152 | 0.397                 | 0.199 | 0.132      | 0.099 | 0.227              | 0.113 | 0.076      | 0.057 |
|                       | 80                         | 0.694                                      | 0.347 | 0.231      | 0.174 | 0.454                 | 0.227 | 0.151      | 0.114 | 0.259              | 0.130 | 0.086      | 0.065 |
|                       | 90                         | 0.781                                      | 0.390 | 0.260      | 0.195 | 0.511                 | 0.255 | 0.170      | 0.128 | 0.291              | 0.146 | 0.097      | 0.073 |

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่าง ๆ ตามขนาดของแรงกระทำ ตั้งแต่ 40 - 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นที่ขนาดต่าง ๆ

| ความ<br>ยาว<br>(เมตร) | แรง<br>กระทำ<br>(กิโลกรัม) | การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด (มิลลิเมตร) |       |            |       |                       |       |            |       |                    |       |            |       |
|-----------------------|----------------------------|---|-------|------------|-------|-----------------------|-------|------------|-------|--------------------|-------|------------|-------|
|                       |                            | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                  |       |            |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |            |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |            |       |
|                       |                            | สัดส่วน                                 |       |            |       | สัดส่วน               |       |            |       | สัดส่วน            |       |            |       |
|                       |                            | 1 :<br>0.5                              | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 | 1 :<br>0.5            | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 | 1 :<br>0.5         | 1 : 1 | 1 :<br>1.5 | 1 : 2 |
| 3.00<br>(PC-3)        | 40                         | 0.263                                   | 0.131 | 0.088      | 0.066 | 0.208                 | 0.104 | 0.069      | 0.052 | 0.136              | 0.068 | 0.045      | 0.034 |
|                       | 50                         | 0.328                                   | 0.164 | 0.109      | 0.082 | 0.260                 | 0.130 | 0.087      | 0.065 | 0.170              | 0.085 | 0.057      | 0.043 |
|                       | 60                         | 0.394                                   | 0.197 | 0.131      | 0.099 | 0.312                 | 0.156 | 0.104      | 0.078 | 0.204              | 0.102 | 0.068      | 0.051 |
|                       | 70                         | 0.460                                   | 0.230 | 0.153      | 0.115 | 0.364                 | 0.182 | 0.121      | 0.091 | 0.238              | 0.119 | 0.079      | 0.060 |
|                       | 80                         | 0.525                                   | 0.263 | 0.175      | 0.131 | 0.416                 | 0.208 | 0.139      | 0.104 | 0.272              | 0.136 | 0.091      | 0.068 |
|                       | 90                         | 0.591                                   | 0.296 | 0.197      | 0.148 | 0.468                 | 0.234 | 0.156      | 0.117 | 0.307              | 0.153 | 0.102      | 0.077 |
| 4.00<br>(PC-4)        | 40                         | 0.421                                   | 0.210 | 0.140      | 0.105 | 0.310                 | 0.155 | 0.103      | 0.077 | 0.203              | 0.102 | 0.068      | 0.051 |
|                       | 50                         | 0.526                                   | 0.263 | 0.175      | 0.131 | 0.387                 | 0.194 | 0.129      | 0.097 | 0.254              | 0.127 | 0.085      | 0.064 |
|                       | 60                         | 0.631                                   | 0.316 | 0.210      | 0.158 | 0.464                 | 0.232 | 0.155      | 0.116 | 0.305              | 0.153 | 0.102      | 0.076 |
|                       | 70                         | 0.736                                   | 0.368 | 0.245      | 0.184 | 0.542                 | 0.271 | 0.181      | 0.135 | 0.356              | 0.178 | 0.119      | 0.089 |
|                       | 80                         | 0.842                                   | 0.421 | 0.281      | 0.210 | 0.619                 | 0.310 | 0.206      | 0.155 | 0.407              | 0.203 | 0.136      | 0.102 |
|                       | 90                         | 0.947                                   | 0.473 | 0.316      | 0.237 | 0.697                 | 0.348 | 0.232      | 0.174 | 0.458              | 0.229 | 0.153      | 0.114 |
| 5.00<br>(PC-5)        | 40                         | 0.494                                   | 0.247 | 0.165      | 0.123 | 0.371                 | 0.185 | 0.124      | 0.093 | 0.235              | 0.117 | 0.078      | 0.059 |
|                       | 50                         | 0.617                                   | 0.309 | 0.206      | 0.154 | 0.463                 | 0.232 | 0.154      | 0.116 | 0.293              | 0.147 | 0.098      | 0.073 |
|                       | 60                         | 0.741                                   | 0.370 | 0.247      | 0.185 | 0.556                 | 0.278 | 0.185      | 0.139 | 0.352              | 0.176 | 0.117      | 0.088 |
|                       | 70                         | 0.864                                   | 0.432 | 0.288      | 0.216 | 0.649                 | 0.324 | 0.216      | 0.162 | 0.411              | 0.205 | 0.137      | 0.103 |
|                       | 80                         | 0.988                                   | 0.494 | 0.329      | 0.247 | 0.741                 | 0.371 | 0.247      | 0.185 | 0.469              | 0.235 | 0.156      | 0.117 |
|                       | 90                         | 1.111                                   | 0.556 | 0.370      | 0.278 | 0.834                 | 0.417 | 0.278      | 0.208 | 0.528              | 0.264 | 0.176      | 0.132 |

### 1.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์

พื้นตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความยาว 3, 4 และ 5 เมตร เป็นขนาดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบที่นิยมใช้กันมากในงานก่อสร้างอาคาร โดยข้อมูลของแผ่นพื้นจากโรงงานผู้ผลิตแสดงดังตารางที่ 4.1 จากข้อมูลในตารางทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นตัวอย่างได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยค่าที่แสดงในตารางนั้นพิจารณาแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีคอนกรีตเททับหน้าด้านบนเพียงแผ่นเดียว ได้ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบอยู่ระหว่าง 7.35 - 16.42 เฮิรตซ์ พื้นตัวอย่างที่มีความยาวน้อยได้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงกว่าพื้นที่ที่มีความยาวมากกว่า เนื่องจากพื้นที่ที่มีความยาวมากกว่าจะมีมวลมาก ทั้งยังมีค่าความแกร่ง (stiffness) น้อย ถึงแม้ว่าพื้นที่ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงมากกว่าก็ตาม หากต้องการดูผลของความยาวพื้น หรือแรงดึงในเส้นลวด อย่งใดอย่างหนึ่งต้องทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเฉพาะอย่าง สำหรับงานวิจัยในส่วนนี้ต้องการนำเสนอภาพรวมของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ผลิตและใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยจึงมิได้แสดงผลในส่วนนี้ รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นตัวอย่างความยาว 3 เมตร สัดส่วนต่อด้านกว้างเท่ากับ 1 : 0.5 ภายใต้กิจกรรมการเดินแอโรบิก และแรงกระทำ 40 กิโลกรัม ความเร่งจะมีค่าสูงในช่วงต้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพิจารณาการกระแทกเพียงครั้งเดียว สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งค่าแอมพลิจูดจะเพิ่มขึ้นสูงจะลดลงเร็วกว่าการลดลงของความเร่งของระบบ ผลการวิเคราะห์การตอบสนองสูงสุดของระบบแบ่งตามสัดส่วนของความยาวพื้นตัวอย่างดังนี้ 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าพื้นตัวอย่างยาว 3 เมตร (PC-3) จะได้สัดส่วนของระบบพื้นที่พิจารณาเท่ากับ 3 x 1.5, 3 x 3, 3 x 4.5 และ 3 x 6 เมตร ตามลำดับ โดยด้านยาว 3 เมตรจะเป็นด้านที่จัดวางพื้นพาดที่จูดรองรับของระบบพื้น ผลการวิเคราะห์หาค่าความเร่งสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดแสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 0.032 - 0.906 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.092g) โดยพื้นที่ความยาว 3, 4 และ 5 เมตรมีความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.032 - 0.838 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.085g), 0.038 - 0.906 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.004g - 0.092g) และ 0.032 - 0.781 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.080g) ตามลำดับ สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอยู่ระหว่าง 0.034 - 1.111 มิลลิเมตร โดยพื้นที่ความยาว 3, 4 และ 5 เมตรมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.034 - 0.591 มิลลิเมตร, 0.051 - 0.947 มิลลิเมตร และ 0.059 - 1.111 มิลลิเมตรตามลำดับ ที่กิจกรรมเดียวกันระบบพื้นที่ที่มีความยาวน้อยกว่าควรมีค่าการตอบสนองสูงสุดน้อยกว่า แต่ถ้าค่าสูงสุดในตารางจะเห็นว่าความเร่งสูงสุดของพื้นที่ความยาว 4 เมตร จะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือพื้นที่ความยาว 3 เมตร ขณะที่พื้นที่ความยาว 5 เมตรมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความเร่งของระบบไม่ได้มีผลเนื่องจากความถี่ธรรมชาติ (ตัวแปรที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติคือความแกร่งและมวล ความแกร่งและตัวแปรที่มีผลต่อความแกร่งมากคือความยาวของระบบ) เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีตัวแปรอื่นๆ ร่วม

ด้วยและตัวแปรที่สำคัญในที่นี้คือมวลของระบบ จึงทำให้พื้นที่ความยาว 4 เมตรมีค่าความเร่งสูงสุดมากกว่า เมื่อพิจารณาที่ความยาวของระบบพื้นที่เท่ากันกิจกรรมที่มีการตอบสนองของระบบสูงสุดเรียงจากมากไปน้อยได้แก่ กิจกรรมเดินแอโรบิก วิ่งเหยาะๆ และวิ่งธรรมดา ตามลำดับ จากกราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าของขนาดของแรงกระทำกับค่าการตอบสนองสูงสุดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าการตอบสนองสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบพื้นที่ขนาดแรงกระทำต่างๆ ได้สำหรับพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตรงกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1

## 2. การวิจัยเชิงทดลอง

### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลเกี่ยวกับคอนกรีตอัดแรงและลวดอัดแรงใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.1 สำหรับคอนกรีตเททับหน้าของตัวอย่างพื้นที่ทั้ง 3 ความยาวแสดงดังตารางที่ 4.6 ข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก ค และตารางที่ 4.7 เป็นการคำนวณค่าคุณสมบัติพื้นฐานของพื้นที่ตัวอย่าง (แสดงเฉพาะส่วนที่ต่างจากข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิต)

### 2.2 ผลการวิเคราะห์

จากการทดสอบพื้นที่ตัวอย่างโดยวิธีการปล่อยแรงกระทำลงที่กึ่งกลางพื้นที่ ขนาดของแรงกระทำอยู่ระหว่าง 40 - 90 กิโลกรัม บันทึกค่าความเร่งของพื้นที่กับเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของระบบได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.8 สำหรับผลทั้งหมดและวิธีการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ข.4 ในรูปที่ 4.5 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นที่ตัวอย่างความยาว 3 เมตร โดยวิเคราะห์จากผลการทดสอบ การทดสอบครั้งที่ 1-7 ใช้แรงกระทำ 40 กิโลกรัม การทดสอบครั้งที่ 8-14 ใช้แรงกระทำ 50 กก. การทดสอบครั้งอื่นๆ ก็เรียงลำดับเช่นเดียวกัน รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นที่ตัวอย่างความยาว 4 เมตร และ 5 เมตรตามลำดับ โดยวิเคราะห์จากผลการทดสอบ การทดสอบครั้งที่ 1-10 ใช้แรงกระทำ 40 กิโลกรัม การทดสอบครั้งที่ 11-20 ใช้แรงกระทำ 50 กก. การทดสอบครั้งอื่นๆ ก็เรียงลำดับเช่นเดียวกัน ความถี่ธรรมชาติของตัวอย่างที่ได้นี้มีผลของมวลของค้ำน้ำหนักรวมอยู่ด้วยเนื่องจากหลังจากที่ปล่อยค้ำน้ำหนักแล้วไม่ได้นำค้ำน้ำหนักรอก

นำค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความแกร่งของระบบโดยการตัดผลของมวลของค้ำน้ำหนักรวมที่ติดไปกับพื้นแล้ว ค่าความเร่งสูงสุดของระบบพื้นที่ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าการวิเคราะห์จากทฤษฎี ได้ผลดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข.5 ค่าความแกร่งในตารางที่ 4.9 นั้นวิเคราะห์จากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปพร้อมคอนกรีตทับหน้ากว้าง 3 แผ่น แล้วลวดรูปลงเหลือแผ่นพื้นเพียง 1 แผ่น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในตารางที่ 4.3 สำหรับตารางที่ 4.10

วิเคราะห์แบ่งตามสัดส่วนของความยาวพื้นตัวอย่างดังนี้ 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2 เหมือนกับการวิจัยเชิงทฤษฎี รูปที่ 4.8 เป็นการพล็อตค่าความเร่งสูงสุดกับขนาดของแรงกระทำ และรูปที่ 4.9 พล็อตค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดกับขนาดของแรงกระทำโดยทั้งสองรูปจะแยกกราฟการตอบสนองของระบบพื้นแต่ละความยาวซึ่งรองรับกิจกรรมแต่ละชนิดที่สัดส่วนของความกว้างต่อความยาวขนาดต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลคอนกรีตเททับหน้าที่ใช้ในการทดสอบ

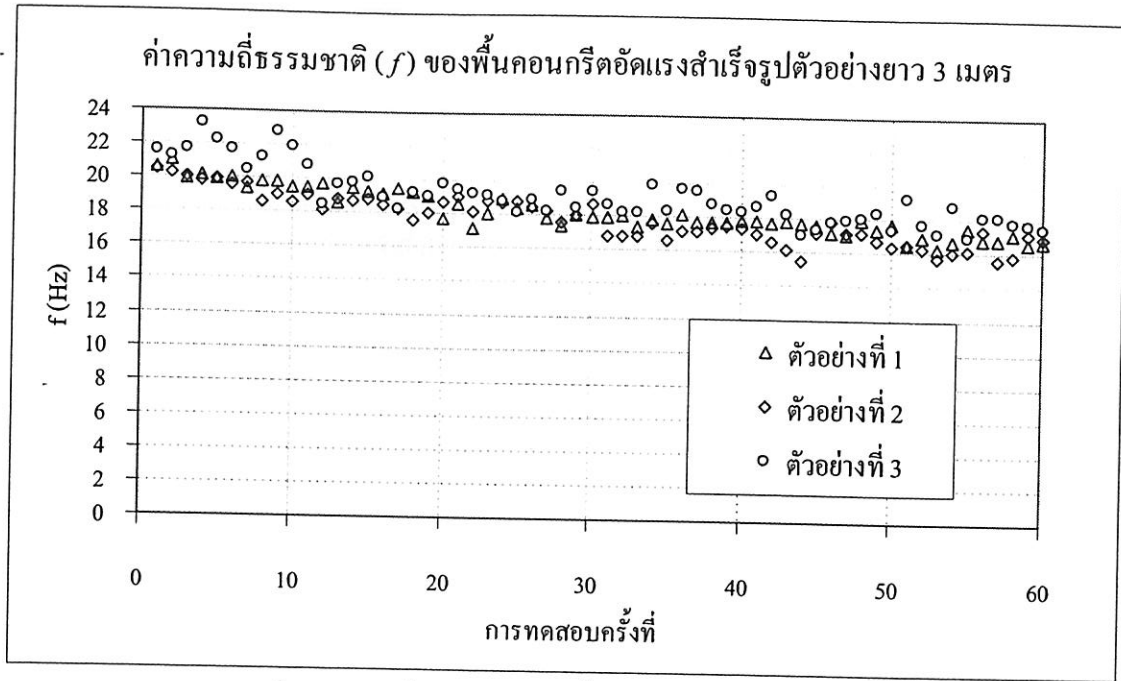
| ข้อมูล   | ชื่อแผ่นพื้น |       |       |
|--|--------------|-------|-------|
|  | PC-3T        | PC-4T | PC-5T |
| 1. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ทรงกระบอก 28วัน) (กก./ตร.ซม.) | 284.8        | 223.6 | 347.6 |
| 2. ความหนา (ซม.)   | 5.42         | 5.67  | 6.17  |

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

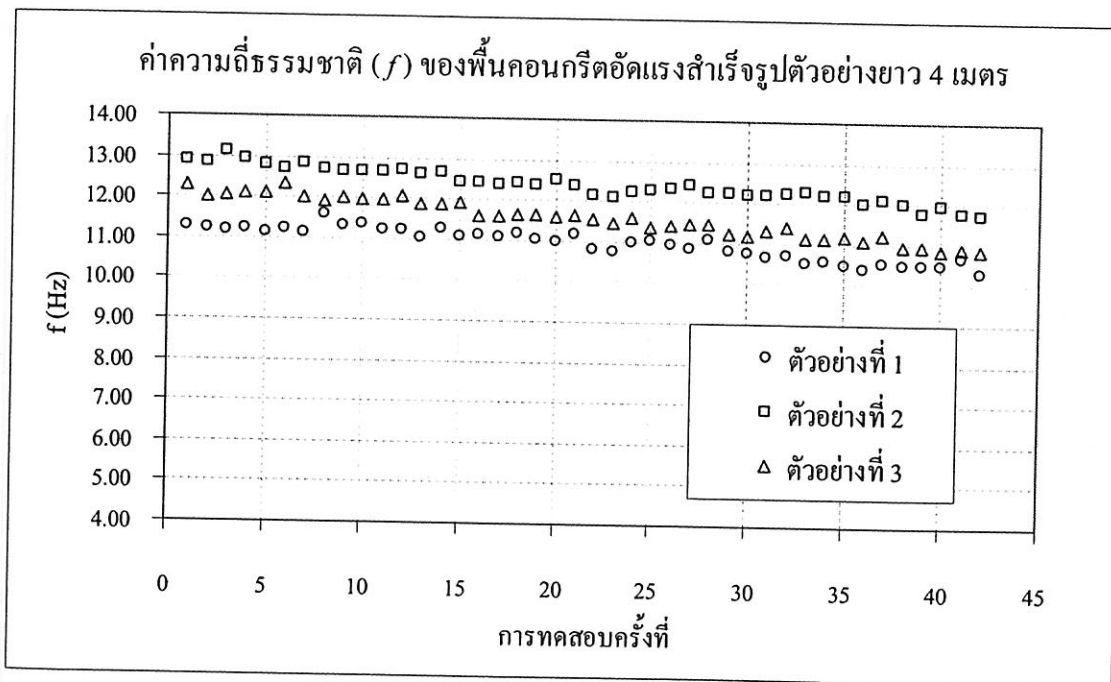
| ข้อมูล   | ชื่อแผ่นพื้น           |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
|  | PC-3T                  | PC-4T                  | PC-5T                  |
| 1. พื้นที่หน้าตัดแปลง (ตร.ม.)                          | $34.97 \times 10^{-3}$ | $33.90 \times 10^{-3}$ | $39.74 \times 10^{-3}$ |
| 2. โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง (ม. <sup>4</sup> )  | $31.56 \times 10^{-6}$ | $31.92 \times 10^{-6}$ | $41.25 \times 10^{-6}$ |
| 3. มวลต่อหน่วยความยาว<br>- รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ ม.) | 87.5                   | 89.6                   | 93.8                   |

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างจากการทดสอบ

| แรง<br>กระทำ<br>(ก.ก.) | ความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |        |       |       |       |        |       |      |      |        |
|------------------------|----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|--------|
|                        | PC-3T                |       |       |        | PC-4T |       |       |        | PC-5T |      |      |        |
|                        | 3-1                  | 3-2   | 3-3   | เฉลี่ย | 4-1   | 4-2   | 4-3   | เฉลี่ย | 5-1   | 5-2  | 5-3  | เฉลี่ย |
| 40                     | 19.99                | 19.59 | 21.82 | 20.47  | 11.19 | 12.88 | 12.13 | 12.07  | 9.12  | 8.17 | 7.92 | 8.40   |
| 50                     | 19.11                | 18.45 | 19.41 | 18.99  | 11.29 | 12.67 | 11.95 | 11.97  | 9.02  | 8.1  | 7.73 | 8.28   |
| 60                     | 18.06                | 18.45 | 18.93 | 18.48  | 11.1  | 12.42 | 11.66 | 11.73  | 8.92  | 8.01 | 7.64 | 8.19   |
| 70                     | 17.77                | 17.12 | 18.85 | 17.91  | 10.92 | 12.26 | 11.47 | 11.55  | 8.83  | 7.97 | 7.73 | 8.18   |
| 80                     | 17.57                | 16.77 | 18.01 | 17.45  | 10.65 | 12.22 | 11.23 | 11.37  | 8.69  | 7.92 | 7.58 | 8.06   |
| 90                     | 16.78                | 16.35 | 17.92 | 17.02  | 10.47 | 11.92 | 10.98 | 11.12  | 8.57  | 7.81 | 7.46 | 7.95   |

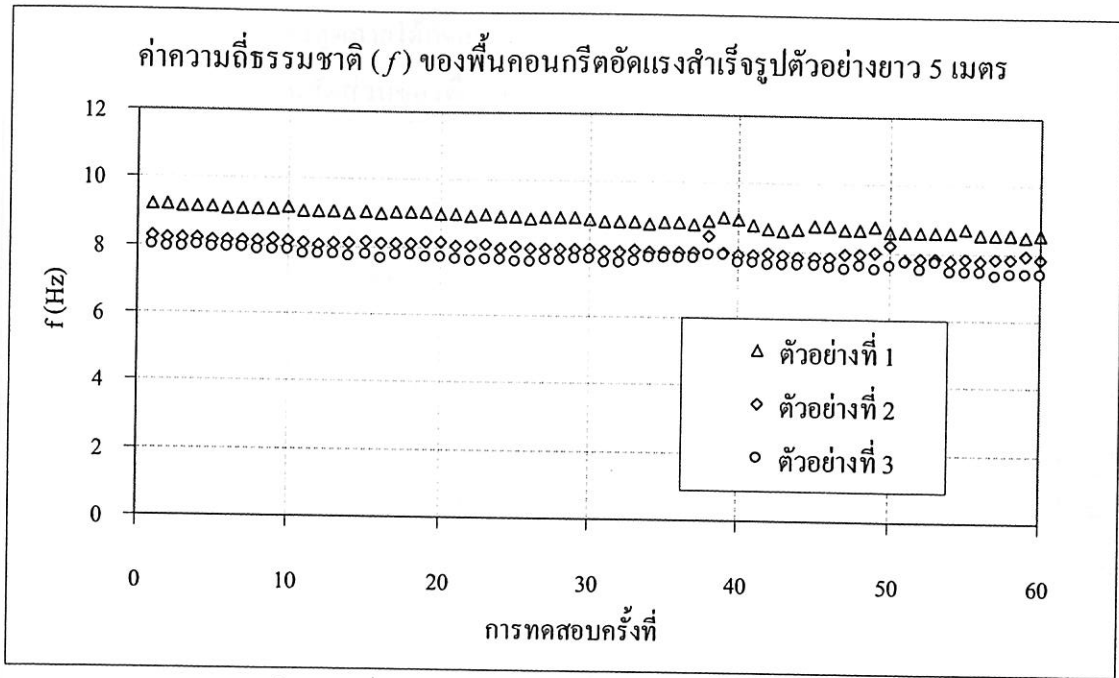


รูปที่ 4.5 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 3 เมตร



รูปที่ 4.6 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 4 เมตร





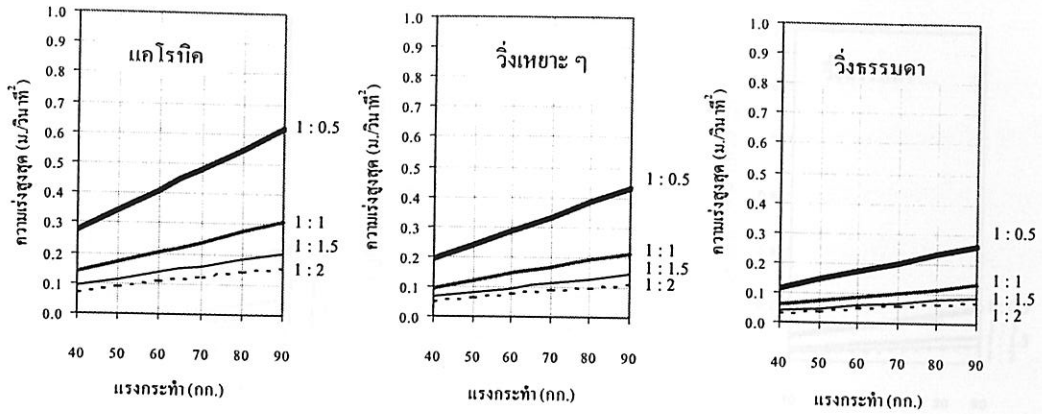
รูปที่ 4.7 ความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างความยาว 5 เมตร

ตารางที่ 4.9 ค่าความแกร่ง (stiffness) ของระบบพื้นตัวอย่างจากการทดสอบ (คิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเพียงแผ่นเดียว)

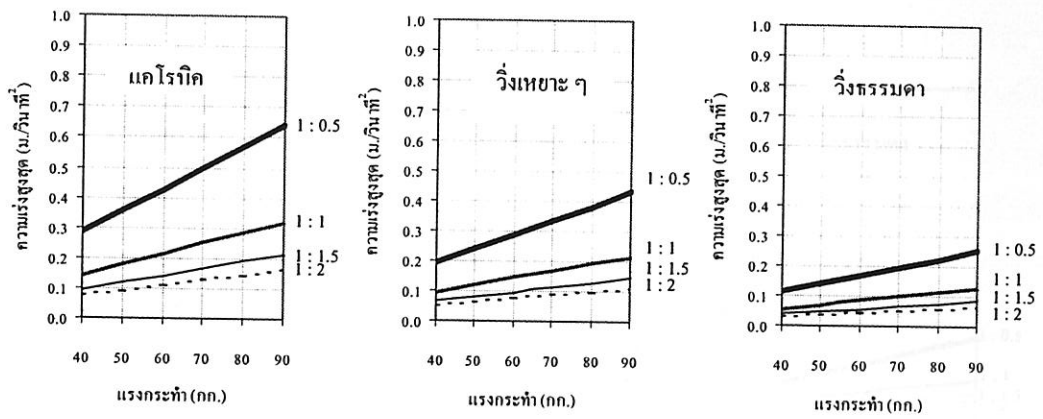
| แรงกระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความแกร่ง (stiffness) นิวตัน/เมตร |              |            |
|------------------------|-----------------------------------|--------------|------------|
|                        | PC-3T                             | PC-4T        | PC-5T      |
| 40                     | 2,570,568.21                      | 1,151,348.50 | 720,689.85 |
| 50                     | 2,258,296.50                      | 1,149,879.72 | 709,666.30 |
| 60                     | 2,184,154.29                      | 1,121,337.72 | 702,585.88 |
| 70                     | 2,094,313.77                      | 1,104,953.10 | 708,088.56 |
| 80                     | 2,027,206.30                      | 1,088,076.78 | 697,248.92 |
| 90                     | 1,966,509.36                      | 1,058,444.27 | 685,906.52 |
| เฉลี่ย                 | 2,183,508.07                      | 1,112,340.01 | 704,031.00 |

ตารางที่ 4.10 ความเร็วสูงสุดภายใต้กิจกรรมชนิดต่างๆ ตามขนาดของแรงกระทำตั้งแต่ 40 - 90 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของพื้นที่ขนาดต่าง ๆ (ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์)

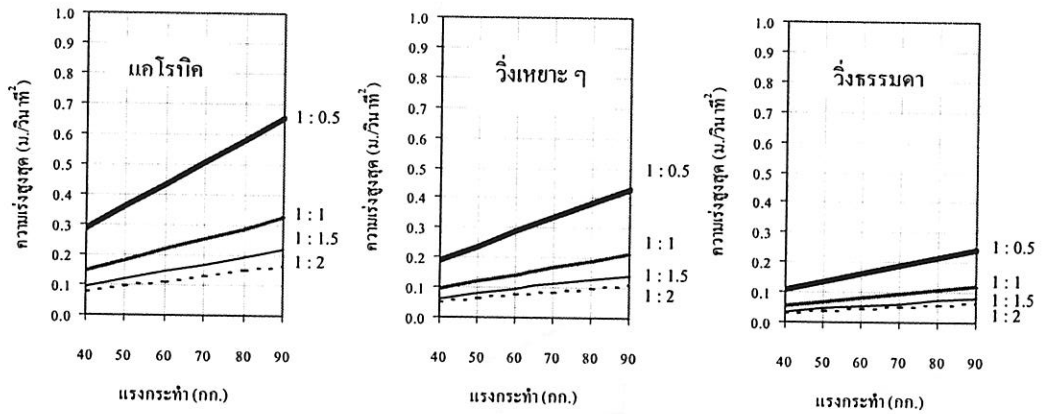
| ความ<br>ยาว<br>(เมตร) | แรง<br>กระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร็วสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |       |       |                       |       |       |       |                    |       |       |       |
|-----------------------|----------------------------|--|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
|                       |                            | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |       |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |       |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |       |       |
|                       |                            | สัดส่วน                                    |       |       |       | สัดส่วน               |       |       |       | สัดส่วน            |       |       |       |
|                       |                            | 1:0.5                                      | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   | 1:0.5                 | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   | 1:0.5              | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   |
| 3.00<br>(PC-3T)       | 40                         | 0.273                                      | 0.137 | 0.091 | 0.068 | 0.191                 | 0.096 | 0.064 | 0.048 | 0.115              | 0.058 | 0.038 | 0.029 |
|                       | 50                         | 0.342                                      | 0.171 | 0.114 | 0.085 | 0.239                 | 0.119 | 0.080 | 0.060 | 0.144              | 0.072 | 0.048 | 0.036 |
|                       | 60                         | 0.410                                      | 0.205 | 0.137 | 0.103 | 0.287                 | 0.143 | 0.096 | 0.072 | 0.173              | 0.087 | 0.058 | 0.043 |
|                       | 70                         | 0.479                                      | 0.239 | 0.160 | 0.120 | 0.334                 | 0.167 | 0.111 | 0.084 | 0.202              | 0.101 | 0.067 | 0.050 |
|                       | 80                         | 0.547                                      | 0.273 | 0.182 | 0.137 | 0.382                 | 0.191 | 0.127 | 0.096 | 0.231              | 0.115 | 0.077 | 0.058 |
|                       | 90                         | 0.615                                      | 0.308 | 0.205 | 0.154 | 0.430                 | 0.215 | 0.143 | 0.107 | 0.260              | 0.130 | 0.087 | 0.065 |
| 4.00<br>(PC-4T)       | 40                         | 0.284                                      | 0.142 | 0.095 | 0.071 | 0.191                 | 0.096 | 0.064 | 0.048 | 0.112              | 0.056 | 0.037 | 0.028 |
|                       | 50                         | 0.355                                      | 0.178 | 0.118 | 0.089 | 0.239                 | 0.119 | 0.080 | 0.060 | 0.139              | 0.070 | 0.046 | 0.035 |
|                       | 60                         | 0.427                                      | 0.213 | 0.142 | 0.107 | 0.287                 | 0.143 | 0.096 | 0.072 | 0.167              | 0.084 | 0.056 | 0.042 |
|                       | 70                         | 0.498                                      | 0.249 | 0.166 | 0.124 | 0.335                 | 0.167 | 0.112 | 0.084 | 0.195              | 0.098 | 0.065 | 0.049 |
|                       | 80                         | 0.569                                      | 0.284 | 0.190 | 0.142 | 0.382                 | 0.191 | 0.127 | 0.096 | 0.223              | 0.112 | 0.074 | 0.056 |
|                       | 90                         | 0.640                                      | 0.320 | 0.213 | 0.160 | 0.430                 | 0.215 | 0.143 | 0.108 | 0.251              | 0.126 | 0.084 | 0.063 |
| 5.00<br>(PC-5T)       | 40                         | 0.289                                      | 0.145 | 0.096 | 0.072 | 0.190                 | 0.095 | 0.063 | 0.048 | 0.109              | 0.054 | 0.036 | 0.027 |
|                       | 50                         | 0.361                                      | 0.181 | 0.120 | 0.090 | 0.238                 | 0.119 | 0.079 | 0.059 | 0.136              | 0.068 | 0.045 | 0.034 |
|                       | 60                         | 0.434                                      | 0.217 | 0.145 | 0.108 | 0.285                 | 0.143 | 0.095 | 0.071 | 0.163              | 0.082 | 0.054 | 0.041 |
|                       | 70                         | 0.506                                      | 0.253 | 0.169 | 0.127 | 0.333                 | 0.166 | 0.111 | 0.083 | 0.190              | 0.095 | 0.063 | 0.048 |
|                       | 80                         | 0.578                                      | 0.289 | 0.193 | 0.145 | 0.380                 | 0.190 | 0.127 | 0.095 | 0.218              | 0.109 | 0.073 | 0.054 |
|                       | 90                         | 0.651                                      | 0.325 | 0.217 | 0.163 | 0.428                 | 0.214 | 0.143 | 0.107 | 0.245              | 0.122 | 0.082 | 0.061 |



(ก) PC-3T



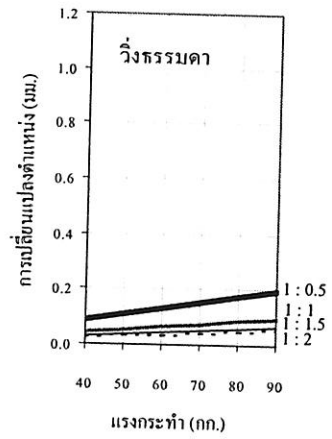
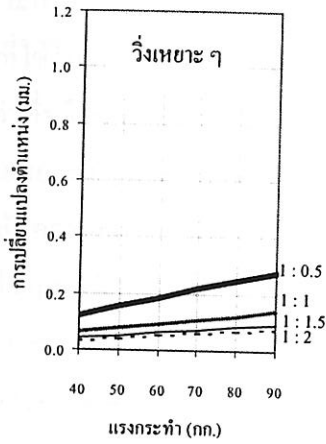
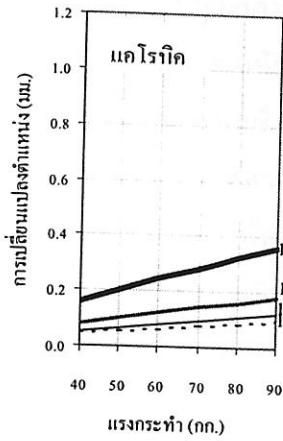
(ข) PC-4T



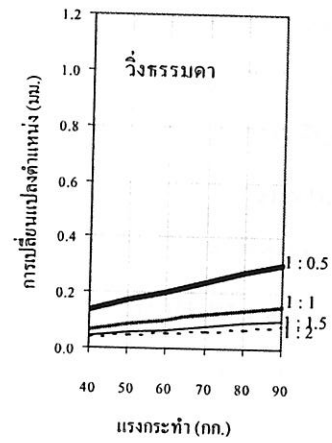
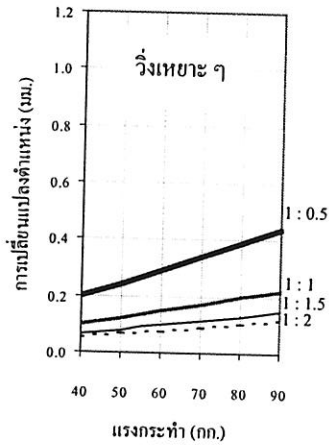
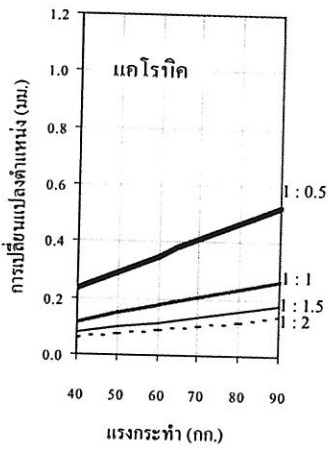
(ค) PC-5T

รูปที่ 4.8 ความแรงสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่างๆ

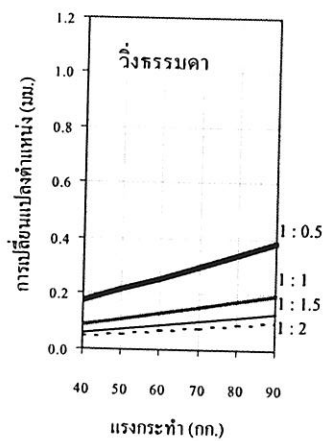
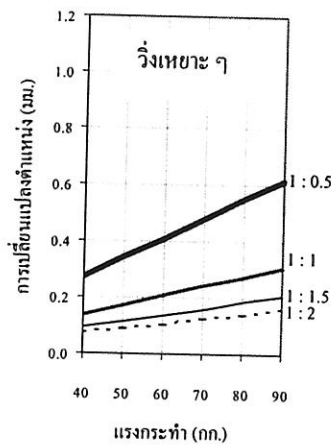
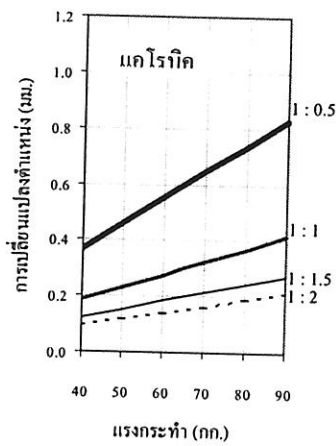
กิจกรรมชนิดต่างๆ



(ก) PC-3T



(ข) PC-4T



(ค) PC-5T

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดตามกิจกรรมชนิดต่างๆ

### 2.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์

คอนกรีตเททับหน้าที่ใช้ในการทดสอบมีค่ากำลังอัดประลัยและความหนามากกว่าค่าที่ใช้วิเคราะห์ทางทฤษฎีซึ่งเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ผลของความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดแปลง โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงและมวลต่อหน่วยความยาวมากขึ้น ส่วนค่ากำลังอัดประลัยจะมีผลทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากตามไปด้วย ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลต่อความถี่ธรรมชาติของระบบโดยตรง ดังกล่าวไว้ในบทที่ 3

ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบตัวอย่างทดสอบความยาว 3, 4 และ 5 เมตรที่รองรับแรงกระแทก 40 - 90 กิโลกรัม จากตารางที่ 4.8 มีดังนี้ 17.02 - 20.47 Hz, 11.12 - 12.07 Hz และ 7.95 - 8.45 Hz. ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวอย่างที่มีความยาวมากจะมีค่าความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าตัวอย่างที่มีความยาวน้อยกว่า นำค่าความถี่ธรรมชาตินี้มาคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติของระบบโดยได้ตัดผลของมวลค้ำน้ำหนักออกและพิจารณาครูปเหลื่อแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปรวมคอนกรีตทับหน้าเพียงแผ่นเดียวเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ค่าความถี่ที่ได้อยู่ระหว่าง 1,967 - 2,571 กิโลนิวตันต่อเมตร, 1,058 - 1,151 กิโลนิวตันต่อเมตร และ 686 - 721 กิโลนิวตันต่อเมตร สำหรับตัวอย่างยาว 3, 4 และ 5 เมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ถ้าต้องการทราบค่าความถี่ของพื้นที่เรียงกันมากกว่า 1 แผ่นก็นำจำนวนแผ่นคูณกับค่าความถี่ที่คิดต่อหนึ่งแผ่นเนื่องจากค่าความถี่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนแผ่นเพราะแต่ละแผ่นมีคุณสมบัติเหมือนกัน

ความถี่สูงสุดในตารางที่ 4.10 ได้จากการนำค่าความถี่เฉลี่ยของพื้นตัวอย่างทดสอบ นำไปหาค่าความถี่ธรรมชาติเฉลี่ยของระบบแล้วทำการวิเคราะห์ค่าความถี่สูงสุด พื้นตัวอย่าง 3, 4 และ 5 เมตร มีความถี่สูงสุดดังนี้ 0.029 - 0.615 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.063g), 0.028 - 0.640 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.065g) และ 0.027 - 0.651 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> (0.003g - 0.066g)

### 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับการวิจัยเชิงทดลอง

รายละเอียดในส่วนนี้จะแสดงการเปรียบเทียบผลการวิจัยเชิงทฤษฎีกับผลจากการทดสอบ ผลทางทฤษฎีและการทดสอบจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ผลเบื้องต้น และผลปรับแก้ โดยผลเบื้องต้นของการวิจัยเชิงทฤษฎีจะเป็นผลการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลของวัสดุจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นพื้นฯ และผลปรับแก้คือผลที่ได้จากการปรับแก้ค่าคุณสมบัติของค่ากำลังอัดประลัย และความหนาของคอนกรีตเททับหน้า สำหรับผลเบื้องต้นของการวิจัยเชิงทดลองคือค่าความถี่ธรรมชาติที่วิเคราะห์จากการเก็บข้อมูลความถี่กับเวลา แล้วทำการวิเคราะห์เชิงความถี่ ซึ่งจะมีผลของมวลค้ำน้ำหนักที่วางอยู่บนพื้นหลังจากที่ปล่อยค้ำน้ำหนักแล้ว ในส่วนของผลปรับแก้จึงได้ทำการวิเคราะห์ใหม่โดยตัดผลของมวลค้ำน้ำหนักทิ้ง

การเปรียบเทียบระหว่างผลเชิงทฤษฎีและผลเชิงทดสอบที่จะกล่าวถึงคือ 1. ค่าความถี่ธรรมชาติ 2. ค่าความแรงแรงของระบบ 3. ค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบ โดยแนวโน้มในการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิจัยทั้งสองแบบมีความสอดคล้องกัน และสามารถนำผลจากการวิจัยเชิงทฤษฎีนี้ไปขยายผลในการวิเคราะห์กรณีรับแรงกระทำในแบบต่างๆ ที่เปลี่ยนไปได้

ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติเชิงทฤษฎีและการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10 จากตารางและรูปนี้ จะได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่าง 3, 4 และ 5 เมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 16.42 - 19.74 Hz, 10.12 - 12.29 Hz และ 7.64 - 8.55 Hz. ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี อยู่ระหว่าง 11.91 - 21.44 % เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดสอบที่ปรับแก้แล้วกับผลทางทฤษฎีเบื้องต้น แต่ถ้าเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ปรับแก้แล้วจะมีค่าสูงกว่าอยู่ระหว่าง 2.89 - 11.73% ค่าความถี่ธรรมชาติที่ปรับแก้แล้วจะมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น และใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากค่าที่ปรับแก้คือ กำลังอัดของคอนกรีตเททับหน้า และความหนาที่มีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น สำหรับตัวอย่าง 3 เมตรมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้นมากกว่ากรณีอื่นๆ (11.81%) เพราะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตเททับหน้ามากกว่าค่าเริ่มต้นมาก ถึงแม้จะมีความหนาของคอนกรีตเททับหน้าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่าง 4 เมตรก็ตาม ทั้งนี้เป็นมีสาเหตุมาจากค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะมีผลกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีผลทำให้ค่าความแรงแรงเพิ่มมากขึ้น ( $k$  : stiffness) สำหรับความหนาของคอนกรีตเททับหน้าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดและมวลเพิ่มขึ้น ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแรงแรงเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นไม่มาก แต่มีผลกับมวลมากกว่า การที่มวลเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความถี่ธรรมชาติลดลง ดังนั้นในการเพิ่มความหนาของคอนกรีตเททับหน้าจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มความถี่ธรรมชาติ ในตัวอย่าง 5 เมตร ค่าปรับแก้มีค่ามากกว่าการทดสอบทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผลของคุณสมบัติเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปคือแรงดึงในลวดอัดแรงที่น้อยกว่าค่าจริงที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อค่าความแรงแรงของระบบโดยตรง การที่ค่าจากการทดสอบมีค่ามากกว่ามีผลเนื่องจากค่าความแรงแรงของระบบเป็นตัวหลัก เพราะรูปแบบของจตุรรองรับที่ใช้ทางทฤษฎีเป็นจตุรรองรับแบบง่าย (simple support) แต่ในตัวอย่างหรือการใช้งานจริงจตุรรองรับจะมีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ได้บางส่วน ทั้งนี้ได้แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความแรงแรงของระบบในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความแรงแรงของระบบจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการทดสอบของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างความยาว ตัวอย่าง 3, 4 และ 5 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1,340 - 2,183 กิโลนิวตันต่อเมตร, 679 - 1,112 กิโลนิวตันต่อเมตร และ 533 - 704 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ โดยค่าจากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าทางทฤษฎีที่ปรับแก้แล้วเท่ากับ 10 - 30% ค่าความ

แกร่งจากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าจากทฤษฎีให้ผลที่สอดคล้องกับผลของค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้กล่าวข้างต้น

ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างเนื่องจากแรงกระทำที่กิจกรรมต่างๆ จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.13 - 4.15 และรูปที่ 4.11 แสดงค่าความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาวขนาดต่างๆ และมีสัดส่วนกว้างต่อยาวเท่ากับ 1 : 1 ภายใต้กิจกรรมแต่ละชนิด และขนาดของแรงกระทำเท่ากับ 60 กิโลกรัม จากตารางที่ 4.13 - 4.15 และรูปที่ 4.11 จะได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดที่วิเคราะห์ทางทฤษฎีมีค่าสูงสุด รองลงมาคือค่าจากทฤษฎีที่มีการปรับแก้ค่าคุณสมบัติของวัสดุแล้ว และค่าจากการทดสอบพร้อมปรับแก้ค่าแล้วมีค่าน้อยที่สุด พื้นความยาว 4 เมตร มีค่าความเร่งสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ 3 เมตร และความยาว 5 เมตรมีค่าน้อยที่สุด ขณะที่พื้นความยาว 5 เมตรมีความถี่ธรรมชาติมีค่าน้อยที่สุด และ 3 เมตรมีความถี่ธรรมชาติมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร่งสูงสุดไม่ได้ขึ้นกับความถี่ธรรมชาติอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับมวลของระบบอีกด้วย จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่มีการปรับแก้ค่าแล้วมีค่าน้อยกว่าค่าจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ปรับแก้ค่าแล้วประมาณ 4 - 14%

รายละเอียดในส่วนนี้จะแสดงถึงการเปรียบเทียบผลวิจัยเชิงทฤษฎีจากตัวอย่างที่ใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปกับข้อมูลคุณสมบัติที่ปรับแก้ใหม่ของจากตัวอย่างผลที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง เพื่อดูผลความคลาดเคลื่อนจากการเตรียมตัวอย่างจริงกับค่าที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตฯ ต่อจากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ปรับแก้แล้วกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ในเบื้องต้นจะเปรียบเทียบผลของค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ต่อจากนั้นจะพิจารณาความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบ

ค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในตอนเริ่มต้น ปรับแก้ และจากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10 จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ปรับแก้แล้วจะมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น และใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากค่าที่ปรับแก้คือ กำลังอัดของคอนกรีตเททับหน้า และความหนา มีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น สำหรับตัวอย่าง 3 เมตรมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้นมากกว่ากรณีอื่นๆ (11.81%) เพราะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตเททับหน้ามากกว่าค่าเริ่มต้นมาก ถึงแม้จะมีความหนาของคอนกรีตเททับหน้าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่าง 4 เมตรก็ตาม ทั้งนี้เป็นมีสาเหตุมาจากค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะมีผลกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีผลทำให้ค่าความแกร่งเพิ่มมากขึ้น ( $k$  : stiffness) สำหรับความหนาของคอนกรีตเททับหน้าที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดและมวลเพิ่มขึ้น ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแกร่งเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้น ไม่มาก แต่มีผลกับมวลมากกว่า การที่มวลเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความถี่ธรรมชาติลดลง ดังนั้นในการเพิ่มความหนาของคอนกรีตเททับหน้าจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติในตัวอย่าง 5 เมตร ค่าปรับแก้มีค่ามากกว่าการทดสอบทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผลของคุณสมบัติ

เกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปคือแรงดึงในลวดอัดแรงที่น้อยกว่าค่าจริงที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อค่าความแกร่งของระบบโดยตรง โดยภาพรวมแล้วจะเห็นว่าค่าจากการวิเคราะห์มีค่าต่างจากค่าการทดสอบอยู่ในช่วง  $\pm 1.6 - 5.5 \%$

ความแรงสูงสุดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในตอนเริ่มต้น ปรับแก้ และจากการทดสอบของตัวอย่างความยาว 3, 4 และ 5 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.13 - 4.15 และรูปที่ 4.11 ที่กิจกรรมต่างๆ

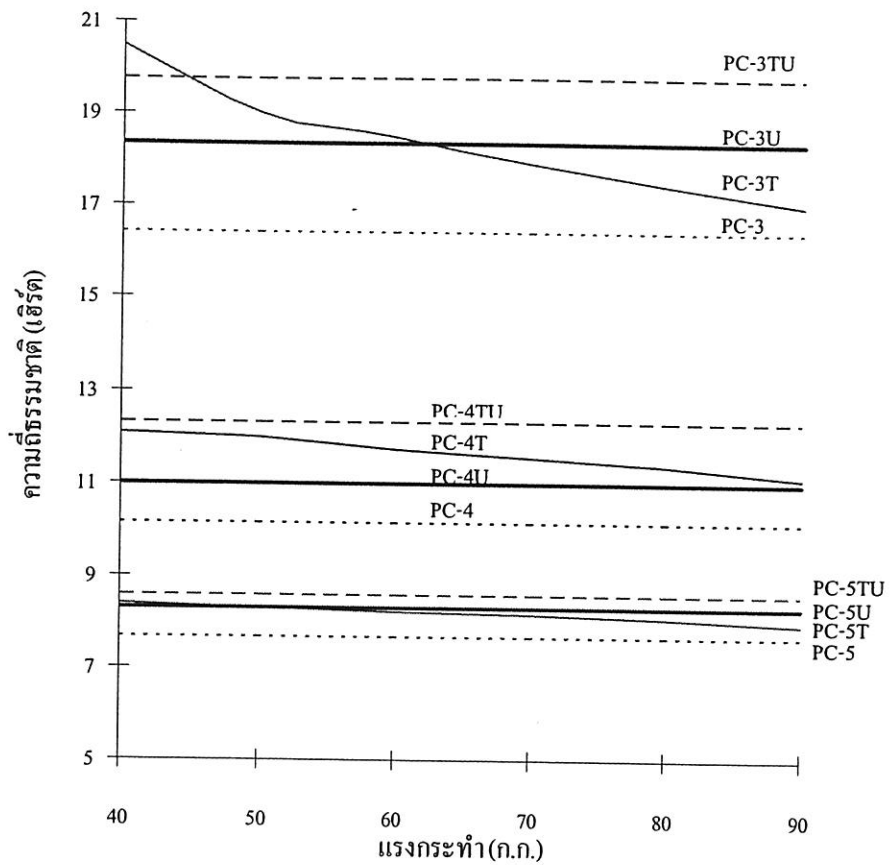
ตารางที่ 4.11 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจากค่าเริ่มต้นที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตฯ (ตารางที่ 4.1) ค่าที่ได้ทำการปรับแก้ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการวัดจากตัวอย่างจริง (ตารางที่ 4.6) และค่าจากการทดสอบจริง

| ตัวอย่าง<br>ที่ | ความถี่ธรรมชาติ (เฮิร์ต) |                  |                    |                   |                   |                  |                    |                   |                   |                  |                    |                   |
|-----------------|--------------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
|                 | 3 เมตร                   |                  |                    |                   | 4 เมตร            |                  |                    |                   | 5 เมตร            |                  |                    |                   |
|                 | ทฤษฎี                    |                  | ทดสอบ              |                   | ทฤษฎี             |                  | ทดสอบ              |                   | ทฤษฎี             |                  | ทดสอบ              |                   |
|                 | เบื้องต้น<br>PC-3        | ปรับแก้<br>PC-3U | เบื้องต้น<br>PC-3T | ปรับแก้<br>PC-3TU | เบื้องต้น<br>PC-4 | ปรับแก้<br>PC-4U | เบื้องต้น<br>PC-4T | ปรับแก้<br>PC-4TU | เบื้องต้น<br>PC-5 | ปรับแก้<br>PC-5U | เบื้องต้น<br>PC-5T | ปรับแก้<br>PC-5TU |
| 40              | 16.42                    | 18.36            | 20.47              | 19.74             | 10.12             | 11.00            | 12.07              | 12.29             | 7.64              | 8.31             | 8.40               | 8.55              |
| 50              |                          |                  | 18.99              |                   |                   |                  | 11.97              |                   |                   |                  | 8.28               |                   |
| 60              |                          |                  | 18.48              |                   |                   |                  | 11.73              |                   |                   |                  | 8.19               |                   |
| 70              |                          |                  | 17.91              |                   |                   |                  | 11.55              |                   |                   |                  | 8.18               |                   |
| 80              |                          |                  | 17.45              |                   |                   |                  | 11.37              |                   |                   |                  | 8.06               |                   |
| 90              |                          |                  | 17.02              |                   |                   |                  | 11.12              |                   |                   |                  | 7.95               |                   |



ความถี่ธรรมชาติของตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ความยาว 3, 4 และ 5 เมตร



รูปที่ 4.10 ค่าความถี่ธรรมชาติของพื้นตัวอย่างจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีช่วงเริ่มต้น และปรับแก้  
เปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.12 ค่าความแกร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่าง

| ตัวอย่าง<br>ยาว<br>(เมตร) | ความแกร่ง (นิวตันต่อเมตร) |           |           |
|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|
|                           | ทฤษฎี                     |           | ทดสอบ     |
|                           | เบื้องต้น                 | ปรับแก้   | ปรับแก้   |
| 3                         | 1,340,596                 | 1,832,308 | 2,183,508 |
| 4                         | 678,799                   | 856,479   | 1,112,340 |
| 5                         | 532,875                   | 639,146   | 704,031   |

ตารางที่ 4.13 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 3 เมตร

| ตัวอย่าง | แรงกระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |         |       |                       |       |         |       |                    |       |         |       |
|----------|------------------------|--|-------|---------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|--------------------|-------|---------|-------|
|          |                        | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |         |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |         |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |         |       |
|          |                        | สัดส่วน                                    |       |         |       | สัดส่วน               |       |         |       | สัดส่วน            |       |         |       |
|          |                        | 1 : 0.5                                    | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5               | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5            | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 |
| PC-3     | 40                     | 0.372                                      | 0.186 | 0.124   | 0.093 | 0.254                 | 0.127 | 0.085   | 0.064 | 0.151              | 0.076 | 0.050   | 0.038 |
|          | 50                     | 0.466                                      | 0.233 | 0.155   | 0.116 | 0.318                 | 0.159 | 0.106   | 0.079 | 0.189              | 0.095 | 0.063   | 0.047 |
|          | 60                     | 0.559                                      | 0.279 | 0.186   | 0.140 | 0.381                 | 0.191 | 0.127   | 0.095 | 0.227              | 0.113 | 0.076   | 0.057 |
|          | 70                     | 0.652                                      | 0.326 | 0.217   | 0.163 | 0.445                 | 0.223 | 0.148   | 0.111 | 0.265              | 0.132 | 0.088   | 0.066 |
|          | 80                     | 0.745                                      | 0.372 | 0.248   | 0.186 | 0.509                 | 0.254 | 0.170   | 0.127 | 0.302              | 0.151 | 0.101   | 0.076 |
|          | 90                     | 0.838                                      | 0.419 | 0.279   | 0.209 | 0.572                 | 0.286 | 0.191   | 0.143 | 0.340              | 0.170 | 0.113   | 0.085 |
| PC-3U    | 40                     | 0.298                                      | 0.149 | 0.099   | 0.074 | 0.205                 | 0.103 | 0.068   | 0.051 | 0.124              | 0.062 | 0.041   | 0.031 |
|          | 50                     | 0.372                                      | 0.186 | 0.124   | 0.093 | 0.257                 | 0.128 | 0.086   | 0.064 | 0.155              | 0.077 | 0.052   | 0.039 |
|          | 60                     | 0.447                                      | 0.223 | 0.149   | 0.112 | 0.308                 | 0.154 | 0.103   | 0.077 | 0.186              | 0.093 | 0.062   | 0.046 |
|          | 70                     | 0.521                                      | 0.261 | 0.174   | 0.130 | 0.359                 | 0.180 | 0.120   | 0.090 | 0.217              | 0.108 | 0.072   | 0.054 |
|          | 80                     | 0.596                                      | 0.298 | 0.199   | 0.149 | 0.410                 | 0.205 | 0.137   | 0.103 | 0.248              | 0.124 | 0.083   | 0.062 |
|          | 90                     | 0.670                                      | 0.335 | 0.223   | 0.168 | 0.462                 | 0.231 | 0.154   | 0.115 | 0.279              | 0.139 | 0.093   | 0.070 |
| PC-3TU   | 40                     | 0.273                                      | 0.137 | 0.091   | 0.068 | 0.191                 | 0.096 | 0.064   | 0.048 | 0.115              | 0.058 | 0.038   | 0.029 |
|          | 50                     | 0.342                                      | 0.171 | 0.114   | 0.085 | 0.239                 | 0.119 | 0.080   | 0.060 | 0.144              | 0.072 | 0.048   | 0.036 |
|          | 60                     | 0.410                                      | 0.205 | 0.137   | 0.103 | 0.287                 | 0.143 | 0.096   | 0.072 | 0.173              | 0.087 | 0.058   | 0.043 |
|          | 70                     | 0.479                                      | 0.239 | 0.160   | 0.120 | 0.334                 | 0.167 | 0.111   | 0.084 | 0.202              | 0.101 | 0.067   | 0.050 |
|          | 80                     | 0.547                                      | 0.273 | 0.182   | 0.137 | 0.382                 | 0.191 | 0.127   | 0.096 | 0.231              | 0.115 | 0.077   | 0.058 |
|          | 90                     | 0.615                                      | 0.308 | 0.205   | 0.154 | 0.430                 | 0.215 | 0.143   | 0.107 | 0.260              | 0.130 | 0.087   | 0.065 |

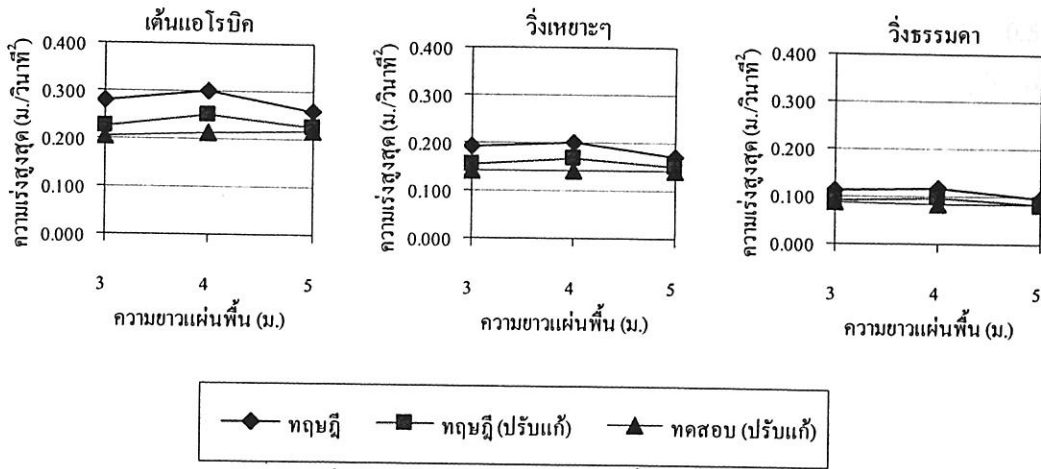
ตารางที่ 4.14 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 4 เมตร

| ตัวอย่าง | แรงกระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |         |       |                       |       |         |       |                    |       |         |       |
|----------|------------------------|--|-------|---------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|--------------------|-------|---------|-------|
|          |                        | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |         |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |         |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |         |       |
|          |                        | สัดส่วน                                    |       |         |       | สัดส่วน               |       |         |       | สัดส่วน            |       |         |       |
|          |                        | 1 : 0.5                                    | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5               | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5            | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 |
| PC-4     | 40                     | 0.403                                      | 0.201 | 0.134   | 0.101 | 0.266                 | 0.133 | 0.089   | 0.066 | 0.153              | 0.077 | 0.051   | 0.038 |
|          | 50                     | 0.503                                      | 0.252 | 0.168   | 0.126 | 0.332                 | 0.166 | 0.111   | 0.083 | 0.192              | 0.096 | 0.064   | 0.048 |
|          | 60                     | 0.604                                      | 0.302 | 0.201   | 0.151 | 0.399                 | 0.199 | 0.133   | 0.100 | 0.230              | 0.115 | 0.077   | 0.058 |
|          | 70                     | 0.705                                      | 0.352 | 0.235   | 0.176 | 0.465                 | 0.232 | 0.155   | 0.116 | 0.269              | 0.134 | 0.090   | 0.067 |
|          | 80                     | 0.805                                      | 0.403 | 0.268   | 0.201 | 0.531                 | 0.266 | 0.177   | 0.133 | 0.307              | 0.153 | 0.102   | 0.077 |
|          | 90                     | 0.906                                      | 0.453 | 0.302   | 0.227 | 0.598                 | 0.299 | 0.199   | 0.149 | 0.345              | 0.173 | 0.115   | 0.086 |
| PC-4U    | 40                     | 0.331                                      | 0.166 | 0.110   | 0.083 | 0.221                 | 0.111 | 0.074   | 0.055 | 0.128              | 0.064 | 0.043   | 0.032 |
|          | 50                     | 0.414                                      | 0.207 | 0.138   | 0.104 | 0.277                 | 0.138 | 0.092   | 0.069 | 0.160              | 0.080 | 0.053   | 0.040 |
|          | 60                     | 0.497                                      | 0.249 | 0.166   | 0.124 | 0.332                 | 0.166 | 0.111   | 0.083 | 0.193              | 0.096 | 0.064   | 0.048 |
|          | 70                     | 0.580                                      | 0.290 | 0.193   | 0.145 | 0.387                 | 0.194 | 0.129   | 0.097 | 0.225              | 0.112 | 0.075   | 0.056 |
|          | 80                     | 0.663                                      | 0.331 | 0.221   | 0.166 | 0.442                 | 0.221 | 0.147   | 0.111 | 0.257              | 0.128 | 0.086   | 0.064 |
|          | 90                     | 0.746                                      | 0.373 | 0.249   | 0.186 | 0.498                 | 0.249 | 0.166   | 0.124 | 0.289              | 0.144 | 0.096   | 0.072 |
| PC-4TU   | 40                     | 0.284                                      | 0.142 | 0.095   | 0.071 | 0.191                 | 0.096 | 0.064   | 0.048 | 0.112              | 0.056 | 0.037   | 0.028 |
|          | 50                     | 0.355                                      | 0.178 | 0.118   | 0.089 | 0.239                 | 0.119 | 0.080   | 0.060 | 0.139              | 0.070 | 0.046   | 0.035 |
|          | 60                     | 0.427                                      | 0.213 | 0.142   | 0.107 | 0.287                 | 0.143 | 0.096   | 0.072 | 0.167              | 0.084 | 0.056   | 0.042 |
|          | 70                     | 0.498                                      | 0.249 | 0.166   | 0.124 | 0.335                 | 0.167 | 0.112   | 0.084 | 0.195              | 0.098 | 0.065   | 0.049 |
|          | 80                     | 0.569                                      | 0.284 | 0.190   | 0.142 | 0.382                 | 0.191 | 0.127   | 0.096 | 0.223              | 0.112 | 0.074   | 0.056 |
|          | 90                     | 0.640                                      | 0.320 | 0.213   | 0.160 | 0.430                 | 0.215 | 0.143   | 0.108 | 0.251              | 0.126 | 0.084   | 0.063 |

ตารางที่ 4.15 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่างความยาว 5 เมตร

| ตัวอย่าง | แรงกระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |         |       |                       |       |         |       |                    |       |         |       |
|----------|------------------------|--|-------|---------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|--------------------|-------|---------|-------|
|          |                        | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |         |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |         |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |         |       |
|          |                        | สัดส่วน                                    |       |         |       | สัดส่วน               |       |         |       | สัดส่วน            |       |         |       |
|          |                        | 1 : 0.5                                    | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5               | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 0.5            | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 |
| PC-5     | 40                     | 0.347                                      | 0.174 | 0.116   | 0.087 | 0.227                 | 0.114 | 0.076   | 0.057 | 0.130              | 0.065 | 0.043   | 0.032 |
|          | 50                     | 0.434                                      | 0.217 | 0.145   | 0.108 | 0.284                 | 0.142 | 0.095   | 0.071 | 0.162              | 0.081 | 0.054   | 0.040 |
|          | 60                     | 0.521                                      | 0.260 | 0.174   | 0.130 | 0.341                 | 0.170 | 0.114   | 0.085 | 0.194              | 0.097 | 0.065   | 0.049 |
|          | 70                     | 0.607                                      | 0.304 | 0.202   | 0.152 | 0.397                 | 0.199 | 0.132   | 0.099 | 0.227              | 0.113 | 0.076   | 0.057 |
|          | 80                     | 0.694                                      | 0.347 | 0.231   | 0.174 | 0.454                 | 0.227 | 0.151   | 0.114 | 0.259              | 0.130 | 0.086   | 0.065 |
|          | 90                     | 0.781                                      | 0.390 | 0.260   | 0.195 | 0.511                 | 0.255 | 0.170   | 0.128 | 0.291              | 0.146 | 0.097   | 0.073 |
| PC-5U    | 40                     | 0.302                                      | 0.151 | 0.101   | 0.076 | 0.198                 | 0.099 | 0.066   | 0.050 | 0.113              | 0.057 | 0.038   | 0.028 |
|          | 50                     | 0.378                                      | 0.189 | 0.126   | 0.094 | 0.248                 | 0.124 | 0.083   | 0.062 | 0.142              | 0.071 | 0.047   | 0.035 |
|          | 60                     | 0.453                                      | 0.227 | 0.151   | 0.113 | 0.297                 | 0.149 | 0.099   | 0.074 | 0.170              | 0.085 | 0.057   | 0.042 |
|          | 70                     | 0.529                                      | 0.264 | 0.176   | 0.132 | 0.347                 | 0.174 | 0.116   | 0.087 | 0.198              | 0.099 | 0.066   | 0.050 |
|          | 80                     | 0.604                                      | 0.302 | 0.201   | 0.151 | 0.397                 | 0.198 | 0.132   | 0.099 | 0.227              | 0.113 | 0.076   | 0.057 |
|          | 90                     | 0.680                                      | 0.340 | 0.227   | 0.170 | 0.446                 | 0.223 | 0.149   | 0.112 | 0.255              | 0.127 | 0.085   | 0.064 |
| PC-5TU   | 40                     | 0.289                                      | 0.145 | 0.096   | 0.072 | 0.190                 | 0.095 | 0.063   | 0.048 | 0.109              | 0.054 | 0.036   | 0.027 |
|          | 50                     | 0.361                                      | 0.181 | 0.120   | 0.090 | 0.238                 | 0.119 | 0.079   | 0.059 | 0.136              | 0.068 | 0.045   | 0.034 |
|          | 60                     | 0.434                                      | 0.217 | 0.145   | 0.108 | 0.285                 | 0.143 | 0.095   | 0.071 | 0.163              | 0.082 | 0.054   | 0.041 |
|          | 70                     | 0.506                                      | 0.253 | 0.169   | 0.127 | 0.333                 | 0.166 | 0.111   | 0.083 | 0.190              | 0.095 | 0.063   | 0.048 |
|          | 80                     | 0.578                                      | 0.289 | 0.193   | 0.145 | 0.380                 | 0.190 | 0.127   | 0.095 | 0.218              | 0.109 | 0.073   | 0.054 |
|          | 90                     | 0.651                                      | 0.325 | 0.217   | 0.163 | 0.428                 | 0.214 | 0.143   | 0.107 | 0.245              | 0.122 | 0.082   | 0.061 |

ความเร่งสูงสุดและความยาวแผ่นพื้น (อัตราส่วน กว้าง : ยาว = 1 : 1)  
ภายใต้แรงกระทำชนิดต่างๆ ขนาด 60 กิโลกรัม



รูปที่ 4.11 ความเร่งสูงสุดของพื้นตัวอย่าง

#### 4. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับมาตรฐาน

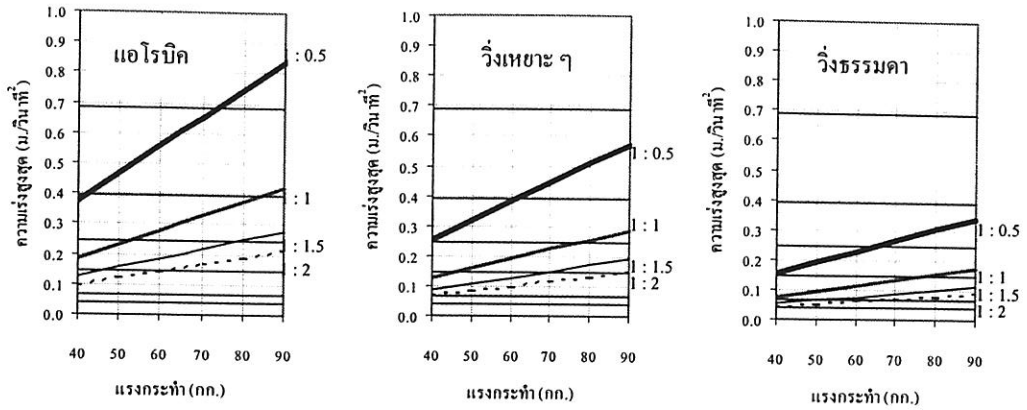
นำผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งสูงสุดทั้งทางทฤษฎีและจากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ National Building Code of Canada ปี 1995 (NBCC 1995) ส่วนที่มีการระบุเกี่ยวกับค่าความเร่งสูงสุดในการออกแบบระบบพื้นดังแสดงในตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนจึงแสดงในการเปรียบเทียบแบบกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 โดยรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกับ NBCC 1995 และรูปที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากการทดสอบกับ NBCC 1995

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าค่าจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พื้นความยาว 3 - 5 เมตร ภายใต้กิจกรรมการเต้นแอโรบิก ได้ผลดังนี้ 1. พื้นสัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงกว่า 0.04g และมีบางส่วนสูงกว่า 0.07g 2. พื้นสัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.025g - 0.04g 3. พื้นสัดส่วน 1 : 1.5 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.015g - 0.025g 4. พื้นสัดส่วน 1 : 2 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.025g ไม่มีส่วนที่สูงกว่า 0.025g และไม่มีส่วนที่ต่ำกว่า 0.007g ภายใต้กิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ ได้ผลดังนี้ 1. พื้นสัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.025g - 0.07g 2. พื้นสัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.015g - 0.04g 3. พื้นสัดส่วน 1 : 1.5 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.025g 4. พื้นสัดส่วน 1 : 2 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.015g ไม่มีส่วนที่สูงกว่า 0.015g และภายใต้กิจกรรมการวิ่งธรรมดา ได้ผลดังนี้ 1. พื้นสัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.015g - 0.04g 2. พื้นสัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.015g มีเพียงเล็กน้อยที่สูงกว่า 0.015g 3. พื้นสัดส่วน 1 : 1.5 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.004g - 0.007g มีส่วนที่มากกว่า

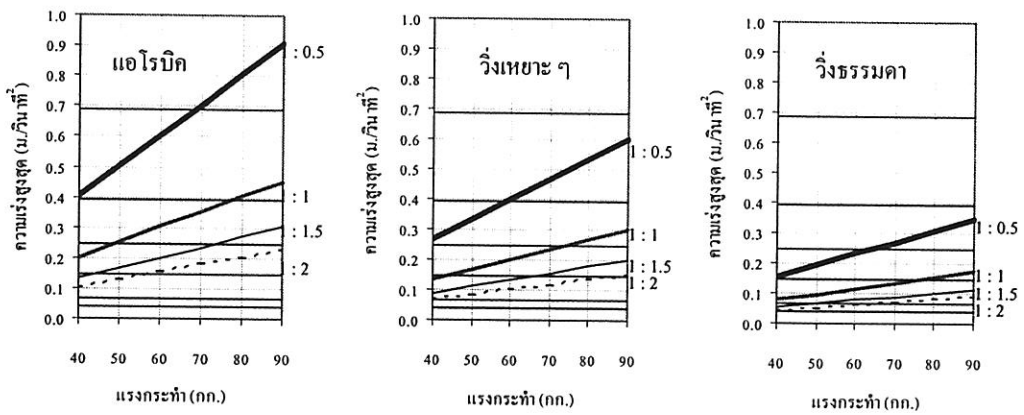
0.007g พอสสมควร 4. พื้นที่สัดส่วน 1 : 2 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.004g - 0.007g มีส่วนที่สูงกว่า 0.007g เพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.13 ภายใต้กิจกรรมการเดินแอโรบิค ได้ผลดังนี้ 1. พื้นที่สัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.04g - 0.07g 2. พื้นที่สัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.015g - 0.004g 3. พื้นที่สัดส่วน 1 : 1.5 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.025g 4. พื้นที่สัดส่วน 1 : 2 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.015g ไม่มีส่วนที่สูงกว่า 0.015g และไม่มีส่วนที่ต่ำกว่า 0.007g ภายใต้กิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ ได้ผลดังนี้ 1. พื้นที่สัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.025g - 0.04g มีเพียงเล็กน้อยที่มากกว่า 0.04g 2. พื้นที่สัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.025g 3. พื้นที่สัดส่วน 1 : 1.5 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.015g 4. พื้นที่สัดส่วน 1 : 2 ค่าความเร่งสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.004g - 0.015g ไม่มีส่วนที่สูงกว่า 0.015g และไม่มีส่วนที่ต่ำกว่า 0.004g และภายใต้กิจกรรมการวิ่งธรรมดา ได้ผลดังนี้ 1. พื้นที่สัดส่วน 1 : 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.007g - 0.0025g 2. พื้นที่สัดส่วน 1 : 1 ค่าความเร่งสูงสุด

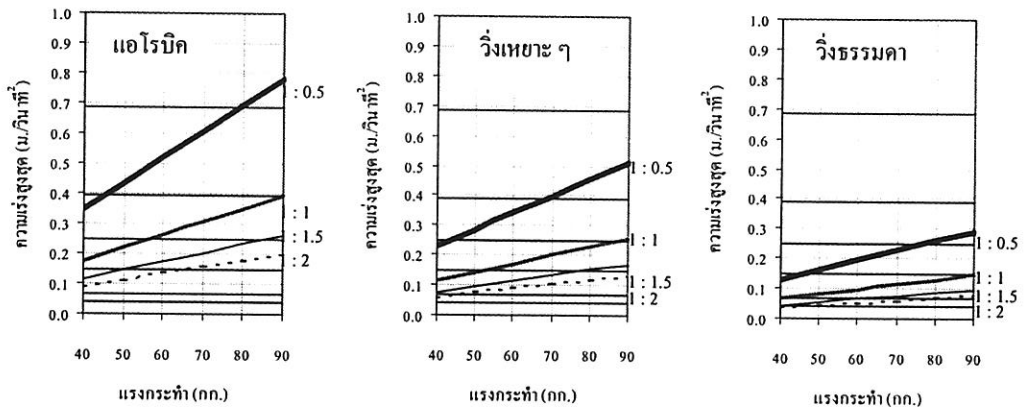
โดยภาพรวมสามารถสรุปได้ว่าความเร่งสูงสุดทั้งการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดสอบมีค่าความเร่งอยู่ระหว่าง 0.004g - 0.07g ค่าส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.007g - 0.04g จะเห็นได้ว่าค่าเหล่านี้สูงกว่าค่ามาตรฐาน NBCC 1995 ถึงแม้จะพิจารณาการกระแทกเท้าเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ควรมีการปรับปรุงระบบพื้นให้มีความสามารถในการต้านทานการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับระดับความเร่งสูงสุดในมาตรฐาน NBCC 1995 ที่ใช้กับลักษณะของอาคารชนิดต่างๆ



(ก) PC-3

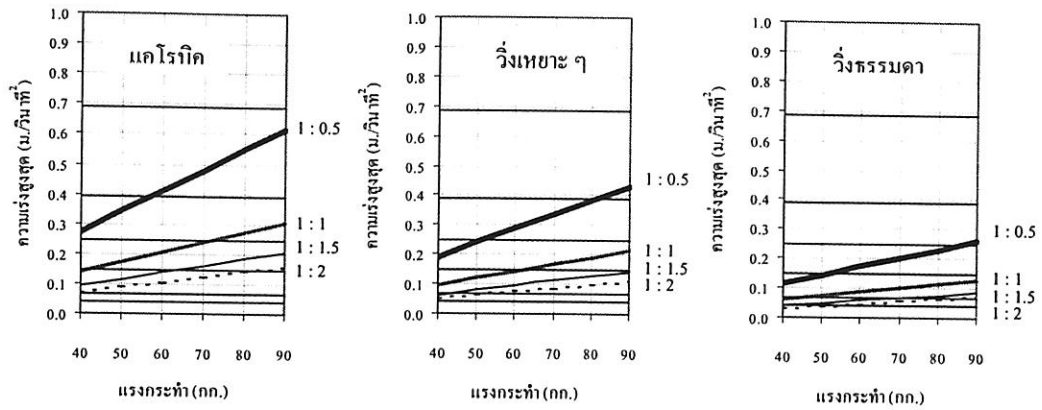


(ข) PC-4

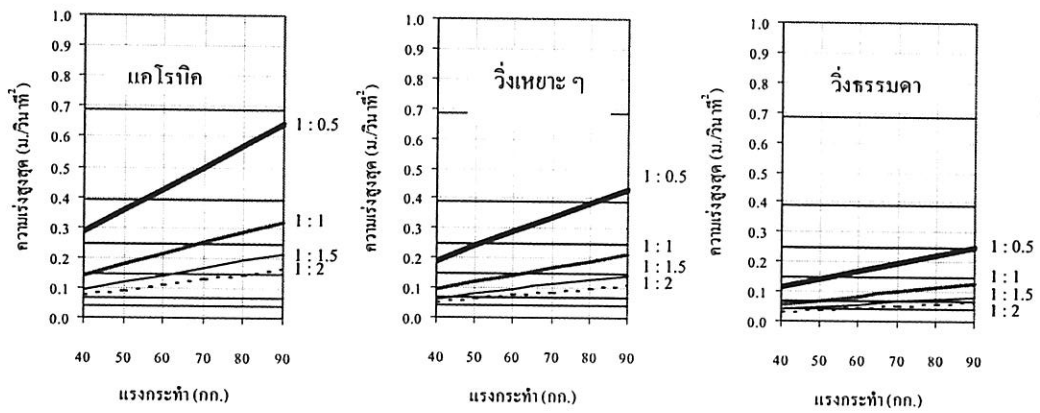


(ค) PC-5

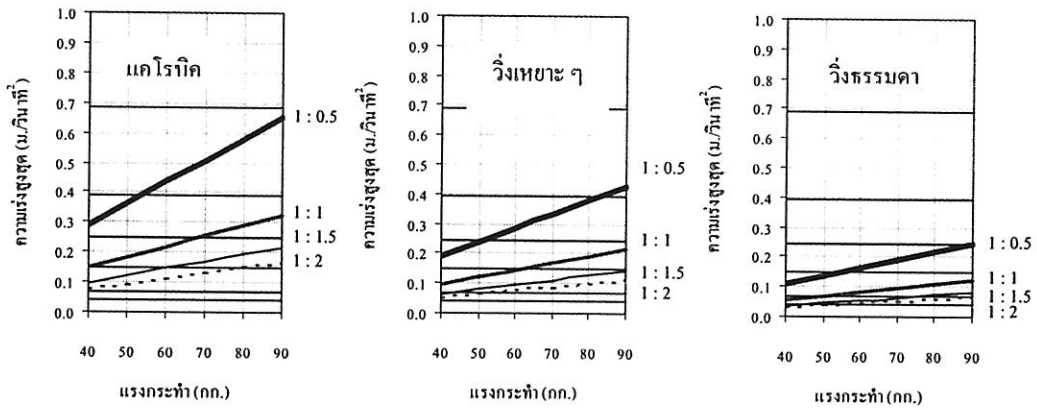
รูปที่ 4.12 ความเร่งสูงสุดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน NBCC 1995



(ก) PC-3T



(ข) PC-4T



(ค) PC-5T

รูปที่ 4.13 ความแรงสูงสุดจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน NBCC 1995



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้แบ่งย่อยออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ 1. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป 2. พฤติกรรมการสั่นของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน และ 4. ข้อเสนอแนะ โดยจะสรุปเฉพาะผลงานของงานวิจัยปีที่ 1 เท่านั้น ไม่ครอบคลุมถึงการวิจัยในปีที่ 2

#### 1. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบพื้น ได้แก่ มวล ความแกร่ง ความถี่ธรรมชาติ ความหน่วง

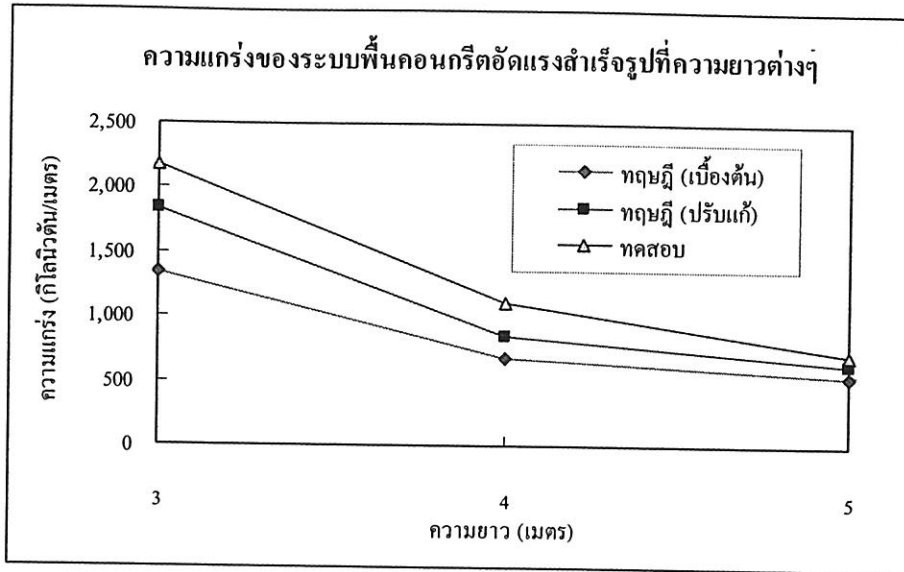
ความแกร่งของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปความยาวตั้งแต่ 3 – 5 เมตรสามารถสรุปได้โดยภาพรวมว่ามีค่าดังนี้

| ความยาว (เมตร) | ความแกร่ง (กิโลนิวตัน/เมตร) |                 |           |
|----------------|-----------------------------|-----------------|-----------|
|                | ทฤษฎี (เบื้องต้น)           | ทฤษฎี (ปรับแก้) | ทดสอบ     |
| 3              | 1,340,596                   | 1,832,308       | 2,183,508 |
| 4              | 678,799                     | 856,479         | 1,112,340 |
| 5              | 532,875                     | 639,146         | 704,031   |

หมายเหตุ : ค่าในตารางวิเคราะห์จากแผ่นพื้น 3 แผ่นวางเรียงกันแล้วเทคอนกรีตทับหน้า

จากตารางและรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าทางจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ปรับแก้ค่าคุณสมบัติของวัสดุและขนาดเหมือนกับตัวอย่างทดสอบแล้ว ประมาณ 10 – 30% ทั้งนี้มีสาเหตุจากความแข็งแรงของจตุรองรับเป็นสาเหตุหลัก เนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพิจารณาเป็นจตุรองรับแบบง่ายไม่สามารถรับโมเมนต์ได้ แต่จากการทดสอบและสภาพการใช้งานจริงที่จตุรองรับสามารถรับโมเมนต์ได้บางส่วน สำหรับค่าทฤษฎีเบื้องต้นกับปรับแก้มีค่าต่างกัน เนื่องจากในการเตรียมตัวอย่างไม่สามารถทำให้คุณสมบัติของวัสดุ (กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเททับหน้า) และขนาด (ความหนา) ได้เหมือนกับค่าที่กำหนดเบื้องต้น จากตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ความยาวได้ค่ากำลังอัดประลัย และความหนามากกว่าค่าที่กำหนดเบื้องต้นจึงทำให้ค่าจากการปรับแก้มีค่ามากกว่าค่าจากทฤษฎีเบื้องต้น

ถ้าต้องการหาค่าความแกร่งของระบบพื้นที่มีจะนวนแผ่นพื้นต่างไปจาก 3 แผ่นวางเรียงต่อกันสามารถหาได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์จากค่าในตารางได้



รูปที่ 5.1 ความแข็งแรงของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ความยาวต่างๆ

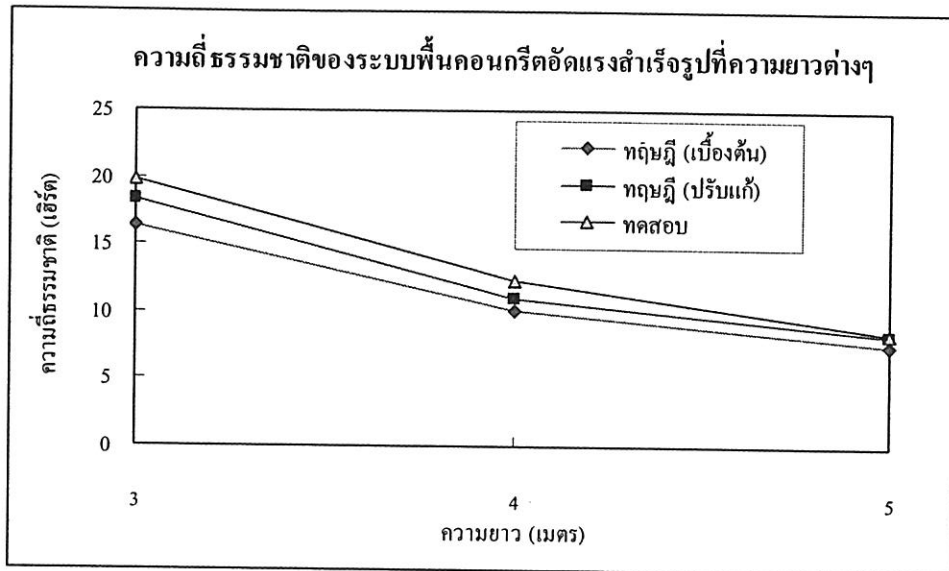
ความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปความยาวตั้งแต่ 3 – 5 เมตร สามารถสรุปได้โดยภาพรวมว่ามีค่าดังนี้

| ความยาว (เมตร) | ความถี่ธรรมชาติ (เฮิร์ต) |                 |       |
|----------------|--------------------------|-----------------|-------|
|                | ทฤษฎี (เบื้องต้น)        | ทฤษฎี (ปรับแก้) | ทดสอบ |
| 3              | 16.42                    | 18.36           | 19.74 |
| 4              | 10.12                    | 11.00           | 12.29 |
| 5              | 7.64                     | 8.31            | 8.55  |

ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้เป็นตัวแทนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปความยาว 3 – 5 เมตร (ต่างจากค่าความแข็งแรงที่พิจารณาพื้นเพียง 3 แผ่นเท่านั้น) จากตารางและรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าทางจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ปรับแก้ค่าคุณสมบัติของวัสดุและขนาดเหมือนกับตัวอย่างทดสอบแล้ว ประมาณ 3 – 12% ทั้งนี้เนื่องจากค่าความแข็งแรงที่มากขึ้นทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติมีค่ามากขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าค่าจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสามารถนำมาใช้ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของระบบในเบื้องต้นได้

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่าเมื่อความยาวพื้นเพิ่มมากขึ้นค่าทั้งสามกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ ตัวแปรแต่ละตัวในการหาค่าความแข็งแรงและความถี่ธรรมชาติทั้งสามกรณีมีความแตกต่างกันในระดับที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้าพิจารณาสัดส่วนความแตกต่างเทียบกับความยาวของพื้นแล้ว พื้นที่ยาวกว่าจะมีสัดส่วนมากกว่า ดังนั้นผลของสัดส่วนที่

มากกว่านี้ทำให้ค่าความแกร่งและค่าความถึธรรมชาติที่ได้จากทั้งสามกรณีมีค่าค่อนข้างต่างกันมาก ส่วนพื้นที่ยาวกว่ามีสัดส่วนความแตกต่างต่อความยาวน้อยกว่า ค่าความแกร่งและค่าความถึธรรมชาติของทั้งสามกรณีจึงต่างกันน้อยกว่าพื้นที่สั้นกว่า



รูปที่ 5.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ความยาวต่างๆ

## 2. พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนำเสนอเกี่ยวกับความเร่งสูงสุดของระบบเนื่องจากความเร่งของระบบมีผลของมวล (พิจารณาพื้นที่ตามสัดส่วนของค้ำยาวของแผ่นพื้นต่อค้ำกว้างที่นำพื้นมาเรียงต่อกัน คือ 1 : 0.5, 1 : 1 1 : 1.5 และ 1 : 2) ขนาดของแรงกระทำ (40 – 90 กิโลกรัม) ชนิดของกิจกรรม (เดิน แอโรบิก วิ่งเหยาะๆ และวิ่งธรรมดา)

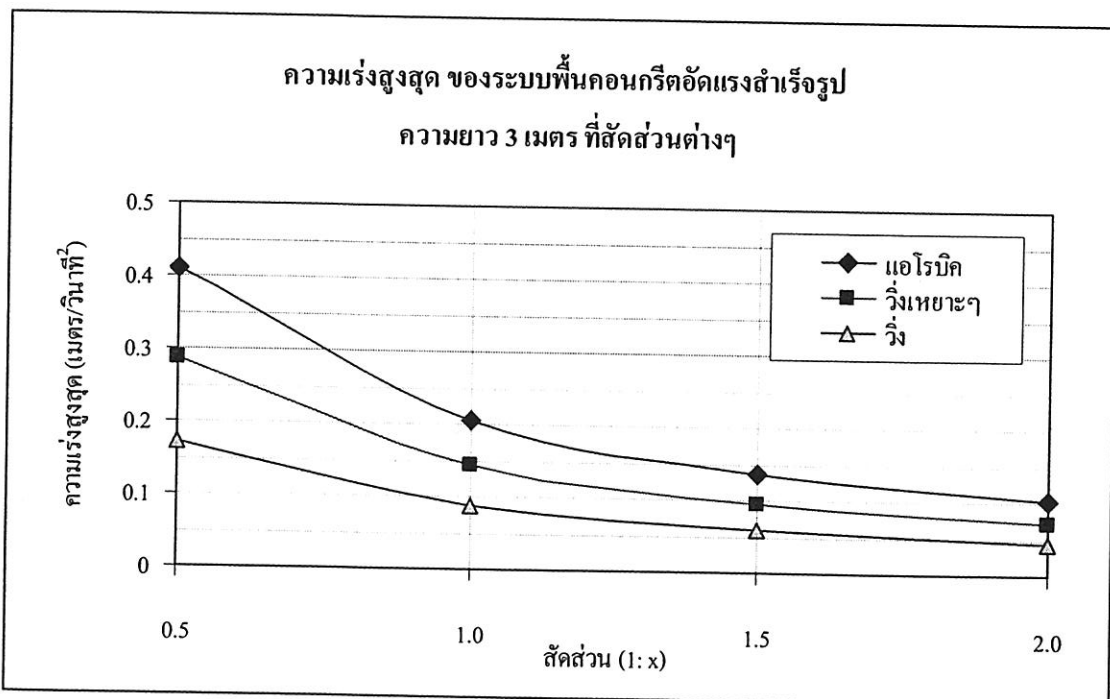
ภาพรวมค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงได้ค่าดังตาราง

| ความยาว (เมตร) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |                                    |                                    |
|----------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
|                | ทฤษฎี (เบื้องต้น)                          | ทฤษฎี (ปรับแก้)                    | ทดสอบ                              |
| 3              | 0.038 – 0.838<br>(0.004g – 0.085g)         | 0.031 – 0.670<br>(0.003g – 0.068g) | 0.029 – 0.615<br>(0.003g – 0.063g) |
| 4              | 0.038 – 0.906<br>(0.004g – 0.092g)         | 0.032 – 0.746<br>(0.003g – 0.076g) | 0.028 – 0.640<br>(0.003g – 0.065g) |
| 5              | 0.032 – 0.781<br>(0.003g – 0.080g)         | 0.028 – 0.680<br>(0.003g – 0.069g) | 0.027 – 0.651<br>(0.003g – 0.066g) |

จากตารางจะเห็นว่าพื้นที่ความยาว 3 4 และ 5 เมตร มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าผลของมวลและความถี่ธรรมชาติแปรผกผันซึ่งกันและกัน เพราะพื้นที่ความยาวน้อยกว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติสูงกว่าและมีมวลน้อยกว่า เช่นเดียวกับพื้นที่ยาวกว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าและมีมวลมากกว่า ค่าความเร่งสูงสุดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

พิจารณาตามสัดส่วนของระบบพื้นและชนิดของกิจกรรม ของพื้นที่ความยาว 3, 4 และ 5 เมตร นำหนักกระทำ 60 กิโลกรัม วิเคราะห์ความเร่งสูงสุดจากการทดสอบ ได้ผลดังตาราง

| สัดส่วน | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |            |       |         |            |       |         |            |       |
|---------|--|------------|-------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|
|         | 3 เมตร                                     |            |       | 4 เมตร  |            |       | 5 เมตร  |            |       |
|         | แอโรบิค                                    | วิ่งเหยาะๆ | วิ่ง  | แอโรบิค | วิ่งเหยาะๆ | วิ่ง  | แอโรบิค | วิ่งเหยาะๆ | วิ่ง  |
| 1 : 0.5 | 0.410                                      | 0.287      | 0.173 | 0.427   | 0.287      | 0.167 | 0.434   | 0.285      | 0.163 |
| 1 : 1   | 0.205                                      | 0.143      | 0.087 | 0.213   | 0.143      | 0.084 | 0.217   | 0.143      | 0.082 |
| 1 : 1.5 | 0.137                                      | 0.096      | 0.058 | 0.142   | 0.096      | 0.056 | 0.145   | 0.095      | 0.054 |
| 1 : 2   | 0.103                                      | 0.072      | 0.043 | 0.107   | 0.072      | 0.042 | 0.108   | 0.071      | 0.041 |



รูปที่ 5.3 ความเร่งสูงสุดของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ความยาว 3 เมตร ที่สัดส่วนต่างๆ

จากตาราง จะได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดของระบบพื้น 3, 4 และ 5 เมตร มีความแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากมวลและความถี่ธรรมชาติของระบบแปรผกผันซึ่งกันและกันจึงทำให้ภาพรวมของค่าความเร่งสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน จากตารางและรูปที่ 5.3 เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับสัดส่วนของขนาด

แล้วจะเห็นว่า ที่สัดส่วน 1 : 0.5 และ 1 : 2 มีค่าความเร่งสูงสุดเป็น 2 เท่า และ 0.5 เท่า ของค่าความเร่งสูงสุดที่สัดส่วน 1 : 1 แต่ที่ 1 : 1.5 กลับไม่เป็น 0.75 เท่าของ 1 : 1 แต่เป็น 0.67 เท่า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ว่า การลดลงจะมีค่าเท่ากับ ความยาวของแผ่นพื้นต่อด้านที่นำแผ่นพื้นมาเรียงกัน เมื่อเทียบกับสัดส่วน 1 : 1 เช่น ถ้ามีสัดส่วน 1 : 1.5 จะมีความเร่งสูงสุดลดลงเท่ากับ  $1/1.5 = 0.67$  เท่าของสัดส่วน 1 : 1 และ สัดส่วน 1 : 0.5 จะมีความเร่งสูงสุดลดลงเท่ากับ  $1/0.5 = 2$  เท่าของสัดส่วน 1 : 1

เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับชนิดของกิจกรรม เห็นได้อย่างชัดเจนว่ากิจกรรมที่ทำให้เกิดความเร่งสูงสุดเรียงจากมากไปน้อยได้แก่ การเดินแอโรบิก การวิ่งเหยาะๆ และการวิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับค่าตัวคูณการกระแทกของแรงมีค่าเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยเช่นกัน แต่เมื่อสัดส่วนของพื้นมีค่ามากขึ้นซึ่งหมายถึงมวลของระบบรวมมีค่ามากขึ้น ผลของแรงเมื่อเทียบกับมวลรวมของระบบจึงมีค่าน้อยทำให้ค่าความเร่งสูงสุดในแต่ละกิจกรรมต่างก็น้อยลง กราฟจึงถูเจ้าหากันที่สัดส่วนของพื้นมากขึ้น

พิจารณาตามขนาดของแรงกระทำต่อระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ความยาว 3, 4 และ 5 เมตร ที่สัดส่วน 1 : 1 วิเคราะห์ความเร่งสูงสุดจากการทดสอบได้ผลดังตาราง

| แรงกระทำ<br>(กิโลกรัม) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |                |       |         |                |       |         |                |       |
|------------------------|--|----------------|-------|---------|----------------|-------|---------|----------------|-------|
|                        | 3 เมตร                                     |                |       | 4 เมตร  |                |       | 5 เมตร  |                |       |
|                        | แอโรบิก                                    | วิ่ง<br>เหยาะๆ | วิ่ง  | แอโรบิก | วิ่ง<br>เหยาะๆ | วิ่ง  | แอโรบิก | วิ่ง<br>เหยาะๆ | วิ่ง  |
| 40                     | 0.137                                      | 0.096          | 0.058 | 0.142   | 0.096          | 0.056 | 0.145   | 0.095          | 0.054 |
| 50                     | 0.171                                      | 0.119          | 0.072 | 0.178   | 0.119          | 0.070 | 0.181   | 0.119          | 0.068 |
| 60                     | 0.205                                      | 0.143          | 0.087 | 0.213   | 0.143          | 0.084 | 0.217   | 0.143          | 0.082 |
| 70                     | 0.239                                      | 0.167          | 0.101 | 0.249   | 0.167          | 0.098 | 0.253   | 0.166          | 0.095 |
| 80                     | 0.273                                      | 0.191          | 0.115 | 0.284   | 0.191          | 0.112 | 0.289   | 0.190          | 0.109 |
| 90                     | 0.308                                      | 0.215          | 0.130 | 0.320   | 0.215          | 0.126 | 0.325   | 0.214          | 0.122 |



จากตารางจะเห็นว่าแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงที่เพิ่มขึ้นถ้าเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของค่าความเร่งสูงสุดโดยให้แรง 40 กิโลกรัมเป็นค่าเริ่มต้น จะได้ว่าที่ 60 กิโลกรัมมีค่าความเร่งสูงกว่า 50% และที่ 80 กิโลกรัม มีค่าความเร่งสูงกว่า 100% จึงสรุปได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดแปรผันตรงกับค่าของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง


### 3. การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐาน

การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับเกณฑ์มาตรฐานเพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบพื้นที่รองรับกิจกรรมต่างๆ ที่ได้ศึกษาในงานวิจัยมีค่าความเร่งสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน เพื่อที่จะได้นำผลการศึกษาวินิจฉัยเปรียบเทียบนี้ไปพัฒนาการออกแบบระบบพื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปต่อไป

การเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานแสดงดังตาราง

| ความยาว (เมตร) | แรงกระทำ (กิโลกรัม) | ความเร่งสูงสุด (เมตร/วินาที <sup>2</sup> ) |       |       |       |                       |       |       |       |                    |       |       |       |
|----------------|---------------------|--|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
|                |                     | เดินแอโรบิก (aero 2.1)                     |       |       |       | วิ่งเหยาะ ๆ (jog 2.5) |       |       |       | วิ่งปกติ (run 3.2) |       |       |       |
|                |                     | สัดส่วน                                    |       |       |       | สัดส่วน               |       |       |       | สัดส่วน            |       |       |       |
|                |                     | 1:0.5                                      | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   | 1:0.5                 | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   | 1:0.5              | 1:1   | 1:1.5 | 1:2   |
| 3.00 (PC-3T)   | 40                  | 0.273                                      | 0.137 | 0.091 | 0.068 | 0.191                 | 0.096 | 0.064 | 0.048 | 0.115              | 0.058 | 0.038 | 0.029 |
|                | 50                  | 0.342                                      | 0.171 | 0.114 | 0.085 | 0.239                 | 0.119 | 0.080 | 0.060 | 0.144              | 0.072 | 0.048 | 0.036 |
|                | 60                  | 0.410                                      | 0.205 | 0.137 | 0.103 | 0.287                 | 0.143 | 0.096 | 0.072 | 0.173              | 0.087 | 0.058 | 0.043 |
|                | 70                  | 0.479                                      | 0.239 | 0.160 | 0.120 | 0.334                 | 0.167 | 0.111 | 0.084 | 0.202              | 0.101 | 0.067 | 0.050 |
|                | 80                  | 0.547                                      | 0.273 | 0.182 | 0.137 | 0.382                 | 0.191 | 0.127 | 0.096 | 0.231              | 0.115 | 0.077 | 0.058 |
|                | 90                  | 0.615                                      | 0.308 | 0.205 | 0.154 | 0.430                 | 0.215 | 0.143 | 0.107 | 0.260              | 0.130 | 0.087 | 0.065 |
| 4.00 (PC-4T)   | 40                  | 0.284                                      | 0.142 | 0.095 | 0.071 | 0.191                 | 0.096 | 0.064 | 0.048 | 0.112              | 0.056 | 0.037 | 0.028 |
|                | 50                  | 0.355                                      | 0.178 | 0.118 | 0.089 | 0.239                 | 0.119 | 0.080 | 0.060 | 0.139              | 0.070 | 0.046 | 0.035 |
|                | 60                  | 0.427                                      | 0.213 | 0.142 | 0.107 | 0.287                 | 0.143 | 0.096 | 0.072 | 0.167              | 0.084 | 0.056 | 0.042 |
|                | 70                  | 0.498                                      | 0.249 | 0.166 | 0.124 | 0.335                 | 0.167 | 0.112 | 0.084 | 0.195              | 0.098 | 0.065 | 0.049 |
|                | 80                  | 0.569                                      | 0.284 | 0.190 | 0.142 | 0.382                 | 0.191 | 0.127 | 0.096 | 0.223              | 0.112 | 0.074 | 0.056 |
|                | 90                  | 0.640                                      | 0.320 | 0.213 | 0.160 | 0.430                 | 0.215 | 0.143 | 0.108 | 0.251              | 0.126 | 0.084 | 0.063 |
| 5.00 (PC-5T)   | 40                  | 0.289                                      | 0.145 | 0.096 | 0.072 | 0.190                 | 0.095 | 0.063 | 0.048 | 0.109              | 0.054 | 0.036 | 0.027 |
|                | 50                  | 0.361                                      | 0.181 | 0.120 | 0.090 | 0.238                 | 0.119 | 0.079 | 0.059 | 0.136              | 0.068 | 0.045 | 0.034 |
|                | 60                  | 0.434                                      | 0.217 | 0.145 | 0.108 | 0.285                 | 0.143 | 0.095 | 0.071 | 0.163              | 0.082 | 0.054 | 0.041 |
|                | 70                  | 0.506                                      | 0.253 | 0.169 | 0.127 | 0.333                 | 0.166 | 0.111 | 0.083 | 0.190              | 0.095 | 0.063 | 0.048 |
|                | 80                  | 0.578                                      | 0.289 | 0.193 | 0.145 | 0.380                 | 0.190 | 0.127 | 0.095 | 0.218              | 0.109 | 0.073 | 0.054 |
|                | 90                  | 0.651                                      | 0.325 | 0.217 | 0.163 | 0.428                 | 0.214 | 0.143 | 0.107 | 0.245              | 0.122 | 0.082 | 0.061 |

หมายเหตุ แต่ละช่องมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง  0.007g – 0.025g  0.025g – 0.07g

 < 0.004g

จากตารางด้านบนแสดงให้เห็นว่าค่าจากการทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.007g – 0.025g ส่วน 0.025g – 0.07g และ < 0.004g มีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยช่วง 0.007g – 0.025g เป็นช่วงที่มีค่าเกินเกณฑ์สำหรับอาคารส่วนห้องทำงานและที่พักอาศัย และ 0.025g – 0.07g เป็นช่วงที่มีค่าเกินเกณฑ์สำหรับอาคารส่วนห้องเดินร่าและห้องออกกำลังกาย ดังนั้นหากต้องการออกแบบอาคารสำหรับห้องต่างๆ ดังที่กำหนดในเกณฑ์มาตรฐานจึงควรพิจารณาถึงค่าความเร่งสูงสุดด้วย

#### 4. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในส่วนนี้ (ปีที่ 1) จัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเมื่อรับแรงกระทำเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์แล้วเกิดการสั่นสะเทือนเป็นอย่างไร มีค่าเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ (หรือทำให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกถึงการสั่นหรือไม่ในระดับมากหรือน้อยเพียงใด โดยใช้เกณฑ์มาตรฐาน NBCC 1995 เป็นหลัก) จากผลการวิจัยได้ว่ามีค่าความเร่งบางส่วนเกินเกณฑ์มาตรฐาน จึงแนะนำให้มีการศึกษาเพื่อลดการสั่นสะเทือนในขั้นการออกแบบต่อไป

ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ทำการวิเคราะห์ทดสอบจากแผ่นพื้น 3 แผ่นเรียงต่อกันแล้วเทคอนกรีตทับหน้า เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ค่าความเร่งสูงสุดสำหรับสัดส่วนอื่นๆ โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์เกี่ยวกับค่าของมวลของระบบ หากต้องการเปรียบเทียบค่าความเร่งที่ได้จึงอาจมีการทดสอบที่สัดส่วนจริงก็ได้

การวิเคราะห์ค่าความเร่งสูงสุดของระบบพื้น ทำโดยนำค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แล้ววิเคราะห์จากแรงกระทำที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากมีความแน่นอนของข้อมูลมากกว่า และเนื่องจากระบบพื้นที่จำลองเป็นพื้นที่จัดเรียงเพียง 3 แผ่น มวลของระบบจึงไม่เหมือนกับการใช้งานจริง จึงต้องมีการเทียบสัดส่วนโดยพิจารณามวลที่เพิ่มขึ้นด้วย หากต้องการทราบค่าความเร่งจริงที่เกิดขึ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการวิเคราะห์ควรทดสอบกับพื้นขนาดจริงตามสัดส่วนที่ได้นำเสนอคือ 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2

ความหน่วงในระบบพื้นมีส่วนช่วยทำให้พื้นมีค่าแอมพลิจูดในการสั่นน้อยลง และสามารถหยุดการสั่นได้เร็วขึ้น โดยขึ้นกับชนิดและหน้าตัดของพื้น, คนหรือสิ่งของหรือโครงสร้างที่อยู่ติดกับพื้น เช่น ฝ้าเพดาน แฉงกันห้อง เป็นต้น โดยถ้ามีจำนวนมากพื้นก็จะมีความหน่วงมาก จากข้อมูลของ Murray (2001) แนะนำ 0.05 หรือ 5% สำหรับ office with fixed partitions 3% สำหรับ conventional or paper offices with demountable partitions และ 2.5% สำหรับ paperless or electronic office สำหรับ Tolaymat (1988) ได้ค่าอัตราส่วนความหน่วงจากการทดสอบกับตัวอย่าง steel joist และ steel beam-concrete slab floor 96 ตัวอย่างโดย single heel-drop impact test ระหว่าง 2 – 10% Maguire and Wyatt (1999) กล่าวว่าระบบพื้นคอนกรีตโดยทั่วไปที่ค่าสัดส่วนความหน่วง อยู่ระหว่าง 0.01 – 0.05 สำหรับพื้นที่ใช้ในกิจกรรมการออกกำลังกายความหน่วงของระบบพื้นจะมีค่ามากขึ้น

ขณะมีผู้ทำกิจกรรม (Brownjohn and Zheng, 2001) สำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์โดยใช้ค่าความหน่วงเท่ากับ 0.03 หากทำการเพิ่มความหน่วงจะทำให้ความเร่งสูงสุดลดลง ดังตัวอย่างของ Kuntiyawichai (2002) ซึ่งวิเคราะห์ finite element ของพื้นคอนกรีตขนาด 9.5 x 9.5 m แบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 256 เอลิเมนต์ และใช้คุณสมบัติของวัสดุดังนี้ โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต = 27.81 GPa สัดส่วนปูนของ = 0.2 และความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,400 kg/m<sup>3</sup> พิจารณาความหนา 3 ค่าคือ 0.24, 0.26 และ 0.28 m สัดส่วนความหน่วง 4 ค่า คือ 0, 1, 2 และ 3% และจุดรองรับสองแบบคือ simply supported และ fixed supported ได้ค่าความถี่ธรรมชาติดังตารางที่ 2.8 ต่อจากนั้นทำการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นเนื่องจากการเดินซึ่งแรงกระทำนี้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ แบ่งการเดินเป็น 2 แบบคือ เดินแบบธรรมดาและเดินแบบเร่งรีบ จากการวิเคราะห์ผลของพื้นที่ความหนาน้อยที่สุดคือ 0.24 m และสัดส่วนความหน่วง 0% และการเดินเป็นการเดินแบบเร่งรีบ ได้ค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 1.43%g แต่เมื่อสัดส่วนความหน่วง เพิ่มขึ้นเป็น 1% ความเร่งสูงสุดลดลงเหลือ 0.17%g (ลดลง 88.11%) แต่เมื่อสัดส่วนเป็น 3% ความเร่งสูงสุดลดลงเหลือ 0.10%g (ลดลง 93% เมื่อเทียบกับกรณีไม่คิดความหน่วง และลดลง 41.18% เมื่อเทียบกับกรณีที่สัดส่วนความหน่วง 1%) จะเห็นว่าระบบที่ไม่มีความหน่วงจะมีการสั่นที่สูง แต่เมื่อมีความหน่วงเพียงเล็กน้อยก็สามารถช่วยลดการสั่นได้มาก แต่เมื่อเพิ่มความหน่วงขึ้นเรื่อย ๆ การสั่นสูงสุดจะลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่นับความหน่วง สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาค่าสัดส่วนความหน่วงเท่ากับ 3% ถือเป็นค่าที่นิยมใช้สำหรับระบบพื้นซึ่งอยู่ประมาณ 1-5% หากต้องการค่าที่ถูกต้องควรมีการคำนวณค่าสัดส่วนความหน่วงจากการทดสอบเพิ่มเติม

ความหนาของคอนกรีตเททับหน้ามีผลต่อคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยรวมของระบบพื้น อาทิเช่น มวล สติฟเนส ความหน่วง ถ้าคอนกรีตเททับหน้าหนาขึ้น จะทำให้ระบบมีมวล สติฟเนส และความหน่วงมากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความหน่วงมีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่น หากต้องการค่าที่ถูกต้องควรมีการทดสอบเพิ่มเติม



## บรรณานุกรม

- Ad Hoc Committee on Serviceability Research. (1986). Structural Serviceability: A Critical Appraisal and Research Need. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 12, Dec.
- Allen, D.E., Rainer, J.H. and Pernica, G. (1985). Vibration Criteria for Assembly Occupancies. Canadian Journal of Civil Engineering, The National Research Council of Canada, Vol. 12, No. 3, 617-623.
- Allen, D.E. (1990). Building Vibrations From Aerobics. Canadian Journal of Civil Engineering, The National Research Council of Canada, Vol. 17. No. 5, 771-779.
- Bachmann, H., and Ammann W. (1987). Vibration In Structures Induced by Man and Machines. (3rd ed.), Zurich : IABSE.
- Baumann, K., and Bachmann, H. (1987). Dynamic loading induced by persons and its effect on beam structures (in german). Institute of Structural Engineering, Swiss Fed. Inst. Of Techn. (ETH) Zurich, report 7501-3, Birkhauser, Basle.
- Clough, W. and Penzien (1993). Dynamics of Structures. (2nd ed.). McGraw-Hill, Inc, New York.
- Ellingwood, B. and Tallin, M. (1984). Structural Serviceability: Floor Vibrations. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 2, Feb.
- Faella, C., Piluso, V., Rizzano, G. (2000). Structural Steel Semirigid Connections : Theory, Design and Software. CRC Press LCC, Florida.
- Kassimali, A. (1999). Matrix Analysis of Structures. Brooks/Cole, California.
- Murray, Thomas, M. (1981). Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations. Engineering Journal, AISC, Vol. 18, No. 2, 62-70.
- Murray, Thomas, M. (1991). Building Floor Vibrations. T.R. Higgins Lectureship paper presented at the AISC National Steel Construction Conference, Washington, D.C., June.
- National Building Code of Canada, NBC 1985, Commentary A: Serviceability criteria for deflections and vibrations.
- National Building Code of Canada, NBC 1995, Commentary A: Serviceability criteria for deflections and vibrations.
- Pornpilai Kitirattrakarn and Mongkol Jiravatcharadej (2006). Vibration Analysis of Precast-Prestressed Concrete Slabs Under Aerobic Loads. Proceeding of The Tenth East Asia-

- Pacific Conference on Structural Engineering. Inter Continental Hotel & Resorts, Bangkok, Thailand. August 3-5, 2006.
- Wheeler, J.E. (1982). Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges. J. Struct. Div. ASCE, vol. 108, ST 9, pp. 2045-2065.
- Tolaymat, R. A. (1988). New Approach to Floor Vibration Analysis. Engineering Journal, AISC, Vol. 25, No. 4, 137-143.
- กิตติศักดิ์ กุลธียาวิชัย (2545). Dynamic Behavior Of Long-Span Flat Concrete Floor Due to Walking Load. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6. STR-124-STR-129.
- จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรณ. (2543). สุขภาพคนไทย ปี พ.ศ. 2543 : สถานะสุขภาพคนไทย (หน้า 156). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข.
- พรพิไล กิติรัตน์ตระการ (2546). การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มงคล จิรวรรณ และพรพิไล กิติรัตน์ตระการ (2551). ความสามารถในการต้านทานการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. STR 36 - STR 39.
- มนัส สัจจวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล (2543). คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อินโฟเพรส.

## ภาคผนวก ก

### รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการทดสอบ

#### ก.1 การเตรียมตัวอย่าง

##### 1. จัดเตรียมคานรองแผ่นพื้น

1.1. หล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 x 40 ซม. ยาว 1.20 ม. จำนวน 6 คาน สำหรับการทดสอบ 3 ตัวอย่าง (รูปที่ 1 แสดงหน้าตัดคานและตัวอย่างคาน)

1.2. จัดวางคานในตำแหน่งที่จะวางแผ่นพื้น โดยระยะห่างของคานเท่ากับความยาวของแผ่นพื้น (รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวางคานและการจัดเรียงแผ่นพื้น) ใช้รถโฟล์คลิฟท์ช่วยในการขนย้ายและจัดวางตำแหน่ง

1.3. ยึดคานและฐานด้วยเหล็กฉาก ทำโดยเจาะรูคานและฐานรองคาน (พื้น) แล้วร้อยพุกผ่านเหล็กฉากเพื่อยึด (รูปที่ 3 การยึดคานและฐานรองคาน)

1.4. ปรับให้ระดับคานแต่ละคู่ให้อยู่ในระดับเดียวกัน

2. จัดเรียงแผ่นพื้นบนคาน ใช้รถโฟล์คลิฟท์ช่วยในการขนย้ายและจัดวางตำแหน่ง (รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวางคานและการจัดเรียงแผ่นพื้น)

##### 3. เทคอนกรีตทับหน้า

3.1. ทำแบบหล่อคอนกรีตเททับหน้าสูง 5 ซม.

3.2. เตรียมลูกปูนสูง 2 ซม. สำหรับผูกเหล็ก wiremesh

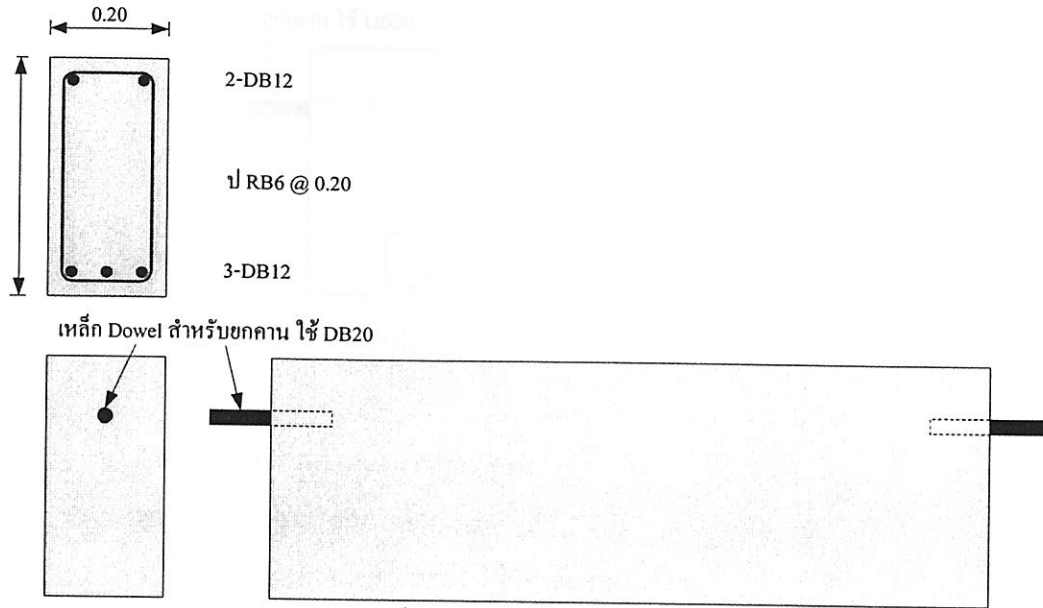
3.3. ปูเหล็ก wiremesh 4mm @0.20 บนแผ่นพื้น

3.4. เตรียมแบบสำหรับเก็บตัวอย่างลูกปูนจำนวน 7 ตัวอย่างขึ้นไป

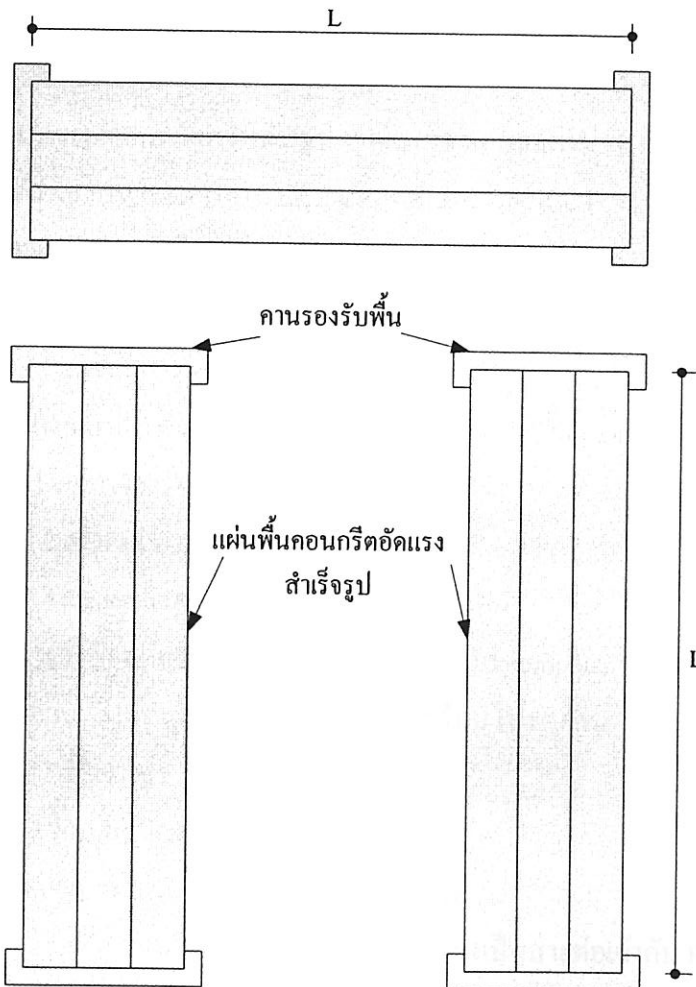
3.5. เทคอนกรีตที่มีขนาดมวลหยาบไม่เกิน 2 ซม. และมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ที่ 28 วันตั้งแต่ 150 – 210 กก./ตร.ซม. พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อข้อที่ 3.4

3.6. บ่มคอนกรีตเททับหน้า และตัวอย่างลูกปูน

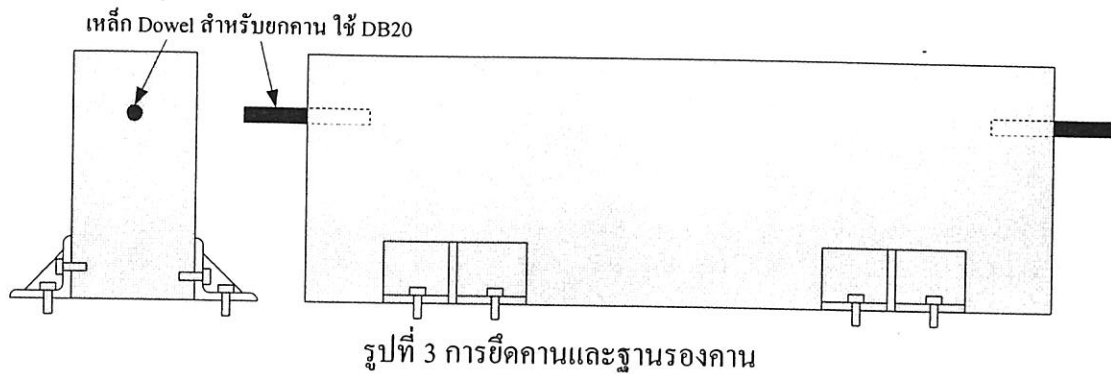
3.7. ทดสอบและบันทึกค่ากำลังอัดของลูกปูนที่ 28 วันนับจากวันที่ทำการเทคอนกรีต



รูปที่ 1 หน้าตัดคานและตัวอย่างคาน



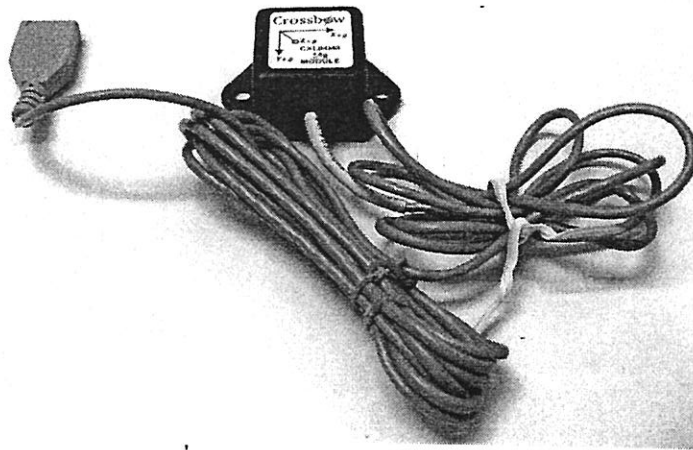
รูปที่ 2 ตำแหน่งการวางคานและการจัดเรียงแผ่นพื้น



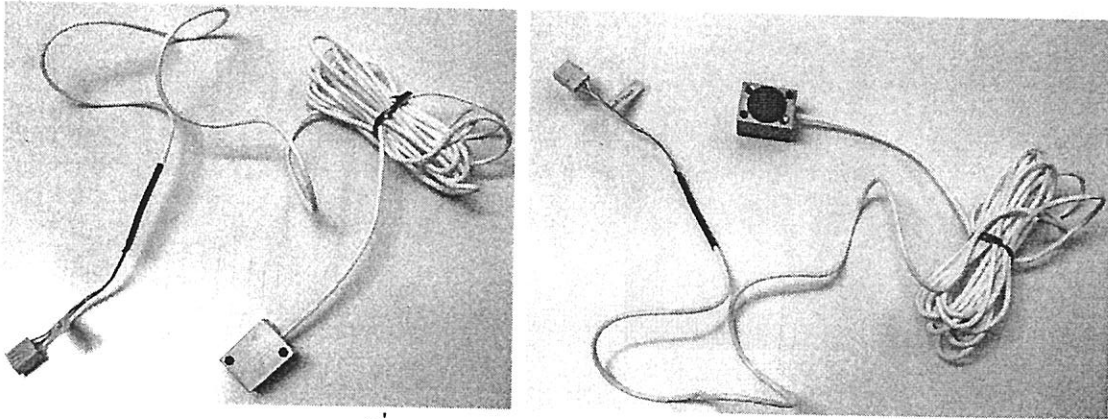
## ก.2 อุปกรณ์ การติดตั้งและการตรวจวัด

### อุปกรณ์ต่างๆ ประกอบด้วย

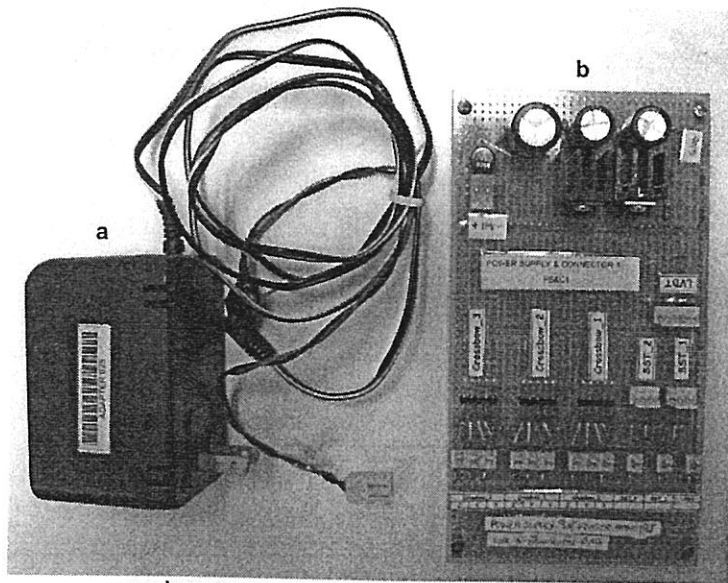
1. อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง ได้แก่ accelerometer
  - 1.1 ยี่ห้อ CROSSBOW รุ่น CXL04M3 serial no. 0025152, 0025155 และ 0024363 ตัวอย่างดังรูปที่ 4
  - 1.2 ยี่ห้อ SENSOTEC รุ่น SM-5/E325-01 serial no. 1070052 และ 1070053 ตัวอย่างดังรูปที่ 5
2. อุปกรณ์จ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ตรวจวัด และเป็นช่องเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (POWER SUPPLY & CONNECTOR : PS&C) ซึ่งจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยนี้โดยเฉพาะ แสดงดังรูปที่ 6
  - 2.1 Adapter สำหรับ PS&C (รูป 6a)
  - 2.2 Power Supply & Connector : PS&C (รูป 6b)
3. อุปกรณ์แปลงสัญญาณจาก analog เป็น digital ได้แก่ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ NATIONAL INSTRUMENTS รุ่น DAQPad-6020E ตัวอย่างดังรูปที่ 7
  - 3.1 DAQPad-6020E (รูป 7a)
  - 3.2 Adapter สำหรับ DAQPad-6020E (รูป 7b)
  - 3.3 สายเชื่อมต่อระหว่าง DAQPad-6020E กับ computer ช่อง USB (รูป 7c)
4. อุปกรณ์รับข้อมูล ได้แก่ computer พร้อมโปรแกรม VirtualBench ของบริษัท NATIONAL INSTRUMENTS
5. สายเชื่อมต่อแบบต่างๆ
  - 5.1 สายหัว BNC ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 8.1a
  - 5.2 สายหัว BNC หนึ่งด้าน และอีกด้านหนึ่งเป็นสายต่อเข้ากับ PS&C ดังรูปที่ 8.1b
6. อุปกรณ์ให้แรงกระแทก ได้แก่ คานพร้อมโครงเหล็ก และตุ้มน้ำหนัก ตัวอย่างดังรูปที่ 9



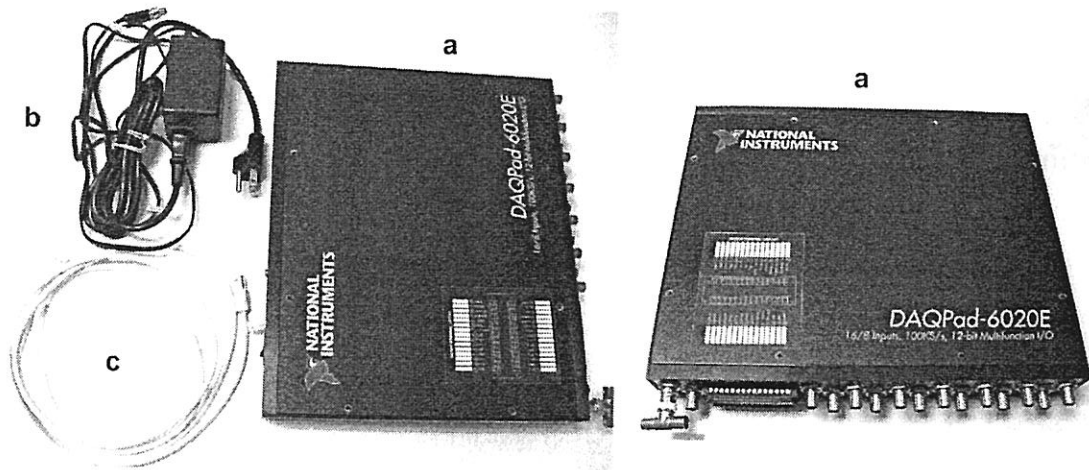
รูปที่ 4 accelerometer รุ่น CXL04M3



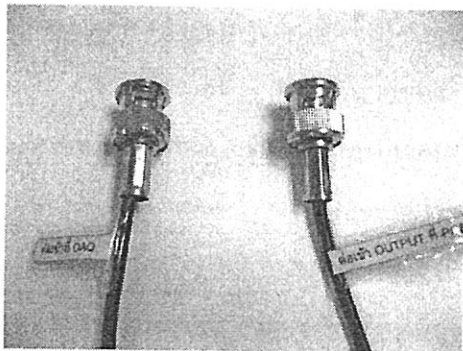
รูปที่ 5 accelerometer รุ่น SM-5/E325-01



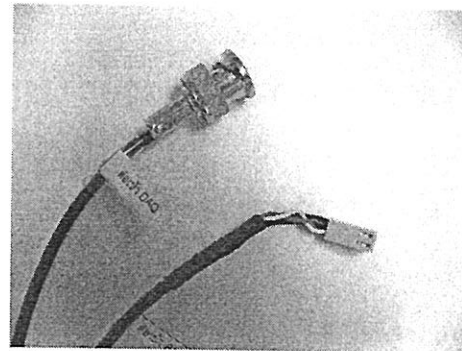
รูปที่ 6 POWER SUPPLY & CONNECTOR



รูปที่ 7 Data acquisition (DAQ) รุ่น DAQPad-6020E

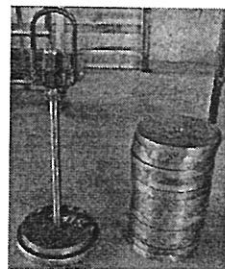
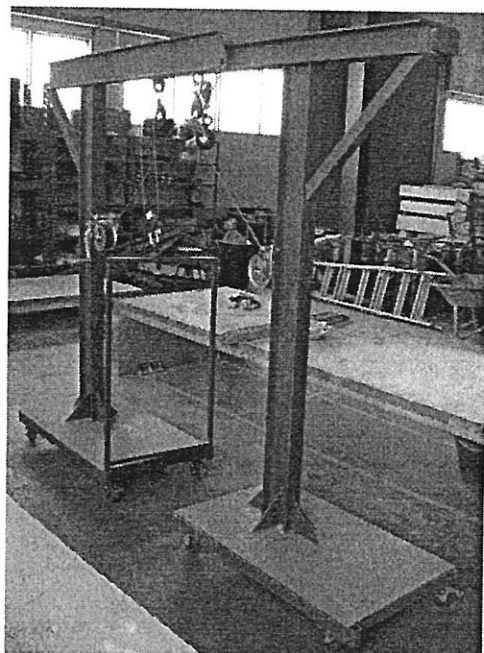


(a)



(b)

รูปที่ 8 สาย BNC



รูปที่ 9 คานพร้อมโครงเหล็ก และตุ้มน้ำหนัก

## การติดตั้งและการตรวจวัด

### 1. การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

1.1. การติดตั้ง accelerometer ยี่ห้อ CROSSBOW รุ่น CXL04M3 ต้องติดตั้งกับพื้น และต่อสายเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ Power Supply และ DAQ ดังรูปที่ 10

#### 1.1.1. การติดตั้ง accelerometer กับพื้น

- ปรับพื้นให้เรียบ และมาร์กตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัด
- ใช้กาวสองหน้าติดกับ sensor แล้วติดลงที่ตำแหน่งที่ต้องการ

#### 1.1.2. การต่อสายเข้า Power Supply

- นำสายของ accelerometer ต่อเข้ากับ POWER SUPPLY & CONNECTOR (PS&C) ด้านมีแถบสีดำซึ่งจะมีจำนวน 5 ช่องเท่ากับจำนวนช่องของตัว accelerometer พอดี (เอาด้านที่มีขีดขึ้น) ดังรูปที่ 10

- นำสายของ adapter ของ POWER SUPPLY & CONNECTOR (PS&C) ต่อเข้ากับ PS&C ที่ช่องเสียบที่เขียนว่า “+15 V-”

- เมื่อจะใช้งานจึงเสียบปลั๊กของ adapter ของ PS&C

#### 1.1.3. การต่อสายเข้า DAQ

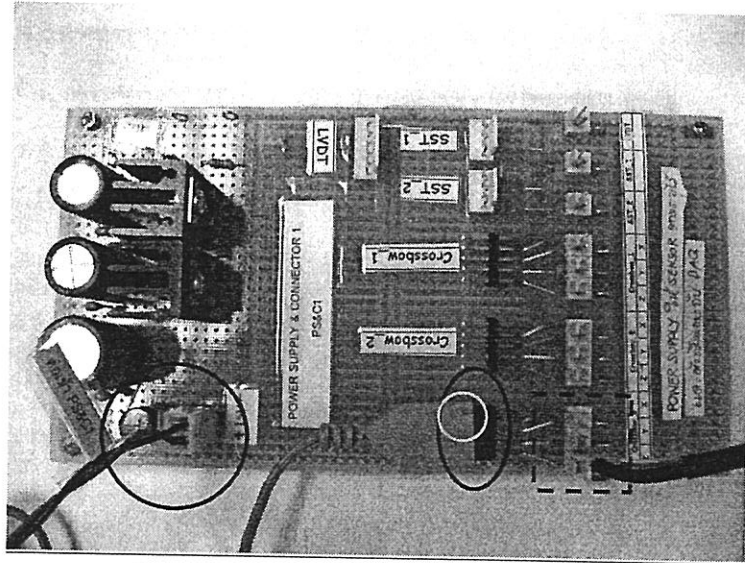
- นำสายที่มีด้านหนึ่งเป็นหัวสำหรับเสียบกับ POWER PS&C และอีกด้านเป็นหัว BNC นำด้านหัวสำหรับเสียบกับ PS&C ต่อเข้ากับ PS&C โดยถ้าต้องการวัดความเร่งในแนวแกน x ก็ต่อเข้าที่ช่อง “x” ถ้าต้องการวัดในแกน y ก็เสียบสายในช่อง “y” (สามารถต่อได้มากกว่า 1 สาย ในกรณีที่ต้องการวัดมากกว่า 1 แกน)

- ต่อจากนั้นนำสายอีกด้านที่เป็นหัว BNC ต่อเข้ากับ DAQ ที่ช่องสัญญาณใดก็ได้ที่วางที่เขียนว่า “ACH0 ถึง ACH7” (ถ้าวัดมากกว่า 1 แกน ก็จะมีสายที่นำมาเสียบเท่ากับจำนวนแกนที่ต้องการวัด)

- หมายเหตุ จำนวนสายที่ต่อเข้ากับ DAQ ขึ้นกับจำนวนของ accelerometer และจำนวนแกนที่ต้องการวัด เช่น ถ้าติดตั้ง accelerometer 2 ตัว และทำการวัดทั้งแกน x และ z ทั้งสองตัว ก็จะมีจำนวนสายที่ต่อเข้ากับ DAQ จำนวน 4 เส้น

1.2. การติดตั้ง accelerometer ยี่ห้อ SENSOTEC รุ่น SM-5/E325-01 การติดตั้งเหมือนกับ accelerometer ยี่ห้อ CROSSBOW รุ่น CXL04M3 ต่างกันตรงที่ ยี่ห้อ SENSOTEC รุ่น SM-5/E325-01 สามารถวัดได้แกนเดียว





รูปที่ 10 แสดงการติดตั้ง accelerometer ยี่ห้อ CROSSBOW รุ่น CXL04M3 เข้ากับ PS&C

2. การติดตั้งอุปกรณ์แปลงสัญญาณ DAQ ทำได้โดย

- นำสายสีขาวด้านหนึ่งต่อเข้ากับ DAQ และอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นหัว USB ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์
- นำสาย adapter ต่อเข้ากับ DAQ แล้วเสียบปลั๊ก เมื่อจะใช้งานจึงเปิดสวิตช์ (สามารถเปิดก่อนเริ่มบันทึกค่าได้)

3. การติดตั้งอุปกรณ์รับข้อมูล

3.1. ทำการลงโปรแกรม VirtualBench และ setup NI-DAQ Pad-6020E Driver ตามคู่มือการใช้งาน NI-DAQ (เอกสารแนบท้าย 1) โดยใช้แผ่น CD ที่แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผ่น CD สำหรับลงโปรแกรม VirtualBench

3.2. เปิดโปรแกรม VirtualBench-Scope และ VirtualBench-Logger ซึ่งแสดงวิธีการใช้อยู่ในคู่มือการใช้งาน NI-DAQ (เอกสารแนบท้าย 1)

4. การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระแทก
  - 4.1. เตรียมค้ำน้ำหนักตามขนาดที่ต้องการ (ตั้งแต่ 40 – 90 กก.)
  - 4.2. ตรวจสอบสภาพของคานและโครงเหล็กให้สามารถรับน้ำหนักจากค้ำน้ำหนักได้ (ถ้าไม่เพียงพอให้ทำการใส่น้ำหนักเพิ่มที่ฐานของโครงเหล็ก ทั้งนี้อาจใช้ลูกปูนคอนกรีตเป็นตัวถ่วงน้ำหนักก็ได้)
  - 4.3. แขนงค้ำน้ำหนักที่คานเหล็ก
  - 4.4. จัดตำแหน่งของคานและโครงเหล็กใหม่ โดยให้ตำแหน่งของค้ำน้ำหนักตรงกับตำแหน่งที่ต้องการ และปรับให้ค้ำน้ำหนักอยู่สูงจากพื้นในระดับที่ต้องการ

### ก.3 ตารางบันทึกข้อมูล

#### 1. ข้อมูลคอนกรีตเททับหน้า

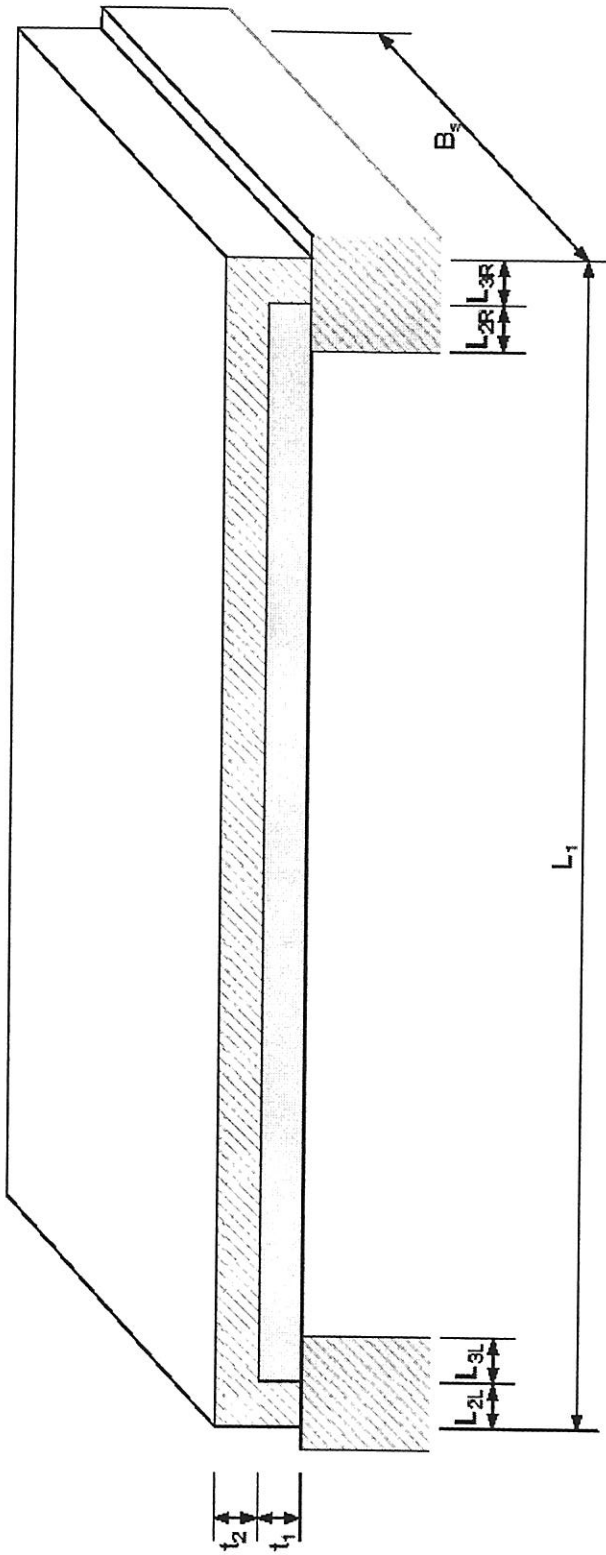
ตารางสำหรับบันทึกข้อมูลของคอนกรีตเททับหน้า เพื่อนำไปใช้ในการหาค่ากำลังอัดประลัย

ตัวอย่างทดสอบความยาว \_\_\_\_\_ เมตร

วันที่ทำการทดสอบ \_\_\_\_\_

| ตัวอย่างที่ | มวล (kg) | เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm) | สูง (cm) | Pmax (kN) | Pmax (kg) |
|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------|-----------|
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |
|             |          |                       |          |           |           |

2. ข้อมูลขนาดของตัวอย่างพื้น ดังรูปที่ 12
3. ข้อมูลตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและไฟล้จี้เก็บข้อมูล ดังรูปที่ 13



ภาพแสดงขนาดต่าง ๆ ของพนักคอนกรีตอัดแรงสำหรับรูปตัวอย่าง

ตารางบันทึกข้อมูล

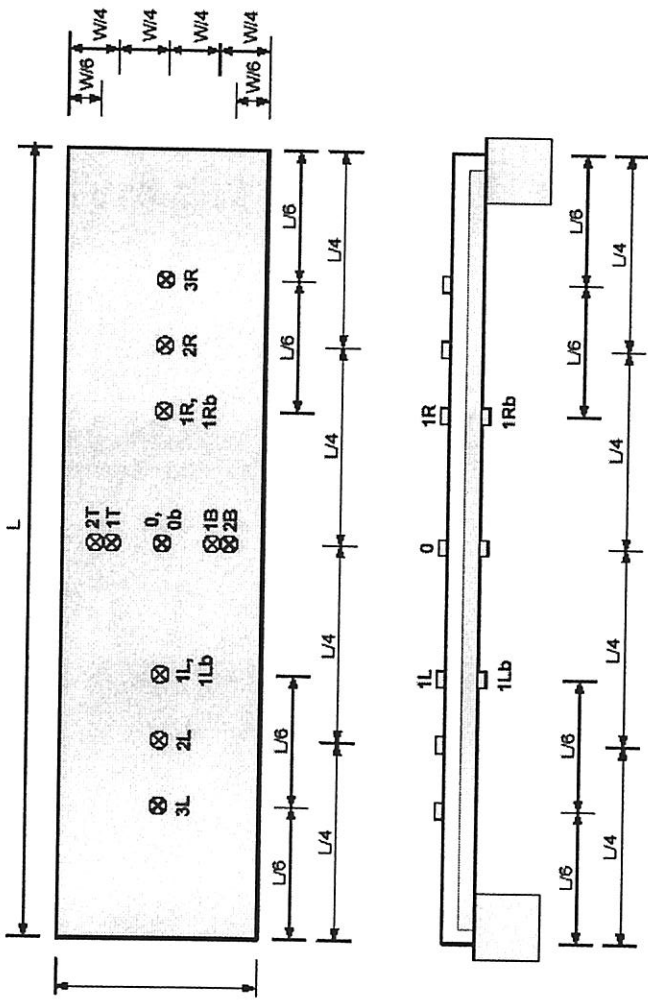
| ตัวอย่างที่ | $L_1$<br>(m) | $L_{2L}$<br>(cm) | $L_{3L}$<br>(cm) | $L_{2R}$<br>(cm) | $L_{3R}$<br>(cm) | $t_1$<br>(cm) | $t_2$<br>(cm) | $B_1$<br>(cm) | หมายเหตุ |
|-------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| 1           |              |                  |                  |                  |                  |               |               |               |          |
| 2           |              |                  |                  |                  |                  |               |               |               |          |
| 3           |              |                  |                  |                  |                  |               |               |               |          |
|             |              |                  |                  |                  |                  |               |               |               |          |

รูปที่ 12 ตัวอย่างตารางการบันทึกข้อมูลขนาดของตัวอย่างพนัก

วันที่ทำการทดสอบ \_\_\_\_\_  
 ตัวอย่างที่ส่งมาที่ \_\_\_\_\_

ความยาวพื้น \_\_\_\_\_ ม.  
 หมายเหตุ \_\_\_\_\_

Sample No. \_\_\_\_\_



ตำแหน่งแรงตกกระแทก \_\_\_\_\_  
 ขนาดของแรง \_\_\_\_\_ กก. สูง \_\_\_\_\_ ซม.  
 ชื่อไฟล์เก็บข้อมูล D:\exp\_data\ข้อมูลจากDAQ1

รูปที่ 13 ตัวอย่างตารางการบันทึกข้อมูลตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

รูปแสดงตำแหน่งอ้างอิงต่างๆที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

| No. | ตำแหน่งที่วัด | ชนิดของ Sensor | ยี่ห้อ/รุ่น | signal no. | sensor's sensitivity | หน่วย | ช่องสัญญาณ | หมายเหตุ |
|-----|---------------|----------------|-------------|------------|----------------------|-------|------------|----------|
| 1   |               |                |             |            |                      |       |            |          |
| 2   |               |                |             |            |                      |       |            |          |
| 3   |               |                |             |            |                      |       |            |          |
| 4   |               |                |             |            |                      |       |            |          |
| 5   |               |                |             |            |                      |       |            |          |

หมายเหตุ : ช่องสัญญาณ หมายถึง ช่องที่ต่อเข้ากับ DAQ

ก.4 สัญญาณข้อมูลขณะทำการทดสอบ

ตารางด้านล่างแสดงข้อมูลที่วัดได้ขณะทำการทดสอบ โดยอักษรโรมันในแต่ละช่อง หมายถึง

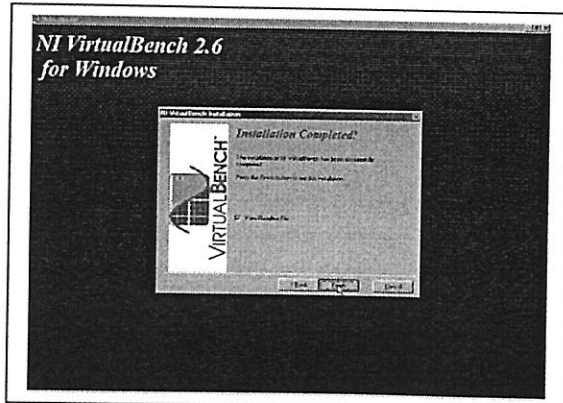
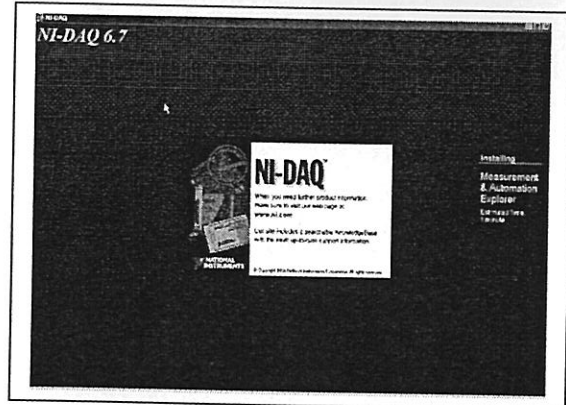
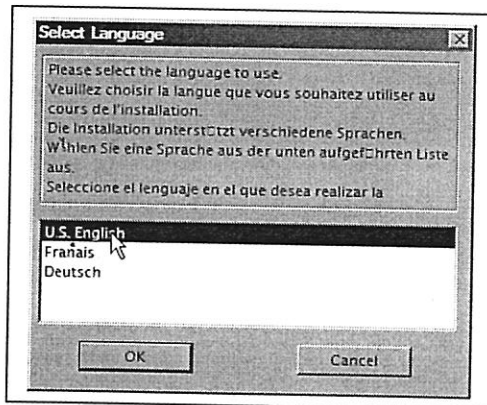
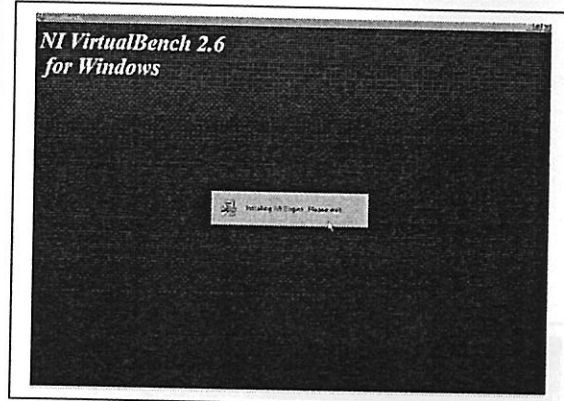
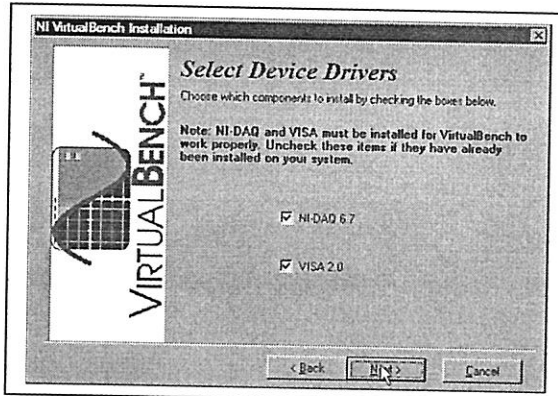
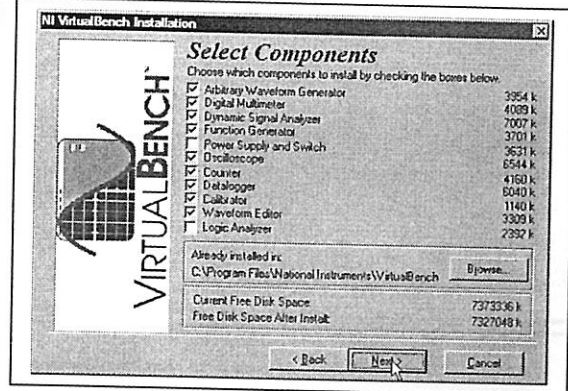
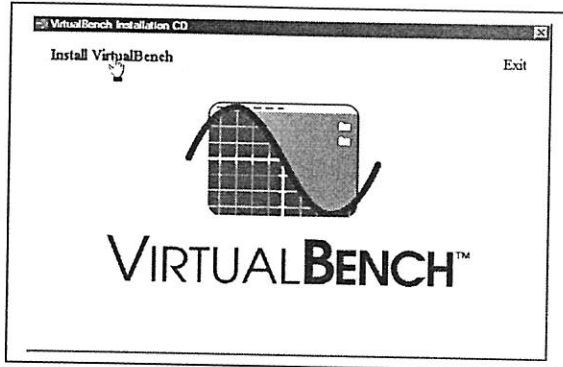
- I เวลาที่บันทึกข้อมูล ในแต่ละแถวจะมีเวลาต่างกัน 1/1000 วินาที
- II III และ IV ค่าความเร่งที่อ่านได้ที่เวลาต่างๆ ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งแต่ละตัว อ่านค่าได้เป็นโวลต์ ต้องทำการแปลงเป็นความเร่งโดยการคูณค่า sensitivity ของแต่ละตัว

| เวลา | สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัด |                 |                 |
|------|-------------------------|-----------------|-----------------|
|      | Acc1<br>(โวลต์)         | Acc2<br>(โวลต์) | Acc3<br>(โวลต์) |
| I    | II                      | III             | IV              |

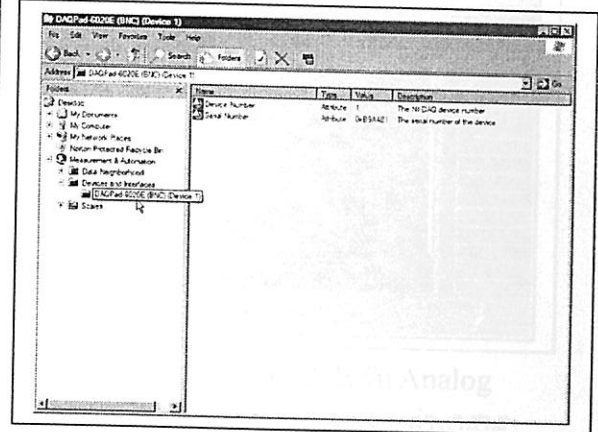
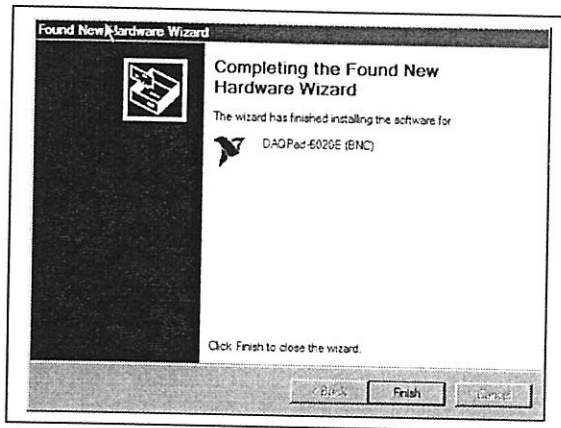
(เอกสารแนบท้าย 1)

การใช้งาน NI-DAQ

1. Install VirtualBench

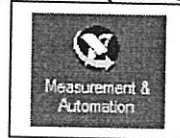


## 2. Setup-NI DAQPad-6020E Driver



- เมื่อต่อ NI-DAQPad-6020E เข้ากับ USB-Port WinXP จะหา Driver

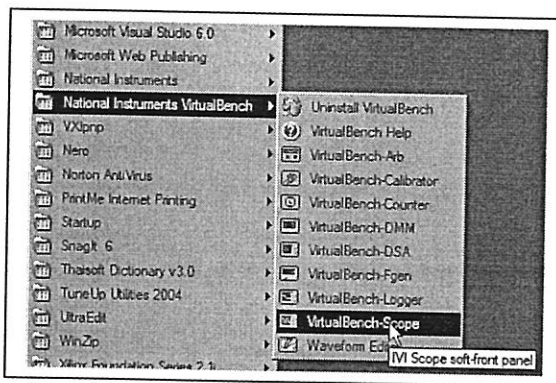
- Click



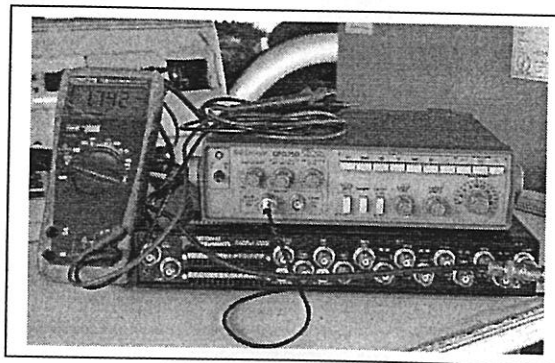
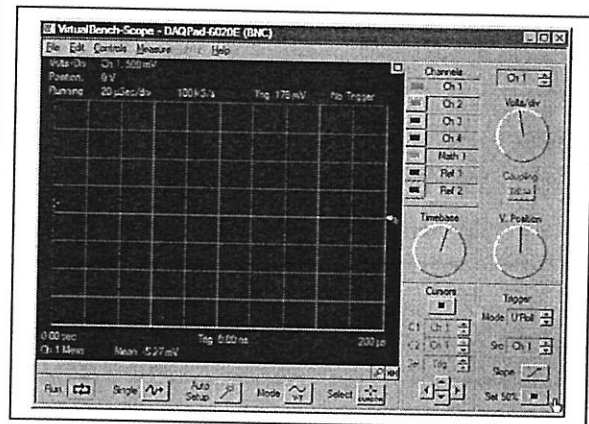
จะแสดง Device Interface เป็น

NI-DAQPad-6020E(BNC)(Device 1)

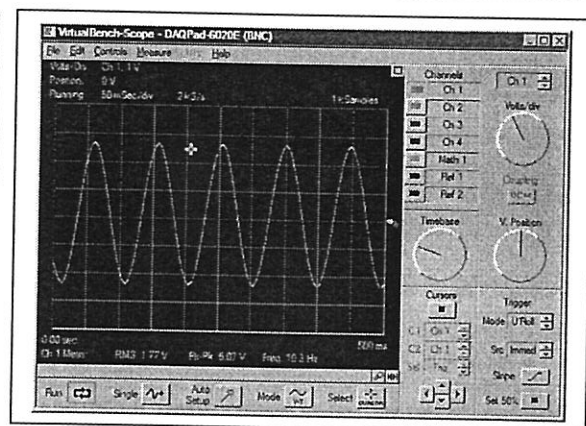
## 3. Using VirtualBench-Scope



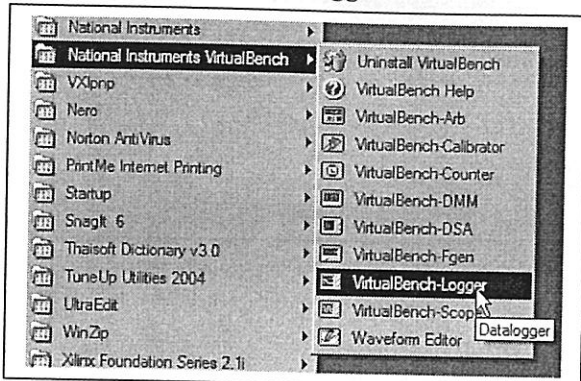
- Select VirtualBench-Scope



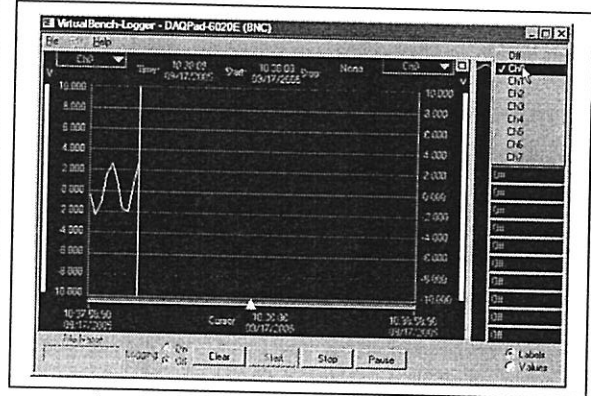
Function Generator :  
5Vpp(1.7Vrms),10Hz



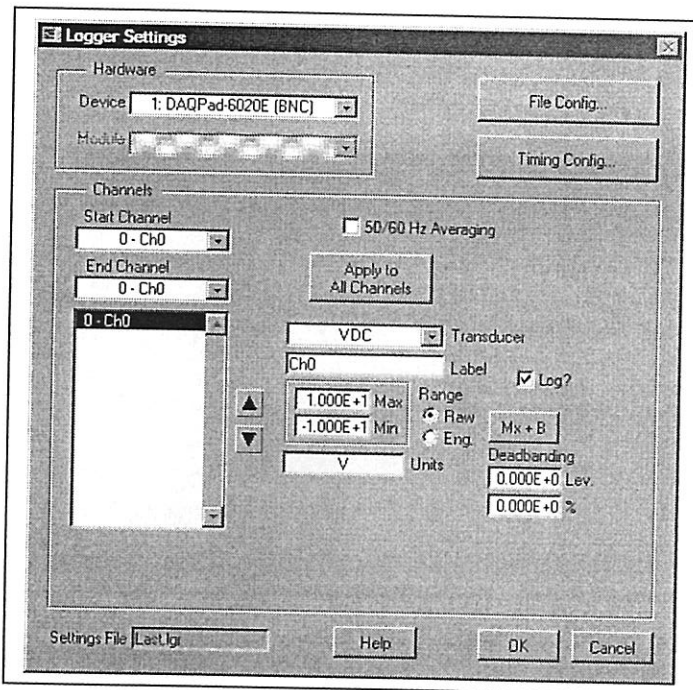
#### 4. Using VirtualBench-Logger



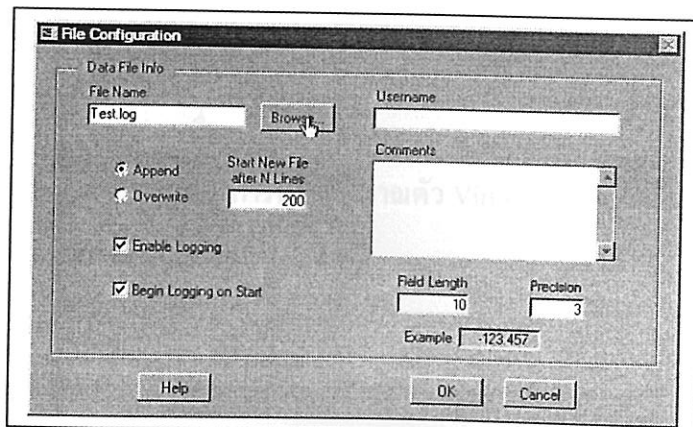
- Select VirtualBench-Logger



- เนื่องจาก DAQPad-6020E รับ Analog Signal ได้ 8 ช่อง(0-7) จึงปิดช่องที่ไม่ได้ใช้

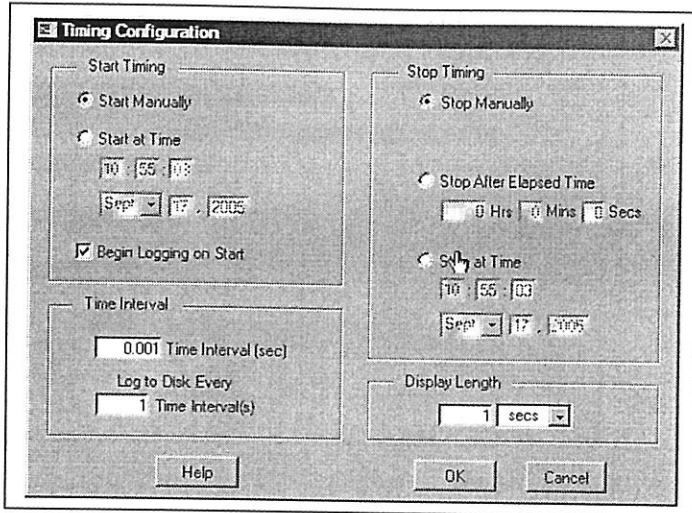


- Device=DAQPad-6020E
- Start Channel : ช่องสัญญาณแรกที่เริ่มเก็บลง File ข้อมูล
- END Channel : ช่องสัญญาณสุดท้ายที่เก็บลง File ข้อมูล

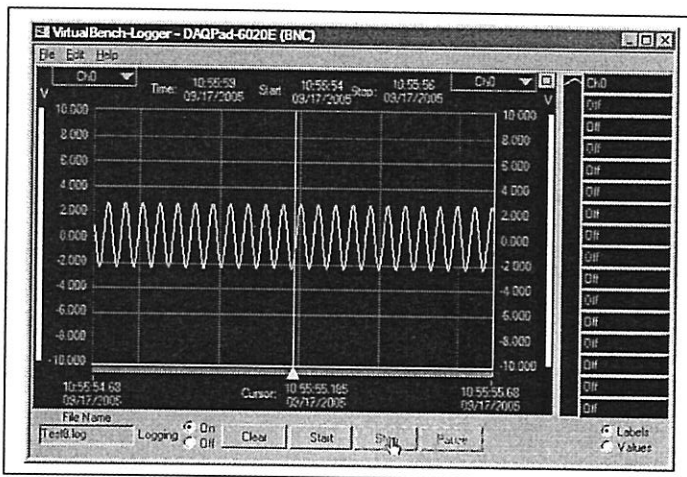


- File Name → ชื่อของไฟล์ที่จะเก็บข้อมูล
- Tick Append สำหรับเก็บไฟล์แบบต่อเนื่อง
- Start New Line After N Line → จำนวนชุดข้อมูลในแต่ละไฟล์ {1 File เก็บ 200 บรรทัด}
- Tick Enable Logging
- Tick Begin Logging on Start
- Field Length → จำนวนข้อมูล 10 ตัว
- Precision → ความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง





- Start Timing
  - Tick Begin Logging on Start
- Time Interval
  - Time Interval(sec) ให้อ่านข้อมูล ทุกๆ 0.001 วินาที(1mSec)
  - Log to Disk Every 1 Time Interval(s) ให้เก็บข้อมูลลงไฟล์ ทุกๆ 1 ครั้งการอ่านข้อมูล
- Display Length
  - การแสดงข้อมูลที่จอ VirtualBench-Logger ขึ้นกับความถี่สัญญาณ ที่ป้อนให้ DAQ



- Click Start เริ่มการเก็บข้อมูล
- Click Stop สิ้นสุดการเก็บข้อมูล
- ผลการเก็บข้อมูลจะได้ File Test.Log หลายๆไฟล์เรียงตามลำดับ

## ข้อควรระวังในการใช้งาน VirtualBench-Logger

เนื่องจาก VirtualBench สามารถตั้ง Time Interval ต่ำสุดที่ 1 ms หรือ Sampling Time = 1 kHz ตามหลักของการสุ่มสัญญาณตัว VirtualBench จะเก็บข้อมูลที่มีความถี่ได้ไม่เกินครึ่งหนึ่ง Sampling Time หรือไม่เกิน 500 Hz

#### 4.1 การใช้งานข้อมูล ด้วย MATLAB

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.5 REPORT  
 NATIONAL INSTRUMENTS  
 DATE CREATED 12:22:43 09/17/2005  
 USER  
 START COMMENT  
 END COMMENT  
 START DATA

| Date       | Time         | Ch0 (v) |
|------------|--------------|---------|
| 09/17/2005 | 12:22:41.683 | 0.244   |
| 09/17/2005 | 12:22:41.684 | 0.083   |
| 09/17/2005 | 12:22:41.685 | -0.078  |
| 09/17/2005 | 12:22:41.686 | -0.234  |
| 09/17/2005 | 12:22:41.687 | -0.391  |

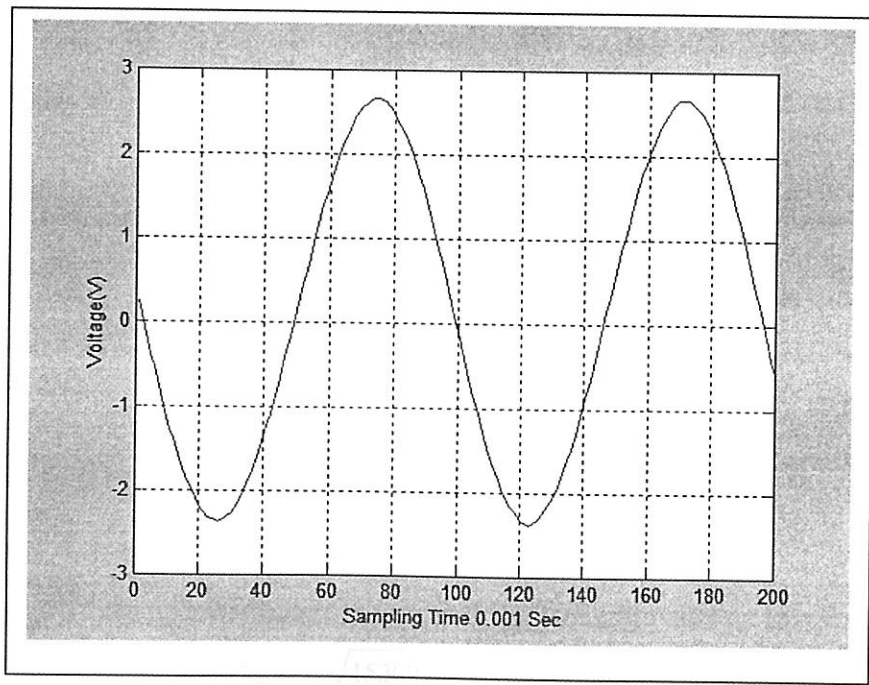
- ตัดบรรทัด ที่ Hi-light ออก
- ตัดบรรทัดสุดท้าย {END DATA} ออก

```
clear all;
Temp = load('Test.log');           % Load Data
for i=1:200                         %Get Data
    Data(i)=Temp(i,3);
end

plot(Data)                          % Show Data
xlabel('Sampling Time 0.001 Sec');
ylabel('Voltage(V)');
grid on;
```

- เมื่อใช้คำสั่ง load('Test.log')แล้ว ตัวแปร Test จะได้ขนาด 1000x3 โดยคอลัมภ์สุดท้ายคือ แรงดันที่อ่านได้
- อ่านค่า V<sub>pp</sub> ได้จาก max(Data)-min(Data)
- คำนวณความถี่ได้จาก
 
$$\text{จากรูป 1 คาบ} = (100-1)*0.001\text{Sec} = 0.099\text{Sec}$$

$$\text{ความถี่} = 1/0.099 = 10.10\text{Hz}$$



$$E_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{2.5}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{1.5625}$$

## ภาคผนวก ข

### รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผล

#### ข.1 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่างการคำนวณค่าคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างที่มีความยาว 4 เมตร  
คุณสมบัติเบื้องต้น

|  | PC-4               |
|--|--------------------|
| 1. ช่วงความยาว (ม.)                            | 4.00               |
| 2. พื้นที่หน้าตัด                              |                    |
| - ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ซม.)                | 175                |
| 3. ขนาด  |                    |
| - กว้าง (ซม.)                                  | 35                 |
| - ความหนาแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง (ซม.)           | 5                  |
| - ความหนาคอนกรีตเททับหน้า (ซม.)                | 5                  |
| 4. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น             |                    |
| - ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ซม.)                   | 2.50               |
| 5. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ทรงกระบอก 28 วัน) |                    |
| - คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ซม.)            | 350                |
| - คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ซม.)                | 150                |
| 6. ลวดอัดแรง                                   |                    |
| - จำนวน (เส้น)                                 | 6                  |
| - ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)                   | 4                  |
| - กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)            | 175                |
| - โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)             | $2.04 \times 10^6$ |

#### การวิเคราะห์

1. พื้นที่หน้าตัดแปลง (แปลงเป็นคอนกรีตอัดแรง)

$$n_1 = \frac{E_{top}}{E_{PC}} = \frac{\sqrt{15200 \times 150}}{\sqrt{15200 \times 350}} = 0.655$$

$$n_2 = \frac{E_{Wire}}{E_{PC}} = \frac{2.04 \times 10^6}{\sqrt{15200 \times 350}} = 7.170$$

พื้นที่หน้าตัดแปลง

$$= (35 \times 5) + n_1 \times (35 \times 5) + n_2 \times (6 \times \pi \times 0.2^2) = 294.97 \text{ ตร.ซม.}$$

2. โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง

$$\bar{y} = \frac{(35 \times 5) \times 2.5 + n_1 \times (35 \times 5) \times 7.5 + n_2 \times (6 \times \pi \times 0.2^2) \times 2.5}{(35 \times 5) \times 2.5 + n_1 \times (35 \times 5) + n_2 \times (6 \times \pi \times 0.2^2)} = 4.442$$

ซม.

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{12} (35 \times 5^3) + (35 \times 5)(5 - 4.442)^2 + \frac{1}{12} n_1 \times (35 \times 5^3) \\ &\quad + n_1 \times (35 \times 5)(7.5 - 4.442)^2 - n_2 (6 \times \pi \times 0.2^2)(5 - 4.442)^2 \\ &= 2,355 \text{ ซม.}^4 \end{aligned}$$

3. มวลต่อหน่วยความยาว

$$\bar{m} = 2400 \times (0.35 \times 0.10) = 84.0 \text{ กก./ม.}$$

4. โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

$$E_{PC} = \sqrt{15200 \times 350} = 284,366 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

5. แรงดึงในเส้นลวด

$$T_{PCwire} = 0.7 \times 0.8 \times 6 \times \pi \times 0.2^2 \times 17,500 = 7,389 \text{ กก.}$$

## ข.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของพื้นตัวอย่าง

1. generalized mass

$$m^* = 84.0 \times \frac{4.0}{2} = 168 \text{ กก.}$$

2. generalized stiffness

$$\text{Geometric stiffness } k_G^* = 7,389 \times \frac{\pi^2}{4.0} \times 9.81 = 178,853 \text{ นิวตัน/เมตร}$$

$$\text{Flexural stiffness } k^* = \frac{\pi^4 \times 284,366 \times 2,355}{4.0^2} \times 9.81 \times 10^{-4} = 499,946 \text{ นิวตัน/ม.}$$

$$\text{Generalized stiffness } \bar{k}^* = k_G^* - k^* = 678,799 \text{ นิวตัน/ม.}$$

### 3. ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega = \sqrt{\frac{678,799}{168}} = 63.56 \text{ เรเดียน}$$

### ข.3 การวิเคราะห์ความเร่งและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด

ดูรายละเอียดในเอกสารแนบท้าย 1 ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์ โดยมีข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. กิจกรรมการเดินแอโรบิก
2. ตัวคูณการกระแทก 3.4
3. ระยะเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น 0.20 วินาที
4. น้ำหนักกระทำ 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 กิโลกรัม
5. ความถี่ธรรมชาติ 63.56 เรเดียน สำหรับพื้นความยาว 4 เมตร
6. สัดส่วนขนาดพื้น 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2

### ข.4 วิธีการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบและผลการวิเคราะห์

ดูรายละเอียดในเอกสารแนบท้าย 2 ใช้โปรแกรม MABLAB ช่วยในการวิเคราะห์ โดยการนำข้อมูลเวลาและความเร่งที่ได้สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง ตัวอย่างที่แสดงเป็นพื้นตัวอย่างความยาว 5 เมตร ตัวอย่างที่ 1 ที่แรงกระทำ 40 กิโลกรัม ทดสอบครั้งที่ 1 ได้ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 9.175 เฮิร์ต

### ข.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าความเร่งจากการทดสอบ

จากข้อมูลค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้สามารถนำมาหาค่าความเร่งได้ โดยตัวอย่างความยาว 5 เมตร ตัวอย่างที่ 1 ยาว 5.13 เมตร ที่แรงกระทำ 40 กิโลกรัม มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.41 เฮิร์ต และมีมวลเท่ากับ 93.8 กิโลกรัม/เมตร จะได้

$$k = (2 \times \pi \times 8.41)^2 \times (93.8 \times \frac{5.13}{2} + 40) = 721,697 \text{ กิโลนิวตัน/เมตร (สำหรับแผ่น}$$

พื้น 1 แผ่น)

## เอกสารแนบท้าย 1

```

%=====
clear
format long
kp=3.4; % dynamic impact factor from fig. 2.5
G=[40*9.81;50*9.81;60*9.81;70*9.81;80*9.81;90*9.81]; % weight of one person (Newton)
tp=0.20; % contact duration up to kind of load
dr=0.03; % damping ratio
wn=52.21; % natural frequency up to property of pc slab (rad/sec)
wd=wn*sqrt(1-dr^2); % natural frequency when under damp (rad/sec)
m=[960 1920 2880 3840]; % generalize mass (kg)
dt=0.001; % time varying =>define as you want => find n
% hint dt must give the n in integer

for z=1:4
for k=1:6
end_t=4;
nn=end_t/dt;
n=tp/dt;
tt(1)=0;
for i=2:n+1;
tt(i)=tt(i-1)+dt;
disp(i) = -tp*kp*G(k)*(-2*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*dr*wn*tp^2*cos(tt(i)*wd)*wd-exp
(-tt(i)*dr*wn)*pi*sin(tt(i)*wd)*dr^2*wn^2*tp^2-exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*sin(tt(i)*wd)
+exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*sin(tt(i)*wd)*wd^2*tp^2+2*dr*wn*tp^2*cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd
+sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*tp-tp^3*sin(pi/tp*tt(i))*wd*dr^2*wn^2-tp^3*sin(pi/tp*tt(i))*wd^3)
/(dr^2*wn^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(dr^2*wn^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp
+wd^2*tp^2)/m(:,z)/wd;
vel(i) = -kp*G(k)*tp*(dr^2*wn^2*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*cos(tt(i)*wd)*wd
+exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*dr*wn*tp^2*sin(tt(i)*wd)*wd^2+dr^3*wn^3*exp(-tt(i)*dr*wn)
*pi*sin(tt(i)*wd)*tp^2+dr*wn*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*sin(tt(i)*wd)-exp(-tt(i)*dr*wn)
*pi^3*cos(tt(i)*wd)*wd+exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*cos(tt(i)*wd)*wd^3*tp^2-

```

```

2*dr*wn*tp*sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd+cos(pi/tp*tt(i))*pi^3*wd-tp^2*cos(pi/tp*tt(i))
*pi*wd*dr^2*wn^2-tp^2*cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd^3)/(dr^2*wn^2*tp^2+pi^2
+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(dr^2*wn^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/m(:,z)/wd;
acc(i)=-kp*G(k)*tp*(-2*dr^2*wn^2*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*sin(tt(i)*wd)*wd^2-
dr^4*wn^4*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*sin(tt(i)*wd)*tp^2-dr^2*wn^2*exp(-tt(i)*dr*wn)
*pi^3*sin(tt(i)*wd)+2*dr*wn*exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*cos(tt(i)*wd)*wd+exp(-tt(i)*dr*wn)
*pi^3*sin(tt(i)*wd)*wd^2-exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*sin(tt(i)*wd)*wd^4*tp^2-2*dr*wn
*cos(pi/tp*tt(i))*pi^3*wd-sin(pi/tp*tt(i))*pi^4/tp*wd+tp*sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*dr^2*wn^2
+tp*sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd^3)/(dr^2*wn^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(dr^2*wn^2
*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/m(:,z)/wd;

```

```
end
```

```
% under damp free vibration
```

```

r=sqrt(((vel(n+1)+disp(n+1)*dr*wn)/wd)^2+disp(n+1)^2);
q=atan((vel(n+1)+disp(n+1))/(wd*disp(n+1)));
for i=n+2:nn+1;
tt(i)=tt(i-1)+dt;
disp(i)=exp(-tt(i)*dr*wn)*r*cos(-tt(i)*wd+q);
vel(i)=-dr*wn*exp(-tt(i)*dr*wn)*r*cos(-tt(i)*wd+q)+exp(-tt(i)*dr*wn)*r*sin(-tt(i)*wd+q)*wd;
acc(i)=dr^2*wn^2*exp(-tt(i)*dr*wn)*r*cos(-tt(i)*wd+q)-2*dr*wn*exp(-tt(i)*dr*wn)
*r*sin(-tt(i)*wd+q)*wd-exp(-tt(i)*dr*wn)*r*cos(-tt(i)*wd+q)*wd^2;

```

```
end
```

```
%find max value
```

```

maxd(k)=max(abs(disp));           % m
maxv(k)=max(abs(vel));           % m/s
maxa(k)=max(abs(acc));           % m/s^2

```

```
max_d(k,z)=maxd(k);
```

```

max_a(k,z)=maxa(k);
end
end
%plot graph
% figure(1),plot(tt,disp)
% title('Displacement(m)')
% xlabel('t'),ylabel('Displacement(m)'),grid
%
% figure(2),plot(tt,vel)
% title('Velocity(m/s)')
% xlabel('t'),ylabel('Velocity(m/s)'),grid
%
% figure(3),plot(tt,acc)
% title('Acceleration(m/s^2)')
% xlabel('t'),ylabel('Acceleration(m/s^2)'),grid

%output data
fid1=fopen('disp_aero00.txt','w');
fid2=fopen('vel_aero00.txt','w');
fid3=fopen('acc_aero00.txt','w');

for i=2:nn+1;
    fprintf(fid1,'%8.4ft%12.10fn',tt(i),disp(i));
    fprintf(fid2,'%8.4ft%12.10fn',tt(i),vel(i));
    fprintf(fid3,'%8.4ft%12.10fn',tt(i),acc(i));
end
fclose('all');

```



ค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบได้ผลดังตาราง

ตัวอย่าง 3 เมตร

| 40 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 20.563                  | 20.423 | 21.563 |
| 2                 | 20.988                  | 20.212 | 21.275 |
| 3                 | 19.900                  | 20.038 | 21.712 |
| 4                 | 20.125                  | 19.800 | 23.238 |
| 5                 | 19.863                  | 19.962 | 22.262 |
| 6                 | 20.063                  | 19.625 | 21.712 |
| 7                 | 19.387                  | 19.712 | 20.488 |
| 8                 | 19.762                  | 18.538 | 21.188 |
| 9                 | 19.775                  | 19.050 | 22.837 |
| 10                | 19.475                  | 18.587 | 21.913 |
| average           | 19.99                   | 19.59  | 21.82  |
| std               | 0.483                   | 0.657  | 0.803  |
| average           | 20.468                  |        |        |
| std               | 1.174                   |        |        |

| 50 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 19.413                  | 18.975 | 20.750 |
| 2                 | 19.663                  | 18.087 | 18.475 |
| 3                 | 18.625                  | 18.788 | 19.725 |
| 4                 | 19.500                  | 18.712 | 19.837 |
| 5                 | 19.262                  | 18.800 | 20.087 |
| 6                 | 19.113                  | 18.488 | 18.887 |
| 7                 | 19.512                  | 18.300 | 18.300 |
| 8                 | 19.275                  | 17.625 | 19.288 |
| 9                 | 19.025                  | 18.000 | 18.988 |
| 10                | 17.75                   | 18.700 | 19.788 |
| average           | 19.11                   | 18.45  | 19.41  |
| std               | 0.563                   | 0.432  | 0.764  |
| average           | 18.991                  |        |        |
| std               | 0.711                   |        |        |

| 60 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 18.587                  | 18.975 | 19.413 |
| 2                 | 17.150                  | 18.087 | 19.238 |
| 3                 | 18.050                  | 18.788 | 19.163 |
| 4                 | 18.887                  | 18.712 | 18.775 |
| 5                 | 18.313                  | 18.800 | 18.087 |
| 6                 | 18.538                  | 18.488 | 18.913 |
| 7                 | 17.788                  | 18.300 | 18.200 |
| 8                 | 17.325                  | 17.625 | 19.488 |
| 9                 | 18.038                  | 18.000 | 18.475 |
| 10                | 17.962                  | 18.700 | 19.500 |
| average           | 18.06                   | 18.45  | 18.93  |
| std               | 0.548                   | 0.432  | 0.526  |
| average           | 18.479                  |        |        |
| std               | 0.605                   |        |        |

| 70 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 17.950                  | 16.813 | 18.738 |
| 2                 | 17.988                  | 16.850 | 18.275 |
| 3                 | 17.313                  | 16.863 | 18.238 |
| 4                 | 17.850                  | 17.587 | 19.900 |
| 5                 | 17.637                  | 16.625 | 18.363 |
| 6                 | 18.087                  | 17.150 | 19.725 |
| 7                 | 17.650                  | 17.100 | 19.613 |
| 8                 | 17.663                  | 17.337 | 18.788 |
| 9                 | 17.688                  | 17.512 | 18.500 |
| 10                | 17.850                  | 17.313 | 18.375 |
| average           | 17.77                   | 17.12  | 18.85  |
| std               | 0.224                   | 0.322  | 0.646  |
| average           | 17.911                  |        |        |
| std               | 0.841                   |        |        |

| 80 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 17.788                  | 17.087 | 18.688 |
| 2                 | 17.700                  | 16.563 | 19.363 |
| 3                 | 17.850                  | 16.200 | 18.200 |
| 4                 | 17.688                  | 15.463 | 17.063 |
| 5                 | 17.550                  | 17.188 | 17.363 |
| 6                 | 17.137                  | 17.825 | 17.813 |
| 7                 | 17.012                  | 17.15  | 17.913 |
| 8                 | 17.913                  | 17.137 | 18.038 |
| 9                 | 17.337                  | 16.750 | 18.325 |
| 10                | 17.712                  | 16.363 | 17.337 |
| average           | 17.57                   | 16.77  | 18.01  |
| std               | 0.307                   | 0.659  | 0.687  |
| average           | 17.451                  |        |        |
| std               | 0.763                   |        |        |

| 90 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 3-1                     | 3-2    | 3-3    |
| 1                 | 16.500                  | 16.525 | 19.250 |
| 2                 | 16.900                  | 16.250 | 17.688 |
| 3                 | 16.212                  | 15.663 | 17.188 |
| 4                 | 16.688                  | 16.025 | 18.775 |
| 5                 | 17.462                  | 16.200 | 16.938 |
| 6                 | 16.788                  | 17.387 | 18.188 |
| 7                 | 16.863                  | 15.637 | 18.163 |
| 8                 | 17.125                  | 15.850 | 17.800 |
| 9                 | 16.575                  | 17.113 | 17.675 |
| 10                | 16.650                  | 16.887 | 17.512 |
| average           | 16.78                   | 16.35  | 17.92  |
| std               | 0.345                   | 0.610  | 0.701  |
| average           | 17.016                  |        |        |
| std               | 0.870                   |        |        |

ตัวอย่าง 4 เมตร

| 40 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 11.262                  | 12.887 | 12.275 |
| 2                 | 11.213                  | 12.838 | 12.025 |
| 3                 | 11.175                  | 13.113 | 12.050 |
| 4                 | 11.213                  | 12.925 | 12.113 |
| 5                 | 11.137                  | 12.800 | 12.125 |
| 6                 | 11.238                  | 12.725 | 12.325 |
| 7                 | 11.113                  | 12.863 | 12.025 |
| average           | 11.19                   | 12.88  | 12.13  |
| std               | 0.054                   | 0.122  | 0.121  |
| average           | 12.069                  |        |        |
| std               | 0.714                   |        |        |

| 50 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 11.613                  | 12.725 | 11.900 |
| 2                 | 11.313                  | 12.663 | 12.025 |
| 3                 | 11.363                  | 12.663 | 11.950 |
| 4                 | 11.225                  | 12.675 | 11.975 |
| 5                 | 11.225                  | 12.688 | 12.038 |
| 6                 | 11.038                  | 12.613 | 11.887 |
| 7                 | 11.25                   | 12.663 | 11.850 |
| average           | 11.29                   | 12.67  | 11.95  |
| std               | 0.175                   | 0.034  | 0.071  |
| average           | 11.969                  |        |        |
| std               | 0.587                   |        |        |

| 60 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 11.100                  | 12.425 | 11.913 |
| 2                 | 11.125                  | 12.438 | 11.588 |
| 3                 | 11.063                  | 12.387 | 11.613 |
| 4                 | 11.188                  | 12.413 | 11.625 |
| 5                 | 11.025                  | 12.375 | 11.625 |
| 6                 | 11.000                  | 12.500 | 11.588 |
| 7                 | 11.188                  | 12.400 | 11.637 |
| average           | 11.10                   | 12.42  | 11.66  |
| std               | 0.074                   | 0.041  | 0.115  |
| average           | 11.725                  |        |        |
| std               | 0.560                   |        |        |

| 70 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 10.800                  | 12.163 | 11.563 |
| 2                 | 10.750                  | 12.125 | 11.467 |
| 3                 | 10.988                  | 12.238 | 11.575 |
| 4                 | 11.025                  | 12.288 | 11.363 |
| 5                 | 10.925                  | 12.338 | 11.387 |
| 6                 | 10.875                  | 12.413 | 11.463 |
| 7                 | 11.088                  | 12.225 | 11.450 |
| average           | 10.92                   | 12.26  | 11.47  |
| std               | 0.122                   | 0.100  | 0.080  |
| average           | 11.548                  |        |        |
| std               | 0.569                   |        |        |

| 80 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 10.825                  | 12.238 | 11.238 |
| 2                 | 10.738                  | 12.188 | 11.163 |
| 3                 | 10.663                  | 12.213 | 11.300 |
| 4                 | 10.700                  | 12.262 | 11.400 |
| 5                 | 10.550                  | 12.288 | 11.150 |
| 6                 | 10.575                  | 12.175 | 11.150 |
| 7                 | 10.488                  | 12.175 | 11.175 |
| average           | 10.65                   | 12.22  | 11.23  |
| std               | 0.118                   | 0.044  | 0.095  |
| average           | 11.364                  |        |        |
| std               | 0.671                   |        |        |

| 90 กิโลกรัม       |                         |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |        |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |        |        |
|                   | 4-1                     | 4-2    | 4-3    |
| 1                 | 10.375                  | 12.012 | 11.075 |
| 2                 | 10.538                  | 12.088 | 11.238 |
| 3                 | 10.463                  | 12.012 | 10.963 |
| 4                 | 10.500                  | 11.800 | 10.963 |
| 5                 | 10.475                  | 11.975 | 10.863 |
| 6                 | 10.675                  | 11.800 | 10.900 |
| 7                 | 10.275                  | 11.750 | 10.850 |
| average           | 10.47                   | 11.92  | 10.98  |
| std               | 0.126                   | 0.133  | 0.137  |
| average           | 11.123                  |        |        |
| std               | 0.627                   |        |        |

ตัวอย่าง 5 เมตร

| 40                |                         |       |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |       |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3   |
| 1                 | 9.175                   | 8.275 | 8.000 |
| 2                 | 9.175                   | 8.213 | 7.950 |
| 3                 | 9.138                   | 8.200 | 7.938 |
| 4                 | 9.113                   | 8.188 | 7.963 |
| 5                 | 9.113                   | 8.138 | 7.913 |
| 6                 | 9.088                   | 8.150 | 7.913 |
| 7                 | 9.075                   | 8.138 | 7.925 |
| 8                 | 9.088                   | 8.138 | 7.888 |
| 9                 | 9.088                   | 8.175 | 7.850 |
| 10                | 9.163                   | 8.125 | 7.875 |
| average           | 9.12                    | 8.17  | 7.92  |
| std               | 0.039                   | 0.047 | 0.044 |
| average           | 8.405                   |       |       |
| std               | 0.527                   |       |       |

| 50                |                         |       |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |       |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3   |
| 1                 | 9.038                   | 8.075 | 7.763 |
| 2                 | 9.050                   | 8.050 | 7.775 |
| 3                 | 9.038                   | 8.075 | 7.738 |
| 4                 | 9.000                   | 8.088 | 7.725 |
| 5                 | 9.025                   | 8.163 | 7.750 |
| 6                 | 9.000                   | 8.088 | 7.625 |
| 7                 | 9.013                   | 8.113 | 7.750 |
| 8                 | 9.013                   | 8.088 | 7.750 |
| 9                 | 9.038                   | 8.138 | 7.700 |
| 10                | 9.000                   | 8.125 | 7.700 |
| average           | 9.02                    | 8.10  | 7.73  |
| std               | 0.019                   | 0.034 | 0.044 |
| average           | 8.283                   |       |       |
| std               | 0.554                   |       |       |

| 60                |                         |       |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |       |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3   |
| 1                 | 8.950                   | 8.063 | 7.625 |
| 2                 | 8.913                   | 8.025 | 7.600 |
| 3                 | 8.950                   | 8.088 | 7.625 |
| 4                 | 8.925                   | 8.000 | 7.625 |
| 5                 | 8.925                   | 8.063 | 7.613 |
| 6                 | 8.875                   | 7.988 | 7.613 |
| 7                 | 8.925                   | 7.988 | 7.650 |
| 8                 | 8.900                   | 7.975 | 7.638 |
| 9                 | 8.938                   | 7.975 | 7.688 |
| 10                | 8.875                   | 7.975 | 7.688 |
| average           | 8.92                    | 8.01  | 7.64  |
| std               | 0.027                   | 0.043 | 0.030 |
| average           | 8.189                   |       |       |
| std               | 0.548                   |       |       |

| 70                |                         |       |        |
|-------------------|-------------------------|-------|--------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |        |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |        |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3    |
| 1                 | 8.813                   | 7.913 | 7.6125 |
| 2                 | 8.788                   | 7.913 | 7.575  |
| 3                 | 8.825                   | 7.963 | 7.675  |
| 4                 | 8.750                   | 7.950 | 7.750  |
| 5                 | 8.825                   | 7.950 | 7.775  |
| 6                 | 8.788                   | 7.900 | 7.775  |
| 7                 | 8.750                   | 7.913 | 7.775  |
| 8                 | 8.863                   | 8.425 | 7.875  |
| 9                 | 8.963                   | 7.900 | 7.875  |
| 10                | 8.900                   | 7.888 | 7.625  |
| average           | 8.83                    | 7.97  | 7.73   |
| std               | 0.067                   | 0.161 | 0.106  |
| average           | 8.176                   |       |        |
| std               | 0.491                   |       |        |

| 80                |                         |       |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |       |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3   |
| 1                 | 8.738                   | 7.850 | 7.638 |
| 2                 | 8.663                   | 7.938 | 7.600 |
| 3                 | 8.588                   | 7.850 | 7.600 |
| 4                 | 8.663                   | 7.825 | 7.600 |
| 5                 | 8.775                   | 7.825 | 7.588 |
| 6                 | 8.763                   | 7.838 | 7.538 |
| 7                 | 8.650                   | 7.950 | 7.500 |
| 8                 | 8.638                   | 7.950 | 7.600 |
| 9                 | 8.763                   | 7.988 | 7.513 |
| 10                | 8.613                   | 8.213 | 7.588 |
| average           | 8.69                    | 7.92  | 7.58  |
| std               | 0.068                   | 0.119 | 0.044 |
| average           | 8.061                   |       |       |
| std               | 0.478                   |       |       |

| 90                |                         |       |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|
| ทดสอบ<br>ครั้งที่ | ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz) |       |       |
|                   | พื้นที่ตัวอย่างที่      |       |       |
|                   | 5-1                     | 5-2   | 5-3   |
| 1                 | 8.613                   | 7.788 | 7.700 |
| 2                 | 8.588                   | 7.800 | 7.488 |
| 3                 | 8.588                   | 7.813 | 7.700 |
| 4                 | 8.575                   | 7.763 | 7.425 |
| 5                 | 8.688                   | 7.800 | 7.438 |
| 6                 | 8.538                   | 7.788 | 7.438 |
| 7                 | 8.538                   | 7.825 | 7.338 |
| 8                 | 8.525                   | 7.800 | 7.375 |
| 9                 | 8.500                   | 7.925 | 7.363 |
| 10                | 8.525                   | 7.800 | 7.350 |
| average           | 8.57                    | 7.81  | 7.46  |
| std               | 0.055                   | 0.044 | 0.134 |
| average           | 7.946                   |       |       |
| std               | 0.477                   |       |       |

## เอกสารแนบท้าย 2

```
clear;
B = load ('t401.txt');      %test no.1 of 4_1\L0_40_15

t = B(:,1);                % 1st column : Time (sec)
s1 = B(:,2);               % 2nd column : Sensotec at position 0 (g)
s2 = B(:,3);               % 3rd column : Sensotec at position 2L (g)

%%%%%%%%%%plot no filter of data
figure (1),plot(t,s1)
title('sensotec without filter at position 0')
xlabel('sec')
ylabel('g')

figure (2),plot(t,s2)
title('sensotec without filter at position 2R')
xlabel('sec')
ylabel('g')

%This system with a 1000 Hz sampling frequency
%To design a xxx Hz lowpass filter
n=50;
fn=30/(1000/2); %cutoff frequency, normalized to half the sampling frequency
b=fir1(n,fn,hamming(n+1)); %b length = 51, Default fir command is Hamming window
fvtool(b,1) %FIR (b,a); a=1 % fvtool is Filter Visualization Tool
a=1;
Hd=dfilt.df2t(b,a); %discrete-time filter object direct form II transposed structure
ss1=filter(Hd,s1);
ss2=filter(Hd,s2);
```

```

%%%%%%%%%%plot filter of data
figure (6),plot(t,ss1)
title('sensotec with filter at position 0')
xlabel('sec')
ylabel('g')

```

```

figure (7),plot(t,ss2)
title('sensotec with filter at position 2L')
xlabel('sec')
ylabel('g')

```

```

%fft data
S1 = fft(s1,80000);
Pyy1 = S1.* conj(S1) / 80000;
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(10),plot(f,Pyy1(1:40001))
title('sensotec without filter at position 0')
xlabel('freq.')

```

```

S2 = fft(s2,80000);
Pyy2 = S2.* conj(S2) / 80000;
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(13),plot(f,Pyy2(1:40001))
title('sensotec without filter at position 2L')
xlabel('freq.')

```

```

%%%%%%%%% fft of filter data
SS1 = fft(ss1,80000);
Pyy3 = SS1.* conj(SS1) / 80000;

```

```
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(15),plot(f,Py3(1:40001))
title('sensotec with filter at position 0')
xlabel('freq.')
```

```
SS2 = fft(ss2,80000);
Py4 = SS2.* conj(SS2) / 80000;
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(17),plot(f,Py4(1:40001))
title('sensotec with filter at position 2L')
xlabel('freq.')
```

```
%fft of data cutoff data 0-0.05 sec with filter
css1 = ss1(51:length (t));
CSS1 = fft(css1,80000);
Py5 = CSS1.* conj(CSS1) / 80000;
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(19),plot(f,Py5(1:40001))
title('sensotec (at position 0)with filter and cutoff 0-0.05 sec')
xlabel('freq.')
```

```
css2 = ss2(51:length (t));
CSS2 = fft(css2,80000);
Py6 = CSS2.* conj(CSS2) / 80000;
f = 1000*(0:40000)/80000;
figure(21),plot(f,Py6(1:40001))
title('sensotec (at position 2L)with filter and cutoff 0-0.05 sec')
xlabel('freq.')
```

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบ

ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเททับหน้า

ตัวอย่าง 3 เมตร

| ตัวอย่างที่ | Pmax (kN)     | Pmax (kg)        | fc' (ksc)     |
|-------------|---------------|------------------|---------------|
| C1/1        | 421.9         | 43,007.14        | 243.37        |
| C1/2        | 429.1         | 43,741.08        | 247.52        |
| C2/1        | 443.9         | 45,249.75        | 256.06        |
| C2/2        | 531.4         | 54,169.22        | 306.54        |
| C3/1        | 547           | 55,759.43        | 315.53        |
| C3/2        | 588.9         | 60,030.58        | 339.70        |
| avg.        | <b>493.70</b> | <b>50,326.20</b> | <b>284.79</b> |
| max.        | 588.9         | 60,030.58        | 339.70        |
| min.        | 421.9         | 43,007.14        | 243.37        |
| std.        | 70.90         | 7,227.26         | <b>40.90</b>  |

ตัวอย่าง 4 เมตร

| ตัวอย่างที่ | Pmax (kN)     | Pmax (kg)        | fc' (ksc)     |
|-------------|---------------|------------------|---------------|
| C01         | 381           | 38,837.92        | 219.78        |
| C02         | 405           | 41,284.40        | 233.62        |
| C03         | 364           | 37,104.99        | 209.97        |
| C04         | 420           | 42,813.46        | 242.27        |
| C05         | 387           | 39,449.54        | 223.24        |
| C06         | 395           | 40,265.04        | 227.85        |
| C07         | 361           | 36,799.18        | 208.24        |
| avg.        | <b>387.57</b> | <b>39,507.79</b> | <b>223.57</b> |
| max.        | 420           | 42,813.46        | 242.27        |
| min.        | 361           | 36,799.18        | 208.24        |
| std.        | 21.27         | 2,168.69         | <b>12.27</b>  |

ตัวอย่าง 5 เมตร

| ตัวอย่างที่ | Pmax (kN)     | Pmax (kg)        | fc' (ksc)     |
|-------------|---------------|------------------|---------------|
| C1/1        | 618.5         | 63,047.91        | 356.78        |
| C1/2        | 629.3         | 64,148.83        | 363.01        |
| C1/3        | 511.8         | 52,171.25        | 295.23        |
| C2/1        | 625.8         | 63,792.05        | 360.99        |
| C2/2        | 566.2         | 57,716.62        | 326.61        |
| C2/3        | 649.6         | 66,218.14        | 374.72        |
| C3/1        | 545.4         | 55,596.33        | 314.61        |
| C3/2        | 659.7         | 67,247.71        | 380.54        |
| C3/3        | 617.3         | 62,925.59        | 356.09        |
| <b>avg.</b> | <b>602.62</b> | <b>61,429.38</b> | <b>347.62</b> |
| max.        | 659.7         | 67,247.71        | 380.54        |
| min.        | 511.8         | 52,171.25        | 295.23        |
| std.        | 50.04         | 5,100.77         | <b>28.86</b>  |



## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวีชรเดช เกิดเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2533 ได้รับทุนรัฐบาลญี่ปุ่นไปศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและ ปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยโตเกียว สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2539

เริ่มทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2539 เป็นต้นมา ในปี พ.ศ. 2542 ได้รับแต่งตั้งเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ ในปี พ.ศ. 2542-2544 ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายอาคารสถานที่ ในปีต่อมาได้ดำรงตำแหน่งหัวหน้าสาขาวิชา วิศวกรรมโยธาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2550 ผลงานทางวิชาการมีบทความตีพิมพ์ 23 เรื่อง แต่งหนังสือ 3 เล่ม

สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี โทร. 0-4422-4420-1