

การศึกษาพฤติกรรมการสันเสเพื่อนของพื้คนกรรตอ้ดแรงล้ําเร้จรูปเน้องจก
กิจกรรมของมนุษย์

นางสาวพรพ้ไล กิตรร้ตนะระการ

วิทยานพฐนี้เป้นส่วนหน้งของการศ้ษาตามล้กฐตรปร้ญญาวศวรรรมศาสตรมหาบัณทศ

สาขาวิชาศวรรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศ้ษา 2546

ISBN 974-533-270-4

**STUDY OF VIBRATIONAL BEHAVIOR OF PRECAST
PRESTRESSED CONCRETE SLABS DUE TO HUMAN ACTIVITIES**

Miss Pornpilai Kitirattrakarn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-270-4**

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์

STUDY OF VIBRATIONAL BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED
CONCRETE SLABS DUE TO HUMAN ACTIVITIES

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิตยภัตฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....
(อาจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรพิไล กิติรัตน์ตระการ : การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ (STUDY OF VIBRATIONAL BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE SLABS DUE TO HUMAN ACTIVITIES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. มงคล จิรวรรณเดช, 117 หน้า. ISBN 974-533-270-4

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ในระบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์อันได้แก่ การเดิน แอโรบิก การวิ่ง และการวิ่งเหยาะๆ และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนของการเสริมเหล็กที่บริเวณจุดรองรับปลายแผ่นพื้น หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนกับเกณฑ์มาตรฐานเกี่ยวกับการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสั่นสะเทือนในอาคารแบบต่างๆ โดยเลือกใช้เกณฑ์มาตรฐานประเทศแคนาดา (NBCC1995) แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ใช้ศึกษาเป็นแผ่นพื้นผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย การวิเคราะห์พิจารณาระบบพื้นเป็นแบบพื้นทางเดียว มีจุดรองรับเป็นแบบง่าย (one-way simply supported slab) มีการเคลื่อนขึ้นลงในแนวตั้งแบบเดียวในรูปของฟังก์ชัน sine ต่อจากนั้น generalize ระบบให้มีระดับความเสรีขึ้นเดียว (single degree of freedom) วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นทำการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้นเพื่อศึกษาศึกษาประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน

ผลการวิจัยพบว่า ตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป คือ ความยาว มวล การอัดแรง ชนิดของกิจกรรม และชนิดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยความยาวและมวลจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่น และเมื่อทำการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้นแล้วสามารถลดการสั่นสะเทือนของระบบลงได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานแล้ว สำหรับระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลาง การเสริมเหล็กที่จุดรองรับส่วนใหญ่สามารถลดการสั่นสะเทือนจนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน NBCC1995 ของอาคารกีฬา ส่วนระบบพื้นแบบท้องเรียบ แม้จะลดการสั่นสะเทือนได้มากแต่การสั่นยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของอาคารทุกประเภท

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PORNPILAI KITITRATTRAKARN : STUDY OF VIBRATIONAL BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE SLABS DUE TO HUMAN ACTIVITIES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MONGKOL CHIRAVACHARADET, Ph.D. 117PP. ISBN : 974-533-270-4

PRECAST PRESTRESSED VIBRATION/ GENERALIZED SDOF/ RESPONSE

The purpose of this thesis is to study the vibrational behavior of floor system using precast prestressed concrete slabs (PC slabs) due to human activities (aerobic exercise, running and jogging) and the effectiveness of reinforcing steel at the supports in reducing vibration. The serviceability criteria for deflections and vibrations of National Building Code of Canada (NBCC) 1995 will be used as acceptable limits for vibration. Commercial PC slabs in Thailand were used in the study. The floor was considered as a one-way simply supported slab. The vibration shape function was assumed to be sinusoidal. The vibration was generalized as a system with single degree of freedom. The simplified system was analyzed using mathematical model. The floor system was then reinforced at the supports to study its effectiveness in vibration reduction.

It was found that the parameters having significance on the vibration are span-length, mass, prestressing force, activity type and type of PC slab, with span-length and mass having the most pronounced effect. Putting reinforcing steel at the supports could reduce the vibration of the floor system quite effectively. The vibrations in most of the reinforced floors made from hollow core PC slabs were found to be lower than the acceptable limits given by NBCC for rhythmic activity. However, for PC flat slab floors, although vibrations were reduced significantly they were still higher than the acceptable limits.

School of Civil Engineering
Academic Year 2003

Student signature.....
Advisor signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ อาจารย์ ดร.ทงศักดิ์ พิศาลสิน ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐ ยางกูร และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน

- คุณกীরติ ตัณฑสุวัฒน์ และคุณวิสินี วิเศษจินดาวัฒน์ ผู้ช่วยเหลือในการค้นคว้าข้อมูลจาก ห้องสมุด AIT

- คุณอลงกรณ์ ละม่อม คุณสุเมธ แซ่เฮง และเพื่อนร่วมเรียนปริญญาโททุกท่านที่ให้คำ ปรึกษาและให้กำลังใจเรื่อยมา

- คุณศราวุธ ราชบุรี คุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณอนุรัฐ ชพานนท์ อาจารย์ศาสน์ สุข ประเสริฐ อาจารย์พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์เชาวน์ หิรัญดิยะกุล และน้องๆ ชมรมแบดมินตัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกคนที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจเรื่อยมา

- ผู้ช่วยสอนและวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี

- คุณสายฝน มานิมนต์, คุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณศุรยา ชาติเงี้ยว ที่ช่วยเหลือเกี่ยว กับการติดต่อประสานงานและอนุเคราะห์วัสดุที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย

- ทบวงมหาวิทยาลัยผู้มอบทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโท

- คุณสมพร กิติรัตน์ตระการ และคุณพิชิต กิติรัตน์ตระการผู้ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษา ต่อระดับปริญญาโท

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและให้การส่งเสริมใน ทุกๆ ด้านด้วยดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตจนถึงปัจจุบัน

พรพีไล กิติรัตน์ตระการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์.....	4
2.1.1 การเดิน และการวิ่ง.....	4
2.1.2 การกระโดดหรือกิจกรรมเข้าจังหวะ.....	8
2.1.3 การเต้นรำ.....	10
2.2 การรับรู้ของมนุษย์ต่อการสัมผัส.....	10
2.3 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	13
2.3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานคอนกรีตอัดแรง	13
2.3.2 การเชื่อมลวดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 ระบบพื้นแบบคอมโพสิต.....	15
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.5 ความเข้าใจในแนวทางการวิจัย.....	21
2.6 แนวทางการวิจัยที่เลือก.....	22
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหาและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล	24
3.1.1 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลอง.....	24
3.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล	25
3.2 แบบจำลองปัญหา	26
3.2.1 แบบจำลองระบบกรณีไม่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น.....	26
3.2.2 แบบจำลองระบบกรณีที่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น.....	27
3.3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบ.....	30
3.3.1 ตัวแปรต่างๆ ในสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งมีจุดรองรับแบบง่าย (Equation of Motion of the System with Simple Support).....	31
3.3.2 คุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมี จุดรองรับแบบง่าย.....	33
3.4 การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนของระบบ.....	35
3.4.1 การวิเคราะห์หาการตอบสนองและความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการสั่น	

(ไม่มีความหน่วงและไม่มีแรงภายนอกมากระทำ).....35

3.4.2 การวิเคราะห์หาการตอบสนองของระบบที่มีการสั่นแบบอิสระ
(ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ)
ภายใต้ความหน่วง.....36

3.4.3 การวิเคราะห์หาการตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและ
มีแรงภายนอกใดๆ มากระทำ โดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเอล
(Duhamel integral method).....37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 แนวทางดำเนินการวิจัย.....	39
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล.....	41
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	41
4.1.1 แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	41
4.1.2 นำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์.....	55
4.1.3 เกณฑ์การรับรู้ความสั่นสะเทือนของมนุษย์.....	56
4.2 ผลการวิเคราะห์.....	57
4.2.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น.....	57
4.2.2 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จุดรองรับ.....	62
4.2.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่จุดรองรับ.....	65
4.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์.....	75
4.3.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่จุดรองรับ.....	75
4.3.2 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จุดรองรับ.....	77
4.3.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่จุดรองรับ.....	77
4.3.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับเกณฑ์มาตรฐาน.....	78
5 บทสรุป.....	84
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	84

5.1.1 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....	84
5.1.2 การเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น	85
5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	87
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณและการวิเคราะห์.....	90
ภาคผนวก ข ตารางการคำนวณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์.....	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB R12.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ ความเร็วและระยะก้าวสำหรับการเดินและวิ่ง	5
2.2 จีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้นสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์	12
2.3 จีดจำกัดความเร่งจำแนกตามการใช้งานอาคาร	12
2.4 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534.....	14
2.5 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้นและมีการคลายแรงดึงต่ำ ตามมาตรฐาน มอก. 95-534	14
2.6 ตัวแปรต่างๆ ที่แนะนำในการออกแบบสำหรับกิจกรรมเข้าจังหวะ.....	19
2.7 จีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้นสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์	19
4.1 ชื่อและข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	44
4.2 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบ.....	57
4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จุกรองรับ ปลายแผ่นพื้น	48
4.4 ชื่อ และลักษณะของแรงกระทำเนื่องจากการกระโดด.....	55
4.5 จีดจำกัดความเร่งสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ระหว่าง 1.5 – 8 เฮิรต์ (NBCC1995).....	56
4.6 การตอบสนองสูงสุด.....	57
4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จุกรองรับปลายแผ่นพื้น.....	65
5.1 ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน.....	86
5.2 ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน.....	87
ก-1 ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	92
ข-1 PNC-L5-315	104
ข-2 PNC-L4-305.....	105

У-3 HC80-L5-332.....	106
У-4 HC6x30-L4-303.....	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-5 HC250-L12-341.....	108
ข-6 HC250-L10-428.....	109
ข-7 HC250-L9-327.....	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างการจัดวางแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....	2
1.2 ห้องผ่าตัดตาของโรงพยาบาล Lock Haven.....	2
2.1 แรงกระทำเป็นคาบ.....	4
2.2 แรงกับเวลาที่ความถี่การก้าวค่าต่างๆ.....	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาสัมผัสพื้นและแรงสูงสุด.....	6
2.4 แรงเนื่องจากการเดิน.....	7
2.5 แรงเนื่องจากการกระแทกเท้าสำหรับกิจกรรมการวิ่ง และการกระโดด.....	8
2.6 แรงเนื่องจากการกระโดด.....	9
2.7 แรงเนื่องจากการกระโดดของคน 8 คน พร้อมกัน.....	9
2.8 เกณฑ์การรับรู้ของมนุษย์ต่อความสั่นสะเทือน	11
2.9 ตัวอย่างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเททับด้วยคอนกรีตเททับหน้า.....	16
2.10 การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของมนุษย์.....	17
2.11 แรงเนื่องจากกิจกรรมเข้าจังหวะ.....	18
3.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหา	24
3.2 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ผล.....	25
3.3 แบบจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปปรับแรงกระทำแบบจุด.....	27
3.4 การจัดวางแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปและการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น.....	28
3.5 แบบจำลองจุดรองรับปลายแผ่นพื้น.....	29
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความยาวที่ปลายแผ่นพื้นและกึ่งกลางคาน.....	30
3.7 ระบบซึ่งมีจุดรองรับแบบง่าย.....	31
3.8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบที่รับแรงคดและมีจุดรองรับแบบง่าย.....	33
3.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระ.....	36
3.10 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วง.....	37
3.11 การตอบสนองเนื่องจากอิมพัลส์.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	หน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....43
4.2	แรงเนื่องจากการกระโดดโดยพิจารณาการกระแทกเท่า 1 ครั้ง.....56
4.3	การตอบสนองสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบทั้ง 3 แบบ.....58
4.4	การตอบสนองสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงทั้ง 3 แบบ.....59
4.5	การตอบสนองของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบทั้ง 3 แบบ.....60
4.6	การตอบสนองของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงทั้ง 3 แบบ.....61
4.7	การตอบสนองสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบเปรียบเทียบกับแบบกลวง62
4.8	การตอบสนองของพื้น PNC-L4-30563
4.9	การตอบสนองของพื้น HC250-L9-32764
4.10	ค่าการตอบสนองสูงสุดของพื้นเนื่องจากการเดินแอโรบิค72
4.11	ค่าการตอบสนองสูงสุดของพื้นเนื่องจากการวิ่งเหยาะๆ73
4.12	ค่าการตอบสนองสูงสุดของพื้นเนื่องจากการวิ่ง74
4.13	ความเร่งของพื้นภายในกิจกรรมการเดินแอโรบิค.....78
4.14	เปรียบเทียบความเร่งสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน.....79
4.15	เปรียบเทียบความเร็วสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน80
4.16	เปรียบเทียบความเร็วสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน81
5.1	การตอบสนองของพื้นแบบท้องเรียบ84
5.2	การตอบสนองของพื้น PNC-L4-305 ภายใต้กิจกรรมการเดินแอโรบิค.....85
ก-1	หน้าตัดการเสริมเหล็กและหน้าตัดแปลงที่จุกรองรับปลายแผ่นพื้น.....94
ก-2	แรงกระทำเนื่องจากการเดินแอโรบิค.....98
ก-3	ใช้โปรแกรม MATLAB R12 ช่วยในการหาสมการการตอบสนองของระบบ.....99
ก-4	สมการการตอบสนองของระบบกรณีไม่มีแรงกระทำ100
ก-5	สมการการตอบสนองของระบบกรณีมีแรงกระทำ101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	=	American Concrete Institute
ANSI	=	American National Standard Institute
aero2.1	=	น้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตเนื่องจากการเดินแอโรบิกที่ความถี่ 2.1 เฮิรต์
b	=	ช่องว่างระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
c^*	=	generalized damping
E_{cp}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพื้นสำเร็จ
E_p	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเทพื้นหน้า
f_g	=	ความถี่ของกิจกรรม
f_f	=	โมดูลัสการแตกหัก (Modulus of fracture)
G	=	น้ำหนักของผู้ทำกิจกรรม
h	=	ความสูงของจตุรกรงรับปลายแผ่นพื้น
HC	=	ชื่อย่อของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงของบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด
I_g	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัด
jog2.5	=	น้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตเนื่องจากการวิ่งเหยาะๆ ที่ความถี่ 2.5 เฮิรต์
k	=	ความต้านทานการหมุน (spring stiffness)
k_d	=	ตัวคูณการกระแทก (dynamic impact factor)
k	=	generalized flexural stiffness
k_G^*	=	generalized geometric stiffness
\bar{k}^*	=	combined generalized stiffness

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

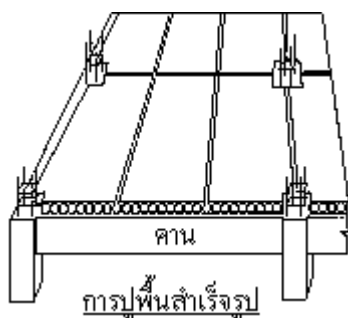
I	=	ความกว้างของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
L	=	ระยะระหว่างจุดรองรับหัวท้ายปลายแผ่นพื้น
L_2	=	ระยะระหว่างจุดที่โมเมนต์เป็นศูนย์ใน bending moment diagram
m^*	=	generalized mass
M	=	โมเมนต์ที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น
NBCC	=	National Building Code of Canada
p_{eff}^*	=	generalized effective load
PNC	=	ชื่อย่อของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบของบริษัท เพชรนครคอนกรีต จำกัด
run3.2	=	น้ำหนักบรรทุกพลวัตเนื่องจากการวิ่งที่ความถี่ 3.2 เฮิรต์
R	=	Response Rating
SDOF	=	Single Degree of Freedom
t_p	=	ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น (contact duration)
T_p	=	$1/f_p$ ช่วงเวลาในการก้าว
$Z(t)$	=	ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่งตามเวลา
$\dot{Z}(t)$	=	ฟังก์ชันความเร็วตามเวลา
$\ddot{Z}(t)$	=	ฟังก์ชันความเร่งตามเวลา
$\psi(X)$	=	รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (shape function)
ω	=	ความถี่ธรรมชาติของระบบ
ω_D	=	ความถี่หน่วงของระบบ
ξ	=	สัดส่วนความหน่วง (damping ratio)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีเกี่ยวกับวัสดุและกรรมวิธีในการก่อสร้างมีการพัฒนามากขึ้น รวมถึงการออกแบบอาคารมีแนวโน้มออกแบบให้อาคารมีความโล่งมากขึ้นเพื่อให้เป็นอาคารอเนกประสงค์สามารถใช้ทำกิจกรรมได้หลายอย่าง อาทิเช่น จัดนิทรรศการ จัดประชุม จัดแสดงดนตรี จัดการแข่งขันกีฬา เป็นต้น ทำให้ช่วงความยาวของพื้นมีค่ามากขึ้นและมีการคำนึงถึงความประหยัด ความสะดวกรวดเร็วในการก่อสร้างมากขึ้นด้วยเช่นกัน วัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจึงต้องมีกำลังสูงและสามารถทำงานได้ง่ายและรวดเร็ว สำหรับในส่วนของโครงสร้างพื้นนั้น พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปถือเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีกำลังสูงและมีความสะดวกในการทำงานทำให้สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง นอกจากนี้ ในท้องตลาดยังมีผู้ผลิตเป็นจำนวนมากให้เลือกใช้ตามความต้องการ โดยมีความยาวตั้งแต่ 2 – 14 ม. ถึงแม้ว่าแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เลือกใช้จะมีกำลังเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย และมีการแอมตัวไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน แต่เนื่องจากการที่แผ่นพื้นมีน้ำหนักน้อยและมีความยืดหยุ่นมาก เมื่อเทียบกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา รวมทั้งไม่ได้หล่อเป็นเนื้อเดียวกับโครงสร้าง รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างการจัดเรียงแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ผลกระทบต่อโครงสร้างที่ตามมาคือ ความสั่นสะเทือนของโครงสร้างมีมากขึ้น ถึงแม้ว่าโครงสร้างจะมีความปลอดภัย แต่การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง จะมีผลต่อการรับรู้ของผู้อาศัยอยู่ในอาคาร ซึ่งทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบาย ความแรงในการสั่นสะเทือนอาจจะวัดออกมาในหลายรูปแบบเช่น ความถี่และช่วงเวลาของการสั่น ระยะเวลาเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้ง และความเร่งในการสั่นสะเทือน ในส่วนของการรับรู้ของมนุษย์นั้นจะขึ้นอยู่กับอิริยาบถ เช่น การนอน ยืน หรือนั่ง และกิจกรรมของผู้รับรู้ที่กระทำอยู่ขณะนั้น นอกจากนี้ ความสั่นสะเทือนยังอาจก่อให้เกิดปัญหาในอาคารที่มีเครื่องมือซึ่งต้องการความละเอียดแม่นยำสูง ยกตัวอย่างดังรูปที่ 1.2 ห้องผ่าตัดตาของโรงพยาบาล Lock Haven หากมีความสั่นสะเทือนมารบกวนมากอาจทำให้ความแม่นยำในการทำงานน้อยลงจนไม่สามารถปฏิบัติงานได้ แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นเพียงความรู้สึกไม่สะดวกสบายของผู้ใช้อาคารเป็นหลัก



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการจัดวางแผ่นพื่นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป



รูปที่ 1.2 ห้องผ่าตัดตาของโรงพยาบาล Lock Haven

(<http://www.wje.com/expertise/health.html>)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1. ศึกษาพฤติกรรมการสันสะท้อนของระบบพื่นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์

1.2.2. ศึกษาประสิทธิผลของการลดการสันสะท้อน ของระบบพื่นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์โดยการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื่น

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1. คอนกรีตและเหล็กที่ใช้วิเคราะห์ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (homogenous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic)

1.3.2. พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหลังจากเทคอนกรีตทับหน้าแล้ว อยู่ในช่วงยืดหยุ่น (linear elastic) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law)

1.3.3. ระยะสั้นขึ้นลงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย (small displacement)

1.3.4. ผลของแรงเฉือน (shear deformation) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งมีค่าน้อยมาก

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1. พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป หมายถึง พื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดคิงเหล็กก่อน

1.4.2. มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปี 2537

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1. กิจกรรมของมนุษย์ที่ศึกษา ได้แก่ การวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ และการเดินแอโรบิก

1.5.2. นำหน้ากบรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์ได้จาก แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีผู้ทำการวิจัยแล้ว

1.5.3. การสั่นสะเทือนของพื้นจะคิดผลเนื่องจากกิจกรรมของคน 1 คน กระแทกเท้าลงพื้น 1 ครั้ง กระทำกิจกรรมที่กึ่งกลางพื้น (mid span) และการรับรู้ในช่วงพื้นเดียวกัน

1.5.4. พิจารณาการสั่นสะเทือนเฉพาะในแนวดิ่งเท่านั้น

1.5.5. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

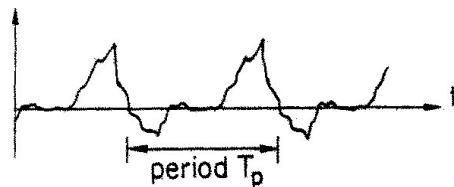
รู้พฤติกรรมและตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือน ในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเมื่อรับน้ำหนักบรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์ และรู้การลดการสั่นสะเทือนโดยการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ปรับปรุงการออกแบบอาคารอเนกประสงค์และเป็นงานวิจัยพื้นฐานนำไปสู่การวิจัยละเอียดต่อไป

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์

แรงที่กระทำกับพื้นเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ ลักษณะของแรงจะขึ้นกับ ความถี่ในการก้าวเท้า (f) ความเร็วในการก้าว (V) น้ำหนักและเพศของคน ชนิดของส้นรองเท้า และ สภาพผิวพื้น ลักษณะของแรงเป็นแบบ periodic load คือเป็นแรงที่เกิดขึ้นซ้ำในช่วงเวลาสม่ำเสมอ รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของแรงแบบ periodic load แบบทั่วไป periodic load สามารถพิจารณาเป็น harmonic load ได้โดยการทำ Fourier transformation (harmonic analysis) ในกรณีที่ช่วงเวลาของ load นานพอจนทำให้เกิดการตอบสนองแบบคงที่ (steady-state) เช่น แรงกระทำเนื่องจากการเดิน รำ หรือการเต้นแอโรบิค เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แรงกระทำเป็นคาบ (Bachmann and Ammann,1987)

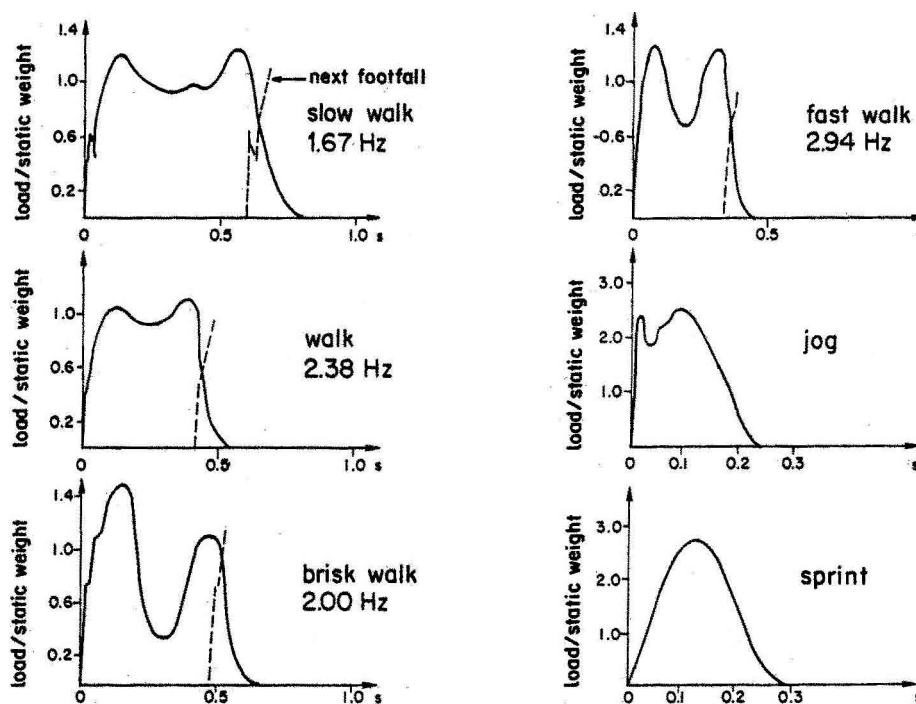
2.1.1 การเดิน และการวิ่ง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความถี่ ความเร็วในการก้าว และระยะก้าว (Wheeler, 1982) รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load-time function (Wheeler,1982) รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า ยังมีความถี่ในการก้าวมาก สัดส่วนระหว่างน้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อพื้นที่ต่อน้ำหนักคนมีค่าเพิ่มขึ้น (Wheeler, 1982) ความแตกต่างระหว่างการเดิน และการวิ่งอยู่ที่ความต่อเนื่องในจังหวะสัมผัสพื้น (ground contact) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) สำหรับการเดินเป็นแบบ continuous ground contact และการวิ่งเป็นแบบ discontinuous ground contact

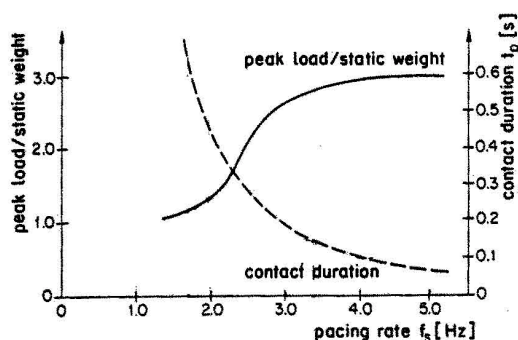
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ ความเร็วและระยะก้าวสำหรับการเดินและวิ่ง

(Bachmann and Ammann,1987)

	f_s [Hz]	v_s [m/s]	l_s [m]
slow walk	~ 1.7	1.1	0.60
normal walk	~ 2.0	1.5	0.75
fast walk	~ 2.3	2.2	1.00
slow running (jog)	~ 2.5	3.3	1.30
fast running (sprint)	> 3.2	5.5	1.75



รูปที่ 2.2 แรงกับเวลาที่ความถี่การก้าวค่าต่างๆ (Bachmann and Ammann,1987)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาสัมผัสพื้นและแรงสูงสุด (rel. to static weight)

(Bachmann and Ammann, 1987)

2.1.1.1 Continuous Ground Contact (Walking)

load-time function ดังรูปที่ 2.4 แสดงการรวมกันระหว่างเท้าแต่ละข้าง สำหรับการเดิน สามารถจำลองโดยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) + \Delta G_2 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \sin(6 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_3) \quad (2.1)$$

เมื่อ $F_p(t)$ = แรงขึ้นกับเวลา

G = น้ำหนักของคน

ΔG_1 = load component (amplitude) of 1st harmonic

ΔG_2 = load component (amplitude) of 2nd harmonic

ΔG_3 = load component (amplitude) of 3rd harmonic

f_s = อัตราการก้าว (pacing rate) หน่วย Hz

φ_2 = phase angle of the 2nd harmonic relative to the 1st harmonic

φ_3 = phase angle of the 3rd harmonic relative to the 2nd harmonic

จากการทดสอบของ Baumann and Bachmann (1987) ได้ค่า

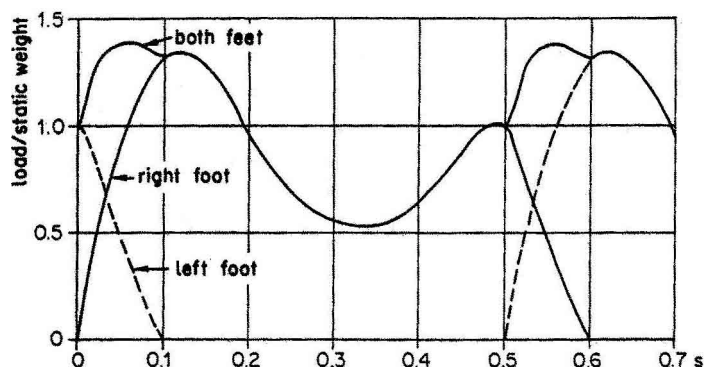
$$\Delta G_1 = 0.4 \cdot G \quad \text{สำหรับ } f_s = 2.0 \text{ Hz}$$

$$\Delta G_1 = 0.5 \cdot G \quad \text{สำหรับ } f_s = 2.4 \text{ Hz}$$

ค่า ΔG_1 ระหว่างช่วงให้ใช้ค่าจากการทำ linear interpolation

$$\Delta G_2 \cong \Delta G_3 \cong 0.1 \cdot G \quad \text{สำหรับช่วง } f_s \cong 2 \text{ Hz}$$

$$\varphi_2 \cong \varphi_3 \cong \pi/2 \quad \text{เป็นค่าประมาณ}$$



รูปที่ 2.4 แรงเนื่องจากการเดิน (Bachmann and Ammann, 1987)

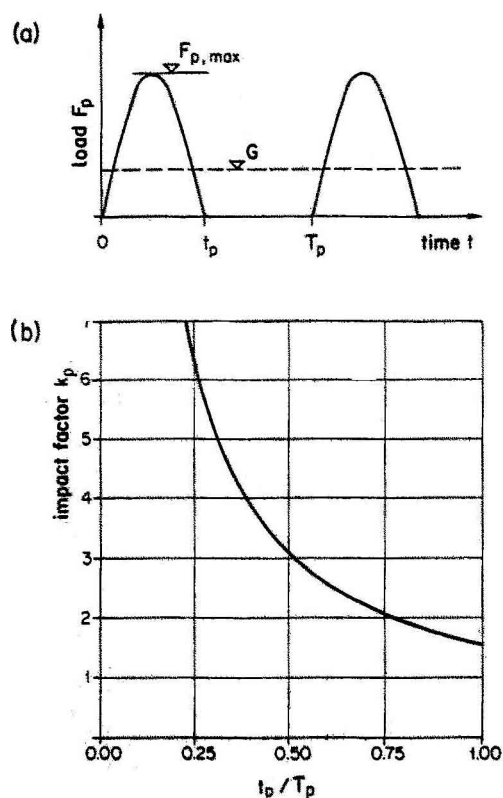
2.1.1.2 Discontinuous Ground Contact (Running and jogging)

load-time function ดังรูปที่ 2.5a สำหรับการวิ่งแสดงโดยใช้ semi-sinusoidal pulses สามารถจำลองโดยสมการทางคณิตศาสตร์ (half-sine model) สำหรับ 1 คาบได้ดังนี้

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot t / t_p) & \text{for } t \leq t_p \\ 0 & \text{for } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (2.2)$$

- เมื่อ $F_p(t)$ = แรงขึ้นกับเวลา
 k_p = $F_{p,\max}/G$ = dynamic impact factor
 $F_{p,\max}$ = peak dynamic load
 G = น้ำหนักคนวิ่ง (โดยทั่วไปสมมติ $G = 800$ N)
 t_p = contact duration
 T_p = $1/f_s$ = pace period

ค่า k_p ได้จากค่าคงที่จากการ integral ของ load-time function สำหรับ 1 คาบ ซึ่งต้องเท่ากับแรงกระทำขณะหยุดนิ่ง (static weight) ดังรูปที่ 2.5b



รูปที่ 2.5 แรงเนื่องจากการกระแทกเท้าสำหรับกิจกรรมการวิ่ง และการกระโดด

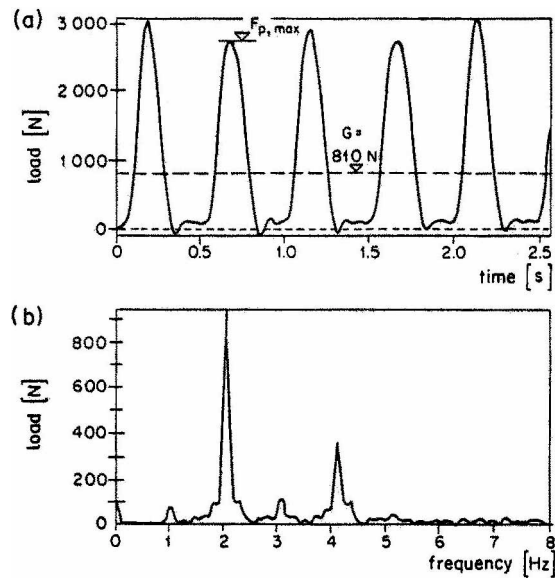
(a) half-sine model (b) ตัวคูณการกระแทกและช่วงเวลาที่สัมผัสพื้น

(Bachmann and Ammann, 1987)

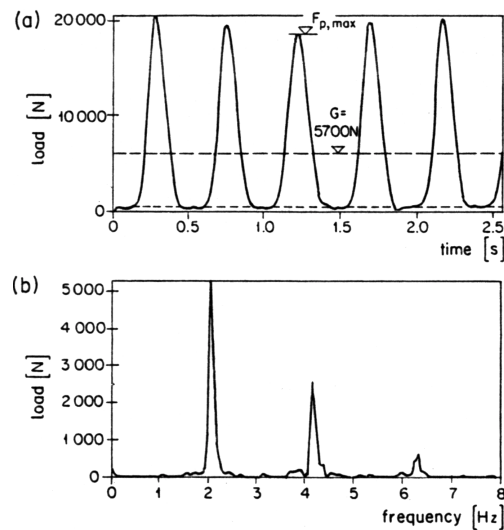
2.1.2 การกระโดดหรือกิจกรรมเข้าจังหวะ (ออกกำลังกาย เต็มแอร์บิค)

แรงลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะเกิดในโรงยิม ห้องออกกำลังกาย ลักษณะของแรงขึ้นกับความถี่ในการกระโดด (f) เวลาที่ใช้ น้ำหนักและเพศของคน ชนิดของเส้นรองเท้า และ สภาพผิวพื้นร่างกายมนุษย์ ช่วงความถี่ที่พิจารณาจะอยู่ในช่วง 1.8-3.4 Hz รูปที่ 2.6 (Allen, Rainer and Pernica, 1985) แสดง load-time function ที่ความถี่ 2.1 Hz จากรูปจะเห็นว่าค่า k_p สูงถึง 3.4 และส่วนประกอบของแรง ที่ 2nd harmonic (4.2 Hz) มีค่าสูงรองจากที่ 1st harmonic (2.1 Hz) ค่า k_p มากที่สุดที่มีการวัดประมาณ 6 หรืออาจจะสูงถึง 7 สำหรับการกระโดดอย่างแรง (Baumann, 1987) half-sine model ยังคงนำมาใช้เป็น idealized mathematical ค่า t_p/T_p อยู่ในช่วงระหว่าง 0.25-0.6 ค่า t_p น้อยที่สุดประมาณ 0.15 วินาที จะได้ $t_p/T_p = 0.15f$ รูปที่ 2.7 (Allen, 1985) เป็นการกระโดดของคน 8 คน จะได้ผลของกราฟใกล้เคียงกับกรณี 1 คน แต่จะเห็นว่าแรง ที่ 3rd harmonic จะมีผลแสดงให้เห็นชัด

กว่า และค่า t_p น้อยที่สุดประมาณ 0.20 วินาที จะได้ $t_p/T_p = 0.20f$ และค่า k สูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 4.5



รูปที่ 2.6 แรงเนื่องจากการกระโดด (a) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา
(b) Fourier amplitude spectrum (Bachmann and Ammann,1987)



รูปที่ 2.7 แรงเนื่องจากการกระโดดของคน 8 คน พร้อมกัน (a) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา
(b) Fourier amplitude spectrum (Bachmann and Ammann,1987)

2.1.3 การเต้นรำ (Dancing)

แรงจากการเต้นรำรวมถึง การชมคอนเสิร์ตที่มีการกระแทกเท้าตามจังหวะดนตรี การวัด load-time function โดยตรงค่อนข้างยุ่งยาก ช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 1.6-3 Hz ความหนาแน่นของผู้ชมประมาณ 2-6 คนต่อตารางเมตร (Pernica, 1983) สำหรับ idealized mathematical load-time function เป็นแบบ continuous ground contact ใช้สมการเดียวกับกรณีของการเดิน และใช้ค่า $\Delta G_1 \cong 0.5G$ และ $\Delta G_2 \cong 0.15G$

2.2 การรับรู้ของมนุษย์ต่อการสั่นสะเทือน

มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อผลกระทบต่อระดับการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสั่นสะเทือน เช่น อิริยาบถของร่างกาย: ยืน นั่ง หรือ นอน ลักษณะการกระตุ้น: ขนาด ความถี่ และช่วงเวลาความนานของการสั่น ลักษณะของระบบพื้น: ความถี่ธรรมชาติ (สติเฟเนส ; มวล) มีงานวิจัยหลายฉบับที่ได้ทดสอบและสร้างเกณฑ์ต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบพื้นเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนที่เกินขีดจำกัด ตัวอย่างดังรูปที่ 2.8 รวบรวมโดย Murray (1981)

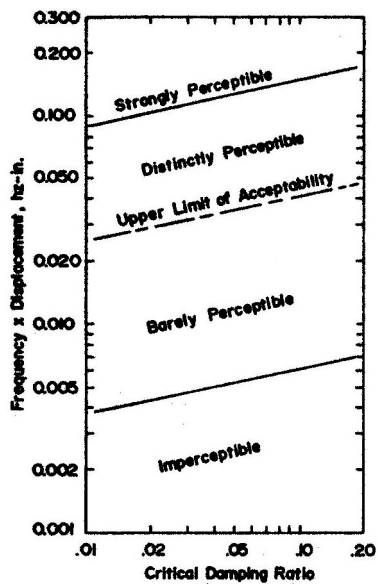
- GSA/PBS Guide 1970 (U.S. Department of Housing and Urban Development Operation Breakthrough : Amendment 4) นำผลมาจากการทดสอบของ Wiss and Parmelee (1974) แต่ค่า acceptable limit เริ่มต้นที่ $R=2.5$ แสดงในรูปที่ 2.8a

- Modified Reiher-Meister Scale (1930) ทดสอบกับคนยืน การสั่นเป็นแบบ steady-state ที่ความถี่ 3 – 100 Hz. และ displacement (amplitude) 0.004 - 0.4 in ดังรูปที่ 2.8b หลังจากนั้น Lenzen (1963) ได้ทำการทดสอบกับพื้นคอนกรีตบนตงคอนกรีต แนะนำว่าค่าจาก Reiher-Meister จะใช้กับ damping น้อยกว่า 5% ถ้า displacement (amplitude) เพิ่มขึ้น 10 เท่า Murray (1975)

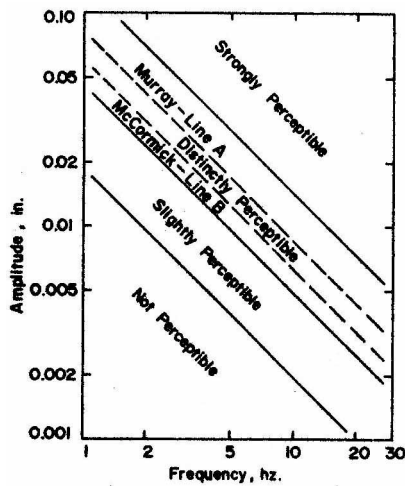
- McCormick (1974) ระบบพื้นที่มี damping > 3% จะใช้ Line B แทน Distinctly Perceptible ดังรูปที่ 2.8b แต่ถ้ามี damping > 10 % สามารถเลื่อน limit ให้สูงขึ้นได้

- CSA Scale (Canadian Standards Association Standard : CSA S16) ซึ่งอ้างอิงการทดสอบของ Allen and Rainer(1976) ทดสอบกับพื้นช่วงยาว 42 ตัวอย่าง การทดสอบเป็นแบบ heel-drop impact ประกอบด้วยการ 1. สั่นแบบต่อเนื่อง (Damping ratio = 0) 2. Damping ratio < 4% 3. Damping ratio ระหว่าง 4% - 8% 4. Damping ratio > 8% ดังรูปที่ 2.8c

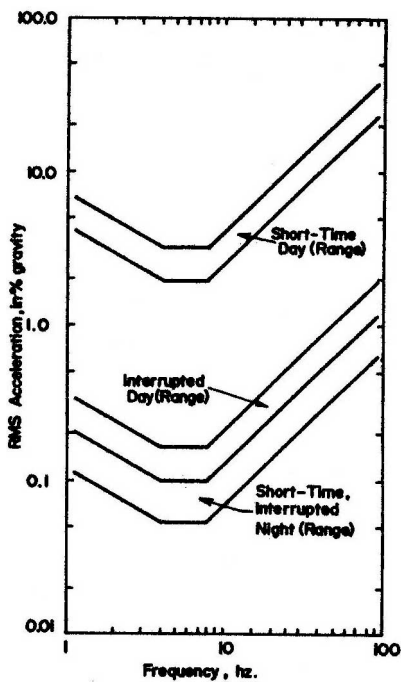
- Adjusted ISO Scale (The International Organization for Standardization's Standard : Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration ISO/01S2631) ดังรูปที่ 2.8d



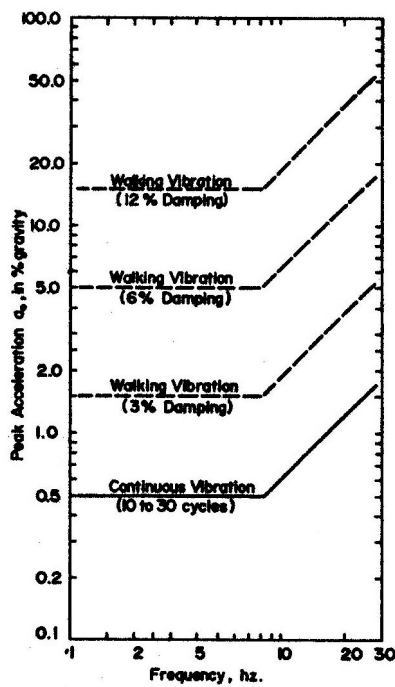
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 2.8 เกณฑ์การรับรู้ของมนุษย์ต่อความสั่นสะเทือน (a) GSA/PBS Guide, (b) modified Reiher-Meister scale, (c) ISO/Splittgerber scale, (d) CSA Standard

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าขีดจำกัดความเร่งที่ใช้ในการออกแบบพื้นเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนจากมาตรฐานของ NBCC1985 (National Building Code of Canada 1985)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าขีดจำกัดความเร่งที่ใช้ในการออกแบบพื้น เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนแยกตามชนิดของอาคาร จากมาตรฐาน ANSI A58.1-1982 (ANSI : American National Standards Institute)

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้นสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์ (NBBC 1985)

Activity or occupancy	Limiting peak Acceleration a_v/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 2.3 ขีดจำกัดความเร่งจำแนกตามการใช้งานอาคาร (ANSI A58.1-1982)

Occupancy / activity	ACCELERATION LIMIT (g)		
	Frequent Steady-state RMS 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			

2.3 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

คอนกรีตอัดแรงแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามวิธีการอัดแรง คือ คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน (pre-tensioned concrete) และคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง (post-tensioned concrete) สำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจัดเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน ในการออกแบบจะต้องตรวจสอบภายใต้ 2 สถานะคือ สถานะการใช้งาน (service state) และ สถานะประลัย (ultimate state) มาตรฐานที่นำมาใช้ในการออกแบบจะใช้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท.ปี 2537 และมาตรฐานของ ACI

2.3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานคอนกรีตอัดแรง

2.3.1.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ต้องการกำลังอัดประลัยสูง มีค่าตั้งแต่ 300-500 กก./ตร.ซม. ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนนิยมใช้การบ่มด้วยไอน้ำ หรือบางทีก็ใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากเริ่มเทคอนกรีต

สำหรับกำลังรับแรงดึง ตามมาตรฐานของ ACI 318-89 นิยมบอกโดยค่าโมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture : f_r)

$$f_r = 2.0\sqrt{f_c} \quad (\text{หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.})$$

โมดูลัสการยืดหยุ่นของสำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ปี 2534 คือ

$$E_c = 15,200\sqrt{f_c} \quad (\text{หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.})$$

การคืบ (creep) สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงอาจใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยการหดตัวรวม (ϵ_c) ต่อหน่วยการหดตัวทันทีทันใด (ϵ_i) (สัมประสิทธิ์การคืบ : C_c) เท่ากับ 3 ซึ่งค่อนข้างปลอดภัย

การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage) โดยปกติงานคอนกรีตอัดแรงจะใช้ค่าหน่วยการหดตัวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage strain) เท่ากับ 0.0002 -0.0006

2.3.1.2 เหล็กเสริมอัดแรง (prestressing steel)

เหล็กเสริมอัดแรงต้องเป็นเหล็กที่มีกำลังสูง โดยทั่วไปมี 3 ชนิด คือ ลวดอัดแรง (prestressing wire) ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand) และ เหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar) สำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนิยมใช้แบบลวดอัดแรง และลวดเกลียวอัดแรง ตามมาตรฐาน มอก. 95-2534 และ 420-2534 ตามลำดับ คุณสมบัติของเหล็กแสดงดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม. (นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด ตร.มม. (ตร.นิ้ว)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อย ที่สุด กก./ตร.ซม. (ปอนด์/ตร. นิ้ว)	กำลังครากอย่างน้อยที่สุด (ที่ 1% หน่วยการยึดตัว) กก./ตร.ซม. (ปอนด์/ตร. นิ้ว)
4 (0.157)	12.57 (0.019)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
5 (0.197)	19.64 (0.030)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
7 (0.276)	38.48 (0.060)	16,000 (227,600)	13,500 (192,000)
9 (0.354)	63.62 (0.098)	14,500 (206,200)	12,500 (177,800)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้นและมีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

เกรด	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง มม. (นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด ตร.มม. (ตร. นิ้ว)	แรงดึงที่จุด ประลัย กก. (ปอนด์)	กำลังครากอย่างน้อยที่สุด (ที่ 1% หน่วยการยึดตัว) กก./ตร.ซม. (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
1725	9.53 (3/8)	51.61 (0.080)	9,070 (20,000)	8,163 (17,999)
	12.70 (1/2)	92.90 (0.144)	16,320 (36,000)	14,688 (32,387)
	15.24 (0.6)	139.35 (0.216)	24,490 (54,000)	22,041 (48,600)
1860	9.53 (3/8)	54.84 (0.085)	10,430 (23,000)	9,387 (20,698)
	12.70 (1/2)	98.71 (0.153)	18,730 (41,300)	16,857 (37,170)
	15.24 (0.6)	140.00 (0.217)	26,580 (58,600)	23,922 (52,748)

2.3.2 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น 2 ช่วงคือ เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง (immediate loss) และเกิดขึ้นตามเวลา (time independent loss)

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรงได้แก่

- การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด (friction loss)
- การสูญเสียแรงดึงจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)
- การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอ (anchorage loss)

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา ได้แก่

- การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss)
- การคืบ (creep loss)
- การคลายแรงดึงของเหล็กเสริม (steel relaxation loss)

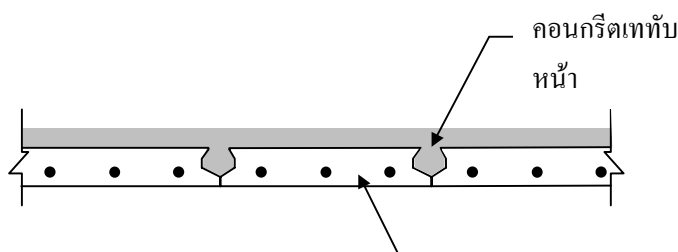
กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดค้ำเหล็กก่อน จะไม่พิจารณาการสูญเสียแรงดึง เนื่องจากความฝืด เนื่องจากขณะที่ค้ำไม่ได้ใช้ทอร์อย และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอ โดยส่วนใหญ่ผู้ผลิตจะออกแบบโดยคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึง ในเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึง และแรงดึงจะค้ำที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมอัดแรง

2.3.3 ระบบพื้นแบบคอมโพสิต

พื้นคอนกรีตสำเร็จรูปโดยทั่วไปดังรูปที่ 2.9 การใช้งานมักจะอยู่ในรูปของโครงสร้างคอมโพสิต การวิเคราะห์โครงสร้างคอมโพสิตภายใต้สถานะการใช้งานจะสมมติว่าโครงสร้างคอมโพสิตมีพฤติกรรมยึดหยุ่น การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรงตลอดหน้าตัด หน่วยแรงดึงและอัดของคอนกรีตเป็นปฏิภาคโดยตรงกับหน่วยการยึดหดตัวตามกฎของฮุก ในการวิเคราะห์หน้าตัดคอมโพสิตจะใช้วิธีของหน้าตัดแปลง (transformed section) โดยแปลงขนาดของหน้าตัดหรือความยาวของหน้าตัด นิยมแปลงหน้าตัดของคอนกรีตในส่วนของพื้นที่หลัง เทียบเท่ากับ ส่วนของคอนกรีตอัดแรง

$$b_r = b_e \frac{(E_c)_{slab}}{(E_c)_{precast}} = b_e \cdot n_c$$

- เมื่อ b_r คือ ความกว้างเทียบเท่าของคอนกรีตพื้นที่หลัง
- $(E_c)_{slab}$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในส่วนของพื้นที่หลัง
- $(E_c)_{precast}$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในส่วนของคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ
- n_c คือ อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในส่วนของพื้นที่หลัง ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในส่วนของคอนกรีตอัดแรง
- b_e คือ ความกว้างประสิทธิผลเดิมของคอนกรีตพื้นที่หลัง



พื้นคอนกรีตอัด
แรงสำเร็จรูป

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเททับด้วยคอนกรีตเททับหน้า

2.4 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 2.10 และได้ Mathematical Model ดังนี้

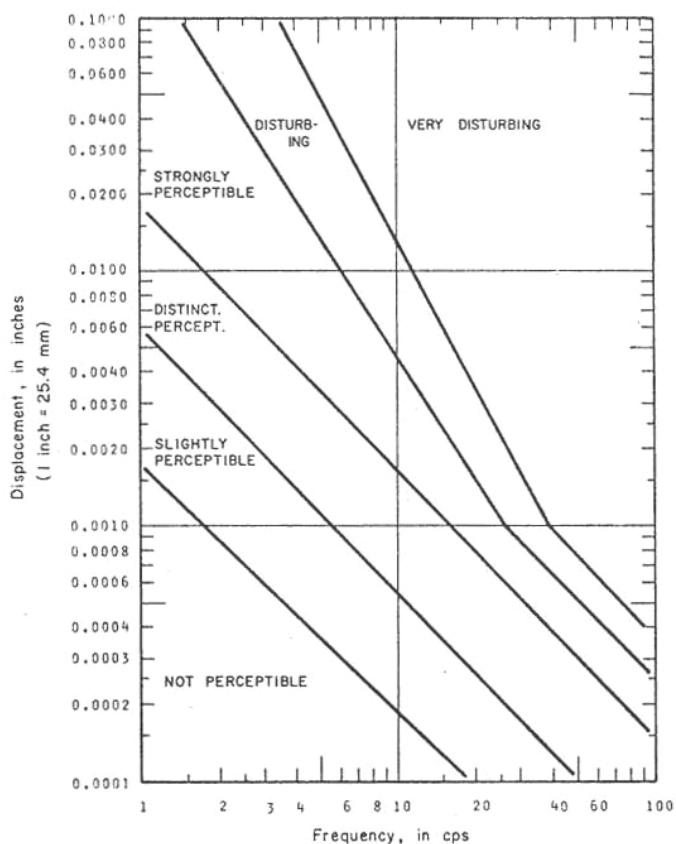
$$R = 6.82(FA)^{0.24}$$

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

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) และเวลาในการสั่นความหน่วง และได้ mathematical model ดังนี้

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

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



รูปที่ 2.10 การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของมนุษย์

(Reiher and Meister, 1946)

Murray (1981) ได้เสนอ Scale ใหม่ โดยได้ทดสอบกับตัวอย่าง พื้นคอนกรีตบนตงเหล็ก และ กานเหล็ก จำนวน 91 ตัวอย่าง ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะใช้คนหนักระหว่าง 170 – 190 lbs. ทำการกระแทกเท้าลงพื้น แล้วจดบันทึกค่า amplitude (displacement) เริ่มต้น (A_0) และ ความถี่ (f) ได้ผลสรุปเป็น Scale ใหม่ ดังนี้

$$D \geq 3.5A_0f + 2.5$$

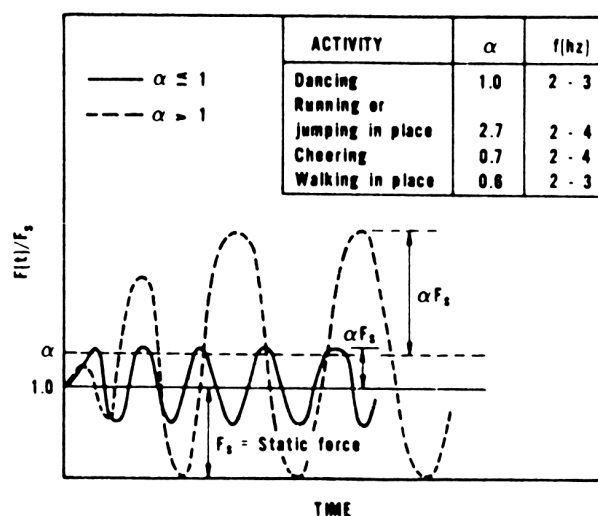
โดย D คือ percent of critical damping A_0 คือ initial amplitude from a heel drop impact หน่วย นิ้ว f คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบพื้น หน่วย เฮิรต (Hz) ถ้า D ไม่น้อยกว่า 5.5 - 6% ถือว่ายอมรับได้

Ellingwood and Tallin (1984) เสนอสูตรในการหาค่าความถี่ของระบบพื้นที่มีจุดรองรับแบบง่าย โดยใช้ค่าขีดจำกัดความเร่งในตารางที่ 2.2 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 αF_s คือ sinusoidal dynamic force หาได้จาก กราฟรูปที่ 2.11 $\frac{\alpha F_s}{k}$ คือ static deflection due to force โดย αF_s ไม่ควรทำให้ค่าการโก่งตัวมี ค่าเกิน 1 มม. f คือ frequency of rhythmic activity f_1 คือ fundamental natural frequency of the floor



รูปที่ 2.11 แรงเนื่องจากการกิจกรรมเข้าจังหวะ (Allen, 1981)

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 $I_m = 68 \text{ N s}$ a_0 คือความเร่งได้จากตารางที่ 2.3

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 2.6 2. เลือกค่าความถี่ของกิจกรรม ; f (ความถี่ของ dynamic force) และ dynamic load factor ; α

โดยดูได้จากตารางที่ 2.6 หรือจากข้อจำกัดอื่นที่เหมาะสม กรณีของ jumping exercise ให้พิจารณา ทั้ง 1st harmonic และ 2nd harmonic แยกเป็น 2 กรณี 3. เลือกค่า acceptable limiting acceleration (a_0) จากตารางที่ 2.7 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 2.3 5. หาค่า f_0 ของระบบพื้น โดยคือน้ำหนักพื้นและน้ำหนักอื่น ๆ ที่กระทำบนพื้นทั้งหมด 6. ถ้า f_0 จากขั้นตอนที่ 5 น้อยกว่าขั้นตอนที่ 4 ควรจะมีการเพิ่ม stiffener ให้กับโครงสร้าง หรือ เปลี่ยนตำแหน่งของกิจกรรม หรือ ควบคุมกิจกรรม เช่น ความถี่ หรือ จำนวนผู้ใช้กิจกรรม

$$f_0 \geq f \sqrt{1 + \frac{1.3\alpha w_p}{a_0/g w_t}} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรต่างๆ ที่แนะนำในการออกแบบสำหรับกิจกรรมเข้าจังหวะ (Allen ,1985)

Activity	Forcing frequency f Hz	Weight of Participants* w_p kPa	Dynamic load Factor ⁺ α	Dynamic load αw_p kPa
Dancing	1.5-3	0.6 (2.5 m ² /couple)	0.5	0.3
Lively concert or sports event	1.5-3	1.5 (0.5 m ² /person)	0.25	0.4
Jumping exercises	1.5-3	0.4 (2 m ² /person)	1.5	0.6
(second harmonic)	3-6	0.4 (2 m ² /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 α are based on commonly encountered events involving a minimum of about 20 participants. Values of α should be increased for well-coordinated events (e.g., jump dances) or for fewer than 20 participants.

ตารางที่ 2.7 ขีดจำกัดความเร่งในการสั่นสะเทือนบนพื้น สำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ 1.5- 8 เฮิรต์ (Allen ,1985)

Activity or occupancy	Limiting peak acceleration a_0/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

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

Allen (1990) ได้ทำการปรับปรุง NBC1985 code สำหรับการออกแบบพื้นเพื่อรับแรงกระทำเนื่องจากการกิจกรรมเข้าจังหวะ ดังนี้ 1. ความเร่งจำกัดที่ใช้ในกิจกรรมแบบผสมเช่น กิจกรรมรับประทานอาหารเช้าและเดินรำ ที่อยู่รวมกัน ควรใช้ค่า 2%g 2. สำหรับแรงกระทำที่คิดเป็นแบบ sinusoidal harmonic ให้คิดผลถึง harmonic ที่ 3 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i W_p \sin \pi i f t$ 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 2.4 4. ค่าความเร่งมากที่สุดสามารถหาได้จากสมการ 2.5 5. การออกแบบพื้นกรณีคิดแรงกระทำที่ 3 harmonic ใช้สมการ 2.6 6. การประมาณค่าความถี่ธรรมชาติใช้สมการ 2.7a และ 2.7b

$$\frac{a_i}{g} = \frac{1.3 \alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_0}{if} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[2\beta \frac{f_0}{if} \right]^2}} \quad (2.4)$$

$$a_m = (a_1^{1.5} + a_2^{1.5} + a_3^{1.5})^{1/1.5} \quad (2.5)$$

$$f_0 \geq if \sqrt{1 + \frac{2 \alpha_i w_p}{a_0 / g w_t}} \quad (2.6)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{stiffness}}{\text{mass}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

(2.7a)

$$\Delta = \frac{(\Delta_B + \Delta_G)}{1.3} + \Delta_S \quad (2.7b)$$

โดย Δ_B คือ ระยะการโก่งของตงตัวเนื่องจากแรงคัตและแรงเฉือน Δ_G คือ ระยะการโก่งของคานหลักตัวเนื่องจากแรงคัตและแรงเฉือน Δ_S คือ ระยะการทรุดตัวของเสาหรือกำแพงรับพื้นและคาน

กิตติศักดิ์ กุลธวิชัย (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตช่วงยาว เนื่องจากการเดิน แผ่นพื้นเป็นพื้นคอนกรีตขนาด 9.50x9.50 ม. ในการวิเคราะห์ใช้วิธี Finite element โดยแบ่งพื้นออกเป็น 256 element 289 node ในการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงค่า ความหนาแน่นนี้ 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 โปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ก็คือ JAnalyser ผลการวิเคราะห์คือ ที่ความหนาน้อย damping ratio ต่ำ และจุดรองรับเป็นแบบ simply supported จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและความเร่งสูงกว่า ที่ความหนามาก damping ratio สูง และจุดรองรับเป็นแบบ fixed supported

2.5 ความเข้าใจในแนวทางการวิจัย

แรงกระทำเนื่องจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์มีหลายแบบเช่น การเดิน การวิ่ง การกระโดด การออกกำลังกาย การชมคอนเสิร์ต แรงต่างๆ เหล่านี้ล้วนแต่เป็นแรงแบบพลศาสตร์ที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างทั้งสิ้น ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยและสร้างแบบจำลองของแรงออกมาในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้น Bachmann และ Ammann ได้ทำการรวบรวมแรงต่างๆ ไว้ในหนังสือ Vibration in Structures Induced by Man and Machine ความแรงของการสั่นสะเทือนในพื้นที่จะขึ้นกับความถี่ในการก้าวเท้า ความเร็วในการก้าว น้ำหนักและเพศของคน ชนิดของส้นรองเท้า สภาพผิวพื้น ขนาดและรูปแบบของแรงกระทำ ซึ่งผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นอาจจะมีความรู้สึกว่าพื้นมีการสั่นหรือบางคนอาจจะไม่รู้ ขึ้นกับอิริยาบถและกิจกรรมของผู้ใช้อาคารอยู่ขณะนั้น ได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรับรู้ของมนุษย์อันเนื่องจากการสั่นสะเทือนและสรุปเป็นเกณฑ์ต่างๆ หลายเกณฑ์ ซึ่งสิ่งทีนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้แบ่งระดับความรู้สึกจะเป็น ความถี่ของการสั่น ระยะเวลาเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่ง ความเร่งในการสั่น เป็นต้น สำหรับการเลือกใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและผู้ใช้แต่ละท่าน Allen (1990) ได้ทำการศึกษาอาคารที่มีปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือนมีค่ามากจนผู้ใช้รู้สึกไม่ปลอดภัย โดยพื้นอาคารทำจากโครงเหล็กอาคารดังกล่าวมีห้องสำหรับออกกำลังกายและจะมีการเดินแอโรบิกเป็นประจำ ซึ่งในการแก้ปัญหาในอาคารที่ก่อสร้างมีหลายวิธีแต่ค่อนข้างทำได้ยาก และเสียค่าใช้จ่ายมากหรือบางครั้งอาจมีความจำ เป็นต้องเปลี่ยนชนิดของกิจกรรม จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าโครงสร้างเหล็กนั้นค่อนข้างมีความไวต่อการสั่นสะเทือนเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและหน้าตัดค่อนข้างเล็ก ความสามารถในการต้านทานการสั่นจะน้อย เมื่อพิจารณาระบบพื้นที่ทำจากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นจะมีความน่าสนใจเพราะว่ามีการผลิตและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา กำลึงสูงและติดตั้งได้ง่าย ทั้งนี้สำหรับพื้นคอนกรีตธรรมดาได้มีผู้ทำการศึกษาแล้วคือ กิตติศักดิ์ กุศลวิชัย (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของพื้นคอนกรีตช่วงยาว เนื่องจากการเดิน แผ่นพื้นเป็นพื้นคอนกรีตขนาด 9.50x9.50 ม ใช้ความหนา 3 ค่าดังนี้ 0.24 0.26 และ 0.28 ม.

2.6 แนวทางการวิจัยที่เลือก

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาแรงกระทำเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ที่เลือกจะเป็นแรงเนื่องจากการออกกำลังกายซึ่งต้องมีการกระโดด เป็นแรงแบบไม่ต่อเนื่องมีช่วงเวลาที่แรงเป็น 0 ขณะยกเท้าขึ้น ในการวิเคราะห์จะพิจารณาการกระแทกเท้าเพียง 1 ครั้งโดย คน 1 คน หนัก 60 กิโลกรัม (จันทร์เพ็ญ, 2543) และการรับรู้การสั่นสะเทือนจะอยู่ในช่วงพื้นเดียวกัน กิจกรรมที่เลือกมี 3 กิจกรรมคือการวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ และการเต้นแอโรบิก และสำหรับเกณฑ์ในการรับรู้ของมนุษย์นั้นขึ้นกับการพิจารณาของผู้สนใจตามความเหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ National Building Code of Canada 1995 (NBCC1995) ทั้งนี้เนื่องจากมาตรฐานนี้ได้รวบรวมผลงานวิจัยและพิจารณาเกณฑ์อื่นๆ เกี่ยวกับเรื่องการสั่นสะเทือนของพื้นและการรับรู้ของมนุษย์ไว้ แล้วสรุปออกมาเป็นมาตรฐาน ดังนั้นมาตรฐานนี้จึงมีความน่าเชื่อถือพอสมควร ระบบพื้นที่น่ามาวิเคราะห์เลือกใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศไทยโดยตัวอย่างที่น่ามาวิเคราะห์นั้นเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบและแบบกลวงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรปลดกัยแล้วแต่ความสนใจของผู้ทำการศึกษา แต่สำหรับงานวิจัยนี้เลือกค่าที่สูงกว่า 300 กก./ตร.ม (หลังจากที่เทคอนกรีตทับหน้าแล้ว) เนื่องจากเป็นค่าที่นิยมใช้ในการออกแบบพื้นอาคารโดยทั่วไป ในการวิเคราะห์พื้นคอนกรีตอัดแรงนี้เมื่อเทคอนกรีตทับหน้าแล้วจะวิเคราะห์เป็นหน้าตัดประกอบ (composite section) วิเคราะห์โดยใช้หน้าตัดแปลง วิเคราะห์เป็นพื้นทางเดียว (one way slab) พิจารณาแบบระดับความเสรีขึ้นเดียว (generalized single degree of freedom : generalized SDOF) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเดียว และแรงกระทำกระทำที่กึ่งกลางแผ่นพื้น จุตรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบง่าย (simple support) สำหรับวิธีในการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและมีแรงภายนอกใดๆ มากกระทำ โดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเอล (Duhamel integral method) และช่วงที่ยกเท้าขึ้นเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบแบบอิสระภายใต้ความหน่วง ในส่วนนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ต้องการลักษณะการตอบสนองและดูว่าตัวแปรใดมีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบพื้นข้าง หลังจากที่ได้วิเคราะห์ระบบพื้นข้างต้นแล้วทำการวิเคราะห์แผ่นพื้นใหม่โดยการเสริมเหล็กที่จุตรองรับในปริมาณต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานการหมุนของจุตรองรับ แล้วพิจารณาจุตรองรับเป็นแบบกึ่งแข็ง (semirigid connection) แล้วทำการวิเคราะห์การตอบสนองอีกครั้ง นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมเหล็กที่จุตรองรับดูแนวโน้มว่าการเสริมเหล็กมีผลช่วยในการลดการสั่นสะเทือนอย่างไร และนำผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมดเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานเพื่อดูว่าพื้นที่เลือกสามารถใช้ได้กับอาคารชนิดใดได้บ้าง ทั้งนี้หากพื้นมีการสั่นสะเทือนอยู่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานในช่วงใดแสดงว่าการสั่น

สะท้อนมีมากเกินไปทำให้เกิดความรำคาญกับผู้ใช้ แต่ความรำคาญนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีกิจกรรมการกระโดดเท่านั้น ในการเลือกใช้เพิ่มขึ้นกับการพิจารณาของผู้ออกแบบ

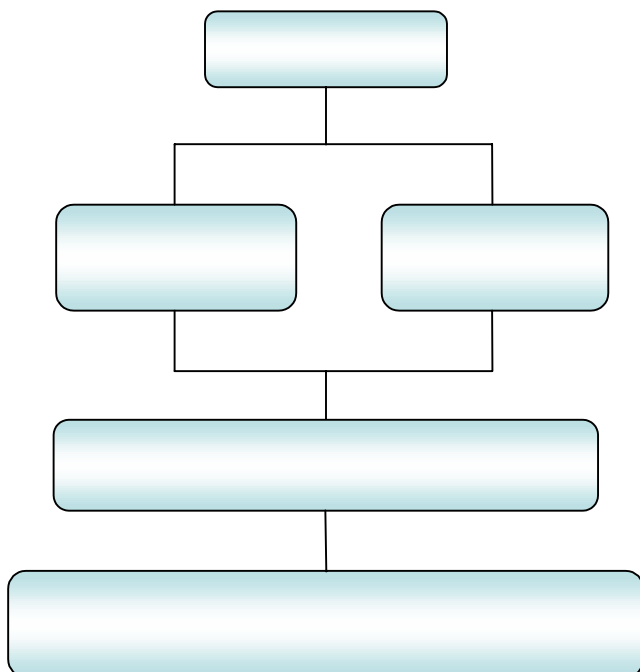
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหาและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

3.1.1 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลอง

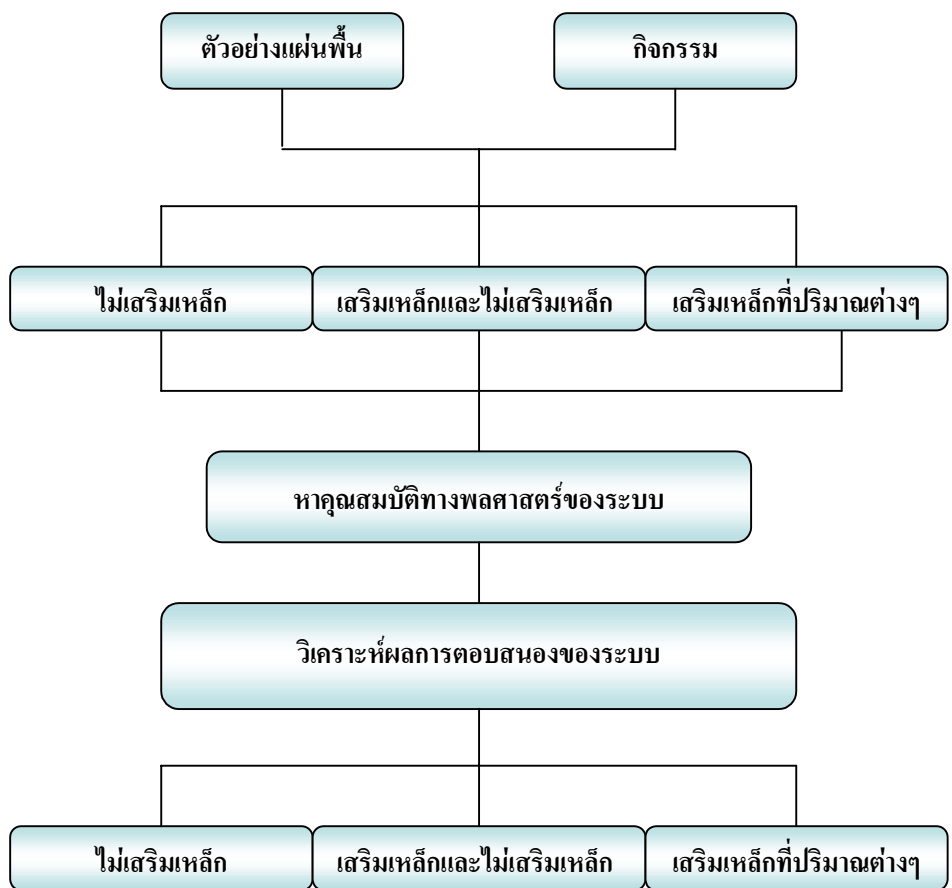
ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหาของระบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ประกอบด้วยการระบุปัญหา กำหนดรูปแบบ ขอบเขต และสมมติฐานสำหรับแบบจำลอง แยกแบบจำลองออกเป็น 2 กรณีคือ แบบจำลองที่ไม่มีการเสริมเหล็ก และแบบจำลองที่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 ต่อจากนั้นศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองจากสมการการเคลื่อนที่ของระบบ แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 หลังจากนั้นศึกษาการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.4.1 ถึง 3.4.3 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองปัญหา

3.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลจะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ 1. วิเคราะห์ตัวอย่าง กรณีที่ไม่มีการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น 2. วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้นและไม่มีการเสริมเหล็กเปรียบเทียบกัน 3. วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กปริมาณต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลเริ่มจากการเลือกตัวอย่างแผ่นพื้น เลือกชนิดของกิจกรรม (น้ำหนักบรรทุกพลวัต) แล้วทำการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนของระบบ แล้วจึงทำการอภิปรายผลการวิเคราะห์ที่ได้ ขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ผลแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

3.2 แบบจำลองปัญหา

แบบจำลองปัญหาคำหรับงานวิจัยนี้คือ การจำลองระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปซึ่งรับแรงกระทำแบบพลวัตเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ แบบจำลองแยกออกเป็น 2 แบบคือ แบบจำลองกรณีไม่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น และแบบจำลองกรณีมีการเสริมเหล็ก ในการวิเคราะห์จะพิจารณาตัดเฉพาะช่วงความกว้างของแผ่นพื้นเพียงแผ่นเดียวเท่านั้น และพิจารณาเพียงช่วงความยาวเดียว (single span) เมื่อมีกิจกรรมเกิดขึ้นจะจำลองให้เป็นแรงกระทำแบบจุดกระทำที่กึ่งกลางความยาว ดังรูปที่ 3.3 โดยแบบจำลองมีข้อจำกัดและสมมติฐานดังนี้

- คอนกรีต และ เหล็กที่ใช้วิเคราะห์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (homogenous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic)
 - พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เมื่อเทคอนกรีตทับหน้าแล้วอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (linear elastic) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law)
 - ระยะสั้นขึ้นลงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย (small displacement)
 - ผลของแรงเฉือน (shear deformation) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวตั้งมีค่าน้อยมาก
 - พฤติกรรมของพื้นเป็นแบบพื้นทางเดียว (one-way slab)
 - ขณะที่ยังไม่มีการเสริมเหล็กมีลักษณะของจตุรรองรับเป็นแบบง่าย (simple support)
 - การยึดของเหล็กเสริมที่ปลายแผ่นพื้นและคานมีความแข็งแรงมากพอจะไม่เกิดการหลุดออกจากกัน
 - การแตกร้าวของคอนกรีตที่กึ่งกลางพื้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ปลายแผ่นพื้น
 - คานมีความกว้างเพียงพอที่จะสามารถวางแผ่นพื้นและทำการเสริมเหล็กได้ (ความกว้างของคานไม่น้อยกว่า 20 ซม.)
 - การสั่นสะเทือนของพื้นจะคิดผลเนื่องจากกิจกรรมของคน 1 คน กระแทกเท้าลงพื้น 1 ครั้ง กระทำกิจกรรมที่กึ่งกลางพื้น (mid span)
 - การรับรู้ต่อการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับแรงกระทำ
- การจัดวางแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นไปตามรูปที่ 3.4ก

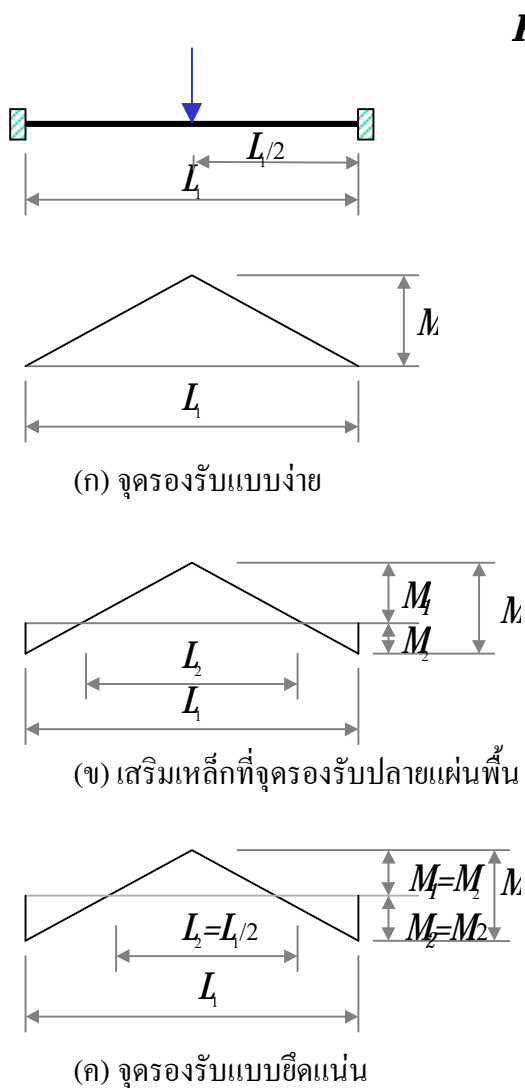
3.2.1 แบบจำลองระบบกรณีที่ยังไม่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

ในกรณีที่ไม่มีเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น จตุรรองรับจะเป็นจตุรรองรับแบบง่าย ซึ่งแผนภาพของโมเมนต์ตัดเมื่อรับแรงกระทำแบบจุดที่กึ่งกลางความยาวเป็นไปตามรูปที่ 3.3ก

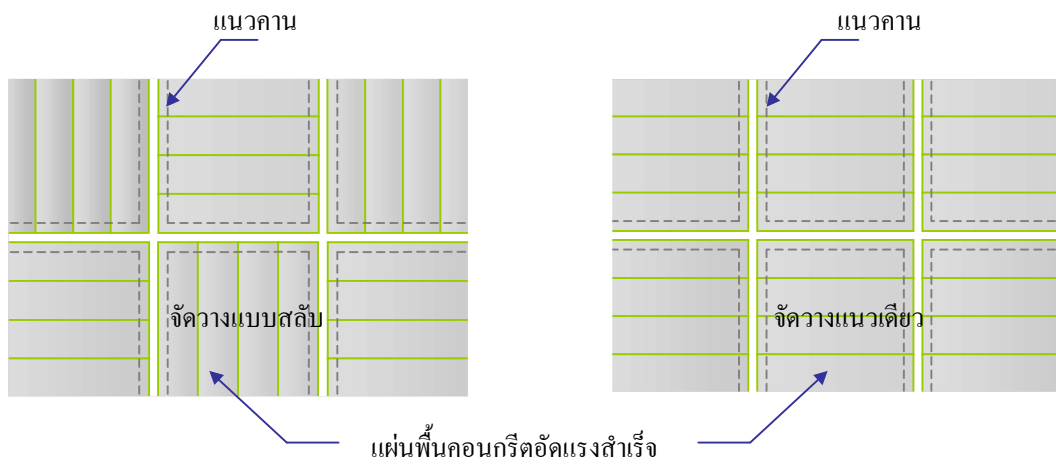
3.2.2 แบบจำลองระบบกรณีที่มีการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

การเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น หมายถึง การใส่เหล็กเสริมเพิ่มเข้าไปที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้นบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นพื้นเพื่อเทคอนกรีตทับหน้า โดยฝากเหล็กไว้ที่คานก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตทับหน้า ดังรูปที่ 3.4ข ซึ่งในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยทั่วไปจะไม่มีคานในส่วนของเหล็กเสริมที่บริเวณนี้เลย ปกติจะใส่เหล็กเพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิเท่านั้น

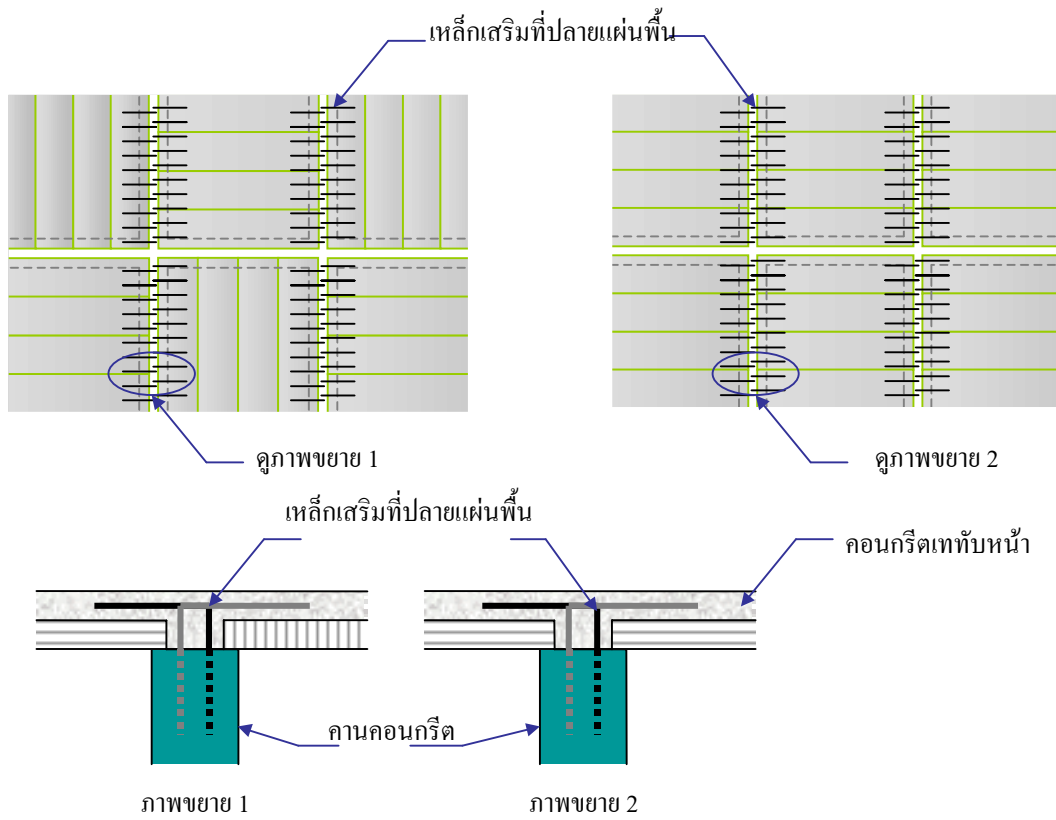
เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น และมีการเทคอนกรีตทับหน้าแล้ว ระบบจะมีความสามารถในการต้านโมเมนต์ลบที่ปลายมากขึ้นดังรูปที่ 3.3ข



รูปที่ 3.3 แบบจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปปรับแรงกระทำแบบจุด



(ก) การจัดวางแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป



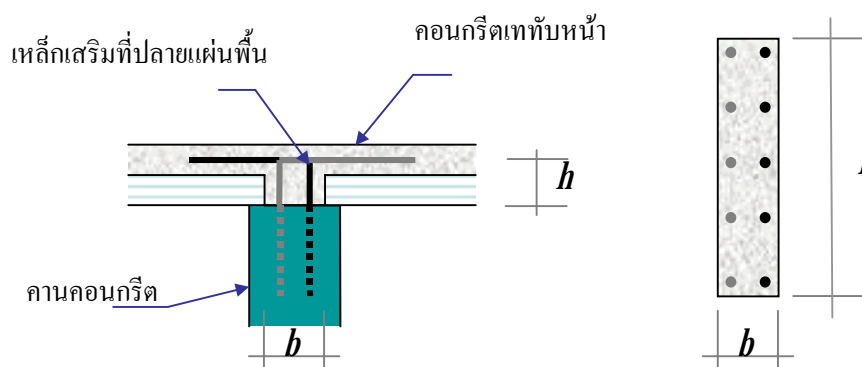
(ข) การเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น

รูปที่ 3.4 การจัดวางแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปและการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

จากรูปที่ 3.3ข ที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้นมีโมเมนต์ลบบางส่วนเกิดขึ้น จุดรองรับลักษณะนี้แสดงพฤติกรรมกำลังระหว่างจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น (semirigid) กรณีของ

จุดรองรับแบบง่ายโมเมนต์ที่ปลายมีค่าเป็น 0 ค่าความแกร่งของจุดรองรับที่ตำแหน่งนี้จะมีค่าเป็น 0 และสำหรับจุดรองรับแบบยึดแน่นในรูปที่ 3.3ค โมเมนต์ที่ปลายจะมีขนาดเท่ากับโมเมนต์ปลายยึดรั้ง (fixed-end moment) และมีค่าความแกร่งของจุดรองรับเป็นอนันต์ ดังนั้นในรูปที่ 3.3ข นั้นจะถือว่าค่าความแกร่งของจุดรองรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – อนันต์ ในการวิเคราะห์หาโมเมนต์ลบในส่วนนี้จึงใช้การวิเคราะห์แบบจุดรองรับแบบก้ำกึ่ง (หัวข้อ Semirigid connection จากหนังสือ Matrix Analysis of Structure) แต่ทั้งนี้มีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าความต้านทานการหมุน (spring stiffness : k) ของจุดรองรับที่ปลายแผ่นพื้นก่อน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะจำลองจุดรองรับที่ปลายแผ่นพื้นที่มีการเสริมเหล็กโดยการตั้งสมมติฐานว่าคอนกรีตเททับหน้าที่มีบริเวณปลายแผ่นพื้น (ช่องว่างระหว่างแผ่นพื้นที่วางต่อกันดังรูปขยายในรูปที่ 3.4ข) มีพฤติกรรมเป็นเสาซึ่งวางอยู่บนคาน และถือว่าคานมีความแกร่งมากกว่าเสามาก ดังนั้นการหมุนของคานจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเสาจึงไม่พิจารณาการหมุนของคานนั้นคือไม่คิดความต้านทานการหมุนของคานร่วมกับของเสานั้นเอง ความสูง (h) ของเสาจะพิจารณาตั้งแต่ขอบล่างของคอนกรีตทับหน้า (จุดสัมผัสกับคาน) ถึงกึ่งกลางความหนาของคอนกรีตทับหน้าในแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ความกว้าง (b) และความยาว (l) ของเสามีขนาดเท่ากับช่องว่างบริเวณหัวคานและความกว้างของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตามลำดับ เพื่อความเข้าใจพิจารณาตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองจุดรองรับปลายแผ่นพื้น

จากแบบจำลองในรูปที่ 3.5 ค่าความต้านทานการหมุนของจุดรองรับที่ปลายแผ่นพื้นนี้เท่ากับ $\frac{EI_e}{h}$ โดย E คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของหน้าตัดและ I_e คือโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัดเสาโดยพิจารณาผลของการแตกร้าวแล้วดังสมการที่ 3.1

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right) I_{cr}$$

(3.1)

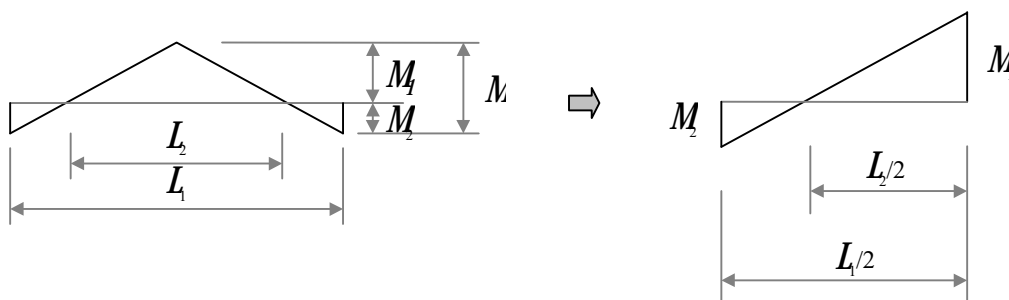
โดย I_g คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดในส่วนของคอนกรีตทั้งหมด

I_{cr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว

M_{cr} คือ โมเมนต์แตกร้าวของหน้าตัด

M_{max} คือ โมเมนต์มากที่สุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัด

เมื่อหาค่าโมเมนต์ที่จุดรองรับ (M_2) ได้แล้ว หาระยะห่างระหว่างจุดที่โมเมนต์เป็นศูนย์ (L_2) ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งความยาวนี้จะนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของหน้าตัดต่อไป



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความยาวที่ปลายแผ่นพื้นและกึ่งกลางคาน

จากรูป 3.6 ใช้หลักสามเหลี่ยมคล้ายจะได้

$$\frac{M_2}{(L_1/2 - L_2/2)} = \frac{M_1}{L_2/2} \Rightarrow \frac{M_1}{M_2} = \frac{L_2/2}{(L_1/2 - L_2/2)} = \frac{L_2}{L_1 - L_2}$$

$$\frac{M_1}{M_2} (L_1 - L_2) = L_2 \Rightarrow L_2 = \frac{\frac{M_1}{M_2} L_1}{\left(\frac{M_1}{M_2} + 1 \right)} \quad (3.2)$$

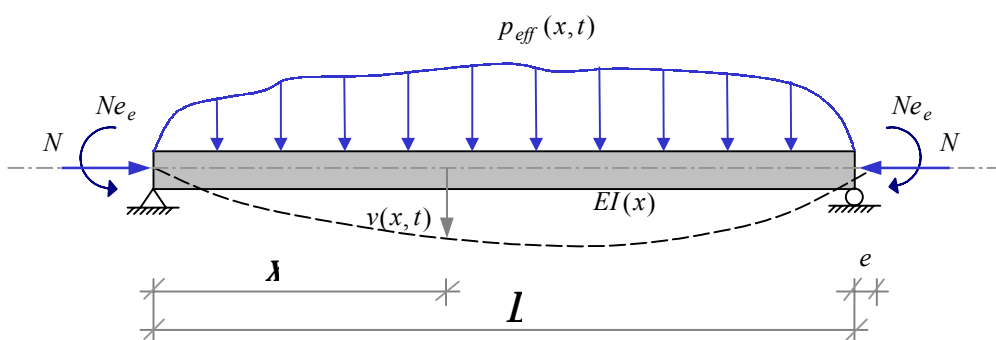
3.3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบ

การหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์คือการหาค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการการเคลื่อนที่ ลักษณะของแบบจำลองจะเป็นระบบที่มีโครงสร้างแบบยึดหยุ่น

3.3.1 ตัวแปรต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมีจุด

รองรับแบบง่าย (Equation of Motion of the System with Simple Support)

ในระบบที่โครงสร้างมีความยืดหยุ่น สามารถมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการคด (flexure deformation) ระบบจะมีจำนวนตัวแปรอิสระนับไม่ถ้วน การวิเคราะห์แบบระดับความเสรีขึ้นเดียว (generalized single degree of freedom : generalized SDOF) สามารถนำมาใช้ได้ถ้าสมมติให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (shape function) แบบเดียว พิจารณาระบบซึ่งมีจุดรองรับแบบง่ายในรูปที่ 3.7 ระบบมีค่าความแกร่งของหน้าตัด (flexural rigidity) $EI(x)$ มวลต่อหน่วยความยาว $m(x)$ ความยาว L รับแรงในแนวตั้ง $p_{eff}(x,t)$ ซึ่งแปรผันตามตำแหน่งและเวลา และรับแรงอัดในแนวนอน N ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e ทำให้เกิดโมเมนต์คดที่ปลายเท่ากับ Ne_e



รูปที่ 3.7 ระบบซึ่งมีจุดรองรับแบบง่าย (simple support)

ในการวิเคราะห์แบบ SDOF จำเป็นต้องสมมติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแบบเดียว โดยมี shape function รูปแบบเดียวคือ $\psi(x)$ และ amplitude ของการเคลื่อนที่ที่เทียบกับการเคลื่อนที่ที่ฐานคือ $Z(t)$ จะได้

$$u(x,t) = \psi(x)Z(t) \quad (3.3)$$

ย้ายข้างสมการได้ $\psi(x)$ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ไม่มีหน่วย (dimensionless ratio)

$$\psi(x) = \frac{u(x,t)}{Z(t)} \quad (3.4)$$

สมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) สำหรับ generalized SDOF สามารถหาได้จาก หลักการงานพลังงาน (principle of work or energy) และ หลักการงานเสมือน (principle of virtual work) ในที่นี้จะใช้หลักการงานเสมือนของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (principle of virtual displacement) ในการวิเคราะห์หาสมการการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$\ddot{a}W_E = \ddot{a}W_I \quad (3.5)$$

$$\delta W_E = -\int_0^L f_I(x,t)\delta v(x) dx + \int_0^L p_{eff}(x,t)\delta v(x) dx - N\delta e - Ne_e \int_0^L \delta v''(x) dx \quad (3.6)$$

$$\delta W_I = \int_0^L M(x,t)\delta v''(x) dx \quad (3.7)$$

เมื่อ δW_E คือ พลังงานภายนอกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเสมือน
 δW_I คือ พลังงานภายในที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเสมือน
 $f_I(x,t)$ คือ แรงเนื่องจากความเฉื่อยของระบบ (inertial loading) เมื่อมีการเคลื่อนที่
 $f_I(x,t) = m(x)\ddot{v}(x,t)$
 $\delta v(x)$ คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเสมือนในแนวตั้ง
 $\delta v''(x) = \partial^2 v(x) / \partial x^2$
 δe คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเสมือนในแนวนอน
 $M(x,t)$ คือ โมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเสมือน
สมมติให้แรงเค้นเนื่องจากความหน่วง (damping stress) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ strain velocity จะได้ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ดังนี้ $\sigma = E[\epsilon + a_1\dot{\epsilon}]$ โดย a_1 คือค่าคงที่ของความหน่วง (damping constant) ดังนั้น

$$M(x,t) = EI(x) [v''(x,t) + a_1\dot{v}''(x,t)] \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$\delta W_I = \int_0^L EI(x) [v''(x,t) + a_1\dot{v}''(x,t)]\delta v''(x) dx \quad (3.9)$$

จาก

$$\begin{aligned} v(x,t) &= \psi(x)Z(t) & \dot{v}''(x,t) &= \psi''(x)\dot{Z}(t) \\ v'(x,t) &= \psi'(x)Z(t) & \delta v(x,t) &= \psi(x)\delta Z \\ v''(x,t) &= \psi''(x)Z(t) & \delta v'(x,t) &= \psi'(x)\delta Z \\ \ddot{v}(x,t) &= \psi(x)\ddot{Z}(t) & \delta v''(x,t) &= \psi''(x)\delta Z \\ e(t) &= \frac{1}{2} \int_0^L [v'(x,t)]^2 dx & \delta e &= \frac{1}{2} \int_0^L v'(x,t)\delta v'(x) dx \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ (3.6) และ (3.9) จะได้

$$\delta W_E = \left[-\ddot{Z}(t) \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx + \int_0^L p_{eff}(x,t)\psi(x) dx - NZ(t) \int_0^L \psi'(x)^2 dx - Ne_e \int_0^L \psi''(x) dx \right] \delta Z \quad (3.10)$$

$$\delta W_I = \left[Z(t) \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx + a_1\dot{Z}(t) \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx \right] \delta Z \quad (3.11)$$

แทนค่าสมการ (3.10) และ (3.11) ในสมการ (3.5) จะได้

$$\begin{aligned} & Z(t) \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx + Z(t) a_1 \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx + Z(t) \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx + NZ(t) \int_0^L \psi'(x)^2 dx \\ &= \int_0^L p_{eff}(x, t) \psi(x) dx - Ne_e \int_0^L \psi''(x) dx \end{aligned} \quad (3.12)$$

จัดรูปสมการที่ (3.12) ให้อยู่ในรูปสมการการเคลื่อนที่

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + k^* Z(t) + k_G^* Z(t) = p_{eff}^*(t) \quad (3.13)$$

จะได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

$$m^* = \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx = \text{generalized mass} \quad (3.13a)$$

$$c^* = a_1 \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx = \text{generalized damping} \quad (3.13b)$$

$$k^* = \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx = \text{generalized flexural stiffness} \quad (3.13c)$$

$$k_G^* = N \int_0^L \psi'(x)^2 dx = \text{generalized geometric stiffness} \quad (3.13d)$$

$$p_{eff}^* = \int_0^L p_{eff}(x, t) \psi(x) dx - Ne_e \int_0^L \psi''(x) dx = \text{generalized effective load} \quad (3.13e)$$

จัดสมการที่ (3.13) ใหม่โดยการรวม 2 stiffness เข้าด้วยกันจะได้

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = p_{eff}^*(t) \quad (3.14)$$

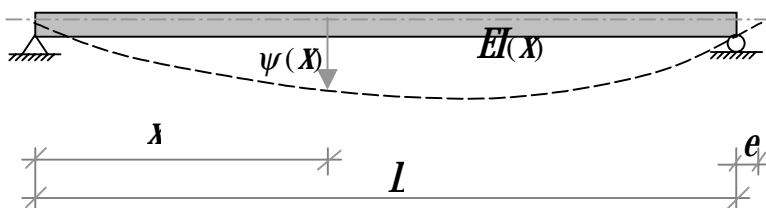
โดย

$$\bar{k}^* = k^* + k_G^* = \text{combined generalized stiffness} \quad (3.14a)$$

สมการการเคลื่อนที่ของระบบหลังจากทำการ generalize คือสมการที่ (3.14) และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบคือสมการที่ 3.13a – 3.13d

3.3.2 คุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมีจุดรองรับแบบง่าย

การหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์จำเป็นต้องมีการสมมติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวตั้งของระบบ (shape function : $\psi(x)$) ก่อน



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบที่รับแรงค้ำและมีจุดรองรับแบบง่าย

พิจารณารูปที่ 3.8 กำหนด shape function $\psi(x)$ ดังนี้

จะได้

$$\begin{aligned}\psi(x) &= \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \\ \psi'(x) &= \frac{\pi}{L} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \\ \psi''(x) &= -\frac{\pi^2}{L^2} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \\ \psi'(x)^2 &= \frac{\pi^2}{L^2} \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \\ \psi''(x)^2 &= \frac{\pi^4}{L^4} \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right)\end{aligned}$$

พิจารณา generalized mass เมื่อ $m(x) = \bar{m}$ และ \bar{m} คือ มวลของกานต่อหน่วยความยาวซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาว จะได้

$$\begin{aligned}m^* &= \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \bar{m} \left[x - \frac{L}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]_0^L \\ &= \frac{1}{2} \bar{m} L\end{aligned}\tag{3.15}$$

พิจารณา generalized flexural stiffness

$$\begin{aligned}k^* &= \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx \\ &= EI \frac{\pi^4}{L^4} \left[\frac{x}{2} - \frac{L}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]_0^L \\ &= EI \frac{\pi^4}{2L^3}\end{aligned}\tag{3.16}$$

พิจารณา generalized geometric stiffness

$$\begin{aligned}k_G^* &= N \int_0^L \psi'(x)^2 dx \\ &= N \frac{\pi^2}{L^2} \left[\frac{x}{2} + \frac{L}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]_0^L \\ &= N \frac{\pi^2}{L}\end{aligned}\tag{3.17}$$

พิจารณา generalized effective load

$$\begin{aligned} p_{eff}^* &= \int_0^L p_{eff}(x,t)\psi(x)dx + Ne_e \int_0^L \psi''(x)dx \\ p_{eff}^* &= p_{eff}(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) + Ne_e \frac{\pi^2}{L} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

สมการที่ 3.15 ถึง 3.17 คือค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นโดยสมมติรูปแบบการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง

$\psi(x) = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$ และทำการ generalize แล้ว และสมการที่ 3.18 คือแรงกระทำกับระบบหลังจากทำการ generalize แล้ว

3.4 การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนของระบบ

การตอบสนองของระบบจะพิจารณาออกมาในรูปของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง และความเร่งของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง การตอบสนองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ไม่มีแรงกระทำ และช่วงที่มีแรงกระทำ

3.4.1 การวิเคราะห์หาการตอบสนองและความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการสั่นแบบอิสระ (ไม่มีความหน่วงและไม่มีแรงภายนอกมากระทำ)

จากสมการการเคลื่อนที่ (3.14) ถ้าไม่พิจารณาความหน่วง และแรงภายนอกจะได้สมการดังนี้

$$m^* \ddot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = 0 \quad (3.19)$$

หรือเขียนอีกแบบหนึ่งได้เป็น

$$m^* \frac{d^2 Z}{dt^2} + \bar{k}^* Z(t) = 0$$

นำ m^* หารทั้งสมการ

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} + \omega^2 Z(t) = 0 \quad (3.20)$$

$$\text{โดย } \omega^2 = \frac{\bar{k}^*}{m^*} \quad (3.20a)$$

คำตอบทั่วไปของสมการอนุพันธ์ (3.20) คือ

$$Z(t) = G_1 e^{i\omega t} + G_2 e^{-i\omega t} \quad (3.21)$$

เมื่อ $Z(t)$ คือ การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง

$$e^{\pm i\omega t} = \cos \omega t \pm i \sin \omega t$$

G_1, G_2 คือ ค่าคงที่ใดๆ หาได้โดยการแทนค่าเริ่มต้นของระบบ

จากสมการ (3.19) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (3.22)$$

$$\dot{Z}(t) = A\omega \cos \omega t - B\omega \sin \omega t \quad (3.23)$$

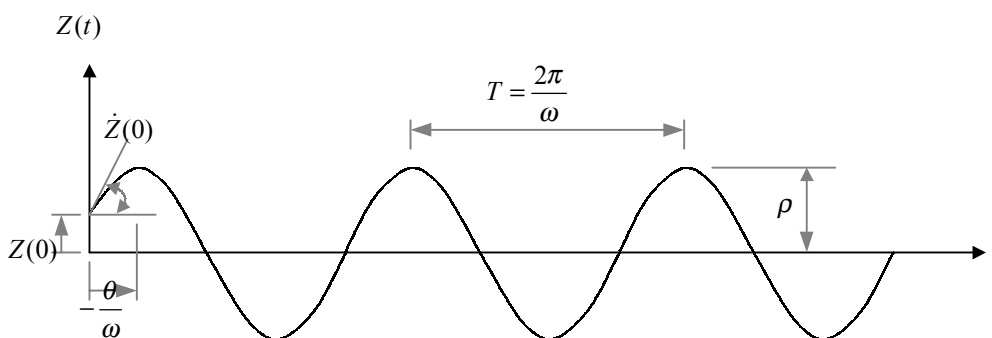
แทนค่าเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา $t = 0$ คือ $Z(0)$ และ $\dot{Z}(0)$ ลงในสมการ (3.22) และ (3.23) จะได้ $A = \frac{\dot{Z}(0)}{\omega}$ และ $B = Z(0)$ ดังนั้นจะได้สมการการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามเวลา $Z(t)$ ดังนี้

$$Z(t) = \frac{\dot{Z}(0)}{\omega} \sin \omega t + Z(0) \cos \omega t \quad (3.24)$$

จัดรูปสมการ (3.24) ให้อยู่ในรูป cosine

$$Z(t) = \rho \cos(\omega t + \theta) \quad (3.25)$$

โดย $\rho = \sqrt{Z^2(0) + \left(\frac{\dot{Z}(0)}{\omega}\right)^2}$ = amplitude และ $\theta = \tan^{-1}\left[\frac{-\dot{Z}(0)}{\omega Z(0)}\right]$ = phase lag angle เมื่อนำสมการที่ (3.25) มาพล็อต จะได้ผลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระ

จากรูปที่ 3.9 ความถี่ธรรมชาติของระบบคือ ω มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที หรือ $f = \frac{\omega}{2\pi}$ มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที และคาบของการเคลื่อนที่คือ $T = \frac{2\pi}{\omega}$ มีหน่วยเป็นวินาที

3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของระบบ ที่มีการสั่นแบบอิสระ (ไม่มีแรงภายนอกกระทำ) ภายใต้ความหน่วง

ความหน่วงของโครงสร้างขึ้นกับวัสดุ ขนาดหน้าตัดและลักษณะของโครงสร้าง สมการที่ (3.14) สามารถเขียนได้เป็น

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + k^* Z(t) = 0 \quad (3.26)$$

หรือ

$$\ddot{Z}(t) + 2\xi\omega\dot{Z}(t) + \omega^2 Z(t) = 0 \quad (3.27)$$

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

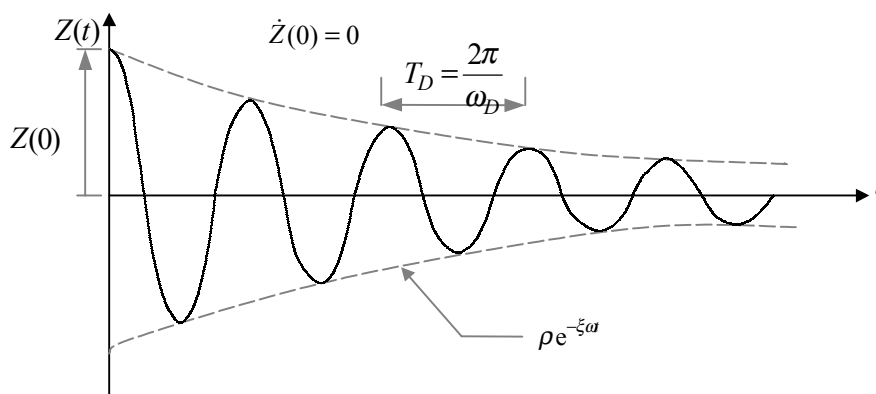
$$Z(t) = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad (3.28)$$

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

$$Z(t) = e^{-\xi\omega t} \rho \cos(\omega_D t - \theta) \quad (3.29)$$

โดย $\rho = \left\{ \left[\frac{\dot{Z}(0) + Z(0)\xi\omega}{\omega_D} \right]^2 + Z^2(0) \right\}^{\frac{1}{2}}$ และ $\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\dot{Z}(0) + Z(0)\xi\omega}{\omega_D Z(0)} \right]$ เมื่อนำสมการที่ (3.29)

มาพล็อต จะได้ผลดังรูปที่ 3.10

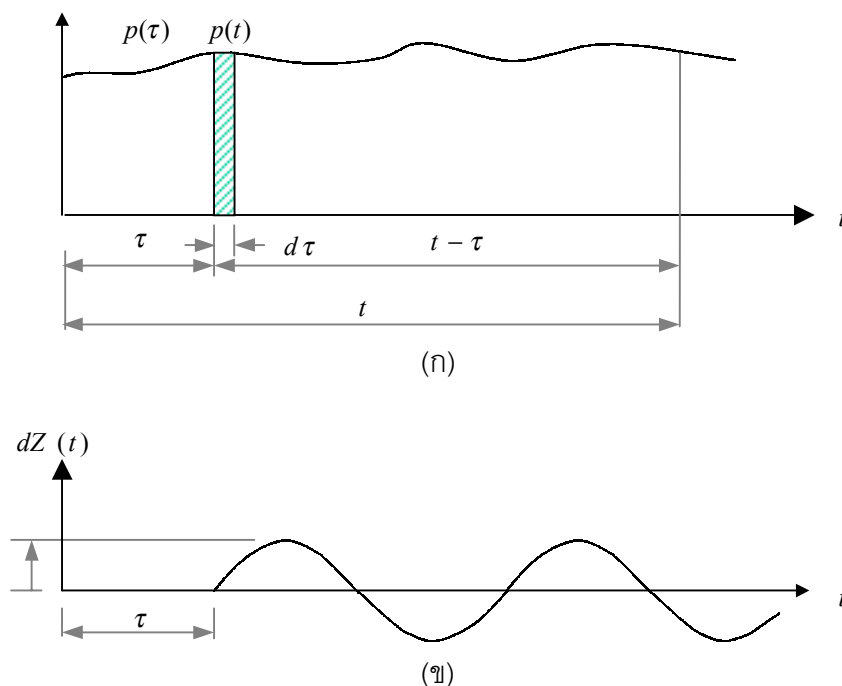


รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับเวลาสำหรับการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วง

จากรูปที่ 3.10 ω_D คือความถี่หน่วงของระบบ และ T_D คือคาบหน่วง และแนวของเส้นประคือ $\rho e^{-\xi\omega t}$ แสดงถึงขอบเขตของการสั่นแบบอิสระภายใต้ความหน่วง

3.4.3 การวิเคราะห์หาการตอบสนองของระบบภายใต้ความหน่วงและมีแรงภายนอกใด ๆ มากระทำ โดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเมล (Duhamel integral method)

การหาการตอบสนองของระบบโดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเมลนั้น เราจะแบ่งแรงกระทำออกเป็นส่วนย่อยในลักษณะของอิมพัลส์ ดังรูปที่ 3.11ก และการตอบสนองรวมของระบบคือการรวมการตอบสนองของแรงกระทำแต่ละส่วนย่อย ดังรูป 3.11ข เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.11 การตอบสนองเนื่องจากอิมพัลส์ (ก) พิจารณาแรงกระทำใดๆ $p(\tau)$ ช่วงเวลา $d\tau$

(ข) การตอบสนองของแรง $p(\tau)$

จากรูปที่ 3.11 τ คือ เวลาในขณะที่อิมพัลส์ย่อย $p(\tau)d\tau$ เริ่มกระทำ และ t คือ เวลาที่ต้องการทราบขนาดของการตอบสนอง $d\tau$ และ $p(\tau)$ เป็นความกว้างและความสูงของอิมพัลส์ ดังนั้นอิมพัลส์ย่อยจะมีขนาดเท่ากับ $p(\tau)d\tau$ การตอบสนองของระบบโครงสร้างขณะที่มีอิมพัลส์ย่อยกระทำโดยมีค่า $\xi < 1$ คือ

$$dZ(t) = p(\tau) d\tau \frac{1}{m\omega_D} e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t-\tau) = \frac{1}{m\omega_D} p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (3.30)$$

ดังนั้น การตอบสนองรวมของระบบในขณะที่มีอิมพัลส์ย่อยทั้งหมดกระทำคือ

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

$$Z(t) = \frac{1}{m^* \omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (3.31)$$

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

$$Z(t) = Z(0)e^{-\xi\omega t} \cos \omega_D t + \frac{1}{\omega_D} [\dot{Z}(0) + \xi\omega Z(0)] e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D t + \frac{1}{m^* \omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega t} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (3.32)$$

3.5 แนวทางดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ทำการศึกษาวิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ศึกษาการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบและตอบสนองของระบบเมื่อรับแรงแบบพลศาสตร์แล้ว ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

3.5.1 เลือกตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิต และหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์

ในประเทศไทยมีบริษัทผู้ผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นจำนวนมาก สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจากบริษัท เพชรนครคอนกรีต จำกัด (PNC) และ บริษัทผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด (CPAC) โดยพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่นำมาวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แบบท้องเรียบและกลวง แบบท้องเรียบจะใช้ข้อมูลจากบริษัท เพชรนครคอนกรีต จำกัด และแบบกลวงใช้ข้อมูลจากบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด

จากข้อมูลที่ได้ในหัวข้อ 3.7.1 นำข้อมูลเหล่านี้หาคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของระบบ คือ 1. generalized mass 2. generalized stiffness และ 3. ความถี่ธรรมชาติ โดยใช้สมการ 3.14a 3.15 ถึง 3.17 และ 3.20a ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้นและทำวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ที่ปลายของระบบตามหัวข้อ 3.2.2 ทั้งนี้ช่องว่างระหว่างแผ่นพื้น (b) จะใช้เท่ากับ 10 ซม. เนื่องจากสามารถวางเหล็กเสริมได้ 2 แถวเพราะหากวางเหล็กเพียงแถวเดียวผลของการเสริมเหล็กจะมีน้อยมาก หลังจากนั้นคำนวณหาค่าคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของระบบใหม่โดยใช้สมการ 3.2 หาคความยาวที่เปลี่ยนไปก่อน แล้วจึงหาคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สมการที่ 3.14a 3.15 ถึง 3.17 และ 3.20a ตามลำดับ

3.5.2 เลือกน้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์

แรงเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ คือการวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ การเดินแอโรบิก ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.2 ในบทที่ 2 ลักษณะของแรงที่กระทำขึ้นกับชนิด ความถี่ของแรง และน้ำหนักของคน โดยแรงกระทำกระทำที่กึ่งกลางพื้นและคิดผลเนื่องจากการกระแทกเท้า 1 ครั้งเท่านั้น หลังจากนั้นทำการ generalize load ตามสมการที่ 3.18

3.5.3 เลือกเกณฑ์การรับรู้ความสั่นสะเทือนของมนุษย์

เกณฑ์การรับรู้ของมนุษย์มีหลายเกณฑ์ดังแสดงไว้ในบทที่ 2 ส่วนใหญ่เป็นเกณฑ์ที่มีผู้ทำการศึกษากันแล้วในต่างประเทศ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ดูแนวโน้มว่าพื้นที่ทำการวิเคราะห์ค่าสูงหรือต่ำกว่าเกณฑ์และสามารถนำมาประยุกต์กับแผ่นพื้นทีวิเคราะห์ได้หรือไม่

3.5.4 วิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

เมื่อได้คุณสมบัติด้านพลศาสตร์ และลักษณะของแรงกระทำแล้ว ก็การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบพื้น โดยในช่วงที่มีแรงกระทำใช้วิธีอินทิกรัลของคูซาเมด สมการที่ 3.32 สำหรับช่วงที่ไม่มีแรงกระทำจะใช้การพิจารณาตามหัวข้อ 3.4.2 โดยสมการที่ใช้คือสมการที่ 3.29 และในการวิเคราะห์จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อดังนี้

3.7.5.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.7.5.2 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.7.5.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.5.5 อภิปรายผลการวิเคราะห์

อภิปรายผลการวิเคราะห์ตามหัวข้อดังนี้

3.7.6.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.7.6.2 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.7.6.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่ปลายแผ่นพื้น

3.7.6.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับเกณฑ์มาตรฐาน

3.5.6 สรุปผล

สรุปผลและข้อเสนอแนะต่างๆ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะแยกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ 1. ข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ได้แก่ ขนาด การอัดแรง และคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุที่ใช้ เพื่อนำมาใช้ในการหาคุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์ 2. ข้อมูลเกี่ยวกับแรงกระทำ ได้แก่ ชนิดและความถี่ของแรง

4.1.1 แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ข้อมูลในการเลือกแผ่นพื้นสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิต ประกอบด้วย ช่วงความยาว น้ำหนักบรรทุกจรที่ยอมให้ (Allowable live load) และความกว้างที่ต้องการ แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว ความกว้างของแผ่นพื้นจะมีขนาดที่แน่นอน สำหรับแบบท้องเรียบจะมีความกว้าง 35 ซม. (ข้อมูลจากบริษัท เพชรนครคอนกรีต จำกัด) แบบกลวงจะมีความกว้าง 30 60 และ 120 ซม. (ข้อมูลจากบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด) ข้อมูลของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1(ก) – 4.1(ค) สำหรับการตั้งชื่อแผ่นพื้นมีข้อสังเกตดังนี้ ตารางที่ 4.1(ก) ชื่อแผ่นพื้น PNC เป็นชื่อย่อของบริษัทผู้ผลิต ในตารางที่ 4.1(ข) และ 4.1(ค) ชื่อแผ่นพื้น HC เป็นชื่อที่บริษัทผู้ผลิตระบุไว้ ตัวเลขต่อท้ายเป็นความหนา (หน่วย มม.) ยกเว้น กรณี HC6x30 ตัวเลข 6x30 หมายถึง ความหนา 6 มม. กว้าง 30 ซม. ต่อจากนั้นเป็นการระบุความยาว เช่น L12 หมายถึงช่วงความยาว 12 เมตร และเลข 3 ตัวหลังเช่น 341 หมายถึงน้ำหนักบรรทุกจรปลอดภัยที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้หลังจากที่มีการเทคอนกรีตทับหน้าแล้ว (หน่วย กก./ตร.ม) ตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เลือกมาสามารถแยกตามวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ผลดังนี้

4.1.1.1 ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการสิ้นเสเทือนในแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยยังไม่มีเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น ได้แก่

- PNC-L5-315
- PNC-L4-305
- PNC-L4-510
- HC250-L12-341
- HC250-L9-327

- HC250-L9-896
- HC6x30-L4-303
- HC80-L5-332

แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบสามตัวอย่างแรกได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1(ก) นั้น มีข้อสังเกตในการเลือกดังนี้ 1.PNC-L5-315 และ PNC-L4-510 จะมีหน้าตัดเหมือนกันมีจำนวนลวดอัดแรงเท่ากันแต่ความยาวไม่เท่ากัน 2.PNC-L4-305 และ PNC-L4-510 มีความยาวเท่ากันแต่การอัดแรงไม่เท่ากัน 3.PNC-L5-315 และ PNC-L4-315 จะมีน้ำหนักบรรทุกจรใกล้เคียงกันคือ 300 กก./ตร.ม ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกที่มีการใช้งานทั่วไปแต่การอัดแรงและความยาวไม่เท่ากัน สำหรับตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงสามตัวอย่างถัดมาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1(ข) นั้น จะมีข้อสังเกตดังนี้ 1.HC250-L12-341 และ HC250-L9-896 จะมีหน้าตัดเหมือนกันมีจำนวนลวดอัดแรงเท่ากันแต่ความยาวไม่เท่ากัน 2.HC250-L9-327 และ HC250-L9-896 มีความยาวเท่ากันแต่การอัดแรงไม่เท่ากัน 3.HC250-L12-341 และ HC250-L9-327 จะมีน้ำหนักบรรทุกจรใกล้เคียงกันคือ 300 กก./ตร.ม ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกที่มีการใช้งานทั่วไปแต่การอัดแรงและความยาวไม่เท่ากัน และสองตัวอย่างสุดท้ายได้แสดงในตารางที่ 4.1(ค) จะนำมาใช้เปรียบเทียบผลกับแบบท้องเรียบ

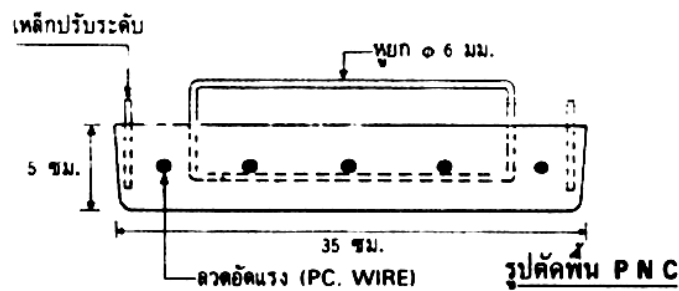
4.1.1.2 ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการเสริมเหล็ก และไม่เสริมเหล็กที่จุกรองรับปลายแผ่นพื้น ได้แก่

- PNC-L4-305
- HC250-L9-327

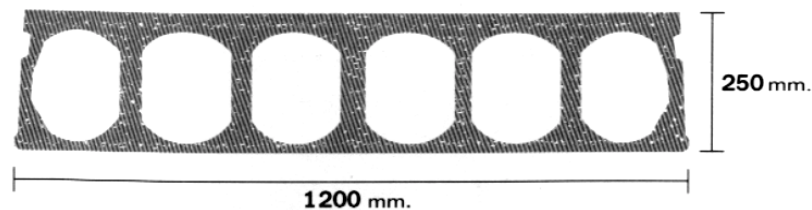
4.1.1.3 ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ผลการเสริมเหล็กที่จุกรองรับปลายแผ่นพื้นในปริมาณต่างๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่

- PNC-L5-315
- PNC-L4-305
- HC6x30-L4-303
- HC80-L5-332
- HC250-L12-341
- HC250-L10-428
- HC250-L9-327

หน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ขนาดของหน้าตัด ความยาวของช่วงพื้น การอัดแรงในแผ่นพื้น ดังแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าในตารางพิจารณาขณะที่ไม่มีการเสริมเหล็กที่หัวคาน สำหรับค่าอัตราส่วนความหน่วงเลือกใช้ 0.03 เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.05



(ก) แบบห้องเรียบ (PNC)



(ข) แบบกลวง (HC250)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตเทพื้นหน้า ที่บริเวณปลายของแผ่นพื้น (บริเวณหัวคาน) การเปลี่ยนแปลงเหล็กเสริมที่บริเวณนี้จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์ของหน้าตัดมีเปลี่ยนแปลงไป แสดงในตารางที่ 4.3 ปริมาณเหล็กเสริมในตารางที่ 4.3 หมายถึงพื้นที่หน้าตัดเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตซึ่งมีความกว้าง (b) เท่ากับ 10 ซม. และมีความยาว (l) เท่ากับความกว้างของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (พิจารณาดังรูปที่ 3.5) รายละเอียดตัวอย่างการคำนวณของตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1(ก) ชื่อ และมูลค่าของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบ (จาก PNC)

ชื่อแผ่นพื้น	แผ่นพื้นแบบท้องเรียบ		
	PNC-L5-315	PNC-L4-305	PNC-L4-510
1. นำหนักบรรทุกจรที่ยอมให้ (กก./ตร.ม.)	315	305	510
2. ช่วงความยาว (ม.)	5.00	4.00	4.00
3. พื้นที่หน้าตัด			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ชม.)	175	175	175
4. ขนาด			
- กว้าง (ชม.)	35	35	35
- หนา (ชม.)	5	5	5
- คอนกรีตทับหน้าหนา (ชม.)	6	5	6
5. โมเมนต์ความเฉื่อย			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)	365	365	365
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)	3,106*	2,454	3106*
6. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)	2.50	2.50	2.50
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)	4.92*	4.59	4.92*
7. มวลต่อหน่วยความยาว			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)	120	120	120
- รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)	264	240	264
8. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต			
(ทรงกระบอก 28 วัน)			
- คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ชม.)	350	350	350
- คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ชม.)	150	150	150
9. ลวดอัดแรง			
- จำนวน (เส้น)	8	6	8
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	4	4	4
- กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)	175	175	175

หมายเหตุ * คือ ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต แต่มีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในภายหลัง

ตารางที่ 4.1(ข) ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง (จาก CPAC)

ข้อมูล	ชื่อแผ่นพื้น	แผ่นพื้นแบบกลวง		
		HC250-L12-341	HC250-L9-327	HC250-L9-896
1. นำหนักบรรทุกจรที่ยอมให้ (กก./ตร.ม.)		341	327	896
2. ช่วงความยาว (ม.)		12.00	9.00	9.00
3. พื้นที่หน้าตัด				
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ชม.)		1,326	1,326	1,326
4. ขนาด				
- กว้าง (ชม.)		120	120	120
- หนา (ชม.)		25	25	25
- คอนกรีตทับหน้าหนา (ชม.)		5	5	5
5. โมเมนต์ความเฉื่อย				
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)		107,781	107,781	107,781
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)		178,571*	178,571*	178,571*
6. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น				
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)		12.89	12.89	12.89
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)		16.50*	16.50*	16.50*
7. มวลต่อหน่วยความยาว				
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)		265	265	265
- รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)		385	385	385
8. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต				
(ทรงกระบอก 28 วัน)				
- คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ชม.)		400	400	400
- คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ชม.)		210	210	210
9. ลวดอัดแรง				
- จำนวน (เส้น)		7	7	7
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)		12.7 (0.5นิ้ว)	9.53 (3/8นิ้ว)	12.7 (0.5นิ้ว)
- กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)		175	175	175

หมายเหตุ * คือ ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต แต่มีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในภายหลัง

ตารางที่ 4.1(ก) ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง (จาก CPAC)

ข้อมูล	ชื่อแผ่นพื้น		
	แผ่นพื้นแบบกลวง		
	HC250-L10-428	HC80-L5-332	HC6x30-L4-303
1. นำหนักบรรทุกจรที่ยอมให้ (กก./ตร.ม.)	428	332	303
2. ช่วงความยาว (ม.)	10.00	5.00	4.00
3. พื้นที่หน้าตัด			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ชม.)	1,326	353	139
4. ขนาด			
- กว้าง (ชม.)	120	60	30
- หนา (ชม.)	25	8	6
- คอนกรีตทับหน้าหนา (ชม.)	5	5	4
5. โมเมนต์ความเฉื่อย			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)	107,781	2,338	488
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)	178,571*	8,127.98*	1,893.12*
6. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)	12.89	3.97	2.91
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)	16.50*	6.30*	4.75*
7. มวลต่อหน่วยความยาว			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)	265	141	112
- รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)	385	261	209
8. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต			
(ทรงกระบอก 28 วัน)			
- คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ชม.)	400	350	350
- คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ชม.)	210	150	150
9. ลวดอัดแรง			
- จำนวน (เส้น)	7	8	4
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	12.7 (0.5 นิ้ว)	5	4
- กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)	175	175	175

หมายเหตุ * คือ ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต แต่มีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในภายหลัง

ตารางที่ 4.2(ก) คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบ

ชื่อและชนิด	แผ่นพื้นแบบท้องเรียบ		
	PNC-L5-315	PNC-L4-305	PNC-L4-510
คุณสมบัติทางพลศาสตร์			
1. generalize mass (m^*), กก.	231	168	184.8
2. generalize stiffness (\bar{k}^*), นิวตัน/ม.	528,385.8	699,820.5	897,863.8
3. ความถี่ธรรมชาติ (ω), เรเดียน/วินาที	47.83	64.54	69.70
4. อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ξ)	0.03 (3%)	0.03 (3%)	0.03 (3%)

ตารางที่ 4.2(ข) คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง

ชื่อและชนิด	แผ่นพื้นแบบกลวง		
	HC250-L12-341	HC250-L9-327	HC250-L9-896
คุณสมบัติทางพลศาสตร์			
1. generalize mass (m^*), กก.	2,772	2,079	2,079
2. generalize stiffness (\bar{k}^*), นิวตัน/ม.	3,516,183.96	7,442,292.72	7,801,419.65
3. ความถี่ธรรมชาติ (ω), เรเดียน/วินาที	35.62	59.83	61.62
4. อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ξ)	0.03 (3%)	0.03 (3%)	0.03 (3%)

ตารางที่ 4.2(ค) คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง

ชื่อและชนิด	แผ่นพื้นแบบกลวง		
	HC250-L10-428	HC80-L5-332	HC6x30-L4-303
คุณสมบัติทางพลศาสตร์			
1. generalized mass (m^*), กก.	2,310	391.50	124.80
2. generalized stiffness (\bar{k}^*), นิวตัน/ม.	5,628,176.02	2,065,091.61	923,060.94
3. ความถี่ธรรมชาติ (ω), เรเดียน/วินาที	49.36	72.63	86.00
4. อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ξ)	0.03 (3%)	0.03 (3%)	0.03 (3%)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ
ปลายแผ่นพื้น

(ก) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบ PNC-L5-315

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized stiffness : k^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก ⁺ (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	500.00	231.00	528,385.80	47.83	7.61
0.5	1.75	322.50	149.00	1,565,572.36	102.51	16.31
1.0	3.50	300.33	138.75	1,889,973.98	116.71	18.58
1.5	5.25	290.28	134.11	2,069,913.49	124.24	19.77
2.0	7.00	284.35	131.37	2,188,057.76	129.06	20.54
2.5	8.75	280.35	129.52	2,273,337.12	132.48	21.09
3.0	10.50	277.42	128.17	2,338,764.49	135.08	21.50
3.5	12.25	275.16	127.12	2,391,141.01	137.15	21.83
4.0	14.00	273.35	126.29	2,434,400.75	138.84	22.10
4.5	15.75	271.85	125.59	2,470,993.41	140.27	22.32
5.0	17.50	270.58	125.01	2,502,532.46	141.49	22.52
5.5	19.25	269.49	124.51	2,530,128.96	142.55	22.69
6.0	21.00	268.54	124.07	2,554,576.04	143.49	22.84
6.5	22.75	267.70	123.68	2,576,457.02	144.33	22.97
7.0	24.50	266.95	123.33	2,596,211.87	145.09	23.09
7.5	26.25	266.28	123.02	2,614,179.66	145.77	23.20
8.0	28.00	265.67	122.74	2,630,590.10	146.40	23.30

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(ข) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบห้องเรียน PNC-L4-305

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m^* (กก.)	generalized stiffness : k^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.0	0.00	400.00	168.00	699,820.50	64.54	10.27
0.5	1.75	245.39	103.06	2,547,977.64	157.23	25.02
1.0	3.50	233.46	98.05	2,926,919.95	172.77	27.50
1.5	5.25	227.55	95.57	3,144,246.57	181.38	28.87
2.0	7.00	223.90	94.04	3,290,067.45	187.05	29.77
2.5	8.75	221.36	92.97	3,396,963.26	191.15	30.42
3.0	10.50	219.47	92.18	3,479,943.27	194.30	30.92
3.5	12.25	217.99	91.55	3,546,993.87	196.83	31.33
4.0	14.00	216.78	91.05	3,602,799.76	198.92	31.66
4.5	15.75	215.78	90.63	3,650,311.00	200.70	31.94
5.0	17.50	214.92	90.27	3,691,488.86	202.23	32.19
5.5	19.25	214.18	89.95	3,727,694.49	203.57	32.40
6.0	21.00	213.53	89.68	3,759,906.14	204.76	32.59
6.5	22.75	212.95	89.44	3,788,847.51	205.82	32.76
7.0	24.50	212.43	89.22	3,815,067.31	206.79	32.91
7.5	26.25	211.96	89.02	3,838,990.40	207.66	33.05
8.0	28.00	211.53	88.84	3,860,951.72	208.47	33.18

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จุ่มรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(ค) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC80-L5-332

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ม.)	generalized mass : m^* (กก.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	5.00	391.50	2,065,091.61	72.63	11.56
0.5	3.00	3.62	283.78	5,050,616.67	133.41	21.23
1.0	6.00	3.34	261.40	6,382,621.78	156.26	24.87
1.5	9.00	3.19	250.13	7,242,035.72	170.16	27.08
2.0	12.00	3.10	243.09	7,860,924.70	179.83	28.62
2.5	15.00	3.04	238.18	8,337,277.74	187.09	29.78
3.0	18.00	2.99	234.49	8,720,766.67	192.85	30.69
3.5	21.00	2.96	231.59	9,039,639.58	197.57	31.44
4.0	24.00	2.93	229.23	9,311,309.46	201.54	32.08
4.5	27.00	2.90	227.26	9,547,175.70	204.96	32.62
5.0	30.00	2.88	225.57	9,755,058.75	207.96	33.10
5.5	33.00	2.86	224.11	9,940,529.54	210.61	33.52
6.0	36.00	2.85	222.82	10,107,681.43	212.98	33.90
6.5	39.00	2.83	221.68	10,259,601.23	215.13	34.24
7.0	42.00	2.82	220.65	10,398,668.83	217.09	34.55
7.5	45.00	2.81	219.72	10,526,754.41	218.88	34.84
8.0	48.00	2.80	218.87	10,645,352.32	220.54	35.10

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b_x l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จุ่มรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(ง) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลาง HC6x30-L4-303

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m^* (กก.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	4.00	124.80	923,060.94	86.00	13.69
0.5	1.50	2.42	75.52	3,824,344.03	225.03	35.81
1.0	3.00	2.31	72.19	4,359,197.77	245.73	39.11
1.5	4.50	2.26	70.51	4,667,912.32	257.30	40.95
2.0	6.00	2.23	69.46	4,875,921.22	264.94	42.17
2.5	7.50	2.20	68.73	5,028,864.24	270.50	43.05
3.0	9.00	2.19	68.18	5,147,863.19	274.78	43.73
3.5	10.50	2.17	67.75	5,244,195.74	278.22	44.28
4.0	12.00	2.16	67.40	5,324,495.09	281.07	44.73
4.5	13.50	2.15	67.10	5,392,947.47	283.50	45.12
5.0	15.00	2.14	66.85	5,452,341.06	285.59	45.45
5.5	16.50	2.14	66.63	5,504,613.86	287.42	45.74
6.0	18.00	2.13	66.44	5,551,160.51	289.05	46.00
6.5	19.50	2.12	66.27	5,593,014.02	290.51	46.24
7.0	21.00	2.12	66.12	5,630,958.38	291.83	46.45
7.5	22.50	2.11	65.98	5,665,601.15	293.04	46.64
8.0	24.00	2.11	65.85	5,697,421.79	294.14	46.81

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต / 100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(จ) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L12-341

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized stiffness : k^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	12.00	2,772.00	3,516,183.96	35.62	5.67
0.5	6.00	11.50	2,657.21	3,944,492.62	38.53	6.13
1.0	12.00	11.20	2,587.12	4,243,612.23	40.50	6.45
1.5	18.00	10.97	2,534.97	4,487,569.44	42.07	6.70
2.0	24.00	10.79	2,493.21	4,697,526.71	43.41	6.91
2.5	30.00	10.64	2,458.28	4,884,018.86	44.57	7.09
3.0	36.00	10.51	2,428.22	5,053,074.42	45.62	7.26
3.5	42.00	10.40	2,401.70	5,209,134.56	46.57	7.41
4.0	48.00	10.29	2,378.02	5,354,321.65	47.45	7.55
4.5	54.00	10.20	2,356.48	5,491,377.22	48.27	7.68
5.0	60.00	10.12	2,336.81	5,620,857.73	49.04	7.81
5.5	66.00	10.04	2,318.64	5,744,401.74	49.77	7.92
6.0	72.00	9.96	2,301.70	5,862,999.45	50.47	8.03
6.5	78.00	9.90	2,285.87	5,976,971.38	51.13	8.14
7.0	84.00	9.83	2,270.97	6,087,158.67	51.77	8.24
7.5	90.00	9.77	2,256.87	6,194,048.91	52.39	8.34
8.0	96.00	9.71	2,243.51	6,297,784.04	52.98	8.43

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(จ) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L10-428

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m^* (กก.)	generalized stiffness : k^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก ** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	10.00	2,310.00	5,628,176.02	49.36	7.86
0.5	6.00	9.65	2,229.08	6,229,906.33	52.87	8.41
1.0	12.00	9.43	2,178.63	6,650,829.03	55.25	8.79
1.5	18.00	9.27	2,140.48	6,995,731.73	57.17	9.10
2.0	24.00	9.13	2,109.65	7,292,768.22	58.80	9.36
2.5	30.00	9.02	2,083.55	7,557,991.15	60.23	9.59
3.0	36.00	8.92	2,060.90	7,798,986.78	61.52	9.79
3.5	42.00	8.83	2,040.79	8,021,897.68	62.70	9.98
4.0	48.00	8.76	2,022.73	8,229,713.83	63.79	10.15
4.5	54.00	8.69	2,006.26	8,425,644.79	64.80	10.31
5.0	60.00	8.62	1,991.04	8,612,479.48	65.77	10.47
5.5	66.00	8.56	1,976.95	8,790,587.58	66.68	10.61
6.0	72.00	8.50	1,963.81	8,961,255.61	67.55	10.75
6.5	78.00	8.45	1,951.40	9,126,771.65	68.39	10.88
7.0	84.00	8.40	1,939.71	9,286,415.80	69.19	11.01
7.5	90.00	8.35	1,928.65	9,441,027.26	69.97	11.14
8.0	96.00	8.30	1,918.09	9,591,978.11	70.72	11.25

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของพื้นคอนกรีตอัดแรงเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ
ปลายแผ่นพื้น (ต่อ)

(ช) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L9-327

ปริมาณเหล็กเสริม		ความยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m^* (กก.)	generalized stiffness : k^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์เซ็นต์	หน้าตัดเหล็ก** (ตร.ซม)				ω (เรเดียน/วินาที)	f (รอบ/วินาที)
0.0	0.00	9.00	2,079.00	7,442,292.72	59.85	9.52
0.5	6.00	8.71	2,012.92	8,177,114.02	63.74	10.14
1.0	12.00	8.53	1,971.30	8,691,325.59	66.40	10.57
1.5	18.00	8.40	1,939.58	9,113,226.23	68.55	10.91
2.0	24.00	8.28	1,913.79	9,477,000.41	70.37	11.20
2.5	30.00	8.19	1,891.84	9,802,263.12	71.98	11.46
3.0	36.00	8.11	1,872.73	10,098,097.36	73.43	11.69
3.5	42.00	8.03	1,855.74	10,371,160.31	74.76	11.90
4.0	48.00	7.97	1,840.32	10,627,869.60	75.99	12.09
4.5	54.00	7.91	1,826.28	10,869,219.70	77.15	12.28
5.0	60.00	7.85	1,813.30	11,098,803.48	78.24	12.45
5.5	66.00	7.80	1,801.23	11,318,476.16	79.27	12.62
6.0	72.00	7.75	1,789.88	11,530,276.75	80.26	12.77
6.5	78.00	7.70	1,779.23	11,734,061.68	81.21	12.92
7.0	84.00	7.66	1,769.13	11,931,775.11	82.12	13.07
7.5	90.00	7.62	1,759.52	12,124,115.82	83.01	13.21
8.0	96.00	7.58	1,750.40	12,310,560.16	83.86	13.35

หมายเหตุ ** หน้าตัดเหล็ก = เปอร์เซ็นต์เหล็ก x พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต /100

$$\text{พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต} = b \times l$$

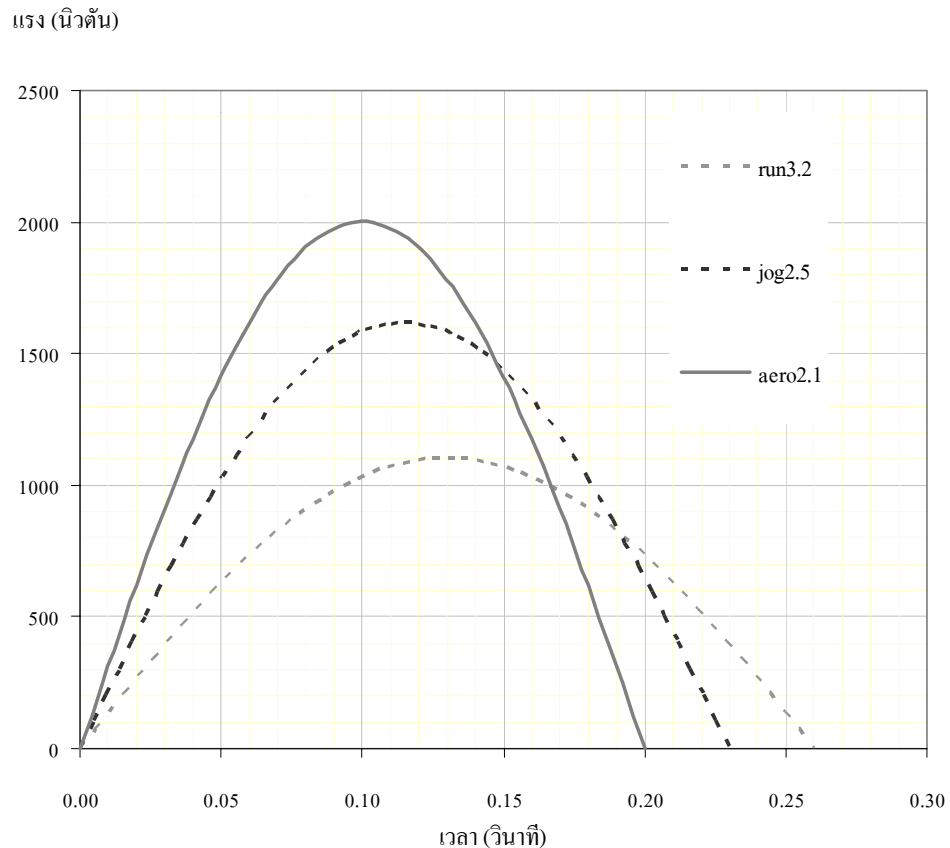
4.1.2 น้ำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมของมนุษย์ (Dynamic Loads from Human Activities)

แรงเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์จะพิจารณาแรงที่เกิดจากการกระโดด โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณา 3 กิจกรรมคือ การวิ่ง การวิ่งเหยาะๆ และการเดินแอโรบิค สำหรับค่าความถี่ของแต่ละกิจกรรม (f) ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น (t_p) และช่วงการก้าว (T_p) ใช้ค่าแนะนำจากข้อมูลที่มีผู้ศึกษาแล้วในบทที่ 2 ค่าตัวคูณการกระแทกหาได้จากรูปที่ 2.3 ชื่อและลักษณะของแรงกระทำแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 สำหรับการตั้งชื่อแรงมีหลักการดังนี้คือ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ 3 ตัวแรกคือ ชนิดของกิจกรรม และเลขต่อท้ายหมายถึงความถี่ของกิจกรรม เช่น run3.2 หมายถึงการวิ่งที่ความถี่ 3.2 เฮิร์ต รูปที่ 4.1 แสดงขนาดของแรงกระทำชนิดต่างๆ เทียบกับเวลา และแรงนี้จะพิจารณาเฉพาะการลงเท้า 1 ครั้ง เท่านั้น จากรูปที่ 4.2 แรงเนื่องจากการเดินแอโรบิค (aero2.1) จะมีค่าสูงสุดมากกว่าแรงเนื่องจากการวิ่งเหยาะๆ (jog2.5) และการวิ่ง (run3.2) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ชื่อ และลักษณะของแรงกระทำเนื่องจากการกระโดด

ชื่อ และชนิด	กิจกรรม		
	วิ่ง	วิ่งเหยาะๆ	เดินแอโรบิค
	run3.2	jog2.5	aero2.1
ข้อมูล			
1. น้ำหนักคน ,กก. (person weight : G)	60*	60*	60*
2. ความถี่ของกิจกรรม ,เฮิร์ต (frequency : f)	3.2	2.5	2.1
3. ช่วงเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น ,วินาที (contact duration : t_p)	0.26	0.23	0.20
4. ช่วงการก้าว , วินาที (pace period : T_p)	0.3125	0.40	0.4762
5. ตัวคูณการกระแทก (dynamic impact factor : k_p)	1.875	2.75	3.4

หมายเหตุ * น้ำหนักเฉลี่ยในเพศชาย 58.18 ± 12.87 กก. ในเพศหญิง 54.27 ± 11.39 กก. ได้ข้อมูลจากหนังสือสถานะสุขภาพคนไทยปี พ.ศ. 2543 (จันทร์เพ็ญ, 2543) สำหรับในงานวิจัย ใช้ค่า 60 กก. เนื่องจากเป็นเลขที่ลงตัว มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย และยังอยู่ในช่วงค่าความแปรปรวนของค่าน้ำหนักเฉลี่ย



รูปที่ 4.2 แรงเนื่องจากการกระโดดโดยพิจารณาการกระแทกเท้า 1 ครั้ง

4.1.3 เกณฑ์การรับรู้ความสั่นสะเทือนของมนุษย์

เกณฑ์เกี่ยวกับขีดจำกัดความเร่ง ที่ใช้ในการออกแบบพื้นเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือน เลือกใช้เกณฑ์จากมาตรฐานการออกแบบอาคารของประเทศแคนาดา (National Building Code of Canada 1995 : NBCC1995) แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 เลือกใช้เกณฑ์นี้เนื่องจากมีความสะดวกและมีความน่าเชื่อถือมากเพราะมาตรฐานนี้ได้ทำการศึกษา และรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนเป็นจำนวนมากแล้วทำการสรุปออกมาเป็นมาตรฐาน

ตารางที่ 4.5 ขีดจำกัดความเร่งสำหรับกิจกรรมที่มีความถี่ระหว่าง 1.5 – 8 เฮิรต์ (NBCC1995)

Activity or occupancy	Limiting peak Acceleration (a_0/g)
Offices and residences (day time)	0.004-0.007
Dancing and weightlifting	0.015-0.025
Rhythmic activity	0.04-0.07

4.2 ผลการวิเคราะห์

4.2.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบ การตอบสนองสูงสุดโดยไม่มีการเสริมเหล็กที่จุดรองรับ ระหว่างพื้น PNC-L5-315 PNC-L4-305 และ PNC-L4-510 แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6(ก) และรูปที่ 4.3 สำหรับผลของ HC250-L12-341 HC250-L9-327 และ HC250-L9-896 แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6 (ข) และรูปที่ 4.4 ส่วนรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการแสดงการตอบสนองของระบบซึ่งพิจารณาเฉพาะแรงกระทำเนื่องจากการเดินแอโรบิกเท่านั้น เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบเฉพาะความแตกต่างของการตอบสนองของพื้นทั้ง 3 แบบเท่านั้นมิได้พิจารณาผลของแรง ในรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบและแบบกลวง

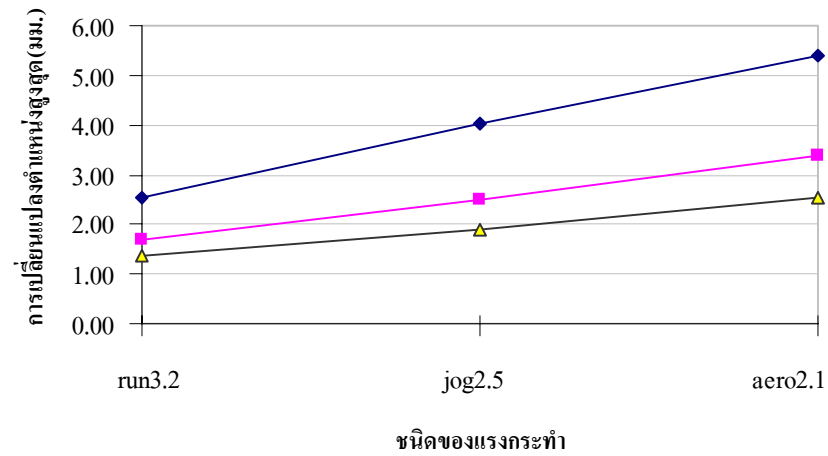
ตารางที่ 4.6 การตอบสนองสูงสุด

(ก) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบทั้ง 3 แบบ

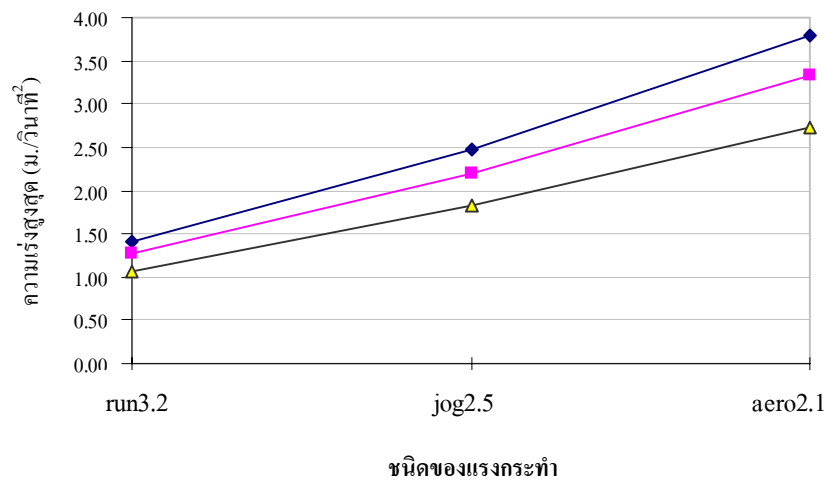
การตอบสนอง สูงสุด แรงกระทำ	PNC-L5-315		PNC-L4-305		PNC-L4-510	
	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)
run3.2	2.555	1.415	1.685	1.277	1.361	1.056
jog2.5	4.037	2.478	2.479	2.208	1.887	1.818
aero2.1	5.379	3.787	3.375	3.319	2.540	2.721

(ข) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงทั้ง 3 แบบ

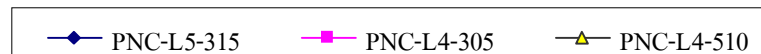
การตอบสนอง สูงสุด แรงกระทำ	HC250-L9-327		HC250-L12-341		HC250-L9-896	
	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)	การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง (มม.)	ความเร่ง (ม./วินาที ²)
run3.2	0.158	0.1152	0.459	0.1843	0.151	0.1126
jog2.5	0.253	0.2001	0.709	0.3267	0.241	0.1954
aero2.1	0.341	0.3025	0.919	0.5221	0.327	0.2950



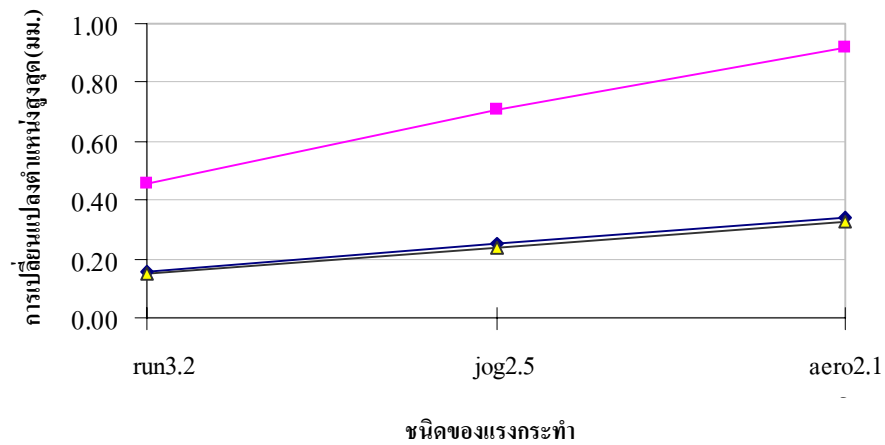
(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด



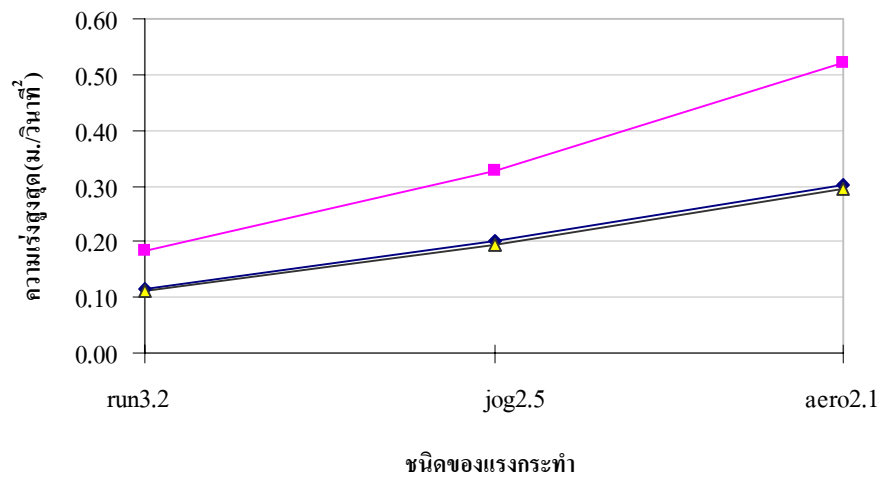
(ข) ความเร่งสูงสุด



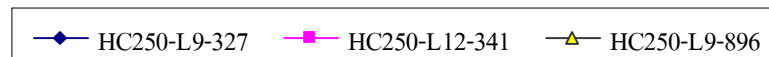
รูปที่ 4.3 การตอบสนองสูงสุดของพื่นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบทั้ง 3 แบบ



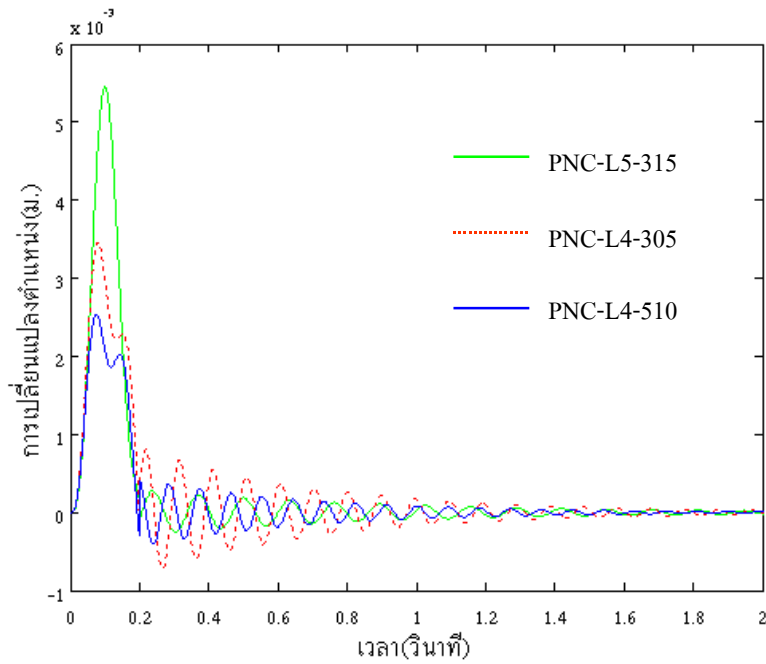
(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด



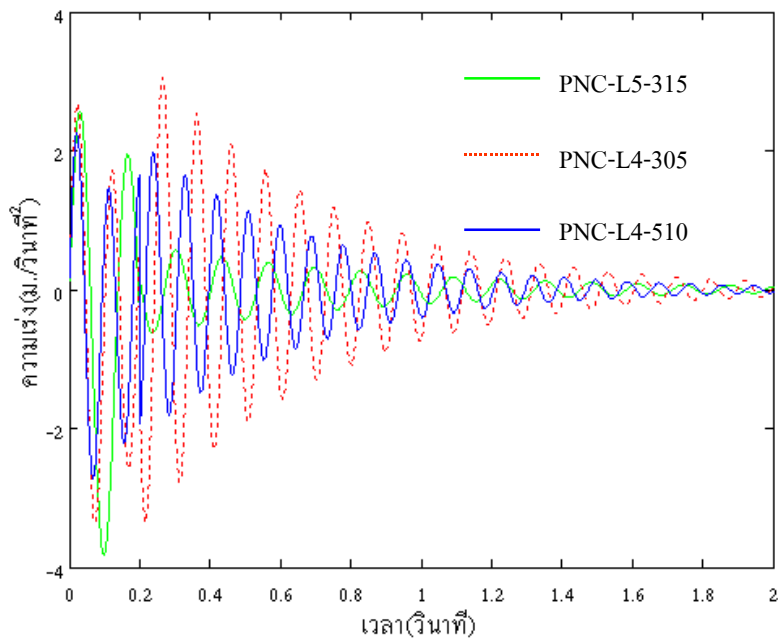
(ข) ความเร่งสูงสุด



รูปที่ 4.4 การตอบสนองสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงทั้ง 3 แบบ

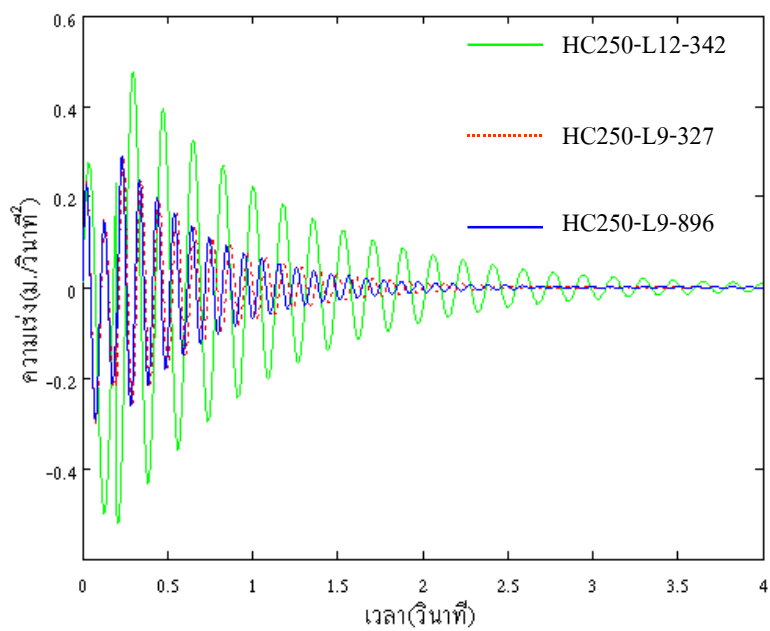
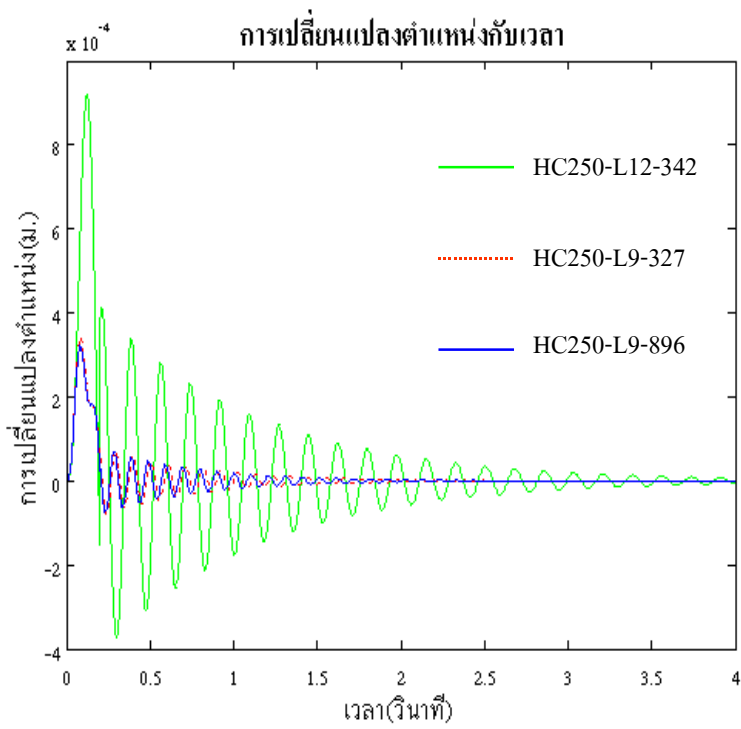


(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้งกับเวลา

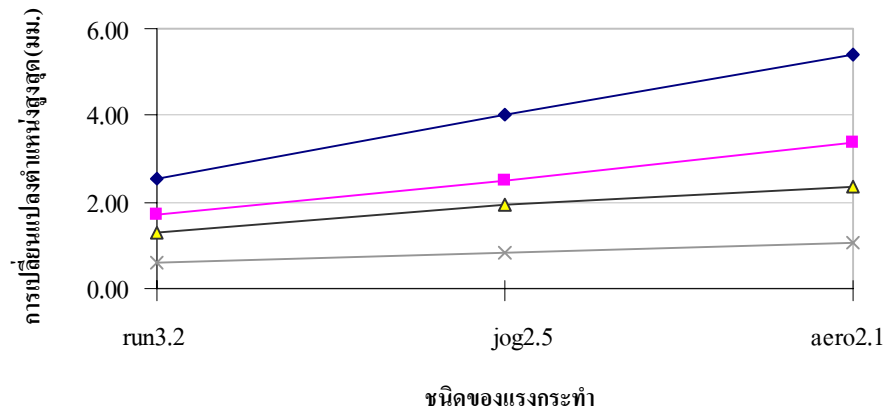


(ข) ความเร็วกับเวลา

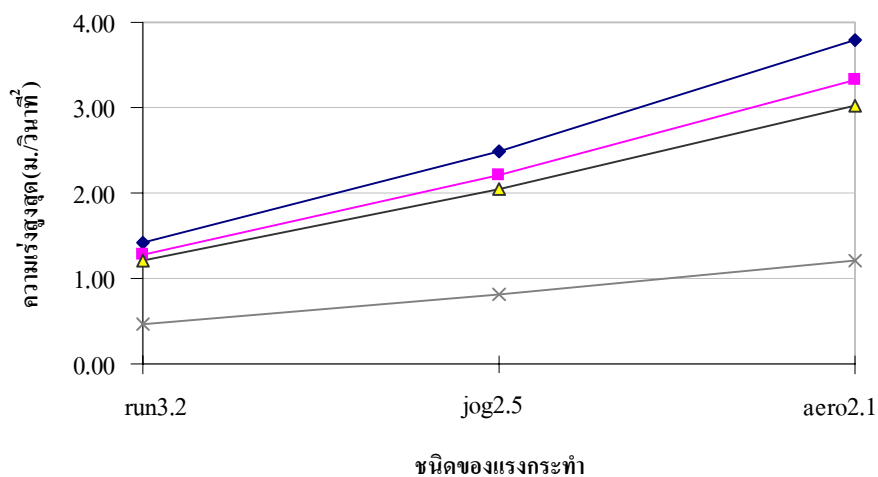
รูปที่ 4.5 การตอบสนองของพื้คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบทั้ง 3 แบบ



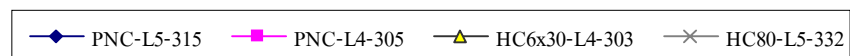
รูปที่ 4.6 การตอบสนองของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวงทั้ง 3 แบบ



(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด



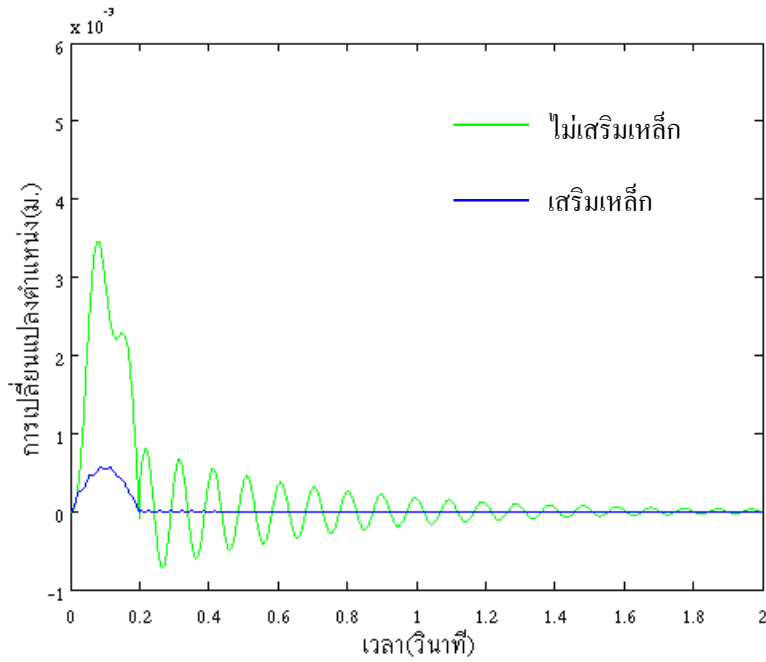
(ข) ความแรงสูงสุด



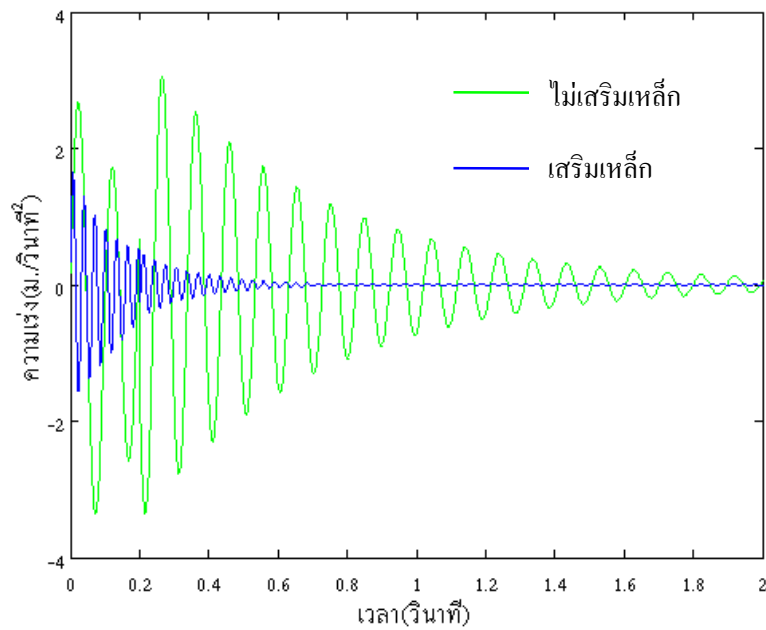
รูปที่ 4.7 การตอบสนองสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบ
เปรียบเทียบกับแบบกลวง

4.2.2 การตอบสนองของระบบ กรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จูดรองรับ

ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงกระทำเนื่องจากการเดินแอโรบิค และปริมาณการเสริมเหล็กที่ 0% และ 4% เท่านั้น เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบการตอบสนองของระบบเนื่องจากกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็ก รูปที่ 4.8 เป็นการวิเคราะห์พื้น PNC-L4-305 และรูปที่ 4.9 เป็นการวิเคราะห์พื้น HC250-L9-327 เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากจึงไม่ได้แสดงในรูปตาราง

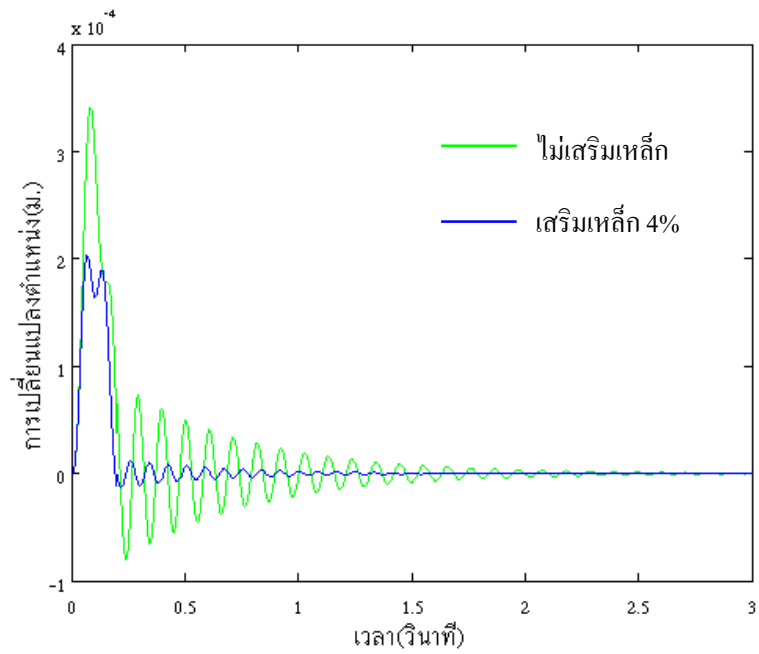


(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้งกับเวลา

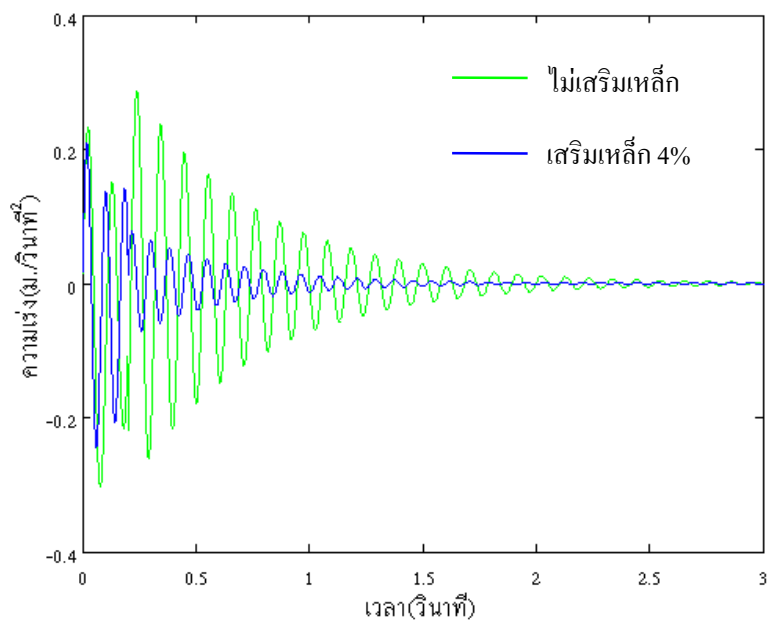


(ข) ความเร่งกับเวลา

รูปที่ 4.8 การตอบสนองของพื้น PNC-L4-305



(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตั้งกับเวลา



(ข) ความเร่งกับเวลา

รูปที่ 4.9 การตอบสนองของพื้น HC250-L9-327

4.2.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่จู่ตรงรับ

ค่าการตอบสนองสูงสุดเนื่องจากแรงกระทำชนิดต่างๆ กรณีเสริมเหล็กในปริมาณต่างๆ ที่จู่ตรงรับปลายแผ่นพื้น ของพื้นที่ 7 แบบ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.7(ก)–4.7(ข) สำหรับรูปที่ 4.10-4.12 เป็นการตอบสนองสูงสุดของพื้นที่ 7 แบบ โดยพิจารณาที่ละกิจกรรมคือ การเดินแอโรบิก การวิ่งเหยาะๆ และการวิ่ง ตามลำดับ ในส่วนนี้ต้องการแสดงให้เห็นภาพรวมเกี่ยวกับการเสริมเหล็กที่จู่ตรงรับปลายแผ่นพื้นให้ชัดเจนยิ่งขึ้น และจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับเกณฑ์การรับรู้ของมนุษย์ต่อไป

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่ตรงรับปลายแผ่นพื้น (ก) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้อเรียบ PNC-L5-315

ชนิดพื้น		PNC-L5-315					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	5.379	4.037	2.555	3.787	2.478	1.415
0.5	1.75	1.446	1.148	0.752	2.042	1.394	0.827
1.0	3.50	1.178	0.911	0.615	1.872	1.294	0.782
1.5	5.25	1.057	0.809	0.567	1.799	1.258	0.760
2.0	7.00	0.987	0.774	0.537	1.756	1.237	0.747
2.5	8.75	0.941	0.750	0.516	1.732	1.221	0.737
3.0	10.50	0.908	0.732	0.501	1.719	1.211	0.732
3.5	12.25	0.882	0.728	0.489	1.709	1.204	0.727
4.0	14.00	0.862	0.706	0.479	1.700	1.198	0.723
4.5	15.75	0.845	0.696	0.472	1.692	1.192	0.720
5.0	17.50	0.831	0.698	0.465	1.685	1.187	0.717
5.5	19.25	0.819	0.681	0.459	1.679	1.183	0.714
6.0	21.00	0.811	0.674	0.454	1.673	1.179	0.712
6.5	22.75	0.806	0.669	0.450	1.668	1.175	0.710
7.0	24.50	0.801	0.663	0.446	1.663	1.172	0.708
7.5	26.25	0.796	0.659	0.442	1.659	1.169	0.706
8.0	28.00	0.793	0.655	0.439	1.656	1.166	0.704

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่ตรงรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
(ข) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบทอเรียบ PNC-L4-305

ชนิดพื้น		PNC-L4-305					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	3.375	2.479	1.685	3.319	2.208	1.277
0.5	1.75	0.833	0.672	0.444	1.841	1.296	0.783
1.0	3.50	0.727	0.572	0.391	1.763	1.242	0.749
1.5	5.25	0.673	0.528	0.364	1.718	1.210	0.730
2.0	7.00	0.639	0.508	0.347	1.698	1.196	0.722
2.5	8.75	0.616	0.493	0.335	1.683	1.185	0.715
3.0	10.50	0.599	0.482	0.326	1.669	1.175	0.709
3.5	12.25	0.585	0.473	0.320	1.659	1.168	0.705
4.0	14.00	0.575	0.466	0.314	1.649	1.161	0.701
4.5	15.75	0.565	0.460	0.309	1.641	1.155	0.697
5.0	17.50	0.558	0.455	0.305	1.633	1.150	0.694
5.5	19.25	0.551	0.450	0.302	1.627	1.145	0.691
6.0	21.00	0.545	0.447	0.299	1.621	1.141	0.689
6.5	22.75	0.540	0.443	0.296	1.618	1.139	0.687
7.0	24.50	0.537	0.440	0.294	1.615	1.137	0.686
7.5	26.25	0.534	0.437	0.292	1.613	1.135	0.685
8.0	28.00	0.531	0.434	0.290	1.611	1.134	0.684

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
(ค) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC80-L5-332

ชนิดพื้น		HC80-L5-332					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	1.072	0.841	0.597	1.2137	0.8130	0.4731
0.5	3.00	0.422	0.338	0.232	0.785	0.553	0.334
1.0	6.00	0.332	0.268	0.178	0.730	0.514	0.311
1.5	9.00	0.294	0.232	0.158	0.702	0.494	0.298
2.0	12.00	0.269	0.211	0.146	0.681	0.480	0.290
2.5	15.00	0.252	0.200	0.137	0.670	0.472	0.285
3.0	18.00	0.239	0.192	0.130	0.661	0.466	0.281
3.5	21.00	0.229	0.186	0.125	0.653	0.460	0.277
4.0	24.00	0.221	0.180	0.121	0.646	0.454	0.274
4.5	27.00	0.215	0.176	0.118	0.639	0.450	0.271
5.0	30.00	0.210	0.172	0.115	0.636	0.447	0.270
5.5	33.00	0.207	0.169	0.113	0.633	0.445	0.269
6.0	36.00	0.204	0.166	0.111	0.630	0.443	0.268
6.5	39.00	0.201	0.163	0.110	0.627	0.441	0.266
7.0	42.00	0.199	0.161	0.108	0.625	0.440	0.265
7.5	45.00	0.197	0.158	0.107	0.622	0.438	0.264
8.0	48.00	0.195	0.156	0.106	0.620	0.436	0.263

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
(ง) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC6x30-L4-303

ชนิดพื้น		HC6x30-L4-303					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	2.339	1.946	1.314	3.0168	2.0425	1.1987
0.5	1.50	0.543	0.434	0.296	1.760	1.239	0.748
1.0	3.00	0.475	0.380	0.258	1.685	1.186	0.715
1.5	4.50	0.440	0.355	0.239	1.651	1.162	0.701
2.0	6.00	0.418	0.340	0.230	1.626	1.144	0.690
2.5	7.50	0.404	0.329	0.223	1.606	1.130	0.682
3.0	9.00	0.396	0.320	0.218	1.589	1.118	0.675
3.5	10.50	0.389	0.314	0.214	1.576	1.109	0.669
4.0	12.00	0.384	0.309	0.211	1.568	1.103	0.665
4.5	13.50	0.380	0.304	0.208	1.564	1.100	0.664
5.0	15.00	0.376	0.301	0.206	1.560	1.097	0.662
5.5	16.50	0.372	0.297	0.203	1.557	1.095	0.661
6.0	18.00	0.369	0.295	0.202	1.554	1.093	0.659
6.5	19.50	0.366	0.293	0.200	1.551	1.091	0.658
7.0	21.00	0.364	0.291	0.199	1.548	1.089	0.657
7.5	22.50	0.362	0.289	0.197	1.546	1.087	0.656
8.0	24.00	0.360	0.288	0.196	1.544	1.086	0.655

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่ตรงรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
 (จ) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L12-341

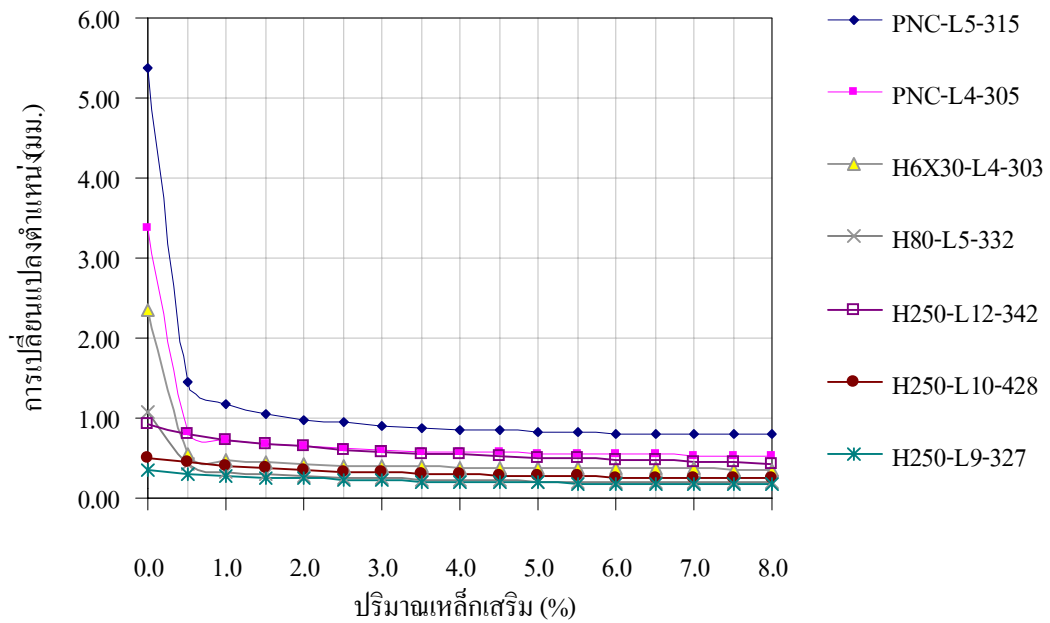
ชนิดพื้น		HC250-L12-341					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	0.919	0.709	0.459	0.5221	0.3267	0.1843
0.5	6.00	0.799	0.612	0.393	0.4629	0.3018	0.1704
1.0	12.00	0.730	0.556	0.356	0.4404	0.2870	0.1623
1.5	18.00	0.680	0.516	0.330	0.4238	0.2763	0.1564
2.0	24.00	0.641	0.485	0.309	0.4105	0.2678	0.1517
2.5	30.00	0.610	0.460	0.293	0.3997	0.2609	0.1480
3.0	36.00	0.583	0.439	0.279	0.3904	0.2549	0.1447
3.5	42.00	0.560	0.421	0.267	0.3823	0.2499	0.1420
4.0	48.00	0.540	0.406	0.257	0.3752	0.2453	0.1395
4.5	54.00	0.522	0.392	0.248	0.3688	0.2413	0.1380
5.0	60.00	0.506	0.379	0.240	0.3630	0.2377	0.1362
5.5	66.00	0.492	0.368	0.232	0.3576	0.2343	0.1336
6.0	72.00	0.478	0.357	0.226	0.3527	0.2312	0.1319
6.5	78.00	0.466	0.348	0.219	0.3482	0.2284	0.1304
7.0	84.00	0.454	0.339	0.214	0.3439	0.2257	0.1289
7.5	90.00	0.444	0.331	0.208	0.3399	0.2232	0.1276
8.0	96.00	0.434	0.323	0.203	0.3361	0.2209	0.1263

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
(จ) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L10-428

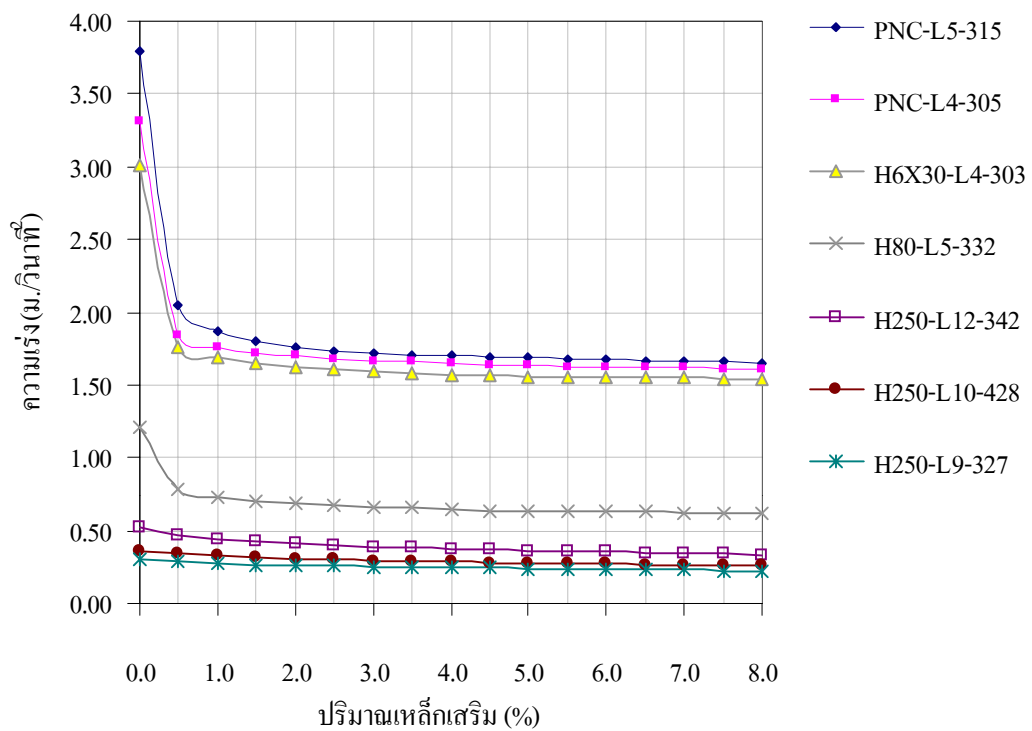
ชนิดพื้น		HC250-L10-428					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	0.504	0.377	0.238	0.3635	0.2380	0.1361
0.5	6.00	0.439	0.327	0.206	0.3394	0.2230	0.1275
1.0	12.00	0.401	0.298	0.187	0.3250	0.2154	0.1227
1.5	18.00	0.374	0.277	0.173	0.3143	0.2074	0.1191
2.0	24.00	0.352	0.261	0.163	0.3059	0.2022	0.1163
2.5	30.00	0.335	0.247	0.155	0.2990	0.1979	0.1140
3.0	36.00	0.320	0.236	0.149	0.2931	0.1942	0.1120
3.5	42.00	0.308	0.227	0.146	0.2892	0.1910	0.1103
4.0	48.00	0.297	0.218	0.144	0.2850	0.1882	0.1088
4.5	54.00	0.287	0.211	0.142	0.2793	0.1857	0.1074
5.0	60.00	0.278	0.204	0.140	0.2755	0.1833	0.1061
5.5	66.00	0.270	0.198	0.138	0.2721	0.1812	0.1050
6.0	72.00	0.262	0.192	0.136	0.2690	0.1793	0.1039
6.5	78.00	0.255	0.187	0.134	0.2660	0.1775	0.1029
7.0	84.00	0.249	0.182	0.132	0.2632	0.1758	0.1020
7.5	90.00	0.243	0.181	0.130	0.2605	0.1741	0.1011
8.0	96.00	0.238	0.179	0.129	0.2581	0.1726	0.1003

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ปริมาณการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น (ต่อ)
(ข) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบกลวง HC250-L9-327

ชนิดพื้น		HC250-L9-327					
เหล็กเสริม		การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (มม.)			ความเร่ง (ม./วินาที ²)		
% เหล็กเสริม	หน้าตัดเหล็ก (ตร.ซม.)	aero2.1	jog2.5	run3.2	aero2.1	jog2.5	run3.2
0	0.00	0.341	0.253	0.158	0.3025	0.2001	0.1152
0.5	6.00	0.299	0.220	0.145	0.2867	0.1894	0.1094
1.0	12.00	0.274	0.201	0.139	0.2746	0.1828	0.1059
1.5	18.00	0.255	0.187	0.134	0.2667	0.1780	0.1032
2.0	24.00	0.241	0.181	0.130	0.2606	0.1742	0.1012
2.5	30.00	0.230	0.177	0.126	0.2553	0.1709	0.0994
3.0	36.00	0.220	0.174	0.123	0.2510	0.1682	0.0979
3.5	42.00	0.211	0.171	0.120	0.2471	0.1658	0.0966
4.0	48.00	0.204	0.168	0.117	0.2437	0.1637	0.0955
4.5	54.00	0.197	0.165	0.115	0.2406	0.1617	0.0944
5.0	60.00	0.191	0.162	0.113	0.2377	0.1599	0.0934
5.5	66.00	0.186	0.160	0.110	0.2350	0.1583	0.0925
6.0	72.00	0.183	0.157	0.108	0.2327	0.1568	0.0917
6.5	78.00	0.181	0.155	0.106	0.2305	0.1554	0.0909
7.0	84.00	0.179	0.153	0.104	0.2283	0.1541	0.0902
7.5	90.00	0.177	0.150	0.103	0.2264	0.1528	0.0895
8.0	96.00	0.176	0.148	0.101	0.2245	0.1517	0.0889

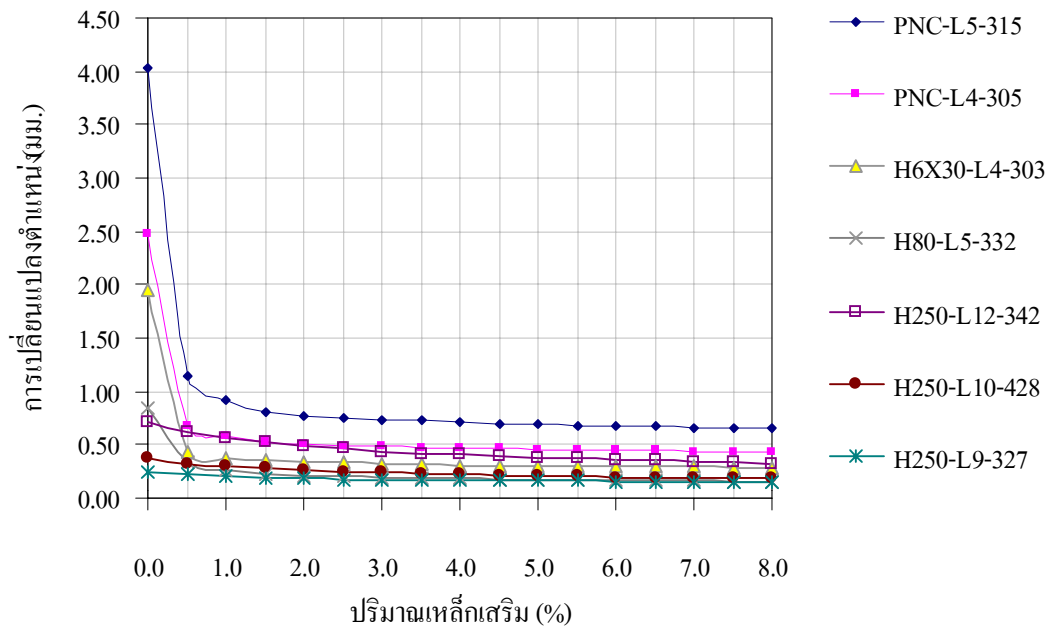


(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด

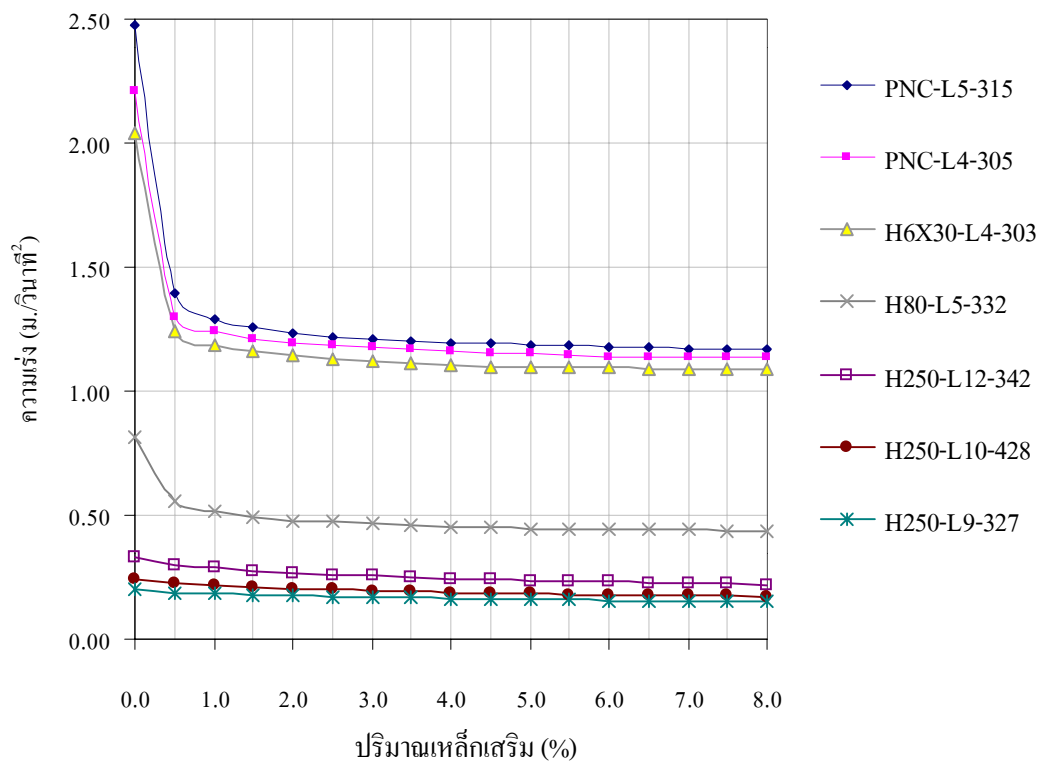


(ข) ความแรงสูงสุด

รูปที่ 4.10 ค่าการตอบสนองสูงสุดของฟันเนื่องจากการเดินแอโรบิค

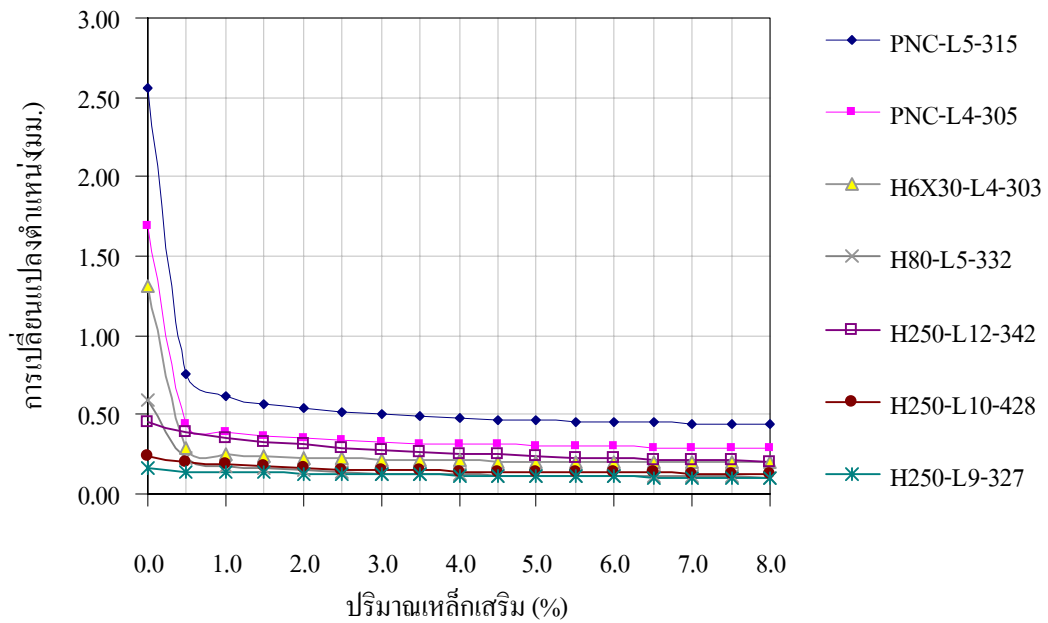


(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด

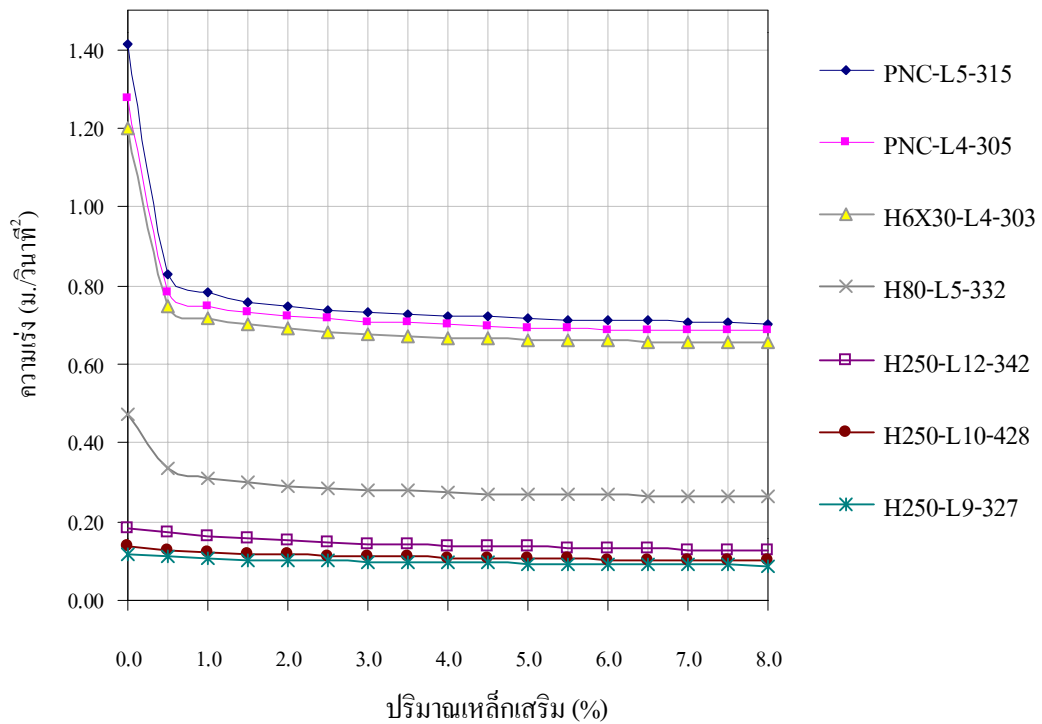


(ข) ความแรงสูงสุด

รูปที่ 4.11 ค่าการตอบสนองสูงสุดของพื้นเนื่องจากการวิ่งเหยาะๆ



(ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุด



(ข) ความแรงสูงสุด

รูปที่ 4.12 ค่าการตอบสนองสูงสุดของพื้นเนื่องจากการวิ่ง

4.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์

4.3.1 การตอบสนองของระบบกรณีไม่เสริมเหล็กที่จู่รองรับ

การวิเคราะห์ผลในหัวข้อ 4.2.1 เกี่ยวกับการตอบสนองของระบบในกรณีไม่เสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้นนั้น สรุปออกมาในเชิงภาพรวมเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบดังนี้คือ 1.ผลของความยาว 2.ผลของการอัดแรง 3.ผลของมวล 4.ผลของชนิดของพื้นคอนกรีตอัดแรง และ 5.ผลของชนิดของกิจกรรม

4.3.1.1 ผลของความยาวและการอัดแรง

จากตารางที่ 4.6(ก) รูปที่ 4.3 และ 4.5 การตอบสนองสูงสุดเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PNC-L5-315 PNC-L4-305 และ PNC-L4-510 ซึ่งสามารถอภิปรายได้ว่า การตอบสนองสูงสุดของระบบจะขึ้นกับความยาวและการอัดแรงในแผ่นพื้น คือถ้ามีการอัดแรงเท่ากันแต่ความยาวต่างกัน (PNC-L5-315 และ PNC-L4-510) ยิ่งพื้นมีความยาวมากยิ่งมีการตอบสนองสูงสุดมาก และถ้ามีความยาวเท่ากันแต่อัดแรงไม่เท่ากัน (PNC-L4-305 และ PNC-L4-510) ยิ่งมีการอัดแรงมากการตอบสนองยิ่งน้อย แต่ทั้งนี้ตัวอย่างทั้งสองมีมวลไม่เท่ากันดังนั้นจะมีผลของมวลเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากพื้นมีการเทคอนกรีตทับหน้าหนาไม่เท่ากัน จึงควรดูผลในส่วนของพื้นแบบกลวงเป็นตัวอย่างประกอบ เมื่อดูผลของภาพรวมจากตัวอย่างของพื้นแบบท้องเรียบทั้งสามแล้วจะเห็นว่าความยาวมีผลต่อการสั่นสะเทือนของพื้นมากกว่าการอัดแรง ซึ่งได้ดูจากความต่างของการตอบสนองสูงสุดของการเปรียบเทียบพื้นแต่ละคู่ในรูปที่ 4.3

จากตารางที่ 4.6(ข) รูปที่ 4.4 และ 4.6 จะเห็นว่าพื้น HC250-L12-341 มีค่าการตอบสนองสูงสุดมากที่สุด ส่วน HC250-L9-327 และ HC250-L9-896 มีค่าการตอบสนองสูงสุดน้อยกว่า โดย HC250-L9-896 มีค่าน้อยกว่า HC250-L9-327 เล็กน้อย ทั้งนี้พื้นที่ทั้งสองมีค่ามวลเท่ากันและมีค่าสติเฟนส และความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่า HC250-L9-327 จะมีการอัดรแรงน้อยกว่าแต่ความยาวเท่ากัน

สามารถอภิปรายได้ว่าการตอบสนองสูงสุดของระบบจะขึ้นกับมวลและสติเฟนส ถ้าค่าสติเฟนสน้อยการตอบสนองจะมีมาก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า HC250-L9-327 และ HC250-L9-896 ซึ่งมีความยาวเท่ากัน มีมวลต่อหน่วยความยาวเท่ากัน มีการอัดแรงไม่เท่ากัน แต่มีค่า generalized mass เท่ากัน และค่า generalized stiffness ต่างกันเล็กน้อย (จะเห็นว่าผลของการอัดแรงมีผลไม่เด่นชัดในกรณีที่มีความยาวและมวลเท่ากัน) แต่เมื่อเทียบกับ HC250-L12-342 แล้วจะมีค่าแตกต่างกันมาก ทั้ง generalized mass และ generalized stiffness ในส่วนของ generalized stiffness จะมีความแตกต่างมากกว่า generalized mass ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการ

3.14 จะเห็นว่าค่า generalized stiffness จะแปรผันกับความยาวยกกำลังสาม ส่วนค่า generalized mass ในสมการที่ 3.13 จะแปรผันกับความยาวยกกำลังหนึ่งเท่านั้น

จากการอภิปรายผลข้างบนนี้สามารถสรุปได้ว่า ความยาวมีผลต่อการตอบสนองของระบบ ถ้าความยาวน้อยลงผลการตอบสนองก็จะน้อยลงในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง แต่ผลของการอัดแรงเพิ่มเติมการตอบสนองของระบบจะน้อยลงแต่ในสัดส่วนที่ค่อนข้างน้อย

4.3.1.2 ผลของมวล

จากผลในตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.3 - 4.6 เปรียบเทียบระหว่าง 1.PNC-L4-305 กับ PNC-L4-510 2.HC250-L10-428 กับ PNC-L5-315 โดย PNC-L4-510 และ HC250-L12-341 มีมวลมากกว่าตามลำดับ แต่พื้นที่แต่ละคู่มีค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าผลการตอบสนองสูงสุดของ PNC-L4-510 และ HC250-L12-341 มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ายังมีมวลมากขึ้น ความสั่นสะเทือนจะน้อยลง

4.3.1.3 ผลของชนิดของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าพื้นแบบกลวงจะมีผลการตอบสนองสูงสุดน้อยกว่าพื้นแบบเรียบ ถึงแม้ว่าพื้น HC6x30-L4-303 จะมีมวลน้อยกว่า PNC-L5-315 และ PNC-L4-305 แต่มีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าค่อนข้างมาก ผลการตอบสนองสูงสุดจึงน้อยกว่าแต่ก็ไม่มากนัก ส่วน HC80-L5-332 มีมวลและความถี่ธรรมชาติมากกว่าพื้นที่ทั้งสามค่อนข้างมากจึงมีผลการตอบสนองสูงสุดน้อยกว่ามากพื้นที่ทั้งสามค่อนข้างมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่ของเรียบและแบบกลวงมีหน้าตัดที่แตกต่างกัน พื้นแบบกลวงโดยส่วนใหญ่ (ความหนาตั้งแต่ 80 ซม.ขึ้นไป)จะมีขนาดใหญ่กว่าพื้นแบบท้องเรียบ จึงมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและมวลมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าพื้นแบบกลวงจะมีการตอบสนองสูงสุดน้อยกว่าพื้นแบบเรียบ

4.3.1.4 ผลของชนิดของกิจกรรม

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.3-4.4 และ 4.7 จะสามารถเรียงลำดับผลการตอบสนองสูงสุดจากมากไปน้อยได้ดังนี้ การเดินแอโรบิก (aero2.1) การวิ่งเหยาะๆ (jog2.5) และการวิ่ง (run3.2) ตามลำดับ ยิ่งกิจกรรมมีความถี่น้อยและระยะเวลาที่เท้าสัมผัสพื้นน้อย ค่าตัวคูณการกระแทกจะมีค่ามาก น้ำหนักสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก เนื่องจากค่าตัวคูณการกระแทกแปรผกผันกับผลคูณของความถี่ของกิจกรรมและระยะเวลาที่เท้าสัมผัสพื้น จากตารางที่ 4.4 การเดินแอโรบิกมีค่าตัวคูณการกระแทกสูงกว่ากิจกรรมอื่น จึงมีขนาดสูงสุดของแรงมากกว่ากิจกรรมอื่น การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนของพื้นจึงมีค่ามากกว่ากิจกรรมชนิดอื่นตามลำดับเช่นกัน

4.3.2 การตอบสนองของระบบในกรณีไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จูดรองรับ

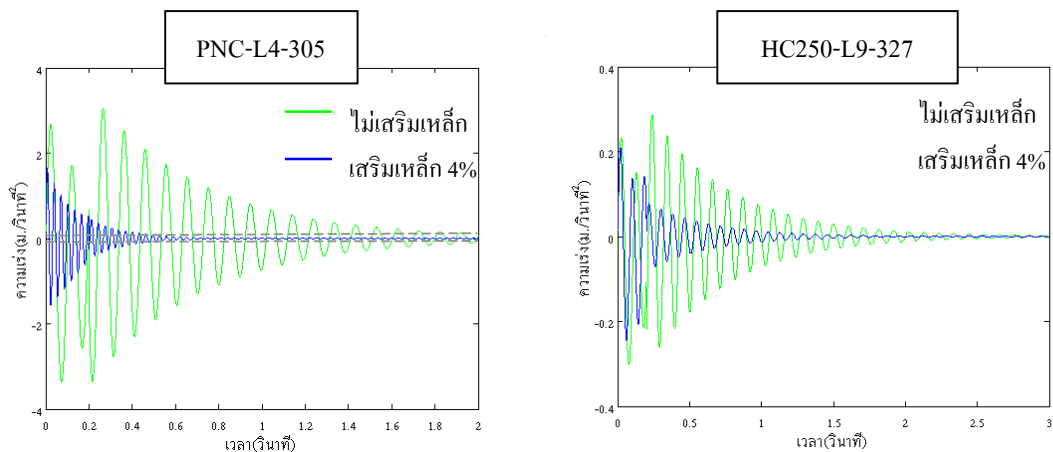
รูปที่ 4.8 เป็นผลการตอบสนองของพื้น PNC-L4-305 และ รูปที่ 4.9 แสดงผลการตอบสนองของพื้น HC250-L9-327 เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับปลายแผ่นพื้นและเสริมเหล็กที่จูดรองรับปลายแผ่นพื้นปริมาณ 4% จะเห็นว่าการเสริมเหล็กที่จูดรองรับนี้ จะทำให้การตอบสนองของพื้นน้อยลง และรวมถึงความหน่วงของพื้นด้วยในช่วงของการสั่นอิสระ จะมีการหยุดสั้นเร็วขึ้น ทั้งนี้เมื่อเราพิจารณาข้อมูลทางด้านพลศาสตร์ของหน้าตัดเมื่อมีการเสริมเหล็กในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมที่จูดรองรับ ความยาวใหม่ (L_2) จะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับปลายแผ่นพื้น จะทำให้ที่บริเวณปลายแผ่นพื้นมีความสามารถในการรับโมเมนต์ลบเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความยาวระหว่างจุดที่โมเมนต์เป็นศูนย์มีค่าลดลง ซึ่งความยาวส่วนนี้คือความยาวใหม่ที่นำมาใช้ในการหาค่า generalized mass และ generalized stiffness เมื่อความยาวน้อยลงค่า generalized mass จะมีค่าลดลง แต่ค่า generalized stiffness กลับมีค่ามากขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าการลดลงของ generalized mass จึงทำให้ผลของการตอบสนองมีค่าน้อยลงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.3.3 การตอบสนองสูงสุดของระบบสำหรับการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.10 - 4.12 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณเหล็กที่จูดรองรับมากขึ้น ค่าการตอบสนองสูงสุดจะมีค่าลดลง จากกราฟการตอบสนอง เราสามารถแบ่งช่วงกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงแรกปริมาณเหล็กเสริมในช่วง 0 - 4.0% และช่วงที่สอง 4.0 - 8.0% การตอบสนองของระบบในช่วงแรกจะมีค่าลดลงค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับในช่วง 4.0 - 8.0% ดังนั้นการเสริมเหล็กในช่วงแรกจะให้ผลในการลดการตอบสนองได้ดีกว่าในช่วงที่สอง ในส่วนของตัวอย่างแผ่นพื้นทั้ง 7 ตัวอย่าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 PNC-L4-305 PNC-L5-315 HC6x30-L4-303 และ HC80-L5-332 และกลุ่มที่ 2 คือ HC250-L9-327 HC250-L10-428 และ HC250-L12-341 ความแตกต่างระหว่างระหว่าง 2 กลุ่มนี้คือ กลุ่มที่ 1 เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับในช่วงต้นๆ (0.5%) จะเห็นว่าการตอบสนองสูงสุดมีค่าลดลงอย่างมาก ส่วนกลุ่มที่ 2 การตอบสนองสูงสุดจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นกลุ่มที่ 1 เป็นพื้นที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดและความยาวน้อย เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับปลายแผ่นพื้นความสามารถในการต้านทานการหมุนของจูดรองรับจะเพิ่มขึ้นมาก และค่าความแกร่งของจูดรองรับจะมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกึ่งกลางแผ่นพื้นมากกว่าในกลุ่มที่ 2 ดังนั้นความสามารถในการถ่ายเทโมเมนต์จากกึ่งกลางพื้นรวมทั้งความ สามารถในการรับโมเมนต์ลบของจูดรองรับในพื้นที่กลุ่มที่ 1 จะมากกว่า ทำให้ระยะจากจุดที่โมเมนต์เป็น 0 (L) จะมีค่าลดลงค่อนข้างมาก คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของระบบจะมีค่าดีขึ้น การตอบสนองสูงสุดของระบบจึงลดลงค่อนข้างมากเมื่อมีการเสริมเหล็กที่จูดรองรับ แต่ในภาพ

รวมแล้วความเร่งสูงสุดในระบบพื้นกลุ่มที่ 1 ยังคงมีค่ามากกว่าพื้นในกลุ่มที่ 2 ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.3.1 แล้ว

รูปที่ 4.13 เส้นประคือ เส้นที่มีความเร่งเท่ากับ 0.007g ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้สำหรับอาคารบ้านพักอาศัยและสำนักงาน จะเห็นว่าช่วงเวลาที่ความเร่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสั้นกว่าตอนที่ยังไม่มีกรเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น

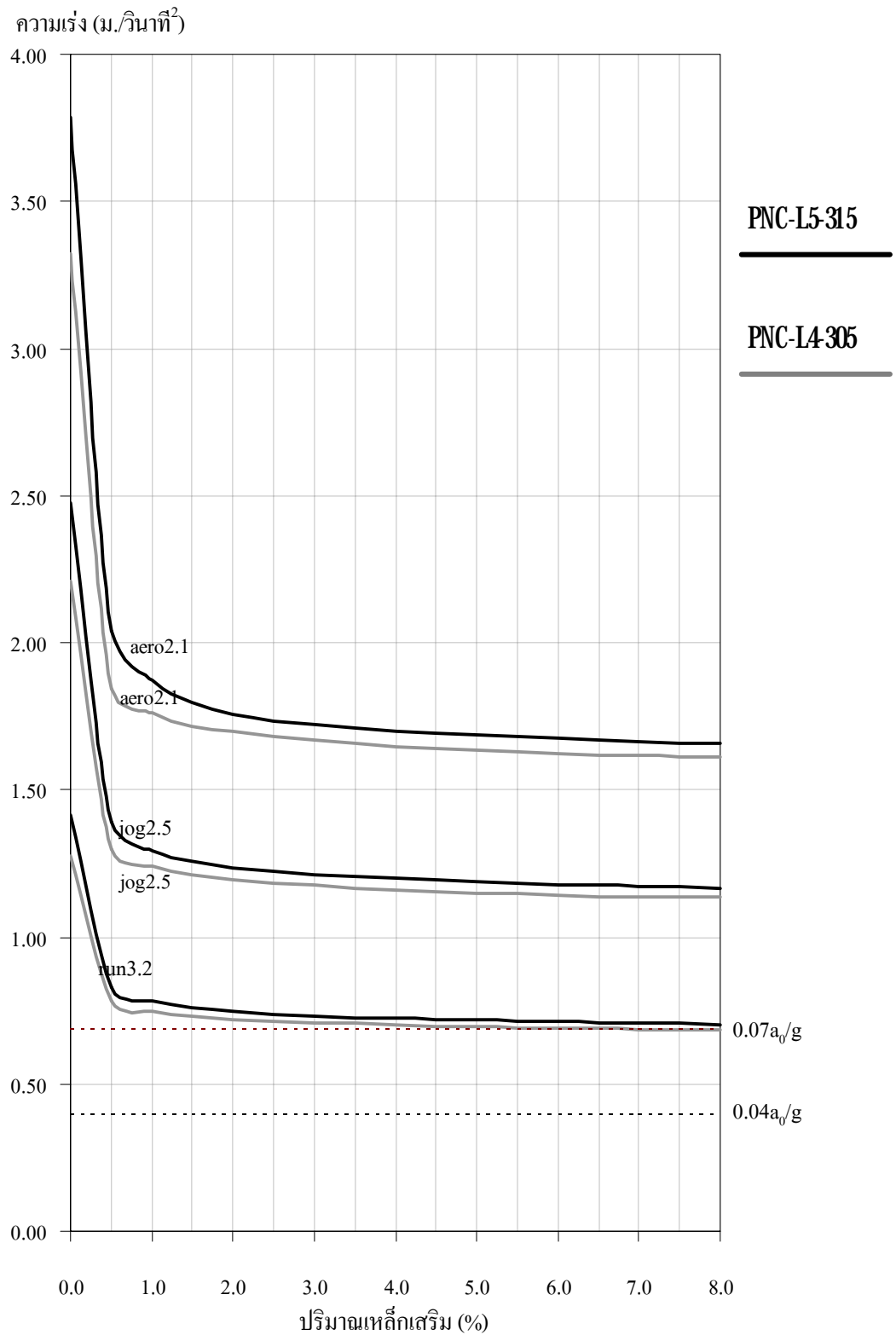


รูปที่ 4.13 ความเร่งของพื้นภายใต้กิจกรรมการเดินแอโรบิค

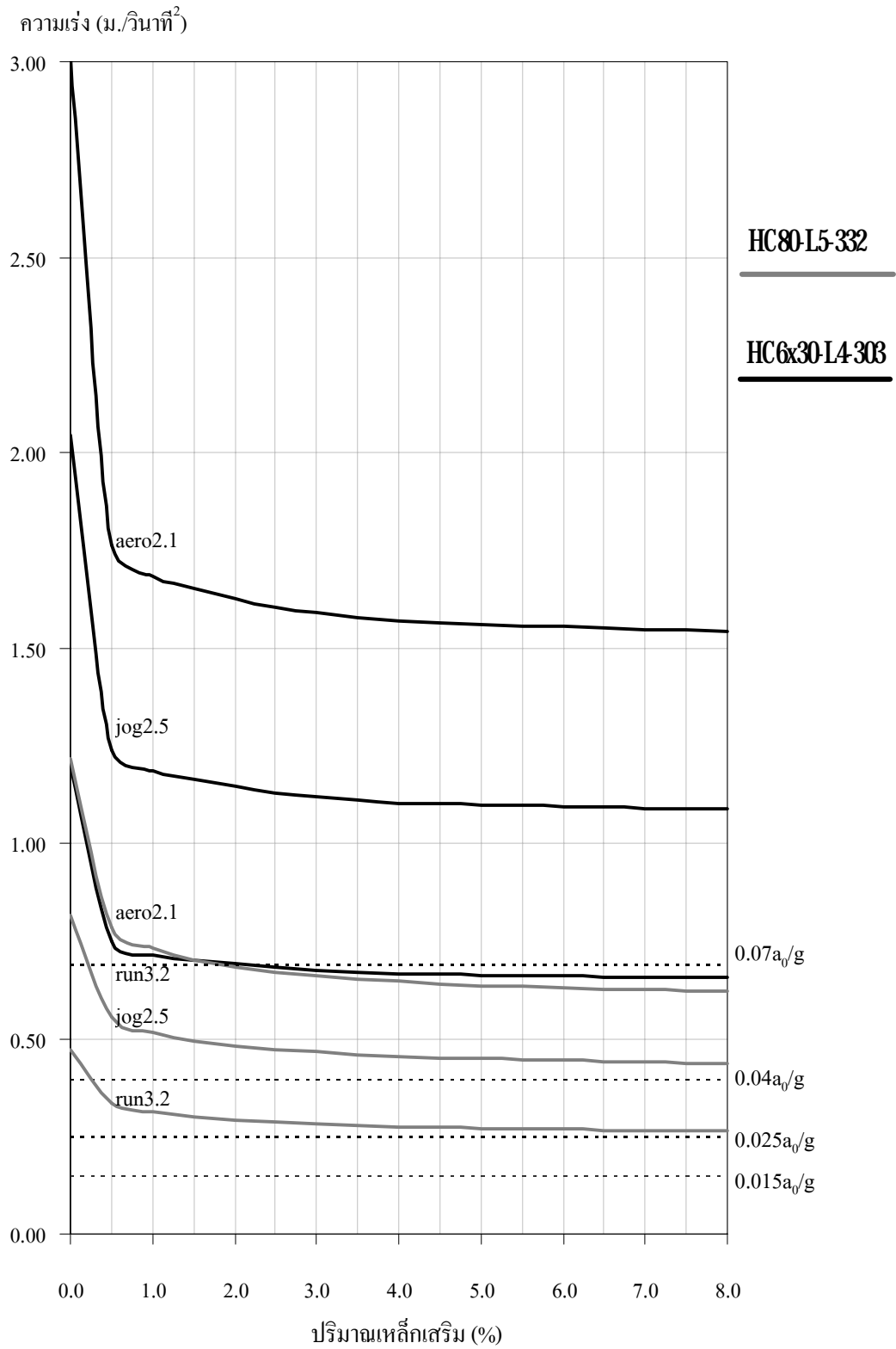
4.3.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับเกณฑ์มาตรฐาน

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 นำมารวมกันแล้วทำการแยกออกเป็น 3 รูปคือรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 โดยรูปที่ 4.14 จะเป็นการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของพื้น PNC-L5-315 และ PNC-L4305 รูปที่ 4.15 คือ HC80-L5-332 และ HC6x30-L4-303 และรูปที่ 4.16 จะเป็นการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของพื้น 1. HC250-L12-341 2. HC250-L10-428 3. HC250-L9-327

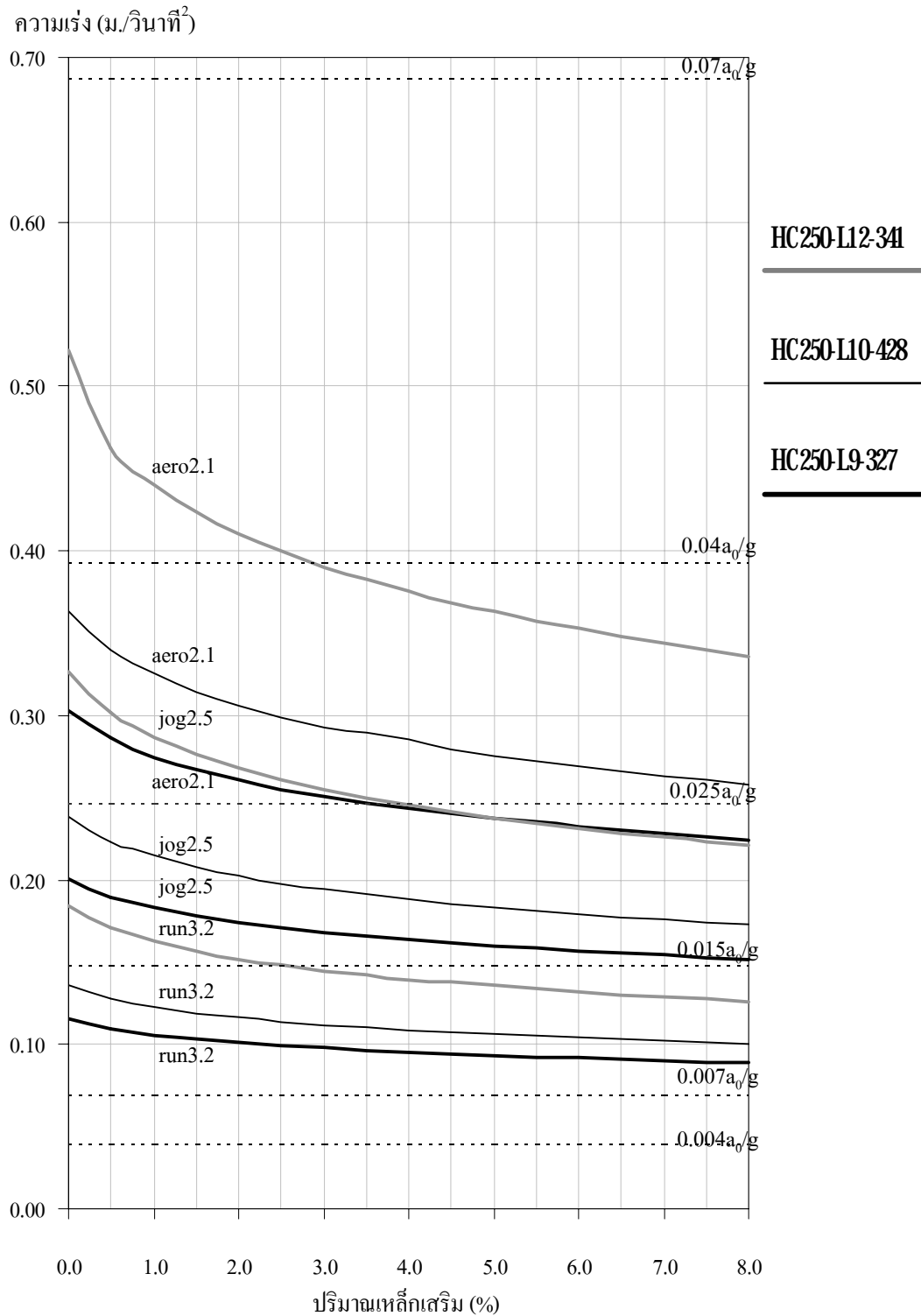
เกณฑ์มาตรฐานของ NBCC1995 ในตารางที่ 4.5 สามารถแบ่งขีดจำกัดออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรก 0.004-0.007 a_g สำหรับพื้นอาคารสำนักงานและบ้านพักอาศัย ส่วนที่สอง 0.015-0.025 a_g สำหรับพื้นห้องเดินร่าหรือห้องยกน้ำหนัก และส่วนที่สาม 0.04-0.07 a_g สำหรับพื้นที่มีกิจกรรมเข้าจังหวะ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเร่งสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเร็วสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความเร็วสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน

ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของพื้นในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าในทุกๆ กิจกรรมค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แสดงว่าพื้นที่ออกแบบนี้จะก่อให้เกิดความรำ

คาญกับผู้ใช้อาคารในช่วงเวลาที่มีกิจกรรม หากมีกิจกรรมการกระโดดเกิดขึ้น ยกเว้นกิจกรรมการวิ่งของพื้น PNC-L4-305 ช่วงที่มีการเสริมเหล็กที่จุ่มรองรับตั้งแต่ 4.5% มีค่าต่ำกว่า 0.07 a₀/g ซึ่งถ้าใช้เป็นพื้นในอาคารที่มีการออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะก็ใช้ได้

ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของพื้นในรูปที่ 4.15 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 พื้น **HC6x30-L4-303** ในกิจกรรมการเดินแอโรบิก และการวิ่งเหยาะๆ การตอบสนองสูงสุดมีค่าสูงกว่า 0.07 a₀/g ดังนั้น หากมีกิจกรรมดังกล่าวเกิดขึ้น ความสั่นสะเทือนจะก่อให้เกิดความรำคาญในช่วงที่มีกิจกรรม ในกิจกรรมการวิ่งหากมีการเสริมเหล็กตั้งแต่ 2% ขึ้นไป การตอบสนองสูงสุดจะอยู่ในช่วง 0.04 a₀/g - 0.07 a₀/g ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับพื้นอาคารที่ออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะได้ พื้น **HC80-L5-332** ในกิจกรรมการเดินแอโรบิกหากมีการเสริมเหล็กตั้งแต่ 2% ขึ้นไป และ 0.5% สำหรับกิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ การตอบสนองสูงสุดจะอยู่ในช่วง 0.04 a₀/g - 0.07 a₀/g ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับพื้นอาคารที่ออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะได้ กิจกรรมการวิ่งหากมีการเสริมเหล็กตั้งแต่ 0.5% ขึ้นไปการตอบสนองสูงสุดจะต่ำกว่า 0.04 a₀/g แต่ก็ยังมีค่าสูงกว่า 0.025 a₀/g จึงใช้ได้กับพื้นอาคารที่ออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะได้ แต่ถ้าใช้ในพื้นที่ยกแบบเป็นห้องเดินรำหรือห้องยกน้ำหนักก็ยังคงมีความรำคาญเกิดขึ้น

ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของพื้นทั้งสามในรูปที่ 4.16 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นว่าพื้นทุกตัวมีค่าสูงกว่า 0.007 a₀/g ดังนั้นในช่วงที่มีแรงกระทำกับพื้นทั้งสามในอาคารประเภทสำนักงานและที่พักอาศัยจะก่อให้เกิดความรำคาญ สำหรับพื้น **HC250-L12-341** กิจกรรมการเดินแอโรบิกมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.025 a₀/g - 0.07 a₀/g สามารถนำมาใช้กับอาคารที่มีการออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะได้ กิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ เมื่อเสริมเหล็ก 4% จะมีความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.015 a₀/g - 0.025 a₀/g สามารถใช้เป็นพื้นห้องที่มีการเดินรำหรือยกน้ำหนักได้ และกิจกรรมการวิ่งมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.007 a₀/g - 0.025 a₀/g สามารถนำมาใช้กับอาคารที่มีการออกแบบเพื่อเป็นห้องเดินรำหรือห้องยกน้ำหนักได้ พื้น **HC250-L10-428** ในกิจกรรมการเดินแอโรบิกมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.025 a₀/g - 0.04 a₀/g สามารถนำมาใช้กับอาคารที่มีการออกแบบเพื่อใช้ในกิจกรรมเข้าจังหวะได้ กิจกรรมการวิ่งเหยาะๆ มีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.015 a₀/g - 0.025 a₀/g สามารถใช้กับอาคารที่ออกแบบเป็นห้องเดินรำหรือห้องยกน้ำหนักได้ และกิจกรรมการวิ่งมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.007 a₀/g - 0.015 a₀/g สามารถใช้กับอาคารที่ออกแบบเป็นห้องเดินรำหรือห้องยกน้ำหนักได้ สำหรับพื้น **HC250-L9-327** ในกิจกรรมการเดินแอโรบิกหากเสริมเหล็ก 3.5% จะมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.015 a₀/g - 0.025 a₀/g สามารถนำมาใช้กับอาคารที่มีการออกแบบเป็นห้องเดินรำหรือห้องยกน้ำหนักได้ กิจกรรมการ

วุ้นเหยาๆ และการวุ้นมีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ระหว่าง $0.007 \text{ a}_0/\text{g}$ - $0.025 \text{ a}_0/\text{g}$ สามารถนำมาใช้กับอาคารที่มีการออกแบบเพื่อเป็นห้องเต็นท์หรือห้องยกน้ำหนักได้

บทที่ 5

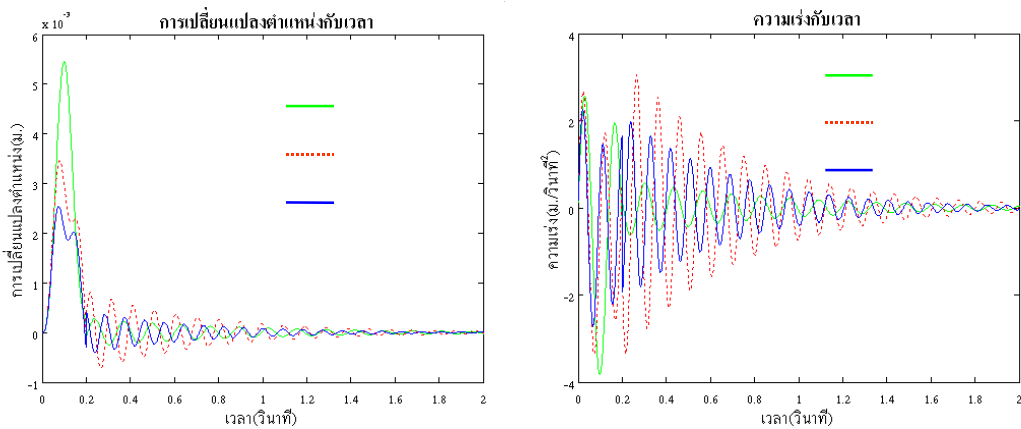
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการสั่นสะเทือนในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์อันได้แก่ การเดิน แอโรบิก การวิ่งเหยาะๆ และการวิ่ง โดยพิจารณาน้ำหนักของผู้ทำกิจกรรมเท่ากับ 60 กิโลกรัม และความถี่ของแต่ละกิจกรรมมีค่าตามลำดับดังนี้ 2.1 2.5 และ 3.2 เฮิรต์ จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ตามวัตถุประสงค์ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

การสั่นสะเทือนของระบบมีค่ามากในช่วงที่เท้าสัมผัสพื้น แต่เมื่อยกเท้าขึ้นการตอบสนองของระบบจะค่อยๆ ลดลง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การตอบสนองของพื้นแบบท้องเรียบ

ตัวแปรที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบมีดังนี้คือ

1. ความยาว ถ้าความยาวมากการตอบสนองของระบบจะมาก ยกตัวอย่างเช่น พื้น HC250-L12-341 กับพื้น HC250-L9-896 มีความยาวต่างกัน 25% ความเร่งสูงสุดต่างกัน 43%

2. การอัดแรง ถ้าการอัดแรงมีมากการตอบสนองน้อย ยกตัวอย่างเช่นพื้น HC250-L9-327 กับพื้น HC250-L9-896 มีการอัดแรงต่างกัน 52% ความเร่งสูงสุดต่างกัน 2.5%

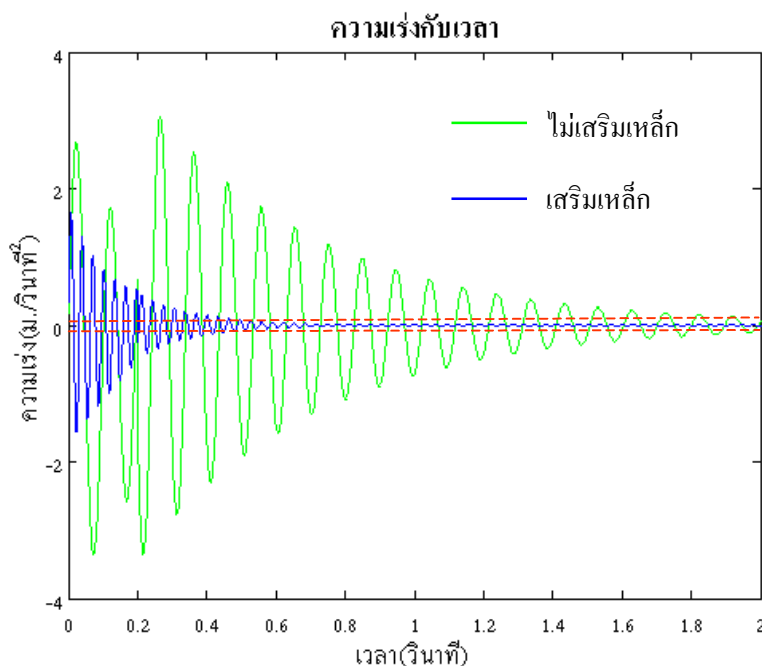
3. มวล หากมีมวลมากการตอบสนองของระบบจะน้อย ยกตัวอย่างเช่น พื้น HC250-L9-327 กับพื้น HC250-L12-341 มีมวลต่างกัน 25% ความเร่งสูงสุดต่างกัน 42%

4. ชนิดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (ที่ใช้ในงานวิจัยนี้) พื้นแบบท้องเรียบจะมีการตอบสนองมากกว่าพื้นแบบกลวง ยกตัวอย่างเช่น พื้น PNC-L4-305 กับพื้น HC6x30-L4-303 ถึงแม้ว่าพื้น PNC-L4-305 จะมีมวลมากกว่าและมีความยาวเท่ากันแต่การสั่นสะเทือนสูงสุดก็ยังมีค่ามากกว่า

5. ชนิดของกิจกรรม กิจกรรมที่มีความถี่น้อยและมีระยะเวลาที่เท่าสัมผัสพื้นน้อยจะมีค่าตัวคูณการกระแทกมาก ทำให้มีค่าแรงพลวัตสูงสุดมีค่ามาก การตอบสนองของระบบก็จะมากตามไปด้วย

5.1.2 การเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้น

เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายแผ่นพื้นสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนของระบบได้โดยการตอบสนองสูงสุดของระบบมีค่าลดลง และพื้นจะหยุดสั่นเร็วขึ้นซึ่งแสดงดังในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าการตอบสนองในช่วงเวลาที่เกินเส้นประน้อยกว่ากรณีไม่เสริมเหล็ก



รูปที่ 5.2 การตอบสนองของพื้น PNC-L4-305 ภายใต้กิจกรรมการเดินแอโรบิก

ในพื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบเมื่อทำการเสริมเหล็กเพียง 0.5% ก็ สามารถลดการตอบสนองสูงสุดของระบบลงค่อนข้างมาก ในพื้นที่แบบกลวงจะค่อยๆลดลง เมื่อเสริมเหล็กไปได้ประมาณ 4% ความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนจะเริ่มน้อยลงเกือบคงที่ เมื่อเปรียบเทียบค่ากับเกณฑ์มาตรฐานของ NBCC1995 พบว่าพื้นที่แบบท้องเรียบถึงแม้ว่าจะมีการเสริมเหล็กที่จุกตรงรับแล้วก็ตามค่าความเร่งสูงสุดยังคงมากกว่าค่ามาตรฐาน ในพื้นที่แบบกลวงในเมื่อเสริมเหล็กแล้วบางส่วนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้ขึ้นกับช่วงที่พิจารณาว่าเปรียบเทียบในช่วงใด (อาคารประเภทใด) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความเร่งสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน

พื้นที่และชนิดของแรง เกณฑ์มาตรฐาน	HC6x30-L4-303		
	run3.2	jog2.5	aero2.1
0.004-0.007 a ₀ /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.015-0.025 a ₀ /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.04-0.07 a ₀ /g	ต่ำกว่า 0.07 a ₀ /g ถ้าเสริมเหล็ก > 2%	สูงกว่า	สูงกว่า
พื้นที่และชนิดของแรง เกณฑ์มาตรฐาน	HC80-L5-332		
	run3.2	jog2.5	aero2.1
0.004-0.007 a ₀ /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.015-0.025 a ₀ /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.04-0.07 a ₀ /g	ต่ำกว่า 0.04 a ₀ /g ถ้าเสริมเหล็ก > 0.25%	ต่ำกว่า 0.07 a ₀ /g ถ้าเสริมเหล็ก > 0.25%	ต่ำกว่า 0.07 a ₀ /g ถ้าเสริมเหล็ก > 2%

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเร่งสูงสุดกับเกณฑ์มาตรฐาน

พื้นที่และชนิดของแรง เกณฑ์มาตรฐาน	HC250-L12-341		
	run3.2	jog2.5	aero2.1
0.004-0.007 a _v /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.015-0.025 a _v /g	ต่ำกว่า 0.015 a _v /g ถ้าเสริม เหล็ก >2.5%	ต่ำกว่า 0.025 a _v /g ถ้าเสริม เหล็ก >4.0%	สูงกว่า
0.04-0.07 a _v /g	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า 0.04 a _v /g ถ้าเสริม เหล็ก > 3.0%
พื้นที่และชนิดของแรง เกณฑ์มาตรฐาน	HC250-L10-428		
	run3.2	jog2.5	aero2.1
0.004-0.007 a _v /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.015-0.025 a _v /g	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า 0.025 a _v /g	สูงกว่า
0.04-0.07 a _v /g	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า
พื้นที่และชนิดของแรง เกณฑ์มาตรฐาน	HC250-L9-327		
	run3.2	jog2.5	aero2.1
0.004-0.007 a _v /g	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
0.015-0.025 a _v /g	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า 0.025 a _v /g	ต่ำกว่า 0.015 a _v /g ถ้าเสริม เหล็ก 3.5%
0.04-0.07 a _v /g	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า

5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

การเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้นนั้น เป็นการออกแบบเฉพาะสำหรับวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของระบบเท่านั้น ควรมีการวิเคราะห์ใหม่หากต้องการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์อื่น

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

5.3.1 ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

5.3.2 ร่วมมือและขอความสนับสนุนจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในการศึกษาวิจัยและพัฒนาการออกแบบแผ่นพื้นเพื่อลดความสั่นสะเทือน

5.3.3 ใช้น้ำหนักบรรทุกพลวัตที่ได้จากการวัดแทนการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- 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 Mechines**. (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**.

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB R12

ภาคผนวก ข

ตารางการคำนวณคุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณและการวิเคราะห์

การคำนวณจะแสดงให้ดู 2 ตัวอย่างคือ พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบท้องเรียบ PNC-L5-315 และแบบกลวง HC250-L12-341 ภายใต้แรงกระทำเนื่องจากการเดินแอโรบิก

1. ข้อมูลของแผ่นพื้นจากบริษัทผู้ผลิต

แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

2. คุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์

จากข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์ของหน้าตัดได้ดังนี้

PNC-L5-315

- โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตพื้นสำเร็จ

$$E_{cp} = 15,200\sqrt{350} = 284,366 \quad \text{กก./ตร.ซม.}$$

- โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตเทพื้นหน้า

$$E_{ct} = 15,200\sqrt{150} = 186,161 \quad \text{กก./ตร.ซม.}$$

- แรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง (70% ของแรงดึงสูงสุด และคิดการสูญเสียแรงดึง 20%)

$$N = 0.70 \times 0.80 \times 8 \times \frac{\pi}{4} \times 4^2 \times 175 = 9,852 \quad \text{กก.}$$

- พิจารณาหน้าตัดแปลง (ไม่พิจารณาผลของลวดเกลียวอัดแรงเนื่องจากมีค่าน้อย)

$$n = \frac{E_{ct}}{E_{cp}} = \frac{186,161}{284,366} = 0.6547$$

$$A_{ct} = n \times 35 \times 6 = 137.48 \quad \text{ตร.ซม.}$$

$$\bar{y} = \frac{(5+3) \times 137.48 + 2.5 \times 175}{(137.48 + 175)} = 4.92 \quad \text{ซม. (จากท้องพื้น)}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{tran} &= n \times \frac{1}{12} \times 35 \times 6^3 + 137.48 \times (5+3-4.92)^2 + 365 + 175 \times (4.92-2.5)^2 \\ &= 3,106 \quad \text{ซม.}^4 \end{aligned}$$

- generalize mass

$$m^* = \frac{\bar{m}L}{2} = \frac{264 \times 0.35 \times 5}{2} = 231 \quad \text{กก.} \quad \text{*****}$$

- generalize stiffness

$$k^* = \frac{EI\pi^4}{L^3} = \frac{284,366 \times 3,106 \times \pi^4 \times 10^{-4}}{5^3} \times 9.81 = 337,609.4 \quad \text{นิวตัน/ม.}$$

$$k_G^* = N \frac{\pi^2}{L} = 9,852 \frac{\pi^2}{5} \times 9.81 = 190,776.4 \quad \text{นิวตัน/ม.}$$

$$\bar{k} = k^* + k_G^* = 528,385.8 \quad \text{นิวตัน/ม.} \quad \text{*****}$$

- ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega = \sqrt{\frac{528,385.8}{231}} = 47.83 \quad \text{เรเดียน/วินาที} \quad \text{*****}$$

ตารางที่ ก-1 ชื่อ และข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ข้อมูล	แผ่นพื้น	PNC-L5-315	HC250-L12-341
1. น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ตร.ม.)		315	341
2. ช่วงความยาว (ม.)		5.00	12.00
3. พื้นที่หน้าตัด		175	
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ตร.ชม.)		365	1,326
4. ขนาด			
- กว้าง (ชม.)		35	120
- หนา (ชม.)		5	25
- คอนกรีตทับหน้าหนา (ชม.)		6	5
5. โมเมนต์ความเฉื่อย			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)		365	107,781
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม. ⁴)		3,135*	178,571*
6. จุด centroid อยู่สูงจากท้องพื้น			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)		2.50	12.89
- รวมคอนกรีตทับหน้า (ชม.)		4.92*	16.50*
7. มวลต่อหน่วยความยาว			
- ไม่รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)		120	265
- รวมคอนกรีตทับหน้า (กก./ตร.ม.)		264	385
8. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต			
(ทรงกระบอก 28 วัน)			
- คอนกรีตพื้นสำเร็จรูป (กก./ตร.ชม.)		350	400
- คอนกรีตเททับหน้า (กก./ตร.ชม.)		150	210
9. ลวดอัดแรง			
- จำนวน (เส้น)		8	7
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)		4	12.7 (0.5 นิ้ว)
- กำลังรับแรงดึงสูงสุด (กก./ตร.มม.)		175	175

หมายเหตุ * คือ ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต แต่มีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในภายหลัง

HC250-L12-341

- โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตพื้นสำเร็จ

$$E_{cp} = 15,200\sqrt{400} = 304,000 \quad \text{กก./ตร.ชม.}$$

- โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตทับหน้า

$$E_{ct} = 15,200\sqrt{210} = 220,269 \quad \text{กก./ตร.ซม.}$$

- แรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง (70% ของแรงดึงสูงสุด และคิดการสูญเสียแรงดึง 20%)

$$N = 0.70 \times 0.80 \times 7 \times \frac{\pi}{4} \times 12.7^2 \times 175 = 63,729.4 \quad \text{กก.}$$

- พิจารณาน้ำหนักตัดแปลง (ไม่พิจารณาลวดเกลียวอัดแรงเนื่องจากมีค่าน้อย)

$$n = \frac{E_{ct}}{E_{cp}} = \frac{220,269}{304,000} = 0.7246$$

$$A_{ct} = n \times 120 \times 5 = 434.74 \quad \text{ตร.ซม.}$$

$$\bar{y} = \frac{(25 + 2.5) \times 434.74 + 12.89 \times 1,326}{(434.74 + 1,326)} = 16.50 \quad \text{ซม. (จากท้องพื้น)}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{tran} &= n \times \frac{1}{12} \times 120 \times 5^3 + 434.74 \times (25 + 2.5 - 16.497)^2 + 107,781 + 1,326 \times (16.50 - 12.89)^2 \\ &= 178,571 \quad \text{ซม.}^4 \end{aligned}$$

- generalize mass

$$m^* = \frac{\bar{m}L}{2} = \frac{385 \times 1.2 \times 12}{2} = 2,772 \quad \text{กก.} \quad \text{*****}$$

- generalize stiffness

$$k^* = \frac{EI\pi^4}{L^3} = \frac{304,000 \times 178,571 \times \pi^4 \times 10^{-4}}{12^3} \times 9.81 = 3,001,989.6 \quad \text{นิวตัน/ม.}$$

$$k_G^* = N \frac{\pi^2}{L} = 9,852 \frac{\pi^2}{5} \times 9.81 = 190,776.4 \quad \text{นิวตัน/ม.}$$

$$\bar{k} = k^* + k_G^* = 3,516,184.0 \quad \text{นิวตัน/ม.} \quad \text{*****}$$

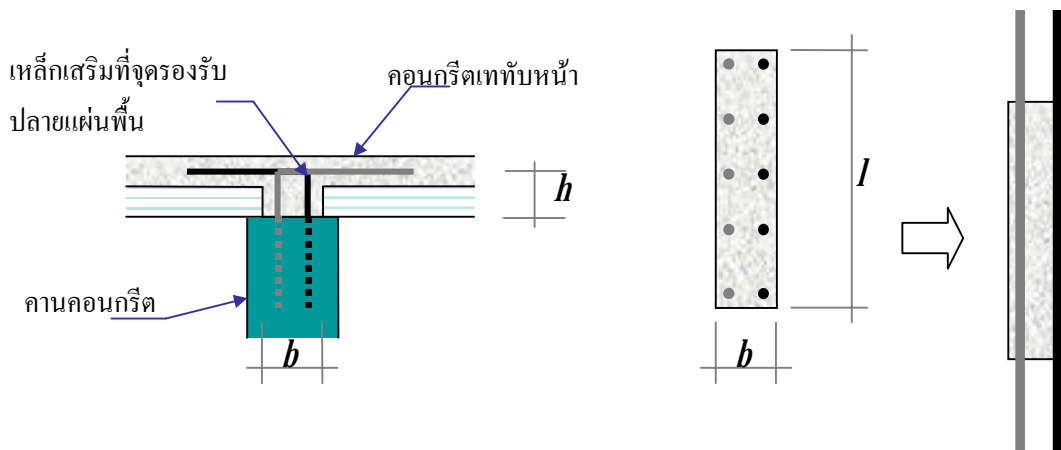
- ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega = \sqrt{\frac{3,516,184.0}{2772}} = 35.61 \quad \text{เรเดียน/วินาที} \quad \text{*****}$$

3. คุณสมบัติต่างๆ ทางด้านพลศาสตร์เมื่อมีการเสริมเหล็กที่จุนรองรับปลายแผ่นพื้น

สำหรับในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณ กรณีที่มีการเสริมเหล็กที่จุนรองรับปลายแผ่นพื้นปริมาณ 4% ของหน้าตัดคอนกรีต พิจารณารูปที่ ก-1 ประกอบ โดยความกว้าง (b) มีค่าเท่า

กับ 10 ซม. และการจัดเรียงเหล็กจะให้จุดศูนย์กลางเหล็กอยู่ห่างจากขอบซ้ายและขวาเท่ากันคือ 3 ซม. ทั้งสองด้าน



รูปที่ ก-1 หน้าตัดการเสริมเหล็กและหน้าตัดแปลงที่จุดรองรับปลายแผ่นพื้น

PNC-L5-315

- โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right) I_{cr}$$

- โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดในส่วนของคอนกรีตทั้งหมด

$$I_g = \frac{1}{12} \times 35 \times 10^3 = 2,916.67 \text{ ซม.}^4$$

- โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว

$$(n-1)A_s(x-3) + l \frac{x^2}{2} = nA_s(b-3-x)$$

$$n = \frac{2.04 \times 10^6}{15,200 \sqrt{150}} = 10.96$$

$$A_s = \rho \frac{bl}{2}, \rho = 0.04$$

$$x = 3.57 \text{ ซม. (วัดจากขอบ)}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bx^3 + nA_s(7-x)^2 + (n-1)A_s(x-3)^2 = 1,456 \text{ ซม.}^4$$

- โมเมนต์แตกร้าวของหน้าตัด

$$f_r = 2.0 \sqrt{150} = 24.49 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{c} = 14,288.7 \text{ กก.-ชม.}, C = 5 \text{ ชม.}$$

- โมเมนต์มากที่สุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัด

$$M_{\max} = \frac{w_{DL+LL} L^2}{12} = 41,125 \text{ กก.-ชม.}$$

$$\therefore I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 \right) I_{cr} = 1,517 \text{ ชม.}^4$$

- spring stiffness (ความต้านทานการหมุน)

$$k = \frac{EI_e}{h} = \frac{15,200 \sqrt{150} \times 1,517 \times 10^{-2}}{(5+3)} \times 9.81 = 3,463,464.4 \text{ นิวตัน-ม./เรเดียน}$$

- โมเมนต์ที่ปลาย (M_2)

จากหัวข้อ semirigid connection ในหนังสือ Matrix Analysis of Structure จะได้ว่า

$$M_2 = \frac{r_b}{R} [(4-3r_e)FM_b - 2(1-r_e)FM_e]$$

$$\text{โดย } r_b = r_e = \frac{kL}{EI + kL} = 0.952$$

$$R = 12 - 8r_b - 8r_e + 5r_b r_e = 1.297$$

$$FM_b = FM_e = \frac{PL}{8} = 0.625, P = 1, L = 5$$

$$\therefore M_2 = 0.5681$$

- ความยาวที่เปลี่ยนไป (L_2)

$$M_1 = \frac{PL}{4} - M_2 = 1.25 - 0.5681 = 0.6819$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{0.6819}{0.5681} = 1.200$$

$$L_2 = \frac{(1.200)(5)}{(1+1.200)} = 2.73 \text{ ม.}$$

- generalized mass

$$m^* = \frac{\bar{m}L}{2} = \frac{264 \times 0.35 \times 2.73}{2} = 126.29 \text{ กก.} \quad \text{*****}$$

- generalized stiffness

$$k^* = \frac{EI\pi^4}{L^3} = \frac{284,366 \times 3,106 \times \pi^4 \times 10^{-4}}{2.73^3} \times 9.81 = 2,085,437.30 \text{ นิวตัน/ม.}$$

$$k_G^* = N \frac{\pi^2}{L} = 9,852 \frac{\pi^2}{2.73} \times 9.81 = 348,963.46 \text{ นิวตัน/ม.}$$

$$\bar{k} = k^* + k_G^* = 2,434,400.75 \text{ นิวตัน/ม.} \quad \text{*****}$$

- ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega = \sqrt{\frac{2,434,400.75}{126.29}} = 138.84 \text{ เรเดียน/วินาที} \quad \text{*****}$$

HC250-L12-341

- โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 \right) I_{cr}$$

- โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดในส่วนของคอนกรีตทั้งหมด

$$I_g = \frac{1}{12} \times 120 \times 10^3 = 10,000 \text{ ซม.}^4$$

- โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตรกร้าว

$$(n-1)A_s(x-3) + l \frac{x^2}{2} = nA_s(b-3-x)$$

$$n = \frac{2.04 \times 10^6}{15,200\sqrt{210}} = 9.26$$

$$A_s = \rho \frac{bl}{2}, \rho = 0.04$$

$$x = 3.43 \text{ ซม. (วัดจากขอบ)}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bx^3 + nA_s(7-x)^2 + (n-1)A_s(x-3)^2 = 4,483.65 \text{ ซม.}^4$$

- โมเมนต์แตรกร้าวของหน้าตัด

$$f_r = 2.0\sqrt{210} = 28.98 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{c} = 57,965.5 \text{ กก.-ซม.}, C = 5 \text{ ซม.}$$

- โมเมนต์มากที่สุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัด

$$M_{\max} = \frac{w_{DL+LL} L^2}{12} = 986,400 \text{ กก.-ซม.}$$

$$\therefore I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}} \right)^3 \right) I_{cr} = 4,484.77 \text{ ซม.}^4$$

- spring stiffness (ความต้านทานการหมุน)

$$k = \frac{EI_e}{h} = \frac{15,200\sqrt{210} \times 4,484.77 \times 10^{-2}}{(25+2.5)} \times 9.81 = 3,523,953.43 \text{ นิวตัน-ม./เรเดียน}$$

- โมเมนต์ที่ปลาย (M_2)

จากหัวข้อ semirigid connection ในหนังสือ Matrix Analysis of Structure จะได้ว่า

$$M_2 = \frac{r_b}{R} [(4-3r_e)FM_b - 2(1-r_e)FM_e]$$

โดย $r_b = r_e = \frac{kL}{EI + kL} = 0.4426$

$$R = 12 - 8r_b - 8r_e + 5r_b r_e = 5.898$$

$$FM_b = FM_e = \frac{PL}{8} = 1.5, \mathbf{P} = 1, \mathbf{L} = 12$$

$$\therefore M_2 = 0.4263$$

- ความยาวที่เปลี่ยนไป (L_2)

$$M_1 = \frac{PL}{4} - M_2 = 3.0 - 0.4263 = 2.574$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{2.574}{0.4263} = 6.04$$

$$L_2 = \frac{(6.04)(12)}{(1+6.04)} = 10.29 \text{ ม.}$$

- generalized mass

$$m^* = \frac{\bar{m}L}{2} = \frac{264 \times 0.35 \times 10.29}{2} = 2,378.13 \text{ กก.} \quad \text{*****}$$

- generalized stiffness

$$k^* = \frac{EI\pi^4}{L^3} = \frac{304,000 \times 178,571 \times \pi^4 \times 10^{-4}}{10.29^3} \times 9.81 = 4,754,259.20 \text{ นิวตัน/ม.}$$

$$k_G^* = N \frac{\pi^2}{L} = 63,729.4 \frac{\pi^2}{10.29} \times 9.81 = 599,356.51 \text{ นิวตัน/ม.}$$

$$\bar{k} = k^* + k_G^* = 5,353,615.71 \text{ นิวตัน/ม.} \quad \text{*****}$$

- ความถี่ธรรมชาติ

$$\omega = \sqrt{\frac{5,353,615.71}{2,378.13}} = 47.45 \text{ เรเดียน/วินาที} \quad \text{*****}$$

4. แรงกระทำเนื่องจากการเต้นแอโรบิค

จากสมการ

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

โดย $k_p = F_{pmax} / G = \text{dynamic impact factor}$

F_{pmax} = peak dynamic load

G = น้ำหนักคนเต้นแอโรบิค (ใช้ $G = 60$ กก. = 588.6 นิวตัน)

t_p = contact duration = 0.2 วินาที

T_p = $1/f_s$ = pace period = $1/2.1 = 0.4762$ วินาที

การคำนวณ

$$\frac{t_p}{T_p} = \frac{0.2}{0.4762} = 4.2 \text{ นำค่านี้ไปอ่านกราฟในรูปที่ 2.5 จะได้ค่า } k_p = 3.4$$

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot t / t_p) & \text{for } t \leq t_p \\ 0 & \text{for } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} = \begin{cases} 3.4 \times 60 \sin(\pi / 0.2) & \text{for } t \leq 0.2 \\ 0 & \text{for } 0.2 \leq t \leq 0.4762 \end{cases}$$

ทำการ generalize จะได้

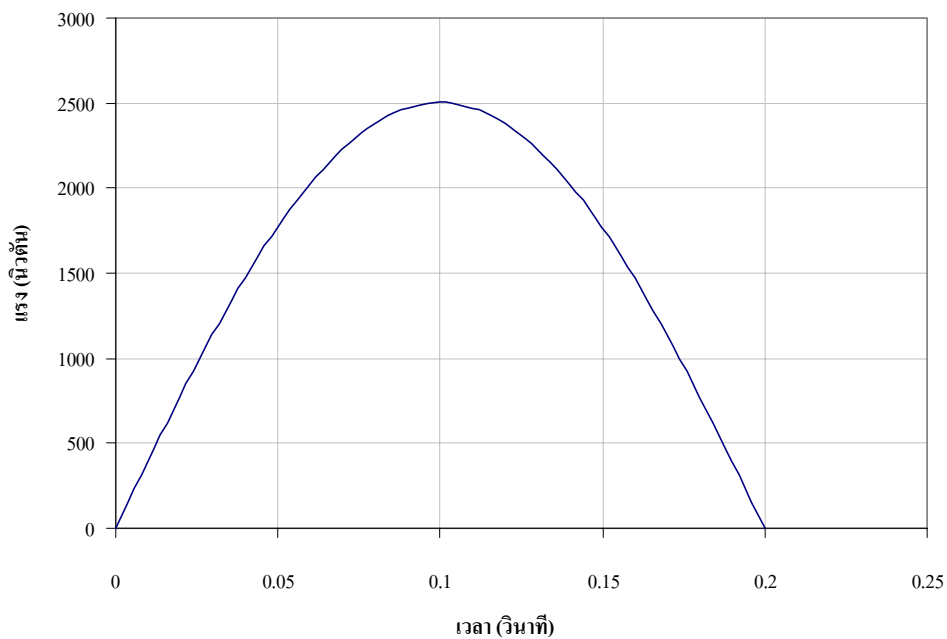
$$p_{eff}^* = p_{eff}(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = F_p(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

แรงกระทำที่กึ่งกลางพื้น ดังนั้น $x = \frac{L}{2}$

$$\text{จะได้ } p_{eff}^* = p_{eff}(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = F_p(t)$$

ลองแทนค่าที่เวลา $t = 0.10$ วินาที จะได้ $p_{eff}^* = 204 \text{ กก.} = 2001.24 \text{ นิวตัน}$

เมื่อแทนค่าที่เวลาตั้งแต่ 0 วินาทีเพิ่มขึ้นทีละ 0.001 วินาทีจะได้สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 แรงกระทำเนื่องจากการเดินแอโรบิก

5. การตอบสนองของระบบ

จากข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้ นำมาวิเคราะห์หาคำตอบสนองของระบบจากสมการการเคลื่อนที่ $m \ddot{Z}(t) + c \dot{Z}(t) + k Z(t) = p_{eff}^*(t)$ สามารถหาคำตอบสนองได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีแรงกระทำ และช่วงที่ไม่มีแรงกระทำ

ขณะมีแรงกระทำ การตอบสนองของระบบ (การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง) เป็นไปตาม

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

สำหรับการศึกษานี้จะให้ค่าเริ่มต้นคือ $Z(0)$ และ $\dot{Z}(0)$ มีค่าเป็น 0 ดังนั้น

$$Z(t) = \frac{1}{m \omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau$$

ขณะไม่มีแรงกระทำ การตอบสนองของระบบ (การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง) เป็นไปตามสมการ

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

ทำการแทนค่าแรงกระทำลงในสมการและใช้โปรแกรม MATLAB R12 ช่วยในการหาสมการ ดังรูปที่ ก-3

```
clear;
syms kp G tp dr wn wd m tt x
disp=int(kp*G*sin(pi*(tt-x)/tp)*exp(-dr*wn*x)/(m*wd)*sin(wd*x),x,0,tt);
vel=diff(disp,tt);
acc=diff(vel,tt);
syms r q tt          % after load (under damp free vibration)
disp2=exp(-dr*wn*tt)*r*cos(wd*tt-q);
vel2=diff(disp2,tt);
acc2=diff(vel2,tt);
```

รูปที่ ก-3 ใช้โปรแกรม MATLAB R12 ช่วยในการหาสมการการตอบสนองของระบบ

สามารถหาสมการการตอบสนองขณะไม่มีแรงกระทำได้ดังรูปที่ ก-4 และขณะมีแรงกระทำได้ดังรูปที่ ก-5 ซึ่งตัวแปรต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

disp(i) คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่ง

vel(i) คือ ความเร็ว

acc(i) คือ ความเร่ง

tp คือ ช่วงเวลาที่เข้าสัมผัสพื้น (contact duration)

kp คือ ตัวคูณการกระแทก (dynamic impact factor)

G คือ น้ำหนักคนเดินแอโรบิค (ใช้ $G = 60$ กก. = 588.6 นิวตัน)

tt คือ เวลา

dr คือ สัดส่วนความหน่วง

wn คือ ความถี่ธรรมชาติ

wd คือ ความถี่หน่วงของระบบ

pi คือ π

m คือ generalize mass

เมื่อได้สมการแล้วทำการแทนค่าต่างๆ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบที่เวลาต่างๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB R12 แสดงไว้ในภาคผนวก ค

$$\begin{aligned} \text{disp}(i) &= \exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\cos(-tt(i)*wd+q); \\ \text{vel}(i) &= -dr*wn*\exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\cos(-tt(i)*wd+q) + \exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\sin(-tt(i)*wd+q)*wd; \\ \text{acc}(i) &= dr^2*wn^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\cos(-tt(i)*wd+q) - 2*dr*wn*\exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\sin(-tt(i)*wd+q)*wd - \exp(-tt(i)*dr*wn)*r*\cos(-tt(i)*wd+q)*wd^2; \end{aligned}$$

รูปที่ ก-4 สมการการตอบสนองของระบบกรณีไม่มีแรงกระทำ

$$\begin{aligned} \mathbf{disp}(i) = & -tp * kp * G * (-2 * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * dr * wn * tp^2 * \cos(tt(i) * wd) * wd - \exp \\ & (-tt(i) * dr * wn) * pi * \sin(tt(i) * wd) * dr^2 * wn^2 * tp^2 - \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi^3 * \sin(tt(i) * wd) \\ & + \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * \sin(tt(i) * wd) * wd^2 * tp^2 + 2 * dr * wn * tp^2 * \cos(pi/tp * tt(i)) \\ & * pi * wd + \sin(pi/tp * tt(i)) * pi^2 * wd * tp - tp^3 * \sin(pi/tp * tt(i)) * wd * dr^2 * wn^2 - tp^3 * \sin(pi/tp * tt \\ & (i)) * wd^3) / (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 + 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 - \\ & 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / m / wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{vel}(i) = & -kp * G * tp * (dr^2 * wn^2 * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * tp^2 * \cos(tt(i) * wd) * wd + \\ & \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * dr * wn * tp^2 * \sin(tt(i) * wd) * wd^2 + dr^3 * wn^3 * \exp(-tt(i) * dr * wn) \\ & * pi * \sin(tt(i) * wd) * tp^2 + dr * wn * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi^3 * \sin(tt(i) * wd) - \exp(-tt(i) * dr * wn) \\ & * pi^3 * \cos(tt(i) * wd) * wd + \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * \cos(tt(i) * wd) * wd^3 * tp^2 - 2 * dr * wn * tp * \sin \\ & (pi/tp * tt(i)) * pi^2 * wd + \cos(pi/tp * tt(i)) * pi^3 * wd - tp^2 * \cos(pi/tp * tt(i)) * pi * wd * dr^2 * wn^2 - \\ & tp^2 * \cos(pi/tp * tt(i)) * pi * wd^3) / (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 + 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / \\ & (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 - 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / m / wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{acc}(i) = & -kp * G * tp * (-2 * dr^2 * wn^2 * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * tp^2 * \sin(tt(i) * wd) \\ & * wd^2 - dr^4 * wn^4 * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * \sin(tt(i) * wd) * tp^2 - dr^2 * wn^2 * \exp(-tt \\ & (i) * dr * wn) * pi^3 * \sin(tt(i) * wd) + 2 * dr * wn * \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi^3 * \cos(tt(i) * wd) * wd + \exp(- \\ & tt(i) * dr * wn) * pi^3 * \sin(tt(i) * wd) * wd^2 - \exp(-tt(i) * dr * wn) * pi * \sin(tt(i) * wd) * wd^4 \\ & * tp^2 - 2 * dr * wn * \cos(pi/tp * tt(i)) * pi^3 * wd - \sin(pi/tp * tt(i)) * pi^4 / tp * wd + tp * \sin(pi/tp * tt(i)) \\ & * pi^2 * wd * dr^2 * wn^2 + tp * \sin(pi/tp * tt(i)) * pi^2 * wd^3) / (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 + \\ & 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / (dr^2 * wn^2 * tp^2 + pi^2 - 2 * pi * wd * tp + wd^2 * tp^2) / m / wd; \end{aligned}$$

รูปที่ ก-5 สมการการตอบสนองของระบบกรณีมีแรงกระทำ

ตัวอย่างการคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆ ทางพลศาสตร์ของระบบแสดงไว้ในหัวข้อ 3.8.2 และ 3.8.3 ในส่วนนี้จะสรุปออกมาเป็นตารางโดยแยกตามตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ดังนี้

ตารางที่ ข-1 PNC-L5-315

ตารางที่ ข-2 PNC-L4305

ตารางที่ ข-3 HC80-L5-332

ตารางที่ ข-4 HC6x30-L4-303

ตารางที่ ข-5 HC250-L12-341

ตารางที่ ข-6 HC250-L10-428

ตารางที่ ข-7 HC250-L9-327

ตารางที่ ข-1 PNC-L5-315

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_c (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								500.00	231.00	337,609.36	190,776.41	528,385.77	47.83	7.61
0.50	1.75	1.844	339.700	447.785	1,022,205.25	0.4437	0.8063	1.8170	322.50	149.00	1,269,798.89	295,773.47	1,565,572.36	102.51	16.31
1.00	3.50	2.382	573.300	671.588	1,533,101.53	0.4992	0.7508	1.5041	300.33	138.75	1,572,360.94	317,613.04	1,889,973.98	116.71	18.58
1.50	5.25	2.726	763.755	854.055	1,949,637.55	0.5243	0.7257	1.3842	290.28	134.11	1,741,309.45	328,604.03	2,069,913.49	124.24	19.77
2.00	7.00	2.977	928.568	1011.955	2,310,092.21	0.5391	0.7109	1.3186	284.35	131.37	1,852,597.37	335,460.39	2,188,057.76	129.06	20.54
2.50	8.75	3.172	1076.161	1153.358	2,632,887.09	0.5491	0.7009	1.2763	280.35	129.52	1,933,087.18	340,249.93	2,273,337.12	132.48	21.09
3.00	10.50	3.329	1211.373	1282.898	2,928,603.09	0.5564	0.6936	1.2464	277.42	128.17	1,994,924.49	343,839.99	2,338,764.49	135.08	21.50
3.50	12.25	3.460	1337.271	1403.516	3,203,949.16	0.5621	0.6879	1.2238	275.16	127.12	2,044,477.34	346,663.67	2,391,141.01	137.15	21.83
4.00	14.00	3.571	1455.931	1517.199	3,463,464.43	0.5666	0.6834	1.2060	273.35	126.29	2,085,437.30	348,963.46	2,434,400.75	138.84	22.10
4.50	15.75	3.667	1568.824	1625.356	3,710,366.28	0.5704	0.6796	1.1915	271.85	125.59	2,120,106.78	350,886.63	2,470,993.41	140.27	22.32
5.00	17.50	3.751	1677.029	1729.023	3,947,017.22	0.5735	0.6765	1.1794	270.58	125.01	2,150,004.14	352,528.31	2,502,532.46	141.49	22.52
5.50	19.25	3.824	1781.363	1828.981	4,175,201.09	0.5763	0.6737	1.1691	269.49	124.51	2,176,175.98	353,952.98	2,530,128.96	142.55	22.69
6.00	21.00	3.890	1882.455	1925.833	4,396,295.75	0.5786	0.6714	1.1602	268.54	124.07	2,199,370.01	355,206.03	2,554,576.04	143.49	22.84
6.50	22.75	3.949	1980.802	2020.055	4,611,385.77	0.5807	0.6693	1.1524	267.70	123.68	2,220,136.53	356,320.49	2,576,457.02	144.33	22.97
7.00	24.50	4.002	2076.800	2112.027	4,821,338.69	0.5826	0.6674	1.1455	266.95	123.33	2,238,890.86	357,321.00	2,596,211.87	145.09	23.09
7.50	26.25	4.050	2170.771	2202.056	5,026,858.07	0.5843	0.6657	1.1393	266.28	123.02	2,255,953.24	358,226.41	2,614,179.66	145.77	23.20
8.00	28.00	4.094	2262.979	2290.396	5,228,521.39	0.5858	0.6642	1.1337	265.67	122.74	2,271,540.54	359,049.56	2,630,590.10	146.40	23.30

ตารางที่ ข-2 PNC-L4-305

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_e (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								400.00	168.00	520,967.58	178,852.89	699,820.46	64.54	10.27
0.50	1.75	1.844	339.700	809.469	1,971,047.34	0.3865	0.6135	1.5871	245.39	103.06	2,256,436.35	291,541.30	2,547,977.64	157.23	25.02
1.00	3.50	2.382	573.300	1000.485	2,436,169.01	0.4164	0.5836	1.4018	233.46	98.05	2,620,475.05	306,444.90	2,926,919.95	172.77	27.50
1.50	5.25	2.726	763.755	1156.221	2,815,384.78	0.4311	0.5689	1.3195	227.55	95.57	2,829,848.33	314,398.24	3,144,246.57	181.38	28.87
2.00	7.00	2.977	928.568	1290.989	3,143,543.91	0.4403	0.5597	1.2714	223.90	94.04	2,970,542.84	319,524.62	3,290,067.45	187.05	29.77
2.50	8.75	3.172	1076.161	1411.677	3,437,417.44	0.4466	0.5534	1.2392	221.36	92.97	3,073,779.19	323,184.07	3,396,963.26	191.15	30.42
3.00	10.50	3.329	1211.373	1522.240	3,706,638.27	0.4513	0.5487	1.2157	219.47	92.18	3,153,972.72	325,970.55	3,479,943.27	194.30	30.92
3.50	12.25	3.460	1337.271	1625.188	3,957,314.24	0.4550	0.5450	1.1977	217.99	91.55	3,218,804.94	328,188.94	3,546,993.87	196.83	31.33
4.00	14.00	3.571	1455.931	1722.216	4,193,577.80	0.4580	0.5420	1.1832	216.78	91.05	3,272,786.34	330,013.42	3,602,799.76	198.92	31.66
4.50	15.75	3.667	1568.824	1814.529	4,418,358.07	0.4606	0.5394	1.1713	215.78	90.63	3,318,759.51	331,551.49	3,650,311.00	200.70	31.94
5.00	17.50	3.751	1677.029	1903.009	4,633,805.87	0.4627	0.5373	1.1612	214.92	90.27	3,358,615.42	332,873.44	3,691,488.86	202.23	32.19
5.50	19.25	3.824	1781.363	1988.323	4,841,545.23	0.4646	0.5354	1.1526	214.18	89.95	3,393,667.07	334,027.43	3,727,694.49	203.57	32.40
6.00	21.00	3.890	1882.455	2070.987	5,042,830.54	0.4662	0.5338	1.1451	213.53	89.68	3,424,858.47	335,047.67	3,759,906.14	204.76	32.59
6.50	22.75	3.949	1980.802	2151.406	5,238,649.21	0.4676	0.5324	1.1384	212.95	89.44	3,452,888.29	335,959.22	3,788,847.51	205.82	32.76
7.00	24.50	4.002	2076.800	2229.904	5,429,791.05	0.4689	0.5311	1.1325	212.43	89.22	3,478,286.38	336,780.93	3,815,067.31	206.79	32.91
7.50	26.25	4.050	2170.771	2306.744	5,616,896.57	0.4701	0.5299	1.1272	211.96	89.02	3,501,463.10	337,527.30	3,838,990.40	207.66	33.05
8.00	28.00	4.094	2262.979	2382.143	5,800,491.53	0.4712	0.5288	1.1223	211.53	88.84	3,522,742.07	338,209.65	3,860,951.72	208.47	33.18

ตารางที่ ข-3 HC80-L5-332

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_e (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								5.00	391.50	1766926.86	298164.75	2,065,091.61	72.63	11.56
0.50	1.75	1.844	582.342	638.128	1,109,882.39	0.3439	0.9061	2.6346	3.62	283.78	4639277.4	411339.31	5,050,616.67	133.41	21.23
1.00	3.50	2.382	982.800	1033.529	1,797,593.59	0.4154	0.8346	2.0092	3.34	261.40	5936058.7	446563.1	6,382,621.78	156.26	24.87
1.50	5.25	2.726	1309.294	1355.901	2,358,287.59	0.4514	0.7986	1.7693	3.19	250.13	6775347	466688.7	7,242,035.72	170.16	27.08
2.00	7.00	2.977	1591.831	1634.869	2,843,491.18	0.4738	0.7762	1.6380	3.10	243.09	7380730.9	480193.81	7,860,924.70	179.83	28.62
2.50	8.75	3.172	1844.848	1884.691	3,278,001.40	0.4895	0.7605	1.5534	3.04	238.18	7847174.2	490103.57	8,337,277.74	187.09	29.78
3.00	10.50	3.329	2076.640	2113.556	3,676,061.07	0.5013	0.7487	1.4935	2.99	234.49	8222961.4	497805.3	8,720,766.67	192.85	30.69
3.50	12.25	3.460	2292.465	2326.656	4,046,701.02	0.5106	0.7394	1.4483	2.96	231.59	8535603.6	504035.95	9,039,639.58	197.57	31.44
4.00	14.00	3.571	2495.882	2527.504	4,396,031.33	0.5181	0.7319	1.4127	2.93	229.23	8802081.9	509227.57	9,311,309.46	201.54	32.08
4.50	15.75	3.667	2689.412	2718.590	4,728,382.88	0.5244	0.7256	1.3837	2.90	227.26	9033523.5	513652.21	9,547,175.70	204.96	32.62
5.00	17.50	3.751	2874.907	2901.742	5,046,935.80	0.5298	0.7202	1.3595	2.88	225.57	9237567.9	517490.82	9,755,058.75	207.96	33.10
5.50	19.25	3.824	3053.765	3078.342	5,354,091.30	0.5345	0.7155	1.3388	2.86	224.11	9419660.5	520869.01	9,940,529.54	210.61	33.52
6.00	21.00	3.890	3227.066	3249.455	5,651,704.10	0.5386	0.7114	1.3210	2.85	222.82	9583804.3	523877.1	10,107,681.43	212.98	33.90
6.50	22.75	3.949	3395.661	3415.920	5,941,234.14	0.5422	0.7078	1.3054	2.83	221.68	9733019.3	526581.95	10,259,601.23	215.13	34.24
7.00	24.50	4.002	3560.229	3578.410	6,223,849.18	0.5455	0.7045	1.2915	2.82	220.65	9869634.6	529034.26	10,398,668.83	217.09	34.55
7.50	26.25	4.050	3721.322	3737.469	6,500,496.28	0.5485	0.7015	1.2791	2.81	219.72	9995481.1	531273.32	10,526,754.41	218.88	34.84
8.00	28.00	4.094	3879.392	3893.543	6,771,952.80	0.5512	0.6988	1.2679	2.80	218.87	10112022	533330.12	10,645,352.32	220.54	35.10

ตารางที่ ข-4 HC6x30-L4-303

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ชม.)	I_{cr} (ชม. ⁴)	I_e (ชม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ชม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ชม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								4.00	124.80	803791.24	119269.69	923,060.94	86.00	13.69
0.50	1.75	1.844	291.171	774.817	1,768,754.62	0.3949	0.6051	1.5325	2.42	75.52	3627249.4	197094.64	3,824,344.03	225.03	35.81
1.00	3.50	2.382	491.400	931.204	2,125,754.11	0.4216	0.5784	1.3722	2.31	72.19	4153006.7	206191.09	4,359,197.77	245.73	39.11
1.50	5.25	2.726	654.647	1058.707	2,416,817.39	0.4350	0.5650	1.2988	2.26	70.51	4456811.2	211101.07	4,667,912.32	257.30	40.95
2.00	7.00	2.977	795.915	1169.043	2,668,692.65	0.4434	0.5566	1.2552	2.23	69.46	4661634.6	214286.64	4,875,921.22	264.94	42.17
2.50	8.75	3.172	922.424	1267.851	2,894,252.35	0.4493	0.5507	1.2258	2.20	68.73	4812293.5	216570.71	5,028,864.24	270.50	43.05
3.00	10.50	3.329	1038.320	1358.370	3,100,890.11	0.4537	0.5463	1.2042	2.19	68.18	4929547.6	218315.57	5,147,863.19	274.78	43.73
3.50	12.25	3.460	1146.233	1442.654	3,293,293.95	0.4571	0.5429	1.1875	2.17	67.75	5024487.5	219708.2	5,244,195.74	278.22	44.28
4.00	14.00	3.571	1247.941	1522.092	3,474,635.69	0.4600	0.5400	1.1741	2.16	67.40	5103639.2	220855.9	5,324,495.09	281.07	44.73
4.50	15.75	3.667	1344.706	1597.670	3,647,163.54	0.4623	0.5377	1.1630	2.15	67.10	5171122.4	221825.07	5,392,947.47	283.50	45.12
5.00	17.50	3.751	1437.453	1670.109	3,812,528.35	0.4643	0.5357	1.1536	2.14	66.85	5229681.8	222659.26	5,452,341.06	285.59	45.45
5.50	19.25	3.824	1526.882	1739.957	3,971,976.62	0.4661	0.5339	1.1455	2.14	66.63	5281225.5	223388.38	5,504,613.86	287.42	45.74
6.00	21.00	3.890	1613.533	1807.634	4,126,471.15	0.4676	0.5324	1.1385	2.13	66.44	5327126.8	224033.71	5,551,160.51	289.05	46.00
6.50	22.75	3.949	1697.830	1873.474	4,276,769.81	0.4690	0.5310	1.1322	2.12	66.27	5368403.2	224610.85	5,593,014.02	290.51	46.24
7.00	24.50	4.002	1780.114	1937.741	4,423,478.82	0.4702	0.5298	1.1267	2.12	66.12	5405826.8	225131.57	5,630,958.38	291.83	46.45
7.50	26.25	4.050	1860.661	2000.651	4,567,089.80	0.4713	0.5287	1.1216	2.11	65.98	5439996.2	225604.91	5,665,601.15	293.04	46.64
8.00	28.00	4.094	1939.696	2062.381	4,708,006.27	0.4723	0.5277	1.1171	2.11	65.85	5471383.8	226037.98	5,697,421.79	294.14	46.81

ตารางที่ ข-5 HC250-L12-341

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_e (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								12.00	2,772.00	3001989.57	514194.39	3,516,183.96	35.62	5.67
0.50	6.00	1.724	1018.721	1020.543	801,901.39	0.1242	2.8758	23.1488	11.50	2,657.21	3408085.615	536407.01	3,944,492.62	38.53	6.13
1.00	12.00	2.243	1737.252	1738.929	1,366,379.32	0.2001	2.7999	13.9933	11.20	2,587.12	3692671.953	550940.27	4,243,612.23	40.50	6.45
1.50	18.00	2.581	2328.467	2330.024	1,830,837.92	0.2565	2.7435	10.6945	10.97	2,534.97	3925294.956	562274.48	4,487,569.44	42.07	6.70
2.00	24.00	2.830	2842.020	2843.473	2,234,285.46	0.3017	2.6983	8.9430	10.79	2,493.21	4125835.419	571691.29	4,697,526.71	43.41	6.91
2.50	30.00	3.025	3302.343	3303.702	2,595,914.94	0.3395	2.6605	7.8360	10.64	2,458.28	4304204.997	579813.86	4,884,018.86	44.57	7.09
3.00	36.00	3.185	3723.730	3725.004	2,926,956.60	0.3721	2.6279	7.0632	10.51	2,428.22	4466081.115	586993.3	5,053,074.42	45.62	7.26
3.50	42.00	3.319	4115.393	4116.588	3,234,647.08	0.4008	2.5992	6.4858	10.40	2,401.70	4615659.864	593474.7	5,209,134.56	46.57	7.41
4.00	48.00	3.433	4483.655	4484.775	3,523,953.43	0.4263	2.5737	6.0378	10.29	2,378.13	4,754,259.20	599356.51	5,353,615.71	47.45	7.55
4.50	54.00	3.532	4833.055	4834.104	3,798,442.23	0.4497	2.5503	5.6711	10.20	2,356.48	4886513.806	604863.42	5,491,377.22	48.27	7.68
5.00	60.00	3.619	5166.967	5167.948	4,060,763.38	0.4710	2.5290	5.3697	10.12	2,336.81	5010904.793	609952.94	5,620,857.73	49.04	7.81
5.50	66.00	3.696	5487.965	5488.881	4,312,939.42	0.4907	2.5094	5.1143	10.04	2,318.64	5129667.579	614734.17	5,744,401.74	49.77	7.92
6.00	72.00	3.766	5798.058	5798.911	4,556,548.16	0.5090	2.4910	4.8941	9.96	2,301.70	5243741.806	619257.64	5,862,999.45	50.47	8.03
6.50	78.00	3.828	6098.841	6099.632	4,792,842.97	0.5261	2.4739	4.7022	9.90	2,285.87	5353425.799	623545.58	5,976,971.38	51.13	8.14
7.00	84.00	3.884	6391.600	6392.333	5,022,835.01	0.5422	2.4578	4.5326	9.83	2,270.97	5459520.83	627637.84	6,087,158.67	51.77	8.24
7.50	90.00	3.936	6677.389	6678.064	5,247,350.83	0.5575	2.4425	4.3812	9.77	2,256.87	5562489.774	631559.13	6,194,048.91	52.39	8.34
8.00	96.00	3.983	6957.078	6957.695	5,467,073.90	0.5720	2.4280	4.2451	9.71	2,243.51	5662463.707	635320.33	6,297,784.04	52.98	8.43

ตารางที่ ข-6 HC250-L10-428

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_e (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								10.00	2310.00	5187437.97	440738.05	5,628,176.02	49.36	7.86
0.50	6.00	1.724	1018.721	1020.333	801,736.32	0.0876	2.4124	27.5453	9.65	2,229.08	5773167.8	456738.51	6,229,906.33	52.87	8.41
1.00	12.00	2.243	1737.252	1738.735	1,366,227.45	0.1422	2.3578	16.5846	9.43	2,178.63	6183515.8	467313.22	6,650,829.03	55.25	8.79
1.50	18.00	2.581	2328.467	2329.844	1,830,696.92	0.1835	2.3165	12.6269	9.27	2,140.48	6520089.1	475642.61	6,995,731.73	57.17	9.10
2.00	24.00	2.830	2842.020	2843.306	2,234,153.90	0.2168	2.2832	10.5298	9.13	2,109.65	6810173.8	482594.43	7,292,768.22	58.80	9.36
2.50	30.00	3.025	3302.343	3303.546	2,595,791.84	0.2451	2.2549	9.2008	9.02	2,083.55	7069350.7	488640.45	7,557,991.15	60.23	9.59
3.00	36.00	3.185	3723.730	3724.857	2,926,841.25	0.2696	2.2304	8.2733	8.92	2,060.90	7304976.6	494010.13	7,798,986.78	61.52	9.79
3.50	42.00	3.319	4115.393	4116.450	3,234,538.93	0.2914	2.2087	7.5807	8.83	2,040.79	7523020.5	498877.2	8,021,897.68	62.70	9.98
4.00	48.00	3.433	4483.655	4484.645	3,523,852.05	0.3109	2.1891	7.0412	8.76	2,022.73	7726381.4	503332.48	8,229,713.83	63.79	10.15
4.50	54.00	3.532	4833.055	4833.983	3,798,347.26	0.3287	2.1713	6.6053	8.69	2,006.26	7918181.4	507463.4	8,425,644.79	64.80	10.31
5.00	60.00	3.619	5166.967	5167.835	4,060,674.55	0.3452	2.1548	6.2424	8.62	1,991.04	8101137.4	511342.13	8,612,479.48	65.77	10.47
5.50	66.00	3.696	5487.965	5488.775	4,312,856.50	0.3604	2.1396	5.9360	8.56	1,976.95	8275600.8	514986.79	8,790,587.58	66.68	10.61
6.00	72.00	3.766	5798.058	5798.812	4,556,470.93	0.3747	2.1253	5.6727	8.50	1,963.81	8442823.2	518432.4	8,961,255.61	67.55	10.75
6.50	78.00	3.828	6098.841	6099.541	4,792,771.27	0.3881	2.1119	5.4416	8.45	1,951.40	8605040.0	521731.68	9,126,771.65	68.39	10.88
7.00	84.00	3.884	6391.600	6392.248	5,022,768.69	0.4008	2.0993	5.2383	8.40	1,939.71	8761540.2	524875.61	9,286,415.80	69.19	11.01
7.50	90.00	3.936	6677.389	6677.986	5,247,289.76	0.4127	2.0873	5.0574	8.35	1,928.65	8913141.6	527885.63	9,441,027.26	69.97	11.14
8.00	96.00	3.983	6957.078	6957.624	5,467,017.98	0.4242	2.0759	4.8941	8.30	1,918.09	9061185.8	530792.27	9,591,978.11	70.72	11.25

ตารางที่ ข-7 HC250-L9-327

ปริมาณเหล็กเสริม		\bar{y} จาก ขอบล่าง (ซม.)	I_{cr} (ซม. ⁴)	I_e (ซม. ⁴)	$\frac{EI_e}{h}$ (นิวตัน-ม.)	M_2	M_1	$\frac{M_1}{M_2}$	ความ ยาว L_2 (ซม.)	generalized mass : m (กก.)	generalized flexural stiffness k^* (นิวตัน/ม.)	generalized geometric stiffness : k_G^* (นิวตัน/ม.)	generalized stiffness : \bar{k}^* (นิวตัน/ม.)	ความถี่ธรรมชาติ	
เปอร์ เซ็นต์	หน้าตัด เหล็ก (ตร.ซม)													ω (เรเดียน/ วินาที)	f (รอบ/ วินาที)
0.00	0.00								9.00	2079.00	7115827.12	326465.60	7,442,292.74	59.83	9.52
0.50	6.00	1.724	1018.721	1028.961	808,515.83	0.0715	2.1785	30.4597	8.71	2,012.92	7839930.5	337183.54	8,177,114.02	63.74	10.14
1.00	12.00	2.243	1737.252	1746.673	1,372,464.58	0.1166	2.1334	18.3034	8.53	1,971.30	8347023.6	344301.97	8,691,325.59	66.40	10.57
1.50	18.00	2.581	2328.467	2337.214	1,836,487.77	0.1509	2.0991	13.9115	8.40	1,939.58	8763293.4	349932.88	9,113,226.23	68.55	10.91
2.00	24.00	2.830	2842.020	2850.182	2,239,557.09	0.1788	2.0712	11.5839	8.28	1,913.79	9122352.1	354648.32	9,477,000.41	70.37	11.20
2.50	30.00	3.025	3302.343	3309.980	2,600,847.56	0.2026	2.0475	10.1084	8.19	1,891.84	9443500.9	358762.17	9,802,263.12	71.98	11.46
3.00	36.00	3.185	3723.730	3730.886	2,931,578.88	0.2232	2.0268	9.0788	8.11	1,872.73	9735672.8	362424.56	10,098,097.36	73.43	11.69
3.50	42.00	3.319	4115.393	4122.103	3,238,980.92	0.2416	2.0084	8.3121	8.03	1,855.74	10005419	365741.35	10,371,160.31	74.76	11.90
4.00	48.00	3.433	4483.655	4489.945	3,528,016.06	0.2583	1.9917	7.7105	7.97	1,840.32	10259063	368806.19	10,627,869.60	75.99	12.09
4.50	54.00	3.532	4833.055	4838.947	3,802,247.53	0.2735	1.9765	7.2264	7.91	1,826.28	10497577	371642.46	10,869,219.70	77.15	12.28
5.00	60.00	3.619	5166.967	5172.478	4,064,322.76	0.2876	1.9625	6.8247	7.85	1,813.30	10724502	374301.31	11,098,803.48	78.24	12.45
5.50	66.00	3.696	5487.965	5493.110	4,316,262.40	0.3006	1.9494	6.4845	7.80	1,801.23	10941665	376810.89	11,318,476.16	79.27	12.62
6.00	72.00	3.766	5798.058	5802.849	4,559,642.76	0.3129	1.9371	6.1908	7.75	1,789.88	11151077	379199.63	11,530,276.75	80.26	12.77
6.50	78.00	3.828	6098.841	6103.289	4,795,716.06	0.3244	1.9256	5.9352	7.70	1,779.23	11352591	381470.22	11,734,061.68	81.21	12.92
7.00	84.00	3.884	6391.600	6395.715	5,025,492.49	0.3354	1.9146	5.7092	7.66	1,769.13	11548127	383647.89	11,931,775.11	82.12	13.07
7.50	90.00	3.936	6677.389	6681.178	5,249,797.83	0.3458	1.9042	5.5074	7.62	1,759.52	11738373	385743.19	12,124,115.82	83.01	13.21
8.00	96.00	3.983	6957.0776	6960.5472	5,469,314.92	0.3556	1.8944	5.3268	7.58	1,750.40	11922807	387752.98	12,310,560.16	83.86	13.35

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB R12 ในการทำงานดังนี้คือ

1. วิเคราะห์หาสมการการตอบสนองของระบบ
2. วิเคราะห์การตอบสนองของระบบ
3. พล็อตกราฟการตอบสนองของระบบ

การวิเคราะห์หาสมการการตอบสนองของระบบได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 3.8.5 จึงแสดงเฉพาะการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบและการพล็อตกราฟการตอบสนองของระบบเท่านั้น

การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ

การตอบสนองของพื้น PNC-L4-305 เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตจากกิจกรรมการเดิน แอโรบิกและมีการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายคาน 4% สามารถเขียนโปรแกรม MATLAB R12 ได้ดังนี้

```
%name=PNC-L4-305
%load=aero2.1
clear
format long
kp=3.4; % dynamic impact factor from fig. 2.5
G=60*9.81; % weight of one person (Newton)
tp=0.2; % contact duration up to kind of load
dr=0.03; % damping ratio
wn=198.92; % natural frequency up to property of pc slab (rad/sec)
wd=wn*sqrt(1-dr^2); % natural frequency when under damp (rad/sec)
m=91.05; % generalize mass (kg)
dt=0.001; % time varying =>define as you want => find n
% hint dt must give the n in integer
end_t=4;
nn=end_t/dt;
n=tp/dt;
tt(1)=0;
for i=2:n+1;
```

$$tt(i)=tt(i-1)+dt;$$

$$\begin{aligned} \text{disp}(i)= & -tp*kp*G*(-2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*dr*wn*tp^2*\cos(tt(i)*wd)*wd-\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*\sin(tt(i)*wd)*dr^2*wn^2*tp^2-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd)+\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*\sin(tt(i)*wd)*wd^2*tp^2+2*dr*wn*tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd+\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*tp- \\ & tp^3*\sin(pi/tp*tt(i))*wd*dr^2*wn^2-tp^3*\sin(pi/tp*tt(i))*wd^3)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2 \\ & +2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{vel}(i)= & -kp*G*tp*(\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*dr*wn*tp^2*\sin(tt(i)*wd)*wd^2+\text{dr}^3*\text{wn}^3*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*tp^2+ \\ & \text{dr}*\text{wn}*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd)-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt \\ & (i)*dr*wn)*pi*\cos(tt(i)*wd)*wd^3*tp^2-2*dr*wn*tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd+ \quad \cos(pi/tp*tt \\ & (i))*pi^3*wd*tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd*\text{dr}^2*\text{wn}^2-tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd^3) \quad / \\ & (\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp \\ & +wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{acc}(i)= & -kp*G*tp*(-2*\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*\sin(tt(i)*wd)*wd^2-\text{dr}^4*\text{wn}^4 \\ & *\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*tp^2-\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd) \\ & +2*dr*wn*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd) \\ & *wd^2-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*wd^4*tp^2-2*dr*wn*\cos(pi/tp*tt(i))*pi^3*wd-\sin \\ & (pi/tp*tt(i))*pi^4/tp*wd+tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*\text{dr}^2*\text{wn}^2+tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd^3)/ \\ & (\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp \\ & +wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

end

% under damp free vibration

$$r=\text{sqrt}(((\text{vel}(n+1)+\text{disp}(n+1)*dr*wn)/wd)^2+\text{disp}(n+1)^2);$$

$$q=\text{atan}((\text{vel}(n+1)+\text{disp}(n+1))/(wd*\text{disp}(n+1)));$$

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

%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('P4_305disp_aero40.txt','w');

```

```

fid2=fopen('P4_305vel_aero40.txt','w');
fid3=fopen('P4_305acc_aero40.txt','w');

for i=2:nn+1;
    fprintf(fid1,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),disp(i));
    fprintf(fid2,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),vel(i));
    fprintf(fid3,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),acc(i));
end
fclose('all');

```

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ กราฟการตอบสนองของระบบ และไฟล์ผลการวิเคราะห์ (output data) ซึ่งประกอบด้วย 1. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา 2. ความเร็วกับเวลา 3. ความเร่งกับเวลา

ตัวอย่างพื้นตัวอื่นก็สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. เปลี่ยนตัวอย่างพื้น ทำโดยการเปลี่ยน name และเปลี่ยนคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยการเปลี่ยนค่า w_n และ m
2. เปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกพลวัต โดยการเปลี่ยนค่า k_p และ t_p
3. เปลี่ยนชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนชื่อในคำสั่ง `fopen` ในเครื่องหมาย ' ' คู่แรก

การพล็อตกราฟการตอบสนองของระบบ

การพล็อตกราฟของพื้น PNC-L4-305 เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมการเดินแอโรบิกและมีการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายคาน 0% และ 4% โดยพล็อตแยกเป็น 2 กราฟคือ 1. กราฟการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา และ 2. กราฟความเร่งกับเวลา สามารถเขียนโปรแกรม MATLAB R12 ได้ดังนี้

```

%compared between 0 and 4%
%PNC-L4-305
load PL4_305disp_aero0.txt
load P4_305disp_aero40.txt

```

```

load PL4_305acc_aero0.txt
load P4_305acc_aero40.txt

disp1=PL4_305disp_aero0;
disp2=P4_305disp_aero40;

acc1=PL4_305acc_aero0;
acc2=P4_305acc_aero40;

t=disp1(:,1);
d1=disp1(:,2);
d2=disp2(:,2);

figure(1),plot(t,d1,'g-',t,d2,'b-');
axis([0 2.0 -0.0010 0.0060]); xlabel('เวลา(วินาที)');ylabel('การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง(ม.)');
title('การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา');

figure(2),plot(acc1(:,1),acc1(:,2),'g-',acc2(:,1),acc2(:,2),'b-');
axis([0 2.0 -4.000 4.000]); xlabel('เวลา(วินาที)');ylabel('ความเร่ง(ม./วินาที^2)');
title('ความเร่งกับเวลา');

```

ในส่วนนี้จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา และความเร่งกับเวลา ซึ่งแต่ละกราฟจะพล็อตเปรียบเทียบระหว่างการไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จุดรองรับ 4% การพล็อตกราฟอื่นๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์ในคำสั่ง load สำหรับชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์เรียงลำดับดังนี้ 1. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อไม่มีการเสริมเหล็ก 2. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อมีการเสริมเหล็ก 4% 3. ความเร่งเมื่อไม่มีการเสริมเหล็ก 4. ความเร่งเมื่อมีการเสริมเหล็ก 4%

นอกจากนี้ยังสามารถพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้โดยใช้ไฟล์ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการตอบสนองที่ได้ในตอนต้น

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB R12 ในการทำงานดังนี้คือ

1. วิเคราะห์หาสมการการตอบสนองของระบบ
2. วิเคราะห์การตอบสนองของระบบ
3. พล็อตกราฟการตอบสนองของระบบ

การวิเคราะห์หาสมการการตอบสนองของระบบได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 3.8.5 จึงแสดงเฉพาะการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบและการพล็อตกราฟการตอบสนองของระบบเท่านั้น

การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ

การตอบสนองของพื้น PNC-L4-305 เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตจากกิจกรรมการเดิน แอโรบิกและมีการเสริมเหล็กที่จุดรองรับปลายคาน 4% สามารถเขียนโปรแกรม MATLAB R12 ได้ดังนี้

```
%name=PNC-L4-305
%load=aero2.1
clear
format long
kp=3.4; % dynamic impact factor from fig. 2.5
G=60*9.81; % weight of one person (Newton)
tp=0.2; % contact duration up to kind of load
dr=0.03; % damping ratio
wn=198.92; % natural frequency up to property of pc slab (rad/sec)
wd=wn*sqrt(1-dr^2); % natural frequency when under damp (rad/sec)
m=91.05; % generalize mass (kg)
dt=0.001; % time varying =>define as you want => find n
% hint dt must give the n in integer

end_t=4;
nn=end_t/dt;
n=tp/dt;
tt(1)=0;
for i=2:n+1;
```

$$tt(i)=tt(i-1)+dt;$$

$$\begin{aligned} \text{disp}(i)= & -tp*kp*G*(-2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*dr*wn*tp^2*\cos(tt(i)*wd)*wd-\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*\sin(tt(i)*wd)*dr^2*wn^2*tp^2-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd)+\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*\sin(tt(i)*wd)*wd^2*tp^2+2*dr*wn*tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd+\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*tp- \\ & tp^3*\sin(pi/tp*tt(i))*wd*dr^2*wn^2-tp^3*\sin(pi/tp*tt(i))*wd^3)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2 \\ & +2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{vel}(i)= & -kp*G*tp*(\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt(i)*dr*wn) \\ & *pi*dr*wn*tp^2*\sin(tt(i)*wd)*wd^2+\text{dr}^3*\text{wn}^3*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*tp^2+ \\ & \text{dr}*\text{wn}*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd)-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt \\ & (i)*dr*wn)*pi*\cos(tt(i)*wd)*wd^3*tp^2-2*dr*wn*tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd+ \quad \cos(pi/tp*tt \\ & (i))*pi^3*wd*tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd*\text{dr}^2*\text{wn}^2-tp^2*\cos(pi/tp*tt(i))*pi*wd^3) \quad / \\ & (\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp \\ & +wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{acc}(i)= & -kp*G*tp*(-2*\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*tp^2*\sin(tt(i)*wd)*wd^2-\text{dr}^4*\text{wn}^4 \\ & *\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*tp^2-\text{dr}^2*\text{wn}^2*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd) \\ & +2*dr*wn*\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\cos(tt(i)*wd)*wd+\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi^3*\sin(tt(i)*wd) \\ & *wd^2-\exp(-tt(i)*dr*wn)*pi*\sin(tt(i)*wd)*wd^4*tp^2-2*dr*wn*\cos(pi/tp*tt(i))*pi^3*wd-\sin \\ & (pi/tp*tt(i))*pi^4/tp*wd+tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd*\text{dr}^2*\text{wn}^2+tp*\sin(pi/tp*tt(i))*pi^2*wd^3)/ \\ & (\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2+2*pi*wd*tp+wd^2*tp^2)/(\text{dr}^2*\text{wn}^2*tp^2+pi^2-2*pi*wd*tp \\ & +wd^2*tp^2)/m/wd; \end{aligned}$$

end

% under damp free vibration

$$r=\text{sqrt}(((\text{vel}(n+1)+\text{disp}(n+1)*dr*wn)/wd)^2+\text{disp}(n+1)^2);$$

$$q=\text{atan}((\text{vel}(n+1)+\text{disp}(n+1))/(wd*\text{disp}(n+1)));$$

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

%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('P4_305disp_aero40.txt','w');

```



```

fid2=fopen('P4_305vel_aero40.txt','w');
fid3=fopen('P4_305acc_aero40.txt','w');

for i=2:nn+1;
    fprintf(fid1,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),disp(i));
    fprintf(fid2,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),vel(i));
    fprintf(fid3,'%8.4f\t%12.10f\n',tt(i),acc(i));
end
fclose('all');

```

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ กราฟการตอบสนองของระบบ และไฟล์ผลการวิเคราะห์ (output data) ซึ่งประกอบด้วย 1. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา 2. ความเร็วกับเวลา 3. ความเร่งกับเวลา

ตัวอย่างพื้นตัวอื่นก็สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. เปลี่ยนตัวอย่างพื้น ทำโดยการเปลี่ยน name และเปลี่ยนคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยการเปลี่ยนค่า w_n และ m
2. เปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกพลวัต โดยการเปลี่ยนค่า k_p และ t_p
3. เปลี่ยนชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนชื่อในคำสั่ง `fopen` ในเครื่องหมาย ' ' คู่แรก

การพล็อตกราฟการตอบสนองของระบบ

การพล็อตกราฟของพื้น PNC-L4-305 เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกพลวัตจากกิจกรรมการเดินแอโรบิกและมีการเสริมเหล็กที่จู่รองรับปลายคาน 0% และ 4% โดยพล็อตแยกเป็น 2 กราฟคือ 1. กราฟการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา และ 2. กราฟความเร่งกับเวลา สามารถเขียนโปรแกรม MATLAB R12 ได้ดังนี้

```

%compared between 0 and 4%
%PNC-L4-305
load PL4_305disp_aero0.txt
load P4_305disp_aero40.txt

```

```

load PL4_305acc_aero0.txt
load P4_305acc_aero40.txt

disp1=PL4_305disp_aero0;
disp2=P4_305disp_aero40;

acc1=PL4_305acc_aero0;
acc2=P4_305acc_aero40;

t=disp1(:,1);
d1=disp1(:,2);
d2=disp2(:,2);

figure(1),plot(t,d1,'g-',t,d2,'b-');
axis([0 2.0 -0.0010 0.0060]); xlabel('เวลา(วินาที)');ylabel('การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง(ม.)');
title('การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา');

figure(2),plot(acc1(:,1),acc1(:,2),'g-',acc2(:,1),acc2(:,2),'b-');
axis([0 2.0 -4.000 4.000]); xlabel('เวลา(วินาที)');ylabel('ความเร่ง(ม./วินาที^2)');
title('ความเร่งกับเวลา');

```

ในส่วนนี้จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับเวลา และความเร่งกับเวลา ซึ่งแต่ละกราฟจะพล็อตเปรียบเทียบระหว่างการไม่เสริมเหล็กและเสริมเหล็กที่จูดรองรับ 4% การพล็อตกราฟอื่นๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์ในคำสั่ง load สำหรับชื่อไฟล์ผลการวิเคราะห์เรียงลำดับดังนี้ 1. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อไม่มีการเสริมเหล็ก 2. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อมีการเสริมเหล็ก 4% 3. ความเร่งเมื่อไม่มีการเสริมเหล็ก 4. ความเร่งเมื่อมีการเสริมเหล็ก 4%

นอกจากนี้ยังสามารถพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้โดยใช้ไฟล์ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการตอบสนองที่ได้ในตอนต้น

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรพิไล กิติรัตน์ตระการ เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน 2518 เป็นคนจังหวัด นครราชสีมาโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ โยธา) จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2539 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในบริษัทรับเหมาก่อสร้างในตำแหน่งวิศวกรเป็นเวลาเกือบ 2 ปี ต่อจากนั้นได้เข้าทำงานทางสายงานวิชาการในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยเป็นเวลา 2 ปี หลังจากนั้นได้รับทุนพัฒนาอาจารย์จากทบวงมหาวิทยาลัยเพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและปริญญาเอก หลังจากศึกษาจบแล้วจึงกลับเข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี