



รายงานการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นเนื่องจากการเคลื่อนไหวน้ำหนักของแรง

The Investigation of Floor Vibration Subjected to Moving Loads

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ
กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ร่วมวิจัย

Emad A.M. EL-Dardiry
ฤกษ์ชัย ศรีวรรณ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หมวดเงินอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2546

รหัสโครงการ : 05011642-0001

ISBN 974-609-224-3



A Research Report

The Investigation of Floor Vibration Subjected to Moving Loads

Researchers

Head of Project

Kittisak Kuntiyawichai

Faculty of Engineering

Ubonratchathani University

Co-researchers

Emad A.M. EL-Dardiry

Rerkchai Srivoramart

This Research was Financially Supported from The National Research Council of Thailand

In Fiscal Year, 2003

Research Code : 05011642-0001

ISBN 974-609-224-3

รายงานการวิจัยเรื่อง	การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นเนื่องจากการเคลื่อนไหวของแรง	
หัวหน้าโครงการวิจัย	นายกิตติศักดิ์	ชั้นดุษฎี
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	Mr. Emad A.M.	EL-Dardiry
	นายฤกษ์ชัย	ศรีวรรณ
คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	
ปีงบประมาณ	2546	
งบประมาณที่ได้รับ	92,400.- บาท	
คำสำคัญ	การตอบสนองทางพลศาสตร์, แผ่นพื้นคอนกรีต, การเคลื่อนไหวของมนุษย์, ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข	

บทคัดย่อ

รายงานการวิจัยฉบับนี้นำเสนอพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นภายใต้การเดินและการกระโดดของมนุษย์ โดยในรายงานการวิจัยจะประกอบด้วยการทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์โครงสร้างและผลกระทบต่อโครงสร้าง รวมทั้งกล่าวถึงเทคนิคการจำลองการเดินและการกระโดดของมนุษย์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Finite Element, FE) ของแบบจำลองของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ สำหรับการศึกษาได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ JL Analyzer ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งรายงานการวิจัยฉบับนี้จะพิจารณาถึงลักษณะแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากการเดินพื้นและแรงที่เกิดจากการกระโดดบนพื้น โดยศึกษาผลของจำนวนคนและความเร็วของการเดินต่อการสั่นของแผ่นพื้น รวมทั้งศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสั่นของแผ่นพื้นอันได้แก่ ความหนาของแผ่นพื้น ลักษณะที่รองรับของแผ่นพื้น และความหน่วงของแผ่นพื้น ในธรรมชาติพื้นจะมีความถี่ของตัวเองค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าความถี่ธรรมชาติ เมื่อพื้นเกิดการสั่นการสั่นที่เกิดภายนอกจะไปรบกวนความถี่ธรรมชาติแม้เพียงหนึ่งในสามของความถี่ธรรมชาติ จะทำให้เกิดการสั่นที่รุนแรงจนนำไปสู่การวิบัติของพื้น จากการศึกษาพบว่าความหนาของพื้นและความหน่วงของพื้นมีส่วนในการช่วยลดผลจากการสั่นบนแผ่นพื้นได้มาก โดยผลการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นที่มีนัยที่สำคัญต่างกัน โดยจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นในรายงานการวิจัยฉบับนี้ ซึ่งในตอนท้ายของรายงานการวิจัยฉบับนี้ได้ทำการสรุปและวิจารณ์อันจะนำไปสู่แนวทางในการออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงและลดปัญหาที่เกิดจากการสั่นของพื้นต่อไป

Project Title	The Investigation of Floor Vibration Subjected to Moving Loads	
Head of Project	Mr. Kittisak	Kuntiyawichai
Co-researchers	Mr. Emad A.M.	EL-Dardiry
	Mr. Rerkchai	Srivoramart
Faculty of Engineering,	Ubonratchathani University	
In Finance Year	2003 for 92,400.- Bath	
Keyword	Dynamic response, Concrete floor, Human walking, Finite element analysis	

Abstract

The main purpose of this research work is to investigate the vibration behaviour of long-span flat concrete floor subjected to human movement, i.e. walking and jumping. Literature concerned about dynamic behaviour of structure and its effect are described. The modelling techniques of human movement on long-span flat concrete floor are described and discussed in details for finite element analysis. A series of finite element analyses have been carried out using JLANalyzer finite element software. Influential parameters on dynamic response of the floor including the number of people walking and jumping on the floor such as walking frequency, jumping frequency, damping ratio, floor thickness and support condition are investigated. The results show that each parameter has a different level on the effect of floor response which is compared in this report. Finally, the methods for avoiding floor vibration problem are introduced in this study.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ในการทำวิจัย และให้การสนับสนุนในการร่วมเสนอผลงานวิจัยอันเกิดจากงานวิจัยชิ้นนี้ ถึง 3 แห่ง คือ

- K. Kuntiyawichai, N. Sangtian, 2002, “Finite element study of long-span flat concrete floor subjected to walking load”, International Conference on Structural Stability and Dynamics 2002 at Singapore, pp. 522-527.
- K. Kuntiyawichai, N. Sangtian, S. Kanarkard, 2002, “Dynamic behaviour of long-span flat concrete floor due to walking load”, The 8th National Convention on Civil Engineering 2002 at Khon Kaen, pp. STR124-129
- S. Nilrat, W. Puatatsananon, K. Kuntiyawichai, 2004, “Vibration behaviour of long-span flat concrete floor subjected to human walking”, The 9th National Convention on Civil Engineering 2003 at Cha-um, Petchaburi, pp. STR78-83

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2546

คณะผู้วิจัย
พฤษภาคม 2547

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	2
1.5 ระเบียบวิจัย	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการโดยทั่วไป	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2.1 วิเคราะห์ศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับ Floor vibration	5
2.2.2 ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาปัญหาการสั่นของโครงสร้าง	7
2.2.3 ปัญหาการสั่นของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่	9
2.2.4 VIBRATION LIMIT STATE - ACCELERATION LIMITS	15
2.2.5 การตอบสนอง	16
2.2.6 การเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	18
3.1 คุณสมบัติของแผ่นพื้นที่ทำการศึกษา	18
3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา	19
3.2.1 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่าง	19
3.2.2 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (1 คน)	20
3.2.3 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (มากกว่า 1 คน)	24
3.2.4 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำแบบกระโดด	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษา	26
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้น	25
4.2 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (1 คน)	30
4.3 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (2 คน)	35
4.4 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (4 คน)	41
4.5 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (6 คน)	47
4.6 ผลการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นขนาดใหญ่ภายใต้น้ำหนักที่เกิดจากการกระโดด	52
4.6.1 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 1 คน	53
4.6.2 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 2 คน	57
4.6.3 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 4 คน	61
4.6.4 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 6 คน	65
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 เปรียบเทียบค่าสูงสุดของการเดินแต่ละความถี่เมื่อมีเงื่อนไขของจำนวนคนที่แตกต่างกัน	71
บรรณานุกรม	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 Suggested dynamic load factors (DLFs) โดย Allen (1990)	15
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ	20
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้น ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (1 คน)	22
ตารางที่ 4.1 ความถี่ธรรมชาติของพื้นที่มีที่รองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบง่าย	28
ตารางที่ 4.2 ความถี่ธรรมชาติของพื้นที่มีที่รองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบยึดแน่น	30
ตารางที่ 4.3 Finite element results of simply supported floor under walking load	34
ตารางที่ 4.4 Finite element results of fixed supported floor under walking load	35
ตารางที่ 4.5 Finite element results of simply supported floor under walking load (2 คน)	38
ตารางที่ 4.6 Finite element results of simply supported floor under walking load 2 คน (สถมภ์)	39
ตารางที่ 4.7 Finite element results of simply supported floor under walking load 2 คน (เรียงหน้ากระดาน)	40
ตารางที่ 4.8 Finite element results of fixed supported floor under walking load 2 คน (สถมภ์)	41
ตารางที่ 4.9 Finite element results of simply supported floor under walking load 4 คนเรียงสอง	44
ตารางที่ 4.10 Finite element results of simply supported floor under walking load 4 คนเดินเรียงหน้ากระดาน	45
ตารางที่ 4.11 Finite element results of fixed supported floor under walking load 4 คนเรียงสอง	46
ตารางที่ 4.12 Finite element results of fixed supported floor under walking load 4 คนเรียงหน้ากระดาน	46
ตารางที่ 4.13 Finite element results of simply supported floor under walking load 6 คนเดินเรียงหน้ากระดาน	49
ตารางที่ 4.14 Finite element results of simply supported floor under walking load 6 คนเดินเรียงหน้ากระดานสามแถว (สถมภ์)	50

	หน้า
ตารางที่ 4.15 Finite element results of fixed supported floor under walking load 6 เดินเรียงคนหน้ากระดาน	51
ตารางที่ 4.16 Finite element results of fixed supported floor under walking load 6 คนเรียงสามสองแถว(สดมภ์)	51
ตารางที่ 4.17 Finite element results โดยคน 1 คน ความถี่ 1.87 เฮิรตซ์	54
ตารางที่ 4.18 Finite element results โดยคน 1 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์	55
ตารางที่ 4.19 Finite element results โดยคน 1 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์	57
ตารางที่ 4.20 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์	59
ตารางที่ 4.21 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์	60
ตารางที่ 4.22 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์	61
ตารางที่ 4.23 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์	63
ตารางที่ 4.24 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์	64
ตารางที่ 4.25 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์	65
ตารางที่ 4.26 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์	67
ตารางที่ 4.27 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์	68
ตารางที่ 4.28 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์	69
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการเดินในแต่ละแบบที่ รองรับแบบง่าย	71
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการเดินในแต่ละแบบที่ รองรับแบบยึดแน่น	71
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการกระโดดในแต่ละแบบ ที่รองรับแบบง่าย	72
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการกระโดดในแต่ละแบบ ที่รองรับแบบยึดแน่น	72

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 คาบและแอมพลิจูดการสั่น	6
รูปที่ 2.2 ผลของความหน่วง	7
รูปที่ 2.3 Reiher – Meister scale	10
รูปที่ 2.4 Allen's recommended acceleration limits for walking load	12
รูปที่ 2.5 แรงที่เกิดขึ้นบนพื้นเมื่อเดินแบบ Normal Walking load, Bachmann(1987)	13
รูปที่ 2.6 แรงที่เกิดขึ้นบนพื้นเมื่อเดินแบบ Slow Walking load, Mouring (1994)	14
รูปที่ 2.7 แรงที่เกิดขึ้นบนพื้นเมื่อเดินแบบ Brisk Walking load, Mouring (1994)	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเดินของมนุษย์โดยทั่วไป	14
รูปที่ 2.9 ลักษณะการแกว่งแบบ Simple Harmonic	17
รูปที่ 3.1 ขนาดของแผ่นพื้น	18
รูปที่ 3.2 Finite Element model of long-span flat concrete floor	19
รูปที่ 3.3 แผนภาพของแรงในลักษณะต่าง ๆ	21
รูปที่ 3.4 ลักษณะการเดินแบบหน้ากระดาน	24
รูปที่ 3.5 ลักษณะการเดินแบบสดมภ์	24
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากกระโดด	25
รูปที่ 3.7 ความถี่ในการกระโดดบนพื้น	25
รูปที่ 4.1 Mode shape ของการสั่น (พื้นหนา 0.24 เมตร, simply supported)	27
รูปที่ 4.2 Mode shape ของการสั่น (พื้นหนา 0.24 เมตร, fixed supported)	29
รูปที่ 4.3 การแอ่นตัวเนื่องจากคน 1 คน เดินด้วยความถี่ในการก้าว=2.0 เฮิรตซ์	31
รูปที่ 4.4 ความเร่งเนื่องจากคน 1 คน เดินด้วยความถี่ในการก้าว=2.0 เฮิรตซ์	31
รูปที่ 4.5 Displacement Spectrum ของรูปที่ 4.3	32
รูปที่ 4.6 Acceleration Spectrum ของรูปที่ 4.4	33
รูปที่ 4.7 แรงที่กระทำบนแผ่นพื้นจากการเดินแบบหน้ากระดาน	36
รูปที่ 4.8 แรงที่กระทำบนแผ่นพื้นจากการเดินสดมภ์	36
รูปที่ 4.9 Displacement time history เดินเรียงหน้ากระดาน	37
รูปที่ 4.10 Acceleration time history เดินเรียงหน้ากระดาน	37
รูปที่ 4.11 Acceleration time history เดินแบบสดมภ์	38
รูปที่ 4.12 Acceleration time history เดินแบบสดมภ์	39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 แรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากการเดิน 4 คน เรียงหน้า กระดาน	42
รูปที่ 4.14 แรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากการเดิน 4 คน เรียงสอง (สดมภ์)	42
รูปที่ 4.15 Displacement time history ของ Walking load 4คน	43
รูปที่ 4.16 Acceleration time history ของ Walking load 4 คน	43
รูปที่ 4.17 แรงกระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากการเดินแบบ 6 คนเรียงหน้ากระดาน	47
รูปที่ 4.18 แรงกระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากการเดินแบบ 6 คนเดินแบบสดมภ์	48
รูปที่ 4.19 Displacement time history ของ Walking load แบบ 6 คนเดิน	48
รูปที่ 4.20 Acceleration time history ของ Walking load แบบ 6 คนเดิน	49
รูปที่ 4.21 แรงกระทำโดยคน 1 คนกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่าง	53
รูปที่ 4.22 Displacement time history ความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ที่รองรับแบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร	54
รูปที่ 4.23 Acceleration time history ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ที่รองรับแบบยึดแน่น ความหนา 0.24 เมตร	55
รูปที่ 4.24 Acceleration time history ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ที่รองรับแบบง่าย ความหนา 0.28 เมตร	56
รูปที่ 4.25 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 2 คน	57
รูปที่ 4.26 Acceleration time history 2 คนความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร	58
รูปที่ 4.27 Acceleration time history 2 คนความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบยึดแน่น ความหนา 0.24 เมตร	59
รูปที่ 4.28 Acceleration time history 2 คนความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร	60
รูปที่ 4.29 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 4 คน	61
รูปที่ 4.30 Acceleration time history 4 คนความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร	62
รูปที่ 4.31 Displacement time history 4 คนความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร	63

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32 Displacement time history 4 คนความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบง่าย ความหนา 0.28 เมตร	64
รูปที่ 4.33 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 6 คน	66
รูปที่ 4.34 Acceleration time history 6 คนความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร	66
รูปที่ 4.35 Acceleration time history 6 คนความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร	67
รูปที่ 4.36 Displacement time history 6 คนความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ที่รองรับ แบบยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัญหาการใช้อาคารผิดประเภทนับว่าเป็นปัญหาใหญ่สำหรับวิศวกรผู้ออกแบบอาคารและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้อาคารโดยตรง ซึ่งโดยปกติอาคารจะมีการสั่นอยู่ในตัวเองแล้ว ดังนั้นเมื่อมีแรงที่กระทำจากการเดินไปมาภายในอาคารรวมทั้งมีการใช้อาคารที่ผิดประเภทแล้วก็อาจทำให้เกิดการสั่นที่ความถี่อยู่นอกเหนือการพิจารณาในออกแบบได้

โดยปกติแล้วการออกแบบโครงสร้างทั่วไปนั้นน้ำหนักจร(Live Load) ที่มีระดับปานกลางเท่านั้นจะถูกพิจารณา ทำให้มีข้อเสียคือมิได้คำนึงถึงผลจากผลทางพลวัต(Dynamic Effect) ที่มีต่อโครงสร้างนั้น ตัวอย่างอาคารที่มีการเคลื่อนไหวมาก ๆ เช่น ศูนย์การค้า สถานที่ออกกำลังกาย ลานแสดงดนตรี (concert hall) เป็นต้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ความรุนแรงจะยังไม่รุนแรงจนกระทั่งเกิดการสั่นที่ชัดเจนเช่นเดียวกับแผ่นดินไหว แต่ถ้ามการสั่นเป็นการสั่นที่สะสมจนกลายเป็นความล้าที่อาคารรับสะสมอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อาคารมีการสั่นขนาดเล็ก โดยผลของแรงประเภทนี้จะส่งผลกระทบต่อจิตใจของผู้ที่อยู่อาศัยภายในอาคาร ทำให้เกิดความรำคาญ สูญเสียสมาธิในการทำงาน และเมื่อถึงจุดหนึ่งอาจเกิดอันตรายกับตัวอาคารหรือผู้อยู่อาศัยได้

ดังนั้นการสั่นที่เกิดจากกิจกรรมมนุษย์จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงในการออกแบบ ซึ่งปัญหาที่พบได้เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์คืออาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีซึ่งใช้เป็นที่จัดกิจกรรมรับน้องใหม่เป็นประจำทุกปีโดยที่พื้นจะเกิดการสั่นไหวจนผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงรู้สึกได้ สืบเนื่องจากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของแผ่นพื้นกับลักษณะของแรงที่มากระทำเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในงานวิจัยนี้ โดยที่เทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Technique) ซึ่งใช้มากในงานวิศวกรรมนั้นจะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองของแผ่นพื้นภายใต้จุดรองรับต่างๆจะถูกสร้างขึ้นพร้อมกับการประยุกต์แรงเคลื่อนที่ (Moving Load) เข้าไปในโมเดลของแผ่นพื้นนั้นโดยที่อัตราเร็วในการเดินหรือวิ่งจะเป็นตัวแปรหลักในการพิจารณา ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์และเป็นข้อแนะนำแก่วิศวกรโครงสร้างโดยทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นภายใต้จตุรรองรับต่าง ๆ
2. เพื่อสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นภายใต้การเคลื่อนไหวของมนุษย์
3. เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและใช้เป็นข้อเสนอแนะที่สำคัญและควรคำนึงถึงแก่วิศวกรโครงสร้าง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองแผ่นพื้น (Mesh Model)
2. กำหนดค่าสภาวะเงื่อนไขการรองรับต่าง ๆ โดยคำนึงถึงการรับน้ำหนักเชิงพลวัต (Dynamic Response) ของแผ่นพื้นภายใต้ น้ำหนักที่เคลื่อนที่ชนิดต่าง ๆ
3. ทำการจำลองการสั่นโดยใช้โปรแกรมที่ใช้สำหรับแบบจำลองของแผ่นพื้นที่มีการกำหนดสภาวะเงื่อนไขของจตุรรองรับแล้ว
4. หาวิธีในอันที่จะลดผลกระทบที่ตามมาอันเนื่องมาจากการสั่น

1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

1. จัดเตรียมแบบจำลองแผ่นพื้น
2. วิเคราะห์พฤติกรรมแผ่นพื้นทั้งคุณสมบัติกลศาสตร์และการตอบสนองต่อแรงกระทำจากการเดิน หนึ่งคน
3. วิเคราะห์พฤติกรรมแผ่นพื้นทั้งคุณสมบัติกลศาสตร์และการตอบสนองต่อแรงกระทำจากการเดินเป็นกลุ่มและการกระโดด
4. เปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างผลการตอบสนองทั้งแบบหนึ่งคนและแบบกลุ่ม

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1. วิธีการเก็บข้อมูล
เก็บข้อมูลและศึกษาข้อมูลของแผ่นพื้นชนิดต่าง ๆ ที่มีแรงที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสั่นของแผ่นพื้น และข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ
2. การวิเคราะห์การสั่นของแผ่นพื้นโดยใช้ Finite Element Method (FEM)
สร้างแบบจำลองของปัญหา (Mesh Model) กำหนดสภาวะเงื่อนไขของปัญหา (Boundary Condition) เปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสั่นของแผ่นพื้น เช่น จตุรรองรับของแผ่นพื้น ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

3. การวิเคราะห์และสรุปผลการทำวิจัย

วิเคราะห์การสั่นของแผ่นพื้นและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ เปรียบเทียบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสั่นของแผ่นพื้น

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลพฤติกรรมของแผ่นพื้นภายใต้การเคลื่อนไหวของมนุษย์งานวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถที่จะนำไปเป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างที่มีแผ่นพื้นขนาดใหญ่ นอกจากนี้แบบจำลองที่ใช้ในงานนี้สามารถนำมาเป็นแบบในการค้นคว้าอย่างต่อเนื่องโดยมีต้นทุนที่ต่ำ
2. สามารถนำเทคโนโลยีการจำลองและวิเคราะห์ Finite Element ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยและใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศเข้ามาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทย

บทที่ 2

ทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการโดยทั่วไป

ปัจจุบันปัญหาการสั่นในอาคารได้กลายเป็นปัญหาที่มีความสำคัญในงานวิศวกรรมโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น การใช้วัสดุที่มีสามารถรับแรงได้มากขึ้น ก่อปรกับการออกแบบโครงสร้างที่สลับซับซ้อน ส่งผลให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาและง่ายต่อการเกิดปัญหาการสั่นไหวภายในอาคาร งานวิจัยฉบับนี้จะได้ทำการนำเสนอสาเหตุของการสั่นที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง รวมทั้งวิธีการในการแก้ไขและหลีกเลี่ยงการสั่นดังกล่าว เพื่อที่จะลดขนาดของการสั่นลง โดยที่ผลการศึกษาจะนำมาสู่การจำแนกพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นภายใต้กิจกรรมของมนุษย์ภายในองค์อาคารเช่น เดิน วิ่ง เต้นแอโรบิค เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสั่นขององค์อาคารสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายนอกและการสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายใน การสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายในส่วนใหญ่เกิดขึ้นจาก การทำงานของเครื่องจักรกลภายในอาคาร เช่น เครื่อง ล้อเลื่อน ลิฟต์ พัดลม ปัม เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น เดิน กระโดด วิ่ง เต้นรำ ส่วนการสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายนอกโดยทั่วไปมักเกิดจากการจราจรไปมาของรถบนท้องถนน ใต้ดิน การก่อสร้างต่างๆ (การตอกเสาเข็ม การระเบิดอุโมงค์ การบดอัดดิน) ลมกรรโชกแรงและแผ่นดินไหว ซึ่งผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ผู้อยู่อาศัยในอาคารเกิดรู้สึกรำคาญ แต่ที่ร้ายที่สุดคือทำให้องค์อาคารเสียหายได้

ปัญหาการสั่นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากความพยายามที่จะออกแบบและก่อสร้างอาคารให้มีความประหยัดและมีประสิทธิภาพในการใช้งานอย่างสูงสุดอีกทั้งการที่มีเทคโนโลยีใหม่เข้ามาช่วยในงานออกแบบต่างๆ ทำให้การออกแบบอาคารมีความสะดวกและรวดเร็วขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากการใช้แผ่นพื้นที่มีความยาวมากขึ้น การทำให้ระบบพื้นคอนกรีตมีน้ำหนักที่ลดลงซึ่งเป็นการลดความหน่วงของแผ่นพื้นก็ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ก่อให้เกิดการสั่นไหวของระบบพื้นภายในอาคารอื่นเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ภายในอาคาร เช่น เดิน วิ่ง เต้นแอโรบิค เป็นต้น ซึ่งการสั่นไหวดังกล่าวส่งผลกระทบต่อผู้อยู่อาศัยจนทำให้เกิดความรำคาญ โดยทั่วไปปัญหานี้มักถูกมองข้ามในขั้นตอนการออกแบบ แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างแพร่หลายในการที่จะศึกษาถึงสาเหตุและแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยได้ทำการทดลองแบบเสมือนจริงในอาคาร ซึ่งการทดลองในลักษณะนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องมือวัด จุดนี้ผู้วิจัยจึงได้เกิดแนวคิดในการที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมของแผ่นพื้นโดยใช้วิธีการคำนวณ

เชิงตัวเลขในการศึกษา ดังนั้นเป้าหมายหลักในการศึกษาในครั้งนี้เพื่อที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ที่ถูกกระทำโดยแรงที่เกิดจากการเดิน (Walking load) แบบต่างๆ เช่น เดินอย่างช้าๆ (Slow walking load) การเดินธรรมดา (Normal walking load) และการเดินอย่างรวดเร็ว (Brisk walking load) รวมไปถึงการกระโดดด้วยความถี่ที่ต่างกัน เป็นต้น สำหรับการศึกษาถึงแนวทางแก้ไขปัญหาการสั่นไหวก็ได้คำนึงถึงปัจจัยหลายประการ เช่น ความหนาของแผ่นพื้น จุดรองรับของแผ่นพื้น เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 วิเคราะห์ศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับ Floor vibration

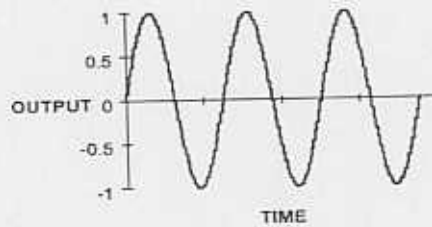
ในการศึกษาเกี่ยวกับวิชาในสาขากลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural Dynamics) ได้มีการบัญญัติศัพท์วิชาการเฉพาะ ซึ่งศัพท์ดังกล่าวมักไม่ได้ถูกกล่าวถึงบ่อยนักในสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering) ดังนั้นเนื้อหาส่วนแรกจะเป็นการอธิบายศัพท์วิชาการเฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การสั่นของแผ่นพื้น (Floor vibrations) ส่วนใหญ่มักเกิดจากการกระทำของคนหรือเครื่องจักร โดยที่การสั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

- ◆ Transient vibration จะมีลักษณะของการสั่นที่ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งการสั่นนั้นหมดไปเมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่ง การสั่นชนิดนี้มักเกิดจากแรงกระแทก (Impact force) เช่น การเดิน เป็นต้น
- ◆ Steady-state vibration จะมีลักษณะการสั่นแบบสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาที่แรงกระทำ การสั่นชนิดนี้มักเกิดจากเครื่องจักร (Rotating machinery) หรือ คนกระโดดตามจังหวะเสียงเพลง (Jumping load)

แผ่นพื้นโดยทั่วไปแล้วจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ความแกร่ง (Stiffness) มวล และ ความหน่วง (Damping) โดยคุณสมบัติเฉพาะตัวนี้จะส่งผลให้พื้นมีการสั่นที่มีความถี่ (Frequency) ค่าหนึ่ง ซึ่งขนาดของการตอบสนองของแผ่นพื้น (Amplitude) สามารถวัดได้ขณะที่แผ่นพื้นอยู่ในตำแหน่งสมดุลชั่วขณะ สำหรับการบอกขนาดนั้นสามารถบอกได้หลายวิธี ได้แก่ การแอมพลิจูด ความเร็ว หรือ ความเร่ง เทียบกับเวลา อย่างไรก็ตาม การบอกขนาดโดยใช้ความเร่งในหน่วยของ m s^{-2} หรือ %g เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก จะเป็นที่ยอมรับใช้กันทั่วไป

คาบของการสั่น (Period, T) คือช่วงเวลาที่แผ่นพื้นใช้ในการสั่นครบหนึ่งรอบของการสั่นรูปที่ 2.1 แสดงการบอกขนาดและคาบของการสั่น



$T = \text{Period}; A = \text{Amplitude}$

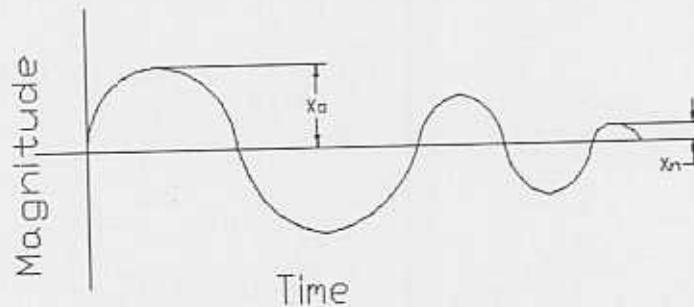
รูปที่ 2.1 แสดงคาบ และ แอมพลิจูด ของการสั่น

เมื่อได้กล่าวถึงคาบของการสั่นแล้ว ค่าที่จะต้องกล่าวถึงอีกค่าหนึ่งก็คือส่วนกลับของคาบ คำนั่นคือความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency, f) ของการสั่น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับจำนวนรอบของการสั่นในเวลา 1 วินาที ความถี่จะมีหน่วยเป็น รอบ/วินาที หรือ เฮิรตซ์(Hertz, Hz) สำหรับแผ่นพื้นอาจมีค่าความถี่ธรรมชาติได้หลายค่าซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการสั่น (Mode of vibration) โดยรูปแบบการสั่นนั้นจะถูกสมมติให้มีลักษณะการสั่นอย่างง่าย(Simple harmonic)ที่มีความถี่เดียวกัน อนึ่งรูปแบบการสั่นอาจมีมากกว่าหนึ่งได้ในกรณีที่ระบบพื้นนั้นเป็นแบบ Multiple degree-of-freedom และแต่ละแบบมีค่าความถี่ธรรมชาติต่างกันไป สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุดของพื้นจะถูกเรียกว่าความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของระบบพื้นนั้นโดยจะมีรูปแบบของการสั่นที่เรียกว่า ความถี่มูลฐานการของการสั่น(Fundamental mode of vibration) (Harris 1996)

กำทอน(Resonance) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อความถี่ของแรงที่กระทำ (Forcing frequency) เช่น การเดิน การกระโดด เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นนั้น นอกจากนี้ความถี่มูลฐานย่อยของแรงที่กระทำ (Harmonic of the forcing frequency) ยังอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ กำทอน ได้เช่นกันถ้าความถี่นั้นสอดคล้องกับความถี่มูลฐาน

เมื่อมีแรงกระทำที่พื้น พลังงานส่วนใหญ่จะสลายไปในระบบพื้นและการสั่นของพื้นก็หมดลง คุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่าความหน่วง (Damping) ซึ่งความหน่วงนี้จะถูกใช้ในการวัดความสามารถในการที่จะลดการสั่นของระบบพื้น ซึ่งค่าความหน่วงนี้มักจะอยู่ในรูปของ ตัวคูณความหน่วง(Viscous damping factor) และ อัตราส่วนความหน่วง(Damping ratio, Merim and Kraige 1992) สำหรับแหล่งที่มาของค่าความหน่วงดังกล่าวนี้สามารถมาได้จากหลายแห่งเช่น ตัวอย่างของความหน่วงที่เกิดจากความหนืด(Viscous damping) ได้แก่ ของเหลวหรืออากาศ สำหรับตัวอย่างของความหน่วงของโครงสร้าง(Structural damping) ได้แก่ความฝืดภายในระบบพื้น ส่วนตัวอย่างของความหน่วงคูลอมบ์ (Coulomb damping)ได้แก่แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างสองพื้นผิว (Avallone and Baumeister 1987)

การที่จะพิจารณาว่าระบบพื้นนั้นมีคามหน่วงอยู่หรือไม่ ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟการตอบสนองของระบบพื้นในรูปที่ 2.1 ซึ่งถ้าความชันของเส้นสัมผัสที่ลากผ่านจุดสูงสุดของกราฟนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบพื้นนั้นไม่มีความหน่วงอยู่ในระบบ แต่ถ้าระบบพื้นนั้นมีความหน่วงอยู่แล้วความชันของเส้นสัมผัสจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงผลของความหน่วง

แต่ถ้าระบบพื้นนั้นมีค่าความหน่วงที่เรียกว่าความหน่วงวิกฤติ (Critical damped) ระบบจะไม่มีการสั่นเกิดขึ้นเลยเนื่องจากค่าความหน่วงมีค่าเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นขึ้น โดยปกติแล้วความหน่วงจะแสดงอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างความหน่วงของระบบกับความหน่วงวิกฤติ ตัวอย่างเช่น ระบบจะมีคุณสมบัติเป็นไม่มีความหน่วง (Underdamped) ก็ต่อเมื่อค่าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 1 เป็นต้น ซึ่งระบบแบบไม่มีความหน่วงจะเป็นระบบที่วิศวกรทั่วไปต้องการให้เป็นเนื่องจากสามารถช่วยดูดซับพลังงานจากการสั่นและส่งผลให้อัมพลิจูดของการสั่นลดลงไปเรื่อยเมื่อเวลาผ่านไป

2.2.2 ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาปัญหาการสั่นของโครงสร้าง

ปัจจัยพื้นฐานที่ใช้ในการพิจารณาปัญหาการสั่นของโครงสร้างจะประกอบด้วยความถี่ธรรมชาติ (Natural frequencies) รูปแบบของการสั่น (mode shape) และความหน่วงโดยที่ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหรือวัตถุใด ๆ ก็คือการสั่นอย่างอิสระหลังจากการกระตุ้นสิ้นสุดลง สำหรับรูปแบบของการสั่นนั้นจะมีลักษณะเดียวกันกับการสั่นขณะที่เกิดการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ นั้น ๆ และถ้าหากความถี่ของการสั่นมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง จะเกิดการสั่นที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่ากำทอน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงเป็นอย่างยิ่ง ส่วนความหน่วงนั้นเป็นความสามารถในการดูดซับพลังงานที่เกิดจากการสั่นซึ่งเป็นธรรมชาติของวัสดุทุกชนิด โดยส่วนใหญ่การเพิ่มความหน่วงจะสามารถลดขนาดการสั่นได้ ดังนั้นวัตถุหรือองค์อาคารที่มีค่าความหน่วงต่ำ ๆ จะเกิดการสั่นสั่นมากกว่าวัตถุหรือองค์อาคารที่มีความหน่วงสูง ๆ ทั้งนี้พลังงานจากการสั่นจะกระจายไปในเนื้อวัสดุ จุดต่อ ตัวต่อ เป็นต้น อนึ่งการเพิ่มความหน่วงสามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า dashpots, friction device หรือการใช้วัสดุพิเศษที่สามารถเพิ่มความหน่วงได้

ปัญหาการสั่นส่วนใหญ่สามารถอธิบายในรูปของแหล่งกำเนิด ลักษณะการส่งผ่าน และตัวรับซึ่งการแบ่งการพิจารณาดังกล่าวจะทำให้ง่ายต่อการแก้ปัญหา ตัวอย่างเช่นเมื่อการสั่นจากแหล่งกำเนิดถูกส่งผ่านชั้นดินไปสู่ฐานรากและแพร่ไปทั้งตัวอาคาร ดินจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความเข้มของการสั่นขององค์อาคาร นั่นคือภายใต้การกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ดินที่รวมตัวกันอย่างหลวม ๆ จะแสดงขนาดของการสั่นมากกว่าดินแข็งหรือหิน แต่อย่างไรก็ตามดินอ่อนก็ยังสามารถที่จะบรรเทาการสั่นได้รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับระยะทาง อนึ่งชนิดของฐานรากที่เลือกใช้กับองค์อาคารก็มีความสำคัญต่อปัญหาของการสั่นเช่นกัน โดยที่ฐานรากที่แผ่ลงไปยังชั้นดินแข็งจะสามารถลดขนาดของการสั่นที่เกิดจากปัจจัยภายนอกได้ สำหรับการส่งผ่านของการสั่นนั้นจะเกิดขึ้นภายในองค์อาคาร ยกตัวอย่างเช่นแหล่งกำเนิดของการสั่นเกิดจากห้องเครื่องบนชั้นดาดฟ้าขององค์อาคาร หรือเกิดจากการกระโดดของผู้อาศัยที่อยู่ในห้องที่ติดกัน ซึ่งถ้าหากผู้รับผลจากการสั่นคือมนุษย์หรือตัวองค์อาคารเอง การที่มนุษย์จะรู้สึกถึงการสั่นนั้นขึ้นอยู่กับท่าทางของมนุษย์ (นั่ง ยืน นอน) ทิศทางการสั่น (แนวตั้ง แนวราบ หมุน) รวมไปถึงกิจกรรมที่ดำเนินอยู่ในขณะนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการสั่นถูกส่งมาพร้อมกับเสียงรบกวน ยิ่งจะส่งผลให้มนุษย์เกิดความรำคาญใจมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของการสั่นขององค์อาคารพบว่า แต่ละอาคารก็จะมีค่าการสั่นที่ยอมรับได้ ซึ่งอาคารเก่า ๆ จะมีค่าการสั่นที่ยอมรับได้น้อยกว่าอาคารใหม่ ๆ ทั้งนี้เนื่องจากอายุของวัสดุและระบบโครงสร้างรวมถึงการเสื่อมสภาพของปูนทราย (mortar) และการทรุดตัวของฐานราก กระบวนการก่อสร้างที่เหมาะสมและการบำรุงรักษาอาคารสามารถป้องกันจากการสั่นในระดับต่ำที่เกิดจากมนุษย์ซึ่งมนุษย์สามารถทนต่อการสั่นในระดับนี้ได้ ส่วนแรงสั่นสะเทือนในอากาศจากคลื่นกระแทก (Supersonic boom) ของเครื่องบินหรือจากลมกระโชกสามารถที่จะสร้างความเสียหายให้กับหน้าต่างและอุปกรณ์ติดตั้งหรือเพดาน การศึกษาบางครั้งจะต้องคำนึงถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระยะยาวแต่ไม่ได้แสดงอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่นการสั่นที่เกิดจากการก่อสร้างแล้วส่งผ่านไปยังพื้นแล้วขยายไปสู่ผนังสามารถทำให้ผนังเกิดการแตกร้าวในอิฐหรือคอนกรีตในกรณีที่เกิดขึ้นที่ระดับที่ปลอดภัย สุดท้ายการสั่นที่เกิดจากแผ่นดินไหวจะสามารถก่อให้เกิดความเสียหายตั้งแต่ผนังไปจนถึงโครงสร้างหลักได้

การสั่นจากการเดินจะเกิดขึ้นจากสาเหตุหลัก 3 ประการ นั่นคือ แผ่นพื้นนั้นมีน้ำหนักเบา ระบบพื้นที่มีความยืดหยุ่น และพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่โล่ง สำหรับแผ่นพื้นที่รับน้ำหนักแบบพลวัตรจะเกิดกับพื้นแบบโรงยิมเนเซียม สถานที่เดินรำ สนามกีฬา โรงมหรสพ ซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปมาของคน ทำให้เกิดขนาดการสั่นที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีผลกระทบดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่การรบกวนเพียงเล็กน้อยไปจนถึงการสร้างความเสี่ยงให้กับโครงสร้างได้ ซึ่งการแก้ไขเบื้องต้นสามารถกระทำได้โดยการออกแบบพื้นให้มีความแข็งแรงมากพอ และหลีกเลี่ยงการออกแบบโครงสร้างที่มีค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของการกระตุ้นอันเนื่องมาจากกิจกรรมในอาคาร

2.2.3 ปัญหาการสั่นของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่

โดยทั่วไปพื้นในอาคารสำนักงานจะเกิดการสั่นได้โดยหลายสาเหตุเช่นการเดินไปมาภายในตัวอาคาร และด้วยเหตุผลของการออกแบบที่ต้องการให้น้ำหนักของโครงสร้างลดลงและพื้นมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงเป็นปัจจัยที่เอื้อให้เกิดปัญหาการสั่นที่ความรุนแรงขึ้นถึงแม้ว่ากำแพงและอุปกรณ์ตกแต่งห้องสามารถทำให้เกิดความหน่วงในระบบแผ่นพื้นทั้งสิ้น นักวิจัยในอดีตจึงได้ริเริ่มในการศึกษาค้นคว้าและหาทางแก้ไขปัญหาโดยในปี 1931 Reiher และ Meister ได้รับการยกย่องว่าเป็นผู้ริเริ่มในการศึกษาถึงการสั่นของแผ่นพื้น

สำหรับกลไกที่จะสามารถทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่า Noise vibration หรือ Annoying vibration จะเกิดขึ้นได้จะต้องมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ประการดังต่อไปนี้

- ◆ แหล่งที่มา – แหล่งกำเนิดของแรงพลวัต
- ◆ ลักษณะการกระจายแรง – แรงนั้นกระจายเข้าสู่โครงสร้างนั้นได้อย่างไร
- ◆ ความสามารถในการรับแรง –ขนาดของ Noise/Vibration ที่ผู้รับนั้นสามารถรับได้ (Dossing 1988)

ในส่วนของ Floor vibration แหล่งที่กำเนิดของแรงนั้นมาจากกิจกรรมที่คนดำเนินชีวิตเช่นเดิน(Walking) กระโดด (Jumping) โดย Lenzen (1966) ได้กล่าวไว้ว่าพื้นโดยทั่วไปจะไม่อยู่ในสถานที่ที่ถูกกระตุ้นเนื่องจากเครื่องจักรหรือที่เรียกว่า Steady-state vibration เนื่องจากเราสามารถวางเครื่องจักรให้อยู่แยกจากระบบพื้นได้การสั่นจึงไม่เกิดขึ้น ดังนั้นการท้าวิจัยเกี่ยวกับการสั่นของระบบพื้นจึงมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของ Transient และ Steady-state vibration ที่เกิดจากมนุษย์เท่านั้น (Human-induced vibration) สำหรับลักษณะการกระจายของแรงไปสู่ผู้รับนั้น ในกรณีของการสั่นในระบบพื้นตัวกลางที่เป็นตัวผ่านแรงก็คือโครงสร้างของอาคาร ส่วนผู้รับแรงที่กระจายผ่านโครงสร้างก็คือผู้อาศัยที่อยู่ภายในอาคารและระบบพื้นเดียวกับแหล่งกำเนิดของแรงนั้น

แต่ตามปกติแล้วมนุษย์มีความสามารถที่จะทนต่อแรงสั่นสะเทือนได้เพียงระดับหนึ่ง เช่นคนที่อาศัยในอาคารสำนักงานหรือที่พักอาศัยที่ถูกใช้ทำกิจกรรม จะสามารถทนต่อแรงชนิดนี้ได้ น้อยกว่าคนที่กำลังร่วมกิจกรรมนั้นอยู่ (Allen 1990b) นอกจากนี้ Hanes (1970) ได้เสนอผลการวิจัยเกี่ยวกับความรู้สึกของผู้โดยสารบนรถยนต์หรือเครื่องบินว่า ค่าความถี่ธรรมชาติของมนุษย์มีค่าอยู่ระหว่าง 5-8 เฮิรตซ์ ดังนั้นถ้าระบบพื้นมีค่าความถี่ธรรมชาติอยู่ในช่วงที่เป็นความถี่ธรรมชาติของมนุษย์ก็เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุให้ผู้อาศัยเกิดความรู้สึกไม่สบาย Murray (1991) ได้ทำการศึกษาระบบพื้นตัวอย่างที่เกิดปัญหาการสั่นกว่า 100 ตัวอย่าง พบว่าความถี่ธรรมชาติของพื้นส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 5-8 เฮิรตซ์ จากปัญหาที่พบดังกล่าวส่งผลให้ปัจจุบันได้มีการวิจัยค้นคว้าและกำหนดมาตรฐานที่ใช้วัดความสามารถของมนุษย์ในการตอบสนองต่อการสั่นไหวในระบบพื้นทั้งแบบ Transient และ Steady-state vibration ดังตัวอย่างของ Reiher และ Meister

เมื่อ D คือ Damping ratio (%)

A_0 คือ Maximum initial amplitude of the floor system due to a heel drop excitation (in)

f คือ First natural frequency of the floor system (Hz)

Allen, Reiner และ Pernica (1985) ได้คิดค้นสมการในการหาค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับ Dancing load ที่จะก่อให้เกิด Sinusoidal dynamic load ดังแสดงในสมการที่ 2.2

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

เมื่อ f_0 คือ Forcing frequency

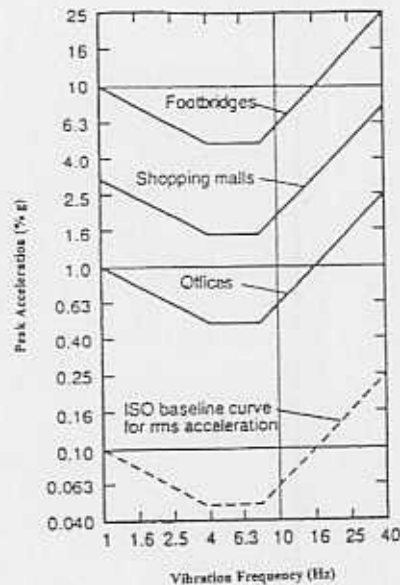
α คือ Dynamic load factor coefficient

a_0 / g คือ Acceleration limit

w_p คือ Equivalent uniformly distributed load for participants

w_t คือ Total floor weight (including participants)

สำหรับกิจกรรมที่มีการกระโดด (Jumping exercise) ตัวอย่างเช่น High impact aerobic จะก่อให้เกิดแรงในลักษณะที่เป็น Sinusoidal loading components ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเท้าทั้งสองลอยพ้นจากพื้นแล้วตกกระทบพื้นตามจังหวะเพลง โดยที่แรงนี้อาจจะเป็นจำนวนเท่าของฮาร์โมนิคหรือฮาร์โมนิคของเพลงนั้นๆ (Allen 1990a) ขณะเดียวกัน Allen (1990b) ได้เสนอข้อกำหนดที่เกี่ยวกับการออกแบบพื้นเพื่อใช้สำหรับกิจกรรมที่มีการเดินหรือการออกกำลังกาย นั่นคือ ความเร่งขนาดไม่เกิน 2%g หรือ 7.75 in/s² จะใช้สำหรับกิจกรรมการเดินแอโรบิคและการยกน้ำหนักในชั้นเดียวกัน และ ความเร่งขนาดไม่เกิน 7%g หรือ 27.0 in/s² จะใช้สำหรับพื้นที่มีกิจกรรมการเดินแอโรบิคเพียงอย่างเดียว ในส่วนค่าความเร่งที่ยอมให้ในกรณีของ Walking load นั้น Allen (1990) ก็ได้สร้างขีดจำกัดของความเร่ง โดยแสดงอยู่ในรูปของกราฟซึ่งจะแบ่งตามลักษณะการใช้งานของอาคารนั้นแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Allen's recommended acceleration limits for walking load

Allen (1990b) ได้เสนอสูตรสำหรับการคำนวณค่าต่ำสุดที่ยอมให้ของความถี่ธรรมชาติของพื้นที่มีกิจกรรมการเดินแอโรบิกโดยอ้างอิงสมการที่ 2.2 ไว้ดังนี้

$$f_0 \geq if \sqrt{1 + \frac{2\alpha_i w_p}{(a_0 / g)w_i}} \quad (2.3)$$

เมื่อ i คือ Harmonic number of the forcing frequency สำหรับตัวแปรอื่นเหมือนกับตัวแปรในสมการที่ 2.2

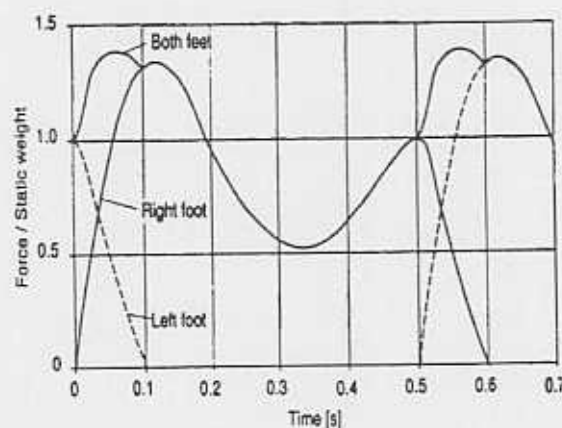
สมการที่ 2.3 จะให้ความสำคัญเพียงแค่สามฮาร์โมนิคแรกของแรงที่มากกระทำ เนื่องจากความถี่จาก Sinusoidal loading ถัดจากฮาร์โมนิคที่สามโดยปกติแล้วจะมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับสามฮาร์โมนิคแรก ดังนั้นจึงสามารถยกเว้นได้

สำหรับเพลงที่ใช้ประกอบในกิจกรรม High impact aerobic นั้นจะมีจังหวะเฉลี่ยอยู่ที่ 150 บีตต่อนาที หรือ 2.5 เฮิร์ตซ์และบางครั้งอาจสูงถึง 2.75 เฮิร์ตซ์โดยฮาร์โมนิคที่สองและสามของแรงที่เกิดจากความถี่ (Forcing frequency) จะมีค่าอยู่ที่ 5 เฮิร์ตซ์และ 7 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ซึ่งความถี่ดังกล่าวอาจสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นและก่อให้เกิดปรากฏการณ์กำ

ทอนขึ้นได้ ดังนั้นสมการที่ 2.3 จะให้ค่าความถี่ของระบบพื้นที่ต้องการอยู่ในช่วงระหว่าง 9-10 เฮิร์ตซ์

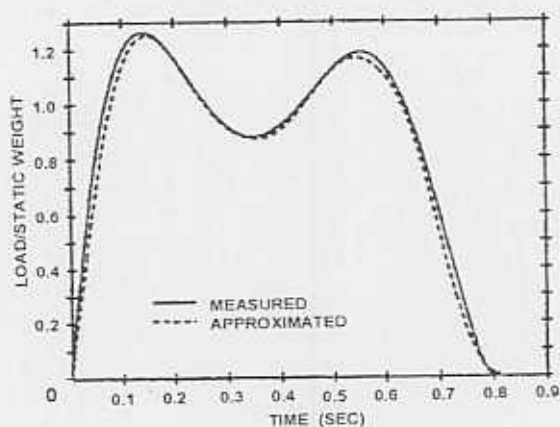
Murray (1991) ได้แนะนำให้วิศวกรคำนึงถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความถี่ธรรมชาติของระบบพื้นที่สอดคล้องกับสมการที่ 2.3 และทำการแยก ระบบพื้นออกจากโครงสร้างให้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นที่เกิดจากกิจกรรมแอโรบิคไป รบกวนระบบพื้นในชั้นอื่นๆ แต่ถ้าปัญหาของการสั่นเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีอยู่แล้ว Murray ได้ แนะนำให้แยก Ceilings และ แบ่งส่วนย่อย(Partition) ภายใต้พื้นสำหรับออกกำลังกาย(Exercise floor)ออกจากกันโดยติดตั้งชั้นส่วนของ Ceilings ให้อยู่อิสระจากเพดานชั้นบน และไม่ติดตั้งชั้น ส่วนย่อย(Partition) ติดกับพื้นชั้นที่เหนือขึ้นไป วิธีนี้ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถป้องกันปัญหาของการ รบกวนพื้นจากการสั่น(Annoying floor vibration) ได้ทางหนึ่ง สำหรับวิธีการป้องกันการรบกวน พื้นจากการสั่นของระบบพื้นยังสามารถทำได้อีกหลายวิธีดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ในส่วนของการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการลดปัญหาการรบกวนพื้นจากการสั่นจากการเดิน ของผู้อาศัยในอาคารนั้นๆ นักวิจัยหลายคนอาทิเช่น Allen และ Rainer (1975), Allen (1990b) และ Murray (1991) ได้ทำการศึกษาและเสนอข้อแนะนำในการออกแบบระบบพื้นเพื่อป้องกัน การรบกวนพื้นจากการสั่น ซึ่งหลังจากที่ได้มีการเสนอข้อกำหนดในการออกแบบระบบพื้นออกมาแล้ว นักวิจัยจึงได้มุ่งความสนใจไปยังรูปร่างลักษณะและฟังก์ชันของน้ำหนักจากการเดินซึ่งหนึ่งในนั้น คือ Bachmann (1987) ได้ทำการทดลองเพื่อวัดขนาดของแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นอันเนื่องมาจากคน เดินแต่ละก้าว ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.5

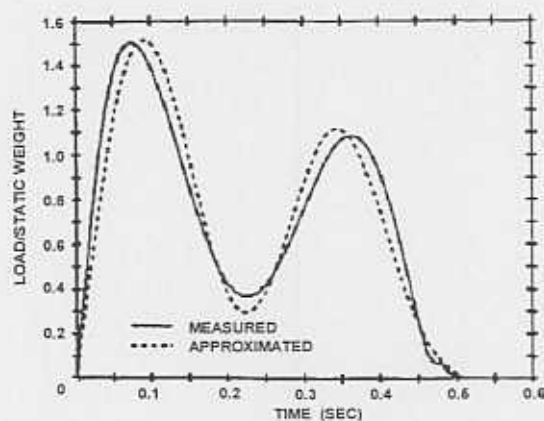


รูปที่ 2.5 แรงที่เกิดขึ้นที่พื้นเมื่อเดินแบบ Normal walking load, Bachmann (1987)

ขณะเดียวกัน Mouring (1994) ก็ได้ทำการทดลองในลักษณะเดียวกันแต่เปลี่ยนลักษณะ การเดินเป็นแบบ ช้าๆ และ เดินอย่างเร่งรีบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 แรงที่เกิดขึ้นที่พื้นเมื่อเดินแบบ Slow walking load, Mouring (1994)



รูปที่ 2.7 แรงที่เกิดขึ้นที่พื้นเมื่อเดินแบบ Brisk walking load, Mouring (1994)

รูปที่ 2.5 – 2.7 เป็นกราฟที่แสดงแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นพื้นเมื่อเดินด้วยความถี่ต่างกัน โดยพิจารณาเพียงหนึ่งก้าว ดังนั้นเมื่อต้องการจำลองการเดินแบบต่อเนื่อง (มากกว่า 1 ก้าว) ก็สามารถทำได้ โดยการกระทำแรงเป็นจุดตามจำนวนก้าวที่เดิน ซึ่งลักษณะการเดินของมนุษย์โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการเดินของมนุษย์โดยทั่วไป

นอกจากนั้น Allen (1990) ได้เสนอสมการของ Walking load โดยอาศัยหลักการรวมกันของฮาร์โมนิคต่างๆของแรงแบบ Sinusoidal แล้วเกิดเป็น Walking load ดังสมการที่ 2.4

$$F = P \{ 1.0 + \sum [a_i \cos(2\pi i f t)] \} \quad (2.4)$$

เมื่อ P = person's average weight, assumed to be 72 kg

a_i = dynamic load factor (DLF)

i = harmonic component number

f = vibration frequency

t = time variable

โดย Allen (1990) ได้แนะนำช่วงความถี่ที่แนะนำ ($i.f$) และ a_i ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Suggested dynamic load factors (DLFs) โดย Allen (1990)

Harmonic component no., i	Frequency range, $i.f$	Dynamic load factor (DLF), a_i
1	1.5-2.5	0.5
2	3.5-4.5	0.2
3	5.0-7.0	0.1
4	7.0-10.0	0.05

2.2.4 VIBRATION LIMIT STATE- - ACCELERATION LIMITS

International Standard Association (ISO, 1989; ISO, 1992) ได้นำเสนอข้อจำกัดการสั่นขั้นต่ำที่จะทำให้ผู้อยู่อาศัยในองค์อาคารสามารถทนต่อการสั่น ข้อจำกัดที่แบ่งตามลักษณะการใช้งานจะแสดงอยู่ในรูปของความเร่ง โดยที่ข้อจำกัดของความเร่งที่ยอมให้ของอาคารแต่ละชนิดจะมีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของความเร่งพื้นฐานที่ยอมให้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 สำหรับอาคารสำนักงาน ISO แนะนำให้คุณด้วย 4 ในกรณีที่มีการสั่นที่เกิดอย่างต่อเนื่องรวมทั้งการสั่นแบบเป็นจังหวะ และ 60-128 สำหรับการสั่น แบบชั่วขณะ โดยที่ตัวอย่างการสั่นแบบเป็นจังหวะได้แก่การตอกเสาเข็ม ส่วนการสั่นแบบชั่วขณะได้แก่การสั่นซึ่งปกติแล้วจะเกิดขึ้นไม่บ่อย เช่นการระเบิด เป็นต้น ดังนั้นหากกล่าวถึงการสั่นเนื่องจากการเดินจึงถือว่าเป็นการสั่นที่เกิดขึ้นเป็นจังหวะโดยธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามก็การสั่นเนื่องจากการเดินจะเป็นจังหวะที่ไม่ถี่เท่ากับการตอกเสาเข็ม ดังนั้นค่าตัวคูณความเร่งที่ยอมให้โดยประมาณสำหรับการสั่นเนื่องจากการเดินจะอยู่ในช่วง 5-8 ซึ่งจะเทียบเท่ากับค่าความเร่งในช่วง 0.25-0.4%g สำหรับความถี่วิกฤตในช่วง 4-8 เฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.4 พบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเร่งที่ยอมให้สูงสุด

ของอาคารสำนักงานกับค่าความเร่งของการเดินพื้นฐาน พบว่ามีค่าประมาณ 1.7 ดังนั้นสำหรับการสั่นจากการเดินในอาคารสำนักงานจะมีค่าความเร่งที่ยอมรับให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.4-0.7%g แต่จากประสบการณ์ของ Alien and Rainer (1976) ได้แนะนำค่าขีดจำกัดของการสั่นจะมีค่าประมาณ 0.5%g สำหรับพื้นที่มีช่วงความถี่ประมาณ 4-8 เฮิร์ตซ์.

สำหรับสะพานลอยคนข้าม ISO (1992) ได้เสนอแนะให้ใช้ตัวคูณความเร่งเท่ากับ 60 รวมกับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเร่งที่ยอมรับให้สูงสุดของอาคารสำนักงานกับค่าความเร่งของการเดินพื้นฐาน พบว่ามีค่าประมาณ 1.7 ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเร่งที่ยอมรับให้มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดของอาคารสำนักงานประมาณ 10 เท่า สำหรับผู้ที่เดินไปมาในย่านศูนย์การค้าจะตอบสนองต่อการสั่นในช่วงนี้ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของร่างกายในขณะนั้น

2.2.5 การตอบสนอง

การเดินข้ามสะพานลอยคนเดินหรือแผ่นพื้นขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดแรงแบบพลวัต ที่สลับซับซ้อนของรูปแบบของการสั่น (Natural mode of vibration) ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถพิจารณาแบบง่ายโดยการพิจารณาจังหวะการก้าวขึ้น-ลงของมนุษย์ ที่กลางช่วงคานที่มีรูปแบบของการสั่นเป็น แบบธรรมชาติ (Natural mode) เท่านั้น พบว่าค่าการตอบสนองจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับความถี่ฮาร์โมนิคที่หนึ่งของแรงที่มากระทำ ซึ่งค่า Steady-state acceleration เนื่องจากฮาร์โมนิคการก้าวทอน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.5 (Rainer, et al, 1988)

$$\frac{a}{g} = \frac{\alpha P}{0.5W} \times \frac{R}{2\beta} \times \cos 2\pi f t = \frac{R\alpha P}{\beta W} \times \cos 2\pi f t \quad (2.5)$$

เมื่อ W คือน้ำหนักของคาน, P คือ damping ratio, g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ R คือ reduction factor ซึ่งจะมีค่า 0.7 สำหรับสะพานลอยคนข้าม และ 0.5 สำหรับแผ่นพื้น, ตัวคูณ $1/(2\beta)$ คือ Dynamic amplification factor สำหรับ Steady-state resonance และ $0.5W/g$ คือ มวลของ SDOF oscillator ซึ่งเทียบเท่ากับมวล W ของคานที่มีจุดรองรับอย่างง่ายและกำลังสั่นในรูปแบบพื้นฐาน สำหรับค่าฮาร์โมนิคอื่นๆก็สามารถก่อให้เกิด Steady-state vibration ได้แต่โดยทั่วไปจะเกิดการสั่นที่มีค่าน้อยกว่าฮาร์โมนิคที่หนึ่ง

2.5.6 การเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic

ในกรณีที่มีการแกว่งเชิงกลเกิดขึ้นระบบจะต้องควบคุมปริมาณ 2 ชนิด คือ ความยืดหยุ่น กับความเฉื่อย เมื่อระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุล ความยืดหยุ่นจะอยู่ในรูปแรงคืนตัว (Restoring force) จนกระทั่งระบบพยายามกลับเข้าสู่สมดุล คุณสมบัติของความเฉื่อยเป็นสาเหตุให้ระบบไม่อยู่ในสมดุล ค่าคงที่นี้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่น และความเฉื่อย ซึ่งยอมให้เกิดการแกว่งขึ้น ความถี่ธรรมชาติของการแกว่งนี้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของความยืดหยุ่น และความเฉื่อย ดังสมการ

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{\text{elasticity}}{\text{inertia}}} \quad (2.6)$$

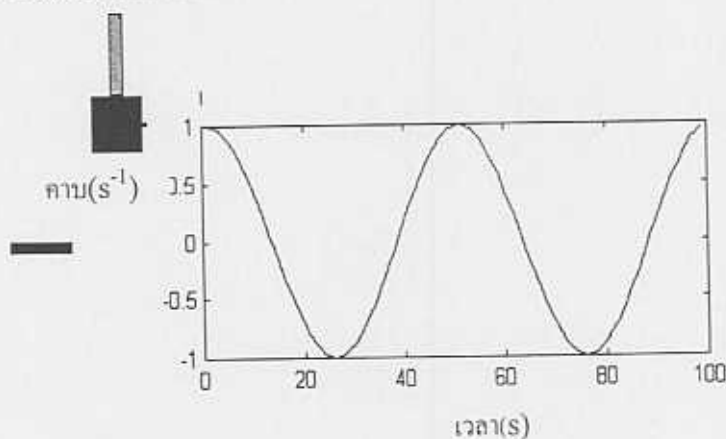
ตัวอย่างที่ง่ายที่สุดของระบบที่มีการแกว่งก็คือ ระบบที่มวลถูกยึดกับสปริงโดยที่สปริงมีค่าคงที่ k ซึ่งเป็นความยืดหยุ่นของแรงคืนตัว จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน $F = ma$ สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.7)$$

โดยที่ $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ เป็นความถี่ธรรมชาติของการแกว่ง ซึ่งได้จากสมการ

$$\chi(t) = \chi_m \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.8)$$

โดยที่ χ_m คือ แอมพลิจูดของการแกว่ง และ ϕ คือเฟตคงที่ของการแกว่ง ซึ่งทั้ง χ_m และ ϕ เป็นค่าคงที่หาได้จากสภาวะเริ่มต้น (การแอมตัวและความเร็ว) ที่เวลา $t=0$ จากรูปที่ 2.9 แสดงกราฟการเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic



รูปที่ 2.9 ลักษณะการแกว่งแบบ Simple Harmonic

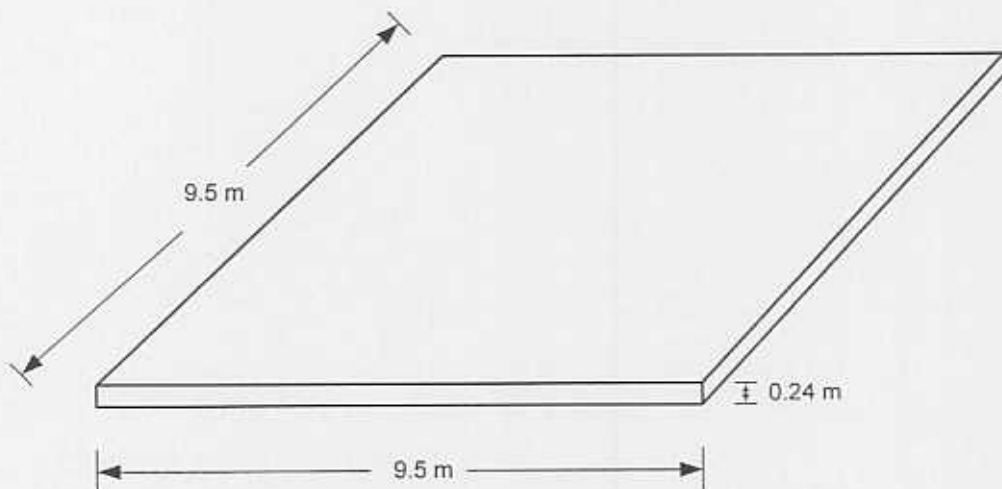
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยชุดนี้ได้ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม JL Analyzer เป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นคอนกรีตขนาดใหญ่ (Long-span flat concrete floor) โดยคุณสมบัติของโปรแกรม JL Analyzer เป็นไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมที่สามารถใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้หลายสาขาอาทิเช่น static, dynamic, buckling, frequency, thermal, electric และงานวิศวกรรมด้านอื่น ๆ โดยจุดเด่นของโปรแกรมนี้อยู่ที่การใช้งานที่ง่าย พร้อมทั้งมีองค์ประกอบของ Pre processor, Main program และ Post processor อยู่ในตัวเดียวกัน

3.1 คุณสมบัติของแผ่นพื้นที่ทำการศึกษา

แผ่นพื้นที่ศึกษาเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตชนิด Flat slab ที่มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบช่วงเดียวที่ขอบทุกด้านไม่ต่อเนื่อง (Four-edge discontinuous) ขนาด 9.5 x 9.5 เมตร ที่มีความหนา 0.24 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของแผ่นพื้น

สำหรับคุณสมบัติของคอนกรีตแผ่นพื้นมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young' Modulus) $E_{conc} = 27.81 \text{ GPa}$, $V_{conc} = 0.20$ และ $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตที่อยู่

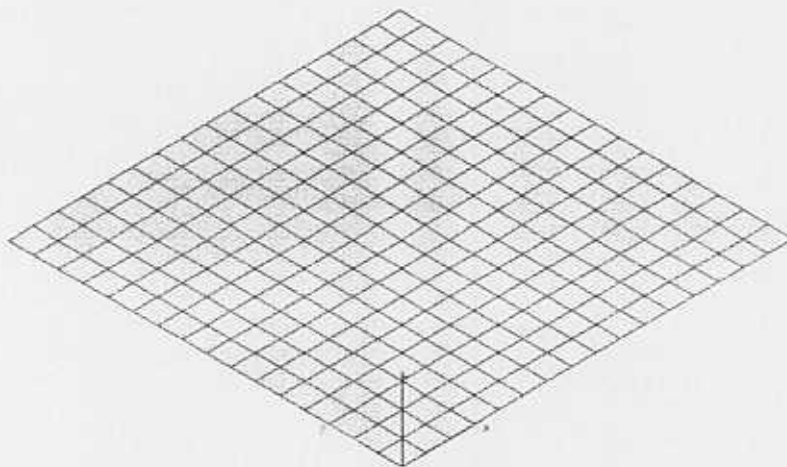
ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic) เท่านั้น เนื่องจากว่าน้ำหนักที่มากจะทำให้ค่าน้อยจึงส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปอยู่ในขีดจำกัดดังกล่าว

3.2 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆดังนี้

3.2.1 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่าง

ในขั้นตอนนี้ไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลของแผ่นพื้นตัวอย่างจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม JL Analyzer โดยที่แบบจำลองของแผ่นแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย 289 Nodes และ 256 Elements



รูปที่ 3.2 Finite element model of a long-span flat concrete floor

สำหรับ Element ที่ใช้ในการสร้างไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลได้แก่ 4 Node shell element ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความเค้น (Stress analysis) โดยที่ shell element ใน JL analyzer จะมี 6 Degree-of-freedom ในแต่ละ Node ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณที่ได้มีความถูกต้องสูง

หลังจากสร้างไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลของแผ่นพื้นเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นโดยผลลัพธ์ที่ได้จากไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมจะอยู่ในรูปของค่า Eigenvalue และ Mode shape ซึ่งค่าเหล่านี้คือคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีขนาด 9.5 x 9.5 เมตร หนา 0.24 เมตร

นอกจากจะศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นที่มีความหนา 0.24 เมตร แล้วผลของความหนาและการเพิ่ม Rigidity ของจตุรรองรับ ต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นก็ได้ทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ด้วย โดยจะเพิ่มความหนาอีก 2 ค่า คือ 0.26 และ 0.28 เมตร

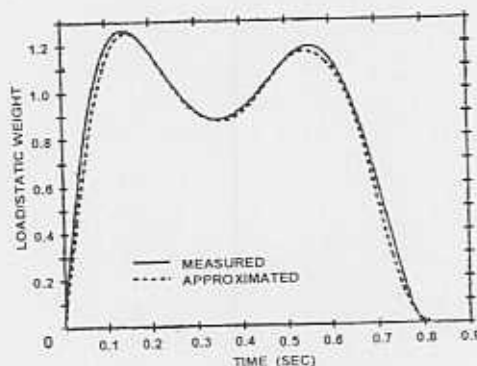
และชนิดของจตุรกรรับแบบ Simply supported และ Fixed supported ซึ่งจากเงื่อนไขที่จะทำการศึกษาในส่วนนี้ได้ทำการสรุปออกมาดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ

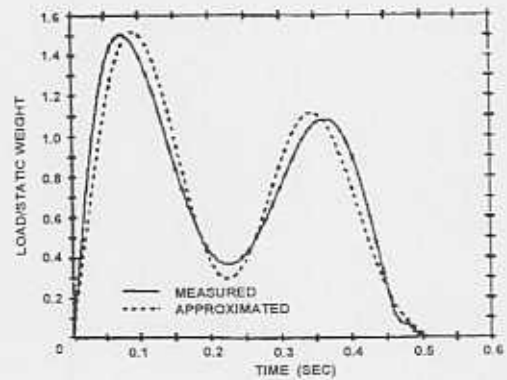
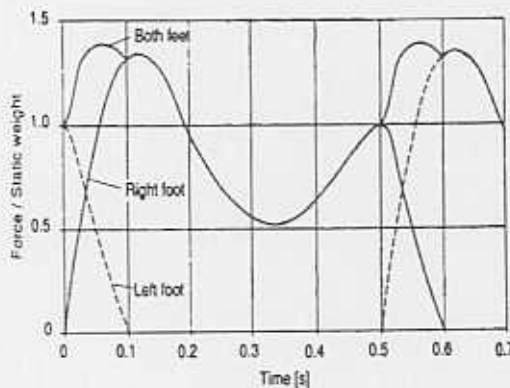
Boundary conditions	Thickness (m)
1. Simply supported	0.24
	0.26
	0.28
2. Fixed supported	0.24
	0.26
	0.28

3.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (1 คน)

ในการศึกษาส่วนนี้จะเริ่มต้นด้วยการสร้างไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลของแผ่นพื้นเหมือนกับการศึกษาในข้อ 1 ก่อน แต่การศึกษาในหัวข้อนี้จะต้องมีการใส่แรงกระทำชนิด Walking load จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำหนักจากการเดินอย่างช้า ๆ (Pacing Frequency = 1.87 Hz.), น้ำหนักจากการเดินปกติ (Pacing Frequency = 2.0 Hz.) และ น้ำหนักที่เกิดจากการเดินอย่างรวดเร็ว (Pacing Frequency = 2.77 Hz.) ซึ่งแผนภาพของแรงทั้ง 3 ชนิดแสดงในรูปที่ 3.3 ก-3.3 ค



ก. Slow walking load (Pacing Freq. = 1.87 Hz.)



ข. Normal walking load(Pacing Freq=2.0 Hz.) ค.Brisk walking load (Pacing Freq=2.77 Hz.)

รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพของแรงในลักษณะต่าง ๆ

โดยแผนภาพของแรงในรูปที่ 3.3 จะถูกกระทำอย่างต่อเนื่องไปตามจังหวะของการเดินจากขอบของพื้นทางซ้ายไปทางขวา แล้วทำการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีลิเมนต์โดยใช้วิธีการ General direct time integration ที่มีอยู่ในโปรแกรม JL Analyzer ในการคำนวณ วิเคราะห์การรับน้ำหนักพลวัตของแผ่นพื้น ซึ่งกระบวนการคำนวณจะทำแก่สมการทางพลศาสตร์ที่ละขั้นตอนโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Newmark's method โดยในการคำนวณจะทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลในการช่วยลดปัญหา การรบกวนจากการสั่นเนื่องจากการเดินภายในอาคารเช่น ความหนาของแผ่นพื้น, จูตรองรับ และ ความถี่ในการก้าว นอกจากนี้ยังมีอีกอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการที่จะช่วยลดปัญหาการรบกวนจากการสั่น เนื่องจากการเดินภายในอาคารได้คือความหน่วงก็จะนำมาศึกษาด้วยโดยจะพิจารณาที่ค่าความหน่วง(Damping ratio) ร้อยละ 0, 1, 2 , 3 และ 5 ตามลำดับโดยความหน่วงที่ใช้คือ Rayleigh damping ที่มีสมการพื้นฐานดังสมการที่ 3.1

$$\xi_i = \frac{\alpha_M}{2\omega_i} + \frac{\beta_M \omega_i}{2} \quad (3.1)$$

เมื่อ ω_i = Natural frequency at this mode

α_M = Mass proportional Rayleigh damping, damps the lower frequencies

β_M = Stiffness proportional Rayleigh damping, damps the higher frequencies

จากเงื่อนไขดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมเป็นที่เรียบร้อยแล้วสุดท้ายค่าการรับน้ำหนักพลวัตของแผ่นพื้นที่จะทำการวัดได้แก่ การแอ่นตัว(Displacement time history) และความเร่ง

(Acceleration time history) ณ บริเวณกึ่งกลางของแผ่นพื้น เนื่องจากจุดนี้จะเป็นจุดที่มีค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุด

ภายหลังที่ได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่น และความเร่งเทียบกับเวลาแล้วทำให้สามารถทราบได้ถึงค่าการตอบสนองสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้เงื่อนไขนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการที่จะบอกถึงความถี่ของการตอบสนองนั้นไม่สามารถบอกได้จากกราฟดังกล่าว จึงต้องมีการใช้โปรแกรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้มาซึ่งความถี่ของการตอบสนองนั้น โปรแกรมดังกล่าวชื่อว่า DADiSP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีขั้นตอนการใช้งานที่ง่ายและแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์ได้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (1 คน)

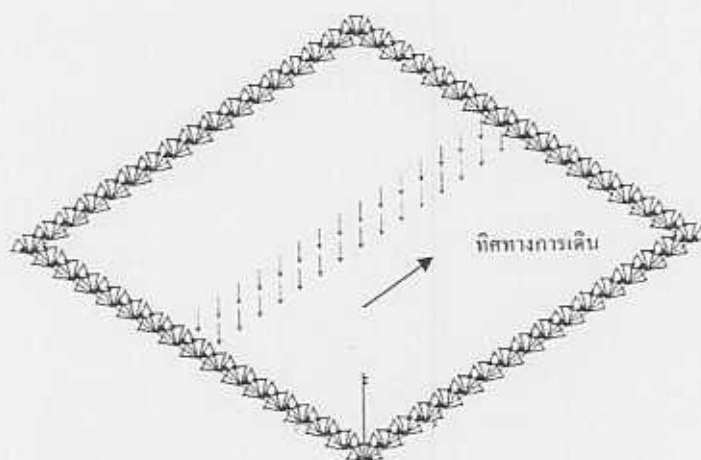
Boundary conditions	Thickness (m)	Type of walking load	Damping Ratio (%)
1. Simply supported	0.24	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5
	0.26	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5
	0.28	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่าง
ภายใต้แรงกระทำแบบ Walking load (1 คน)

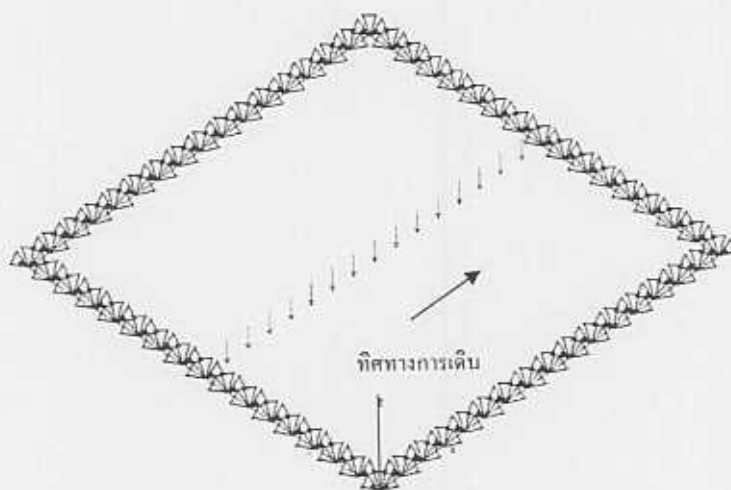
Boundary conditions	Thickness (m)	Type of walking load	Damping Ratio (%)
2. Fixed supported	0.24	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5
	0.26	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5
	0.28	Slow Walking Load, SWL (Pacing frequency = 1.83 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Normal walking load, NWL (Pacing frequency = 2 Hz)	0, 1, 2, 3, 5
		Brisk walking load, BWL (Pacing frequency = 2.77Hz)	0, 1, 2, 3, 5

3.2.3 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (มากกว่า 1 คน)

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของพื้นภายใต้แรงกระทำจากการเดินมากกว่า 1 คน (2, 4, และ 6 คน) ซึ่งเงื่อนไขโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นความหนาของแผ่นพื้นตัวอย่างและความหน่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีเงื่อนไขเหมือนกับการรับแรงจากการเดิน ที่มีคนเพียง 1 คน แต่ส่วนที่ต่างออกมาคือ ลักษณะการเดินของกลุ่มตัวอย่าง โดยที่สามารถจำแนกลักษณะการเดินได้เป็น 2 ลักษณะคือ การเดินในลักษณะหน้ากระดานและการเดินในลักษณะเป็นแถว (column) โดยลักษณะการเดินแบบหน้ากระดานแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 ส่วนรูปที่แสดงการเดินเป็นแถวจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 ตามลำดับทั้งนี้ยังคงเงื่อนไขจุดรองรับและลักษณะการก้าวรวมไปถึงความถี่ในการก้าวเหมือนเดิมทุกประการ



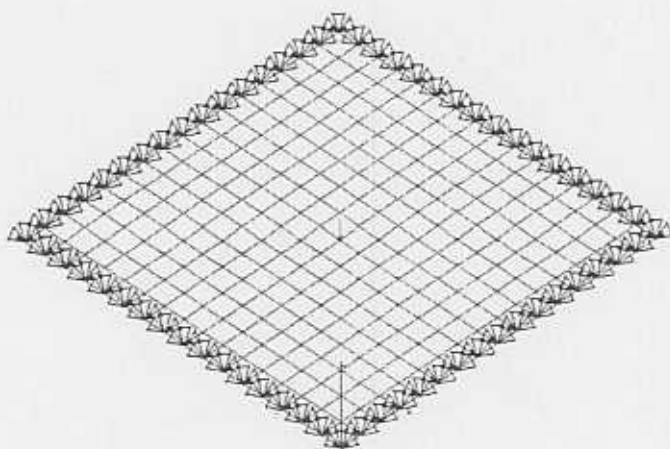
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะที่เดินแบบหน้ากระดาน



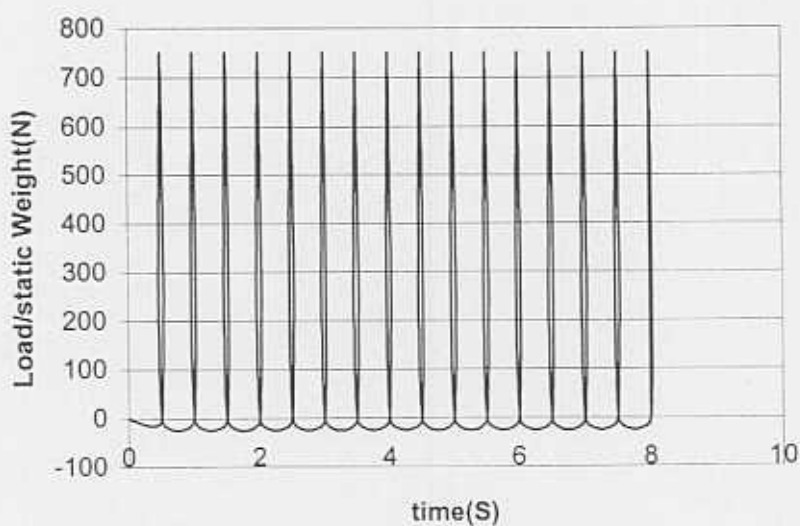
รูปที่ 3.5 แสดงการเดินเป็นแถว

3.2.4 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงการทำจากภาระโดด

การศึกษาดังกล่าวคือการสังเกตการณ์การสั่นของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากภาระโดด โดยทั่วไปไม่ถือว่าเป็นความหนาของแผ่นพื้น จดการรับเหมือนกับกรณีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกันคือ แรงที่เกิดจากการกระทำโดดจะเป็นแรงที่กระทำอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดการพิจารณา ในที่นี้กำหนดให้แรงกระทำที่กึ่งกลางพื้น และความหน่วงบนแผ่นพื้น โดยใช้ความหน่วงบนแผ่นพื้นที่ร้อยละ 0 1 2 และ 5 จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบและสรุปผลจากการวิเคราะห์ ซึ่งมีลักษณะแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.6 และกราฟที่แสดงการกระโดดดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องมาจากภาระโดด



รูปที่ 3.7 แสดงความถี่ในการกระโดดบนแผ่นพื้น

บทที่ 4

ผลการวิจัย

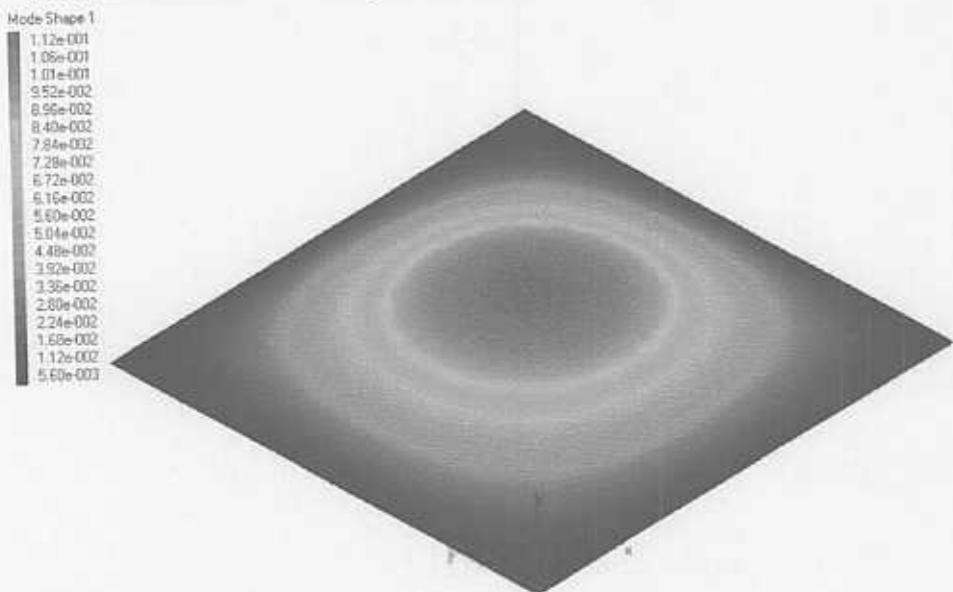
ไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลของแผ่นพื้นคอนกรีตขนาดใหญ่ (Long-span flat concrete floor) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม JL Analyzer ซึ่งเป็นไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมที่สามารถใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้หลายสาขาอาทิเช่น Static, Dynamic, Buckling, Frequency, Thermal, Electric และงานวิศวกรรมด้านอื่นๆ โดยจุดเด่นของโปรแกรมนี้อยู่ที่การใช้งานที่ง่าย

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้น

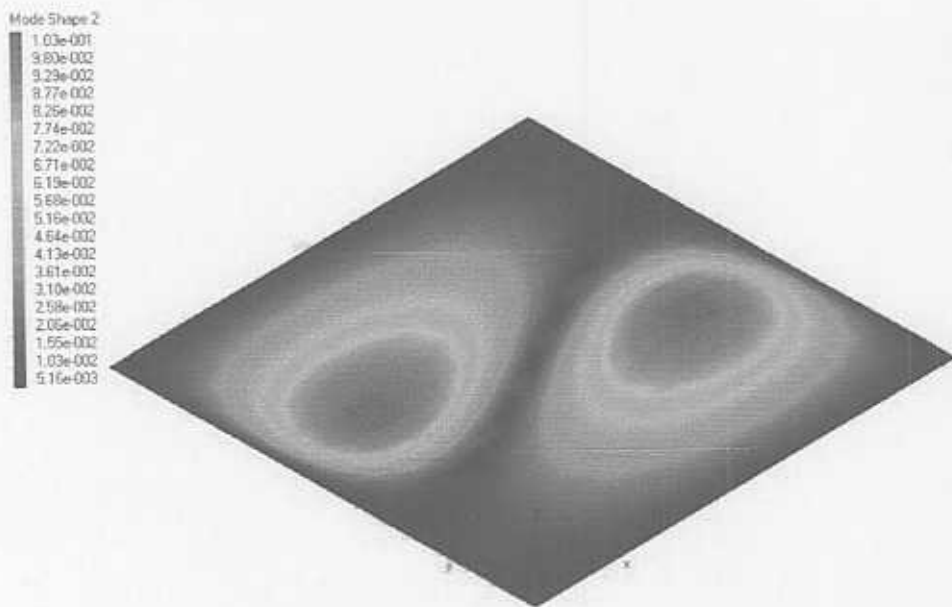
ในเบื้องต้นจะต้องทำการศึกษาค้นสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นหรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Natural frequency ของแผ่นพื้นตัวอย่างก่อนซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

◆ พื้นที่มีจุดรองรับแบบง่าย (Simply supported floor)

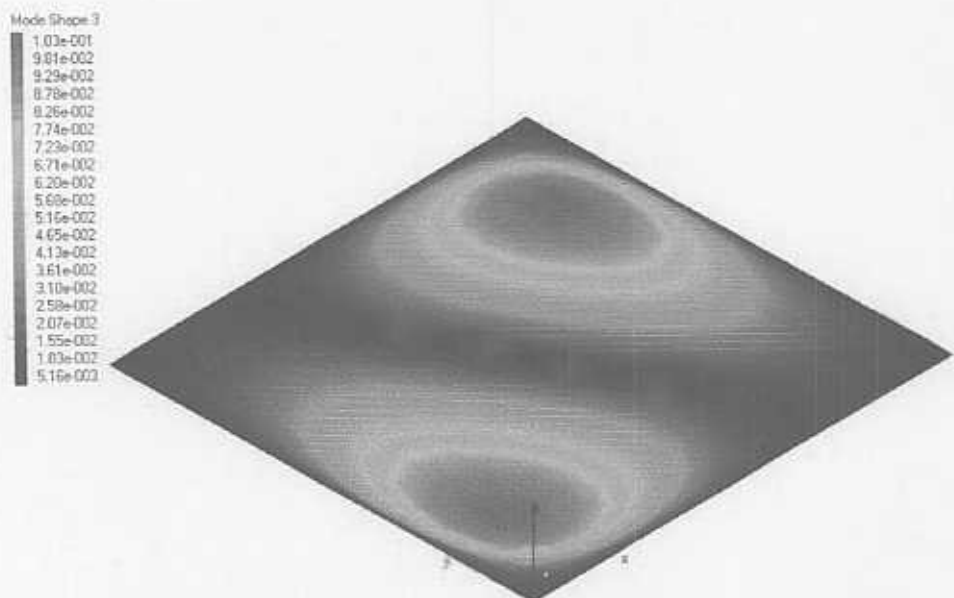
ในกรณีที่เงื่อนไขของจุดรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบง่ายค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสามแบบแรกได้แสดงในรูปที่ 4.1



ก. 1st Mode Nat. Freq. = 8.34379 Hz.



ข. 2nd Mode Nat. Freq. = 20.8286 Hz.



ค. 3rd Mode Nat. Freq. = 20.8286 Hz.

รูปที่ 4.1 แสดง Mode shape ของการสั่น (พื้นหนา 0.24 เมตร, Simply supported)

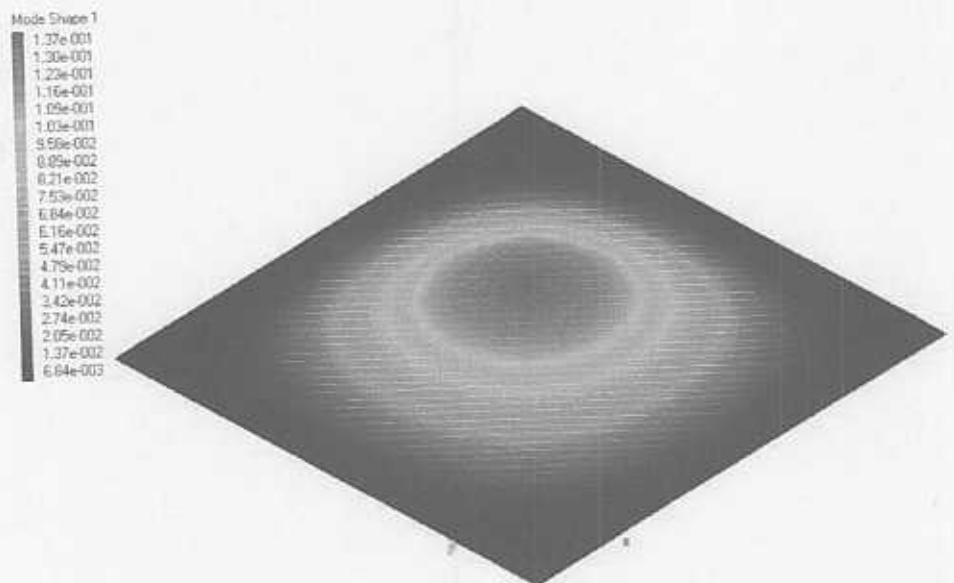
ถ้าหากเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้เป็น 0.26 และ 0.28 เมตร ซึ่งอีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มสติฟเนสให้แก่พื้นนั้นพบว่ารูปแบบของการสั่นมีลักษณะเหมือนกับกรณีที่พื้นมีความหนา 0.24 เมตร แต่ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความถี่ธรรมชาติของพื้นที่มีจุดรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบง่าย

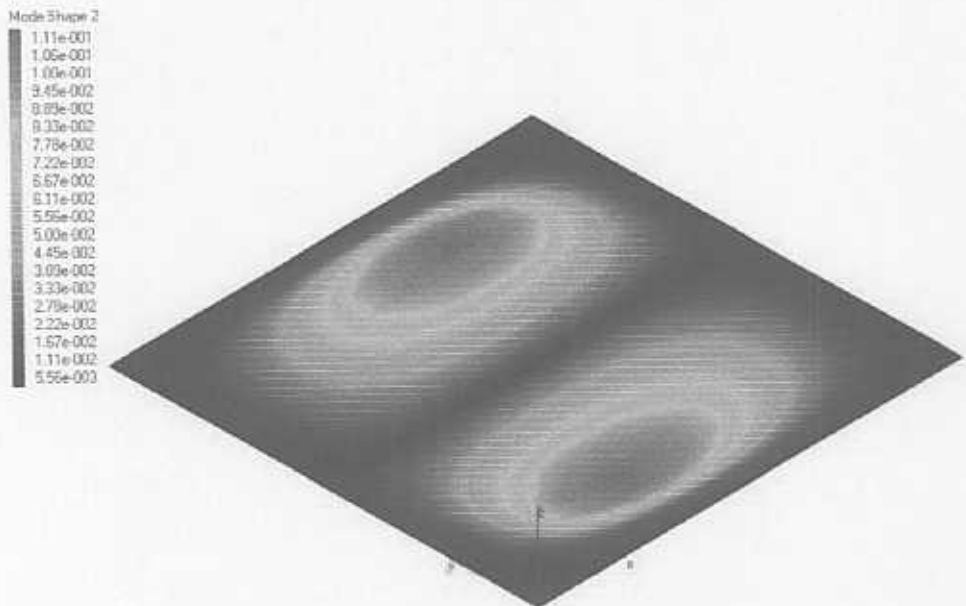
Thickness (m)	1 st Nat. Freq. (Hz)	2 nd Nat. Freq. (Hz)	3 rd Nat. Freq. (Hz)
0.24	8.34379	20.8286	20.8286
0.26	9.03581	22.5437	22.5437
0.28	9.72705	24.2539	24.2539

♦ จุดรองรับแบบยึดแน่น(Fixed supported floor)

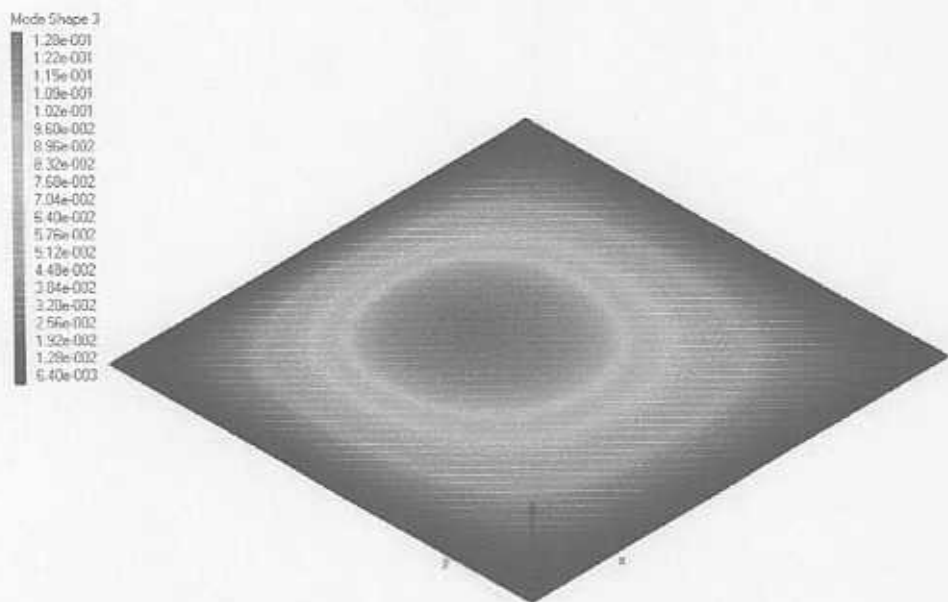
ในกรณีที่เงื่อนไขของจุดรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบ Fixed supported ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นสามโหมดแรกได้แสดงในรูปที่ 4.2



ก. 1st Mode Nat. Freq. = 15.2107 Hz.



ข. 2nd Mode Nat. Freq. = 31.0356 Hz.



ค. 3rd Mode Nat. Freq. = 211.057 Hz.

รูปที่ 4.2 แสดง Mode shape ของการสั่น (พื้นหนา 0.24 เมตร, Fixed supported)

ถ้าหากเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้เป็น 0.26 และ 0.28 เมตร ซึ่งอีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มความแกร่งให้แก่พื้นนั้นพบว่ารูปแบบของการสั่นมีลักษณะเหมือนกับกรณีที่พื้นมีความหนา 0.24 เมตร แต่ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความถี่ธรรมชาติของพื้นที่มีจุดรองรับของแผ่นพื้นเป็นแบบยึดแน่น

Thickness (m)	1 st Nat. Freq. (Hz)	2 nd Nat. Freq. (Hz)	3 rd Nat. Freq. (Hz)
0.24	15.2107	31.0356	211.057
0.26	16.4595	33.5526	211.057
0.28	17.7039	36.0536	211.057

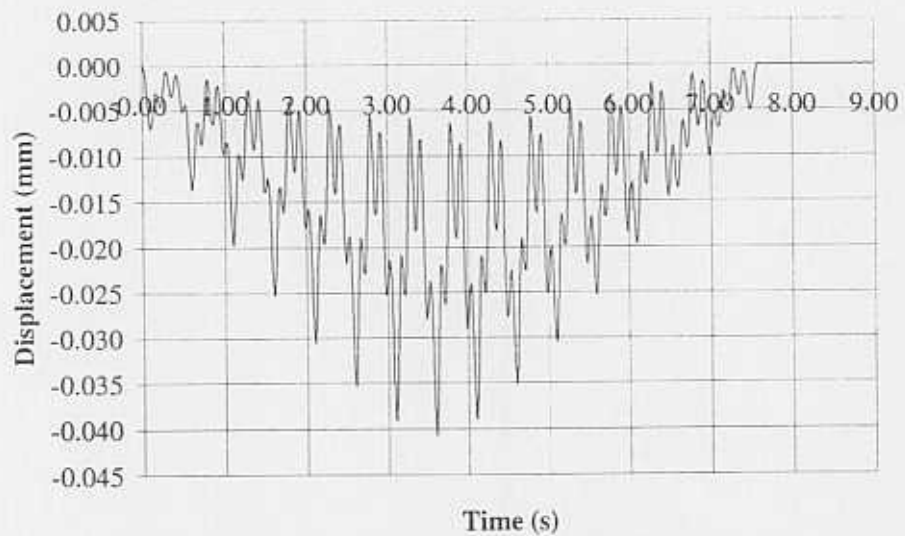
จากผลการศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นและสภาวะของจุดรองรับพบว่าความหนามีผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามจะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนสภาวะของจุดรองรับจากจุดรองรับอย่างง่ายไปเป็นยึดแน่นนั้นส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติเพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าตัวของความถี่ธรรมชาติในกรณีแรก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนเงื่อนไขของจุดรองรับก็เสมือนเป็นการเพิ่มความแกร่งบริเวณขอบของแผ่นพื้นจึงส่งผลให้เกิดการสั่นที่มีความถี่สูงขึ้น

4.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงการทำจากการเดิน (1 คน)

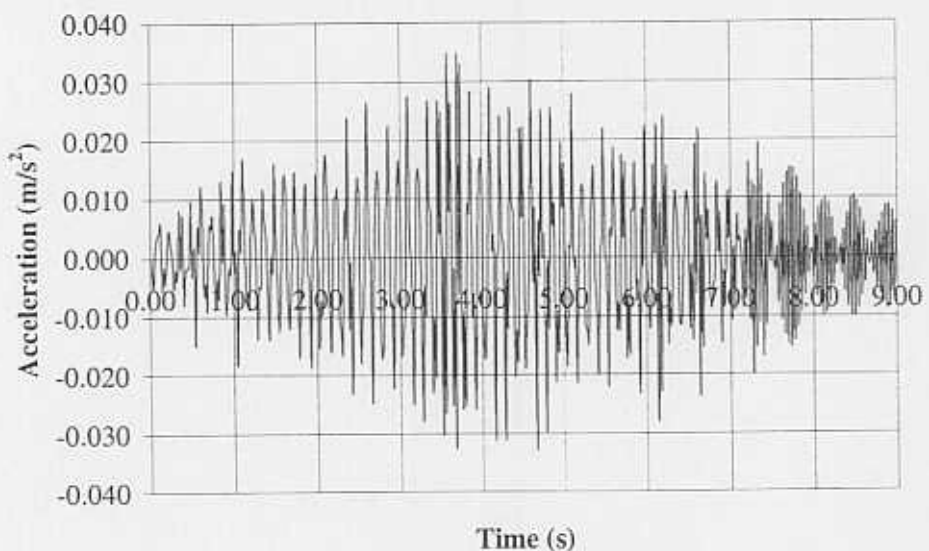
ในการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงการทำจากการเดิน (Walking load) แบบ 1 คน ผลการศึกษาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ตามลักษณะของเงื่อนไขของจุดรองรับซึ่งได้แก่ จุดรองรับอย่างง่าย จุดรองรับแบบยึดแน่น ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

♦ จุดรองรับอย่างง่าย (Simply supported)

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์แผ่นพื้นที่โดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์การแอ่นตัวและรูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ความเร่ง ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นผลการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีความหนา 0.24 เมตร จุดรองรับเป็นแบบง่ายและ ความหน่วงร้อยละ 0



รูปที่ 4.3 การแอ่นตัวเนื่องจากคน 1 คน เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2 เฮิรตซ์ จุดรองรับแบบง่าย ความหนา 0.24 เมตร

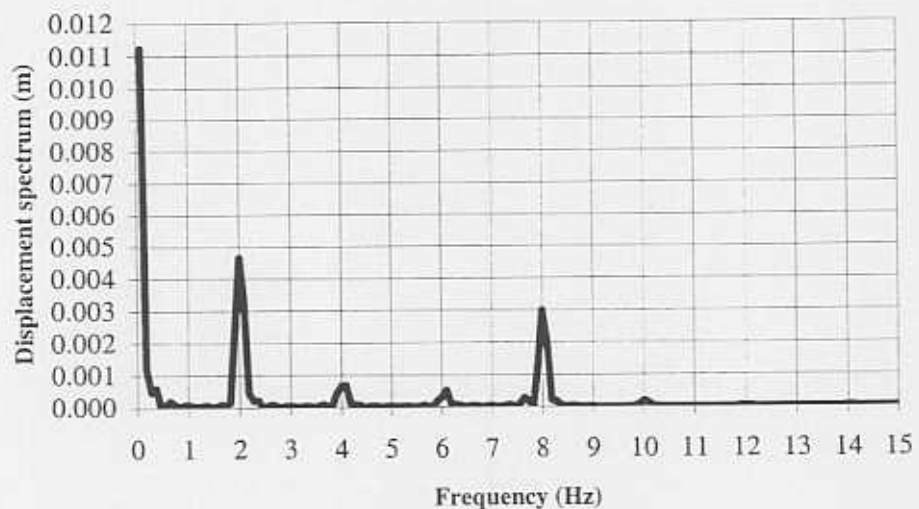


รูปที่ 4.4 ความเร่งจากคน 1 คน เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2 เฮิรตซ์ จุดรองรับแบบง่าย หนา 0.24 เมตร

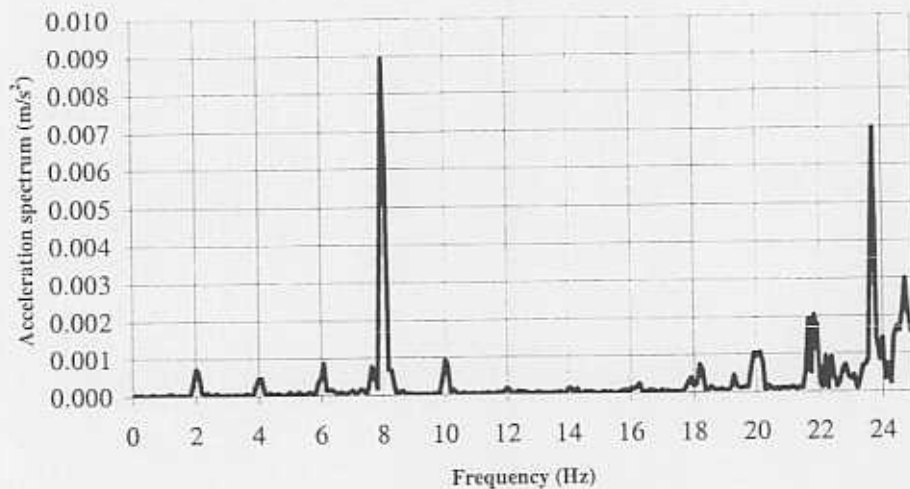
จากรูปพบว่าตำแหน่งของความเร่งและการแอ่นตัวมีทิศตรงกันข้ามกัน เนื่องมาจากแผ่นพื้นจะเกิดการแอ่นตัวอยู่ตลอดเวลาทำให้ค่าเป็นลบส่วนความเร่งเมื่อเกิดการแอ่นตัวจะมีความเร็วเกิดขึ้นในทิศทางขึ้นลงตลอดเวลาซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic ค่าของการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.041 มิลลิเมตร ที่เวลาประมาณ 3.5 วินาที นั้นหมายความว่า ค่าการแอ่นตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นพื้นพอดี หลังจากนั้นขนาดของ ค่าการแอ่นตัว

จะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งแรงนั้นเคลื่อนที่ออกจากพื้นไป ถ้าหากพิจารณาถึงรูปร่างของการตอบสนองจะพบว่ามีลักษณะเหมือนการนำเอาฮาร์โมนิคหลาย ๆ อันมารวมกัน

รูปที่ 4.4 แสดงความเร่งของแผ่นพื้นที่เกิดขึ้นเมื่อมีคน 1 คนเดินด้วย ความถี่ในการก้าว เท่ากับ 2.0 เฮิรตซ์ ซึ่งขนาดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.3 แต่อย่างไรก็ตามกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 สามารถบอกได้เพียงแค่ขนาดและเวลาของการเกิดค่าสูงสุดนั้น ดังนั้นถ้าหากต้องการทราบถึงค่าของการตอบสนองของแผ่นพื้นเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้นนั้นจะต้องใช้โปรแกรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณมาช่วยในการคำนวณหาค่าความถี่ของการตอบสนองที่ต้องการได้ ซึ่งในที่นี้ใช้โปรแกรม DADiSP ที่มีฟังก์ชัน Fast Fourier Transform (FFT) ทำให้สามารถสัญญาณในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งอยู่ในรูป Time domain ไปเป็น Frequency domain ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 Displacement spectrum จากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.6 Acceleration spectrum จากรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดง Displacement spectrum และ Acceleration spectrum ที่ได้จากการแปลงสัญญาณที่อยู่ในรูป Time domain ไปเป็น Frequency domain โดยใช้เทคนิคของ FFT ซึ่งจะเห็นได้ว่า จำนวนของจุดสูงสุดของกราฟทั้งสองจะอยู่ในรูปของสมการทั่วไปคือ

$$\text{Number of peak} = n \times \text{Pacing frequency} \quad (4.1)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$

พิจารณากราฟ Acceleration spectrum ในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าสูงสุดของสเปกตรัมที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้นจะมีค่าสูงที่สุด

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของแผ่นพื้นซึ่งได้แก่ความหนาของแผ่นพื้น, ความถี่ในการก้าวรวมทั้งค่าความหน่วงของแผ่นพื้นที่มีจุดรองรับแบบง่าย ภายใต้การกระทำของน้ำหนักจากการเดินพบว่ามีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Finite element results of simply supported floor under walking load

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.0546	0.0410	0.0536	0.3670	0.3657	1.4300
	1	0.0292	0.0200	0.0220	0.1000	0.1047	0.1730
	2	0.0236	0.0150	0.0162	0.0750	0.0770	0.1240
	3	0.0197	0.0130	0.0130	0.0600	0.0620	0.0943
	5	0.0149	0.0098	0.0096	0.0432	0.4440	0.7050
0.26	0	0.0421	0.0370	0.1200	0.3679	0.0730	4.2810
	1	0.0240	0.0164	0.0182	0.0951	0.0970	0.1589
	2	0.0272	0.0138	0.0144	0.0718	0.0747	0.0119
	3	0.0174	0.0116	0.0116	0.0583	0.0600	0.0950
	5	0.0135	0.0088	0.0087	0.0422	0.0434	0.0688
0.28	0	0.0414	0.0218	0.0430	0.6764	0.5160	0.8090
	1	0.0198	0.0138	0.0158	0.0905	0.0956	0.1555
	2	0.0174	0.0119	0.0127	0.0690	0.0720	0.1150
	3	0.0152	0.0103	0.0105	0.0563	0.0583	0.0924
	5	0.0121	0.0077	0.0079	0.0412	0.0404	0.0673

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.3 พบว่าความหนาของแผ่นพื้นมีส่วนช่วยลดแอมพลิจูดของการสั่นได้ประมาณร้อยละ 10 ซึ่งมีผลน้อยกว่าการเพิ่มค่าความหน่วงของแผ่นพื้นที่สามารถช่วยลดแอมพลิจูดของการสั่นได้ถึง 50% อนึ่งถ้าพิจารณาค่าความเร่งที่เกิดขึ้นสูงสุด จะพบว่าแผ่นพื้นที่มีความหนา 0.24 เมตร ค่าความถี่ในการก้าวเท่ากับ 2.77 เฮิร์ตซ์ (Brisk walk) มีค่า ความเร่งที่เกิดขึ้นสูงสุด สาเหตุเป็นเพราะว่า ความถี่ 2.77 เฮิร์ตซ์ มีค่าใกล้เคียงกับ 1/3 ของความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้น สภาวะเช่นนี้เรียกว่า ก้าวทอน ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่วิกฤตที่สุดของการสั่นของแผ่นพื้นนั้น ๆ และพบว่าความถี่ในการก้าวมีส่วนที่ทำให้การตอบสนองทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นนั้นเพิ่มขึ้นดังจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของการเดินเพิ่มขึ้นค่าความเร่งที่เกิดขึ้นสูงสุดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

♦ จูตรองรับแบบยึดแน่น (Fixed supported)

ในกรณีที่เงื่อนไขจูตรองรับเป็นแบบยึดแน่นนั้นลักษณะการตอบสนองทางพลศาสตร์จะมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีที่จูตรองรับเป็นแบบง่ายเพียงแต่จะมีค่าแอมพลิจูดที่น้อยกว่ากรณีแรกอันเนื่องมาจากการเพิ่มการยึดแน่น (Rigidity) ของแผ่นพื้น ซึ่งผลการศึกษาได้สรุปอยู่ในตารางที่ 4.4

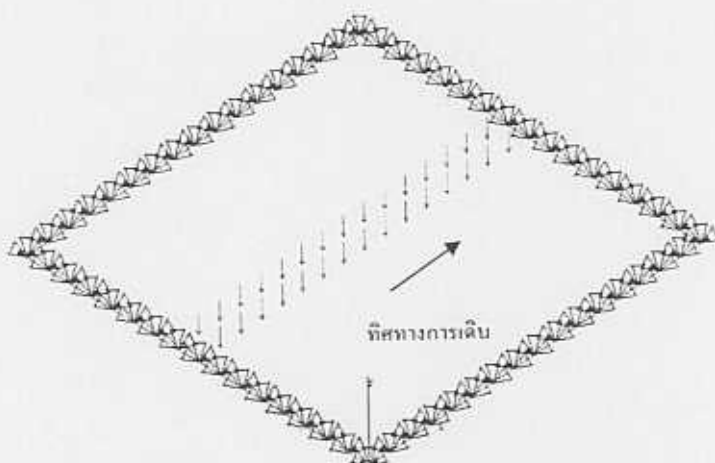
ตารางที่ 4.4 Finite element results of fixed supported floor under walking load

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.0255	0.0182	0.0271	0.4636	0.5507	0.3565
	1	0.0172	0.0124	0.0146	0.1163	0.1230	0.2061
	2	0.0159	0.0113	0.0131	0.0917	0.0958	0.1562
	3	0.0152	0.0106	0.0120	0.0769	0.0797	0.1278
	5	0.0138	0.0094	0.0103	0.0586	0.0601	0.0955
0.26	0	0.0196	0.0129	0.0209	0.4991	0.2296	0.3354
	1	0.0140	0.0101	0.0120	0.1099	0.1154	0.1928
	2	0.0128	0.0094	0.0107	0.0872	0.0916	0.1487
	3	0.0123	0.0087	0.0100	0.0736	0.0767	0.1228
	5	0.0115	0.0079	0.0088	0.0566	0.0583	0.0925
0.28	0	0.0148	0.0105	0.0170	0.3685	0.2665	0.3283
	1	0.0116	0.0084	0.0100	0.1042	0.1087	0.1805
	2	0.0106	0.0076	0.0089	0.0832	0.0878	0.1416
	3	0.0101	0.0073	0.0083	0.0706	0.0739	0.1179
	5	0.0095	0.0067	0.0075	0.0547	0.0566	0.0906

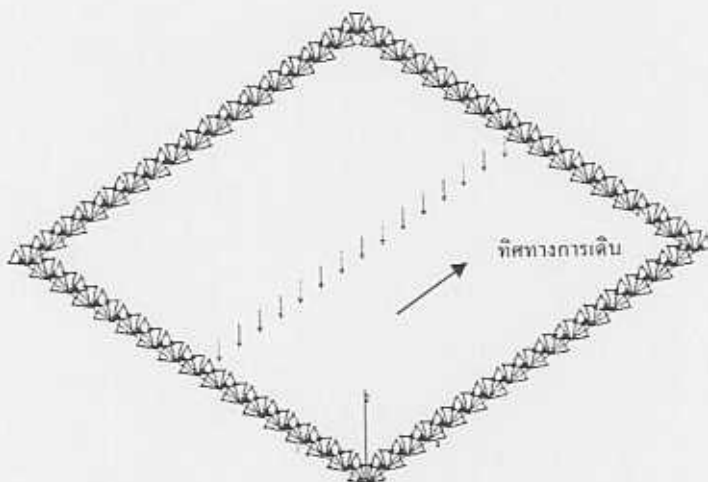
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มการยึดแน่นที่จุดรองรับสามารถลดขนาดของแอมปลิจูดของการแอ่นตัวได้ประมาณร้อยละ 50 แต่ในทางตรงกันข้ามแอมปลิจูดของความเร่งมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย สาเหตุที่แอมปลิจูดเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากพื้นมีค่าความแกร่ง(stiffness)เพิ่มขึ้น นั่นเอง สำหรับผลของการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้น ความถี่ในการก้าวและความหน่วงให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีที่มีจุดรองรับเป็นแบบง่าย

4.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (2 คน)

การตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดินที่มีคนเดิน 2 คนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 3 กรณีแรกคือการเดินแบบหน้ากระดานซึ่งลักษณะแรงที่กระทำลงบนแผ่นพื้นตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และแรงกระทำแบบหน้ากระดานดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม JL Analyzer ทำให้ได้ค่าการแอ่นตัวและ ความเร่งของแผ่นพื้นโดยได้นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงค่าสูงสุดของแต่ละค่าขึ้นดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



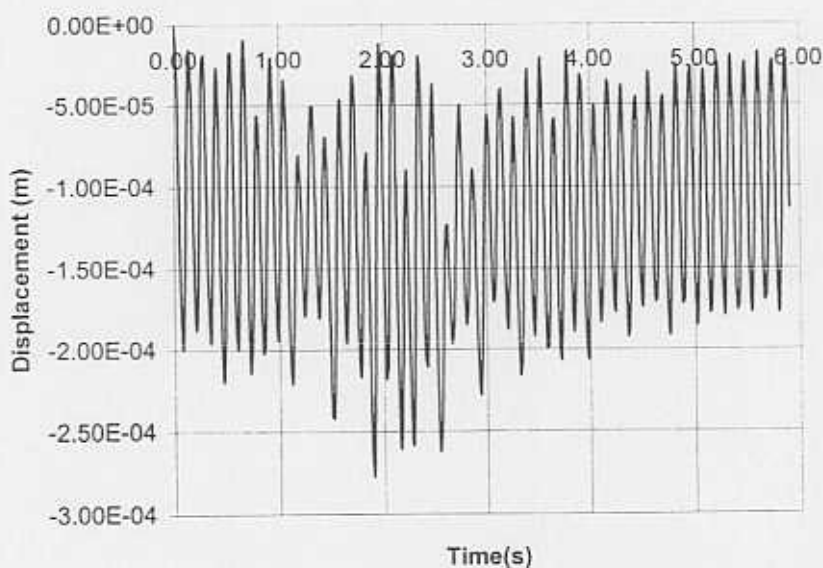
รูปที่ 4.7 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจากการเดินแบบหน้ากระดาน



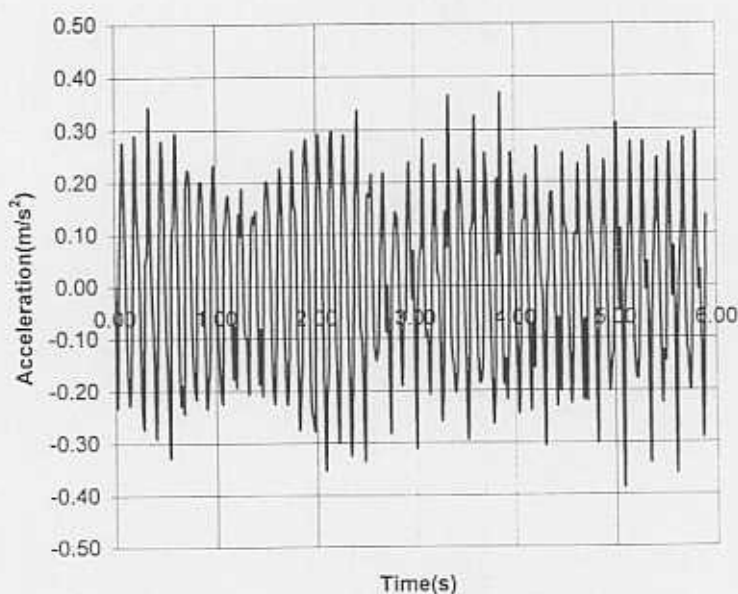
รูปที่ 4.8 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจากการเดินแบบสดมภ์(column)

◆ จุดรองรับอย่างง่าย

จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงการแอ่นตัวของแผ่นพื้นพบว่าค่าการแอ่นตัวสูงสุดของแผ่นพื้นที่จุดกึ่งกลางมีค่าเท่ากับ 0.2765 มิลลิเมตรโดยที่การแอ่นตัวจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อถึงค่าสูงสุดแล้ว และ ความเร่ง ของแผ่นพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 ณ จุดกึ่งกลางมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.72256%g โดยความถี่จะขึ้น ๆ ลง ๆ สลับกันไปมา



รูปที่ 4.9 แสดง Displacement time history เติร์ดเรียงหน้ากระดาน ความหนา 0.24 เมตร
เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์ จูตรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.10 แสดง Acceleration time history เติร์ดเรียงหน้ากระดาน เดินด้วยความถี่ในการ
ก้าว = 2.77 เฮิรตซ์ ความหนา 0.24 เมตร จูตรองรับแบบง่าย

ทั้งนี้แผ่นพื้นตัวอย่างที่นำมาแสดงนี้เป็นแผ่นพื้นเป็นแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีความหนา 0.24 เมตร
และมีความหน่วงร้อยละ 0 จูตรองรับเป็นแบบง่าย เมื่อทำการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่างโดยการ

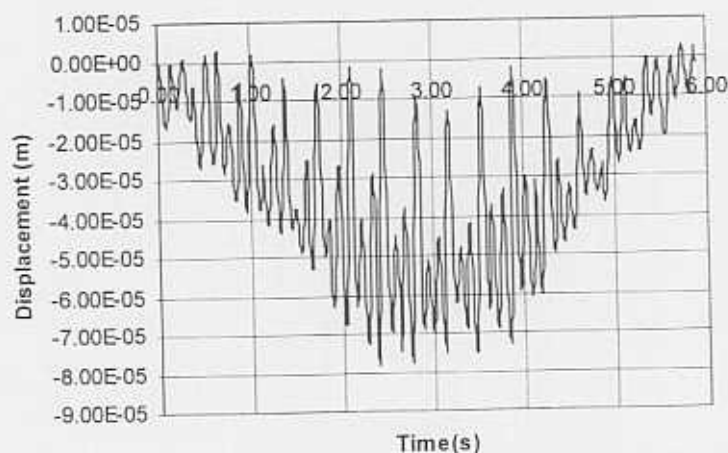
เพิ่มความหนาของแผ่นพื้นและเพิ่มความหน่วงของแผ่นพื้นตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่าง ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 Finite element results of simply supported floor under walking load (2 คน)

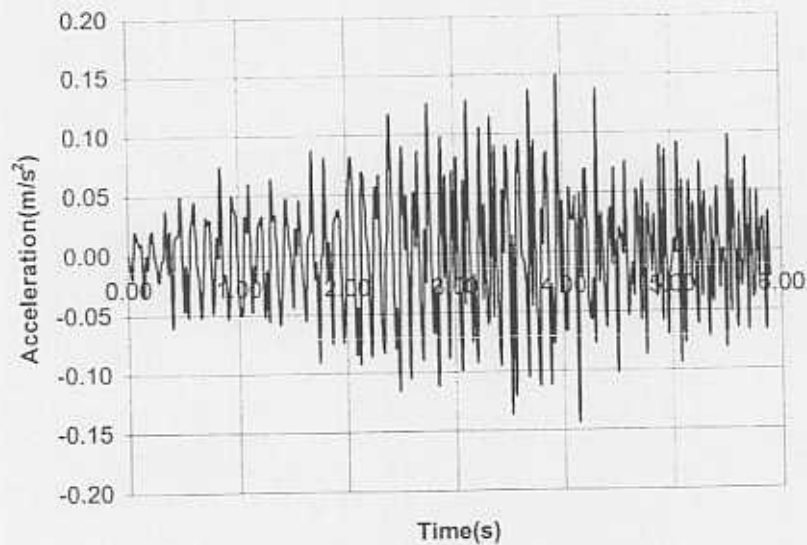
Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.2819	0.2518	0.2765	3.3483	3.3637	3.7226
	1	0.1489	0.1313	0.1285	0.1289	0.1288	0.1817
	2	0.1263	0.1093	0.1039	0.0689	0.0787	0.1195
	3	0.1078	0.0967	0.0924	0.0575	0.0615	0.0932
	5	0.0840	0.0755	0.0730	0.0423	0.0503	0.0670
0.26	0	0.2134	0.1737	0.3393	3.3327	2.8183	8.1609
	1	0.1212	0.1073	0.1069	0.1260	0.1260	0.1707
	2	0.1071	0.0926	0.0868	0.0659	0.0762	0.1157
	3	0.0931	0.0824	0.0783	0.0552	0.0597	0.0907
	5	0.0751	0.0675	0.0649	0.0411	0.0428	0.0651
0.28	0	0.1698	0.1505	0.1938	3.5050	2.8057	3.4141
	1	0.0992	0.0880	0.0895	0.1231	0.1231	0.1604
	2	0.0889	0.0788	0.0735	0.0609	0.0740	0.1593
	3	0.0811	0.0698	0.0664	0.0531	0.0581	0.0884
	5	0.0665	0.0597	0.0572	0.0398	0.0418	0.0635

การที่แผ่นพื้นมีความหนาขึ้นส่งผลอย่างชัดเจนต่อการแอ่นตัวและความเร่งโดยที่ความหนาที่เพิ่มขึ้นจะไปลดค่าขนาดการแอ่นตัวแต่ขนาดความเร่งกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากค่าความแข็งของแผ่นพื้นที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จะเห็นว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อแอมพลิจูดของความเร่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้าหากเพิ่มความหน่วงเข้าไปในระบบสามารถที่จะลดแอมพลิจูดของความเร่งได้มากกว่าร้อยละ 50

ส่วนแผ่นพื้นที่มีแรงกระทำเป็นแบบแถว (column) นั้นค่าการแอ่นตัวและความเร่งโดยมีจุดรองรับแบบง่ามนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดง Displacement time history เเดินแบบแถว ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิร์ตซ์ จุดรองรับแบบง่าม



รูปที่ 4.12 แสดง Acceleration time history เดินแบบแถว ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์ จุตรองรับแบบง่าย

ผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่างที่มีแรงกระทำจากการเดินโดยมีน้ำหนักจากคนเดิน 2 คนกระทำบนแผ่นพื้นนั้นซึ่งลักษณะการเดินเป็นแบบเดินตามกันไป(สดมภ์) นั้นสามารถแสดงเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 Finite element results of simply supported floor under walking load 2 คน (สดมภ์)

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.0770	0.0661	0.0777	0.4749	0.6436	1.5185
	1	0.0571	0.0390	0.0451	0.1377	0.1991	0.1881
	2	0.0473	0.0314	0.0343	0.1063	0.1401	0.1165
	3	0.0396	0.0259	0.0275	0.0926	0.1107	0.0950
	5	0.0299	0.0194	0.0199	0.0717	0.0811	0.0706
0.26	0	0.0632	0.0694	0.2113	0.6681	1.3041	7.9248
	1	0.0464	0.0323	0.0377	0.1296	0.1885	0.1790
	2	0.0404	0.0271	0.0300	0.1011	0.1343	0.1119
	3	0.0347	0.0230	0.0247	0.0882	0.1068	0.0915
	5	0.0270	0.0176	0.0183	0.0693	0.0788	0.0688
0.28	0	0.0720	0.0411	0.0700	1.4226	0.8943	1.5521
	1	0.0381	0.0269	0.0316	0.1225	0.1791	0.1695
	2	0.0344	0.0233	0.0263	0.0966	0.1288	0.1077
	3	0.0304	0.0203	0.0222	0.0841	0.1032	0.0884
	5	0.0243	0.0159	0.0168	0.0670	0.0765	0.0666

จากตารางที่ 4.6 พบว่าตัวที่จะควบคุมแอมพลิจูดของความเร่งได้ดีคือความหน่วงเพราะสามารถที่จะลดแอมพลิจูดของความเร่งได้มากกว่าการเพิ่มความหนา

♦ จูตรองรับแบบยึดแน่น

ในกรณีที่เงื่อนไขจูตรองรับเป็นแบบ Fixed supported นั้นลักษณะการตอบสนองทางพลศาสตร์จะมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีที่จูตรองรับเป็นแบบง่ายเพียงแต่จะมีค่าแอมพลิจูดที่น้อยกว่ากรณีแรกอันเนื่องมาจากการเพิ่มความแข็งของแผ่นพื้น ซึ่งผลการศึกษาได้สรุปอยู่ในตารางที่ 4.7 จะเป็นผลของน้ำหนักจากการเดินที่มีแรงกระทำบนพื้นตัวอย่าง 2 คนแบบเดินเรียงหน้ากระดาน

ตารางที่ 4.7 Finite element results of fixed supported floor under walking load 2 คน
(เรียงหน้ากระดาน)

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Wa	Brisk Walk
0.24	0	0.1130	0.0864	0.1057	3.5739	3.2682	3.2055
	1	0.0699	0.0606	0.0649	0.1903	0.1902	0.2306
	2	0.0671	0.0586	0.0615	0.1025	0.1025	0.1562
	3	0.0651	0.0569	0.0584	0.0702	0.0812	0.1234
	5	0.0609	0.0531	0.0519	0.0560	0.0595	0.0904
0.26	0	0.0860	0.0695	0.0858	3.5932	2.7629	2.8992
	1	0.0560	0.0484	0.0520	0.1860	0.1859	0.2133
	2	0.0536	0.0467	0.0495	0.1001	0.1008	0.1476
	3	0.0523	0.0457	0.0476	0.0686	0.0787	0.1192
	5	0.0498	0.0435	0.0435	0.0538	0.0578	0.0879
0.28	0	0.0656	0.0570	0.0685	2.5416	2.6066	2.6639
	1	0.0457	0.0394	0.0425	0.1823	0.1822	0.1991
	2	0.0436	0.0379	0.0404	0.0992	0.0991	0.1396
	3	0.0426	0.0371	0.0391	0.0679	0.0763	0.1152
	5	0.0410	0.0358	0.0367	0.0520	0.0562	0.0866

จากข้อมูลที่ปรากฏในตารางพบว่า ความหน่วงของแผ่นพื้นมีผลต่อการลดการแอ่นตัวของแผ่นพื้นตัวอย่างเป็นอย่างยิ่ง และเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นตัวอย่างที่เป็นจูตรองรับแบบง่ายโดยการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นรวมไปถึงการเพิ่มความหน่วงให้กับแผ่นพื้นตัวอย่าง แล้วจะพบว่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางพื้นลดลงเป็นอย่างมาก และเมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเดินบนพื้นตัวอย่าง 2 คนเดินแบบสดมภ์ จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 Finite element results of fixed supported floor under walking load 2 คนเดิน
เป็นแถว

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.0385	0.0340	0.0323	0.6986	0.8155	0.5898
	1	0.0329	0.0231	0.0255	0.1554	0.2423	0.2518
	2	0.0298	0.0216	0.0238	0.1275	0.1783	0.1591
	3	0.0287	0.0205	0.0222	0.1086	0.1444	0.1197
	5	0.0264	0.0184	0.0196	0.0907	0.1073	0.0925
0.26	0	0.0306	0.0240	0.0258	0.8513	0.3791	0.6124
	1	0.0246	0.0187	0.0205	0.1458	0.2283	0.2346
	2	0.0238	0.0175	0.0193	0.1205	0.1695	0.1528
	3	0.0232	0.0167	0.0183	0.1034	0.1382	0.1148
	5	0.0217	0.0154	0.0165	0.0864	0.1036	0.0891
0.28	0	0.0225	0.0192	0.0213	0.5034	0.4417	0.6160
	1	0.0200	0.0154	0.0167	0.1373	0.2158	0.2182
	2	0.0194	0.0143	0.0158	0.1143	0.1614	0.1461
	3	0.0189	0.0138	0.0152	0.0987	0.1324	0.1103
	5	0.0180	0.0129	0.0139	0.0825	0.1001	0.0861

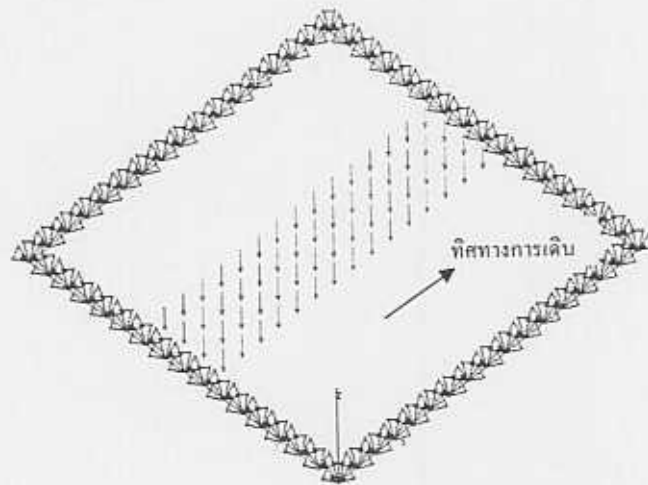
ผลที่ออกมามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยที่กรณีที่ไม่มีความหน่วงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจะทำให้ค่าแอมพลิจูดของความเร่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีความหน่วงในระบบพื้น ทั้งนี้แอมพลิจูดที่ลดลงมากกว่าร้อยละ 50 ส่วนกรณีที่เพิ่มความหนาขึ้นแอมพลิจูดของความเร่งลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่ทั้งนี้ผลของการยึดแน่นของจตุรรองรับมีส่วนที่ทำให้แอมพลิจูดของความเร่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอันเนื่องมาจากความแกร่งของแผ่นพื้นนั่นเอง

4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (4 คน)

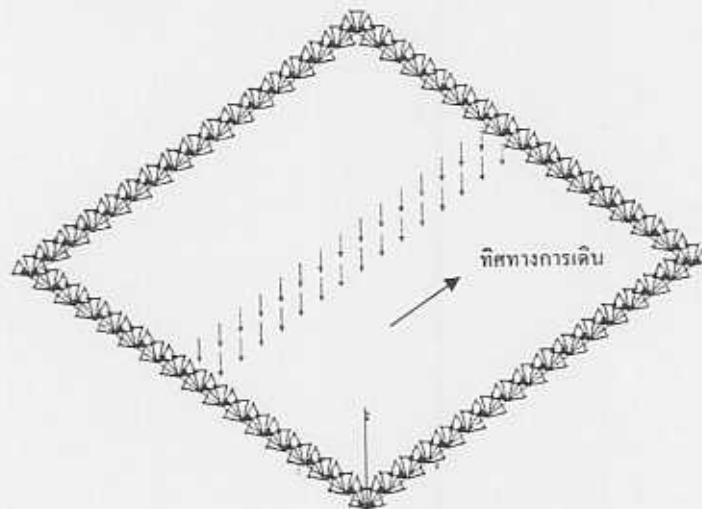
การตอบสนองของแผ่นพื้นที่มีต่อแรงกระทำที่เกิดจากการเดินนั้นแผ่นพื้นตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์คล้ายคลึงกับแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีแรงจากการเดิน ทั้งแบบเดินคนเดียวและเดิน 2 คน ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบการเดินของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.13 เป็นการเดินแบบรียงหน้ากระดานและในรูปที่ 4.14 เป็นการเดินแบบเป็นเดินหน้ากระดานเรียงสอง (สดมภ์) โดยที่ความแตกต่างของพื้นตัวอย่างทั้งสองชนิดก็คือรูปแบบการเดินบนพื้นตัวอย่าง ซึ่งทำให้ผลที่วิเคราะห์ได้มีความแตกต่างกันพอสมควร

♦ จูตรองรับอย่างง่าย(Simply supported)

ลักษณะการตอบสนองของแผ่นพื้นในรูปของ Displacement time history และ Acceleration time history แผ่นพื้นที่มีแรงกระทำจากการเดิน โดยที่การเดินบนแผ่นพื้นเป็นแบบเรียงหน้ากระดานโดยที่ตัวอย่างของแผ่นพื้นนี้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 และในรูปที่ 4.14

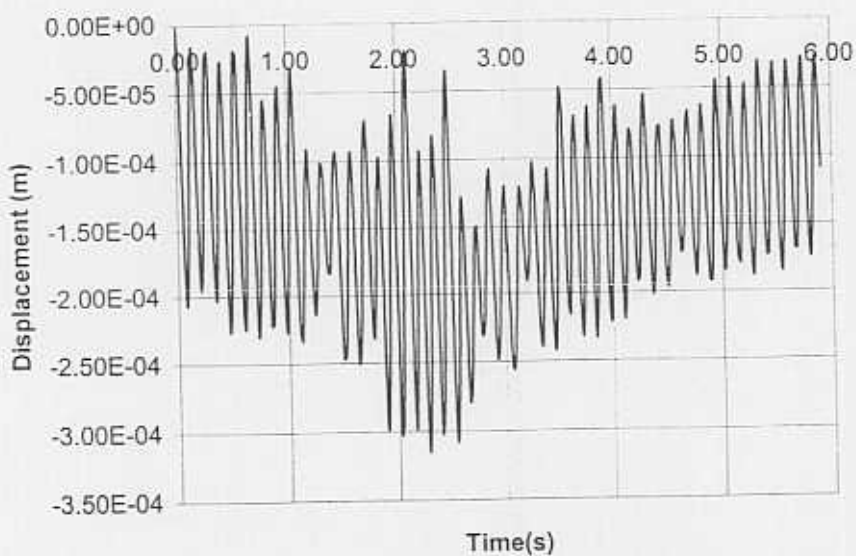


รูปที่ 4.13 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจากการเดินแบบ 4 คนเรียงหน้ากระดาน

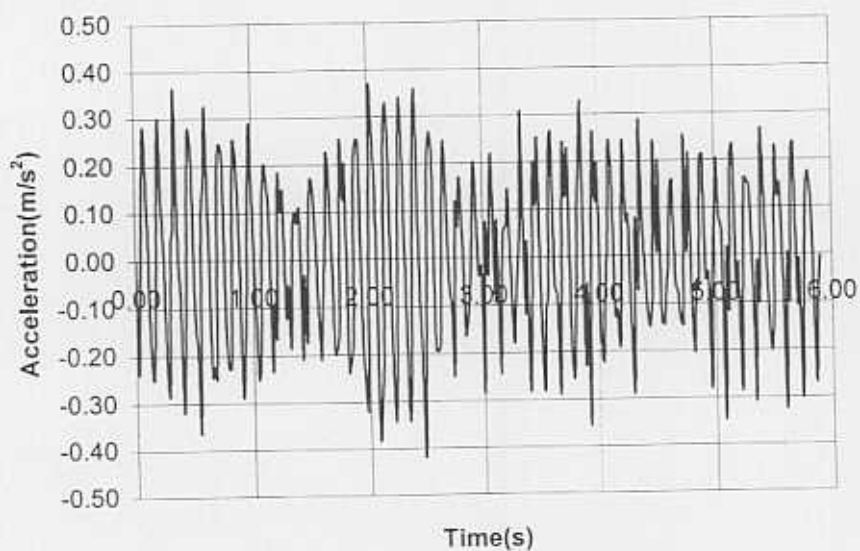


รูปที่ 4.14 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจากการเดินแบบสดมภ์เรียงสอง

เมื่อทำการวิเคราะห์การเดินในลักษณะต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วแล้วจะได้รูปกราฟแสดงความถี่ของการตอบสนองต่อแรงกระทำจากการเดินแบบสดมภ์บนแผ่นพื้นตัวอย่าง เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้ทราบแนวโน้มของการแอ่นตัวและความเร่งที่แผ่นพื้นตอบสนองได้โดยได้แสดงกราฟการตอบสนองของแผ่นพื้นในรูปของ การแอ่นตัว และ ความเร่ง ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดง Displacement time history ของ Walking load 4 คนเดิน ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.16 แสดง Acceleration time history ของ Walking load 4 คนเดิน ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์

สำหรับตัวอย่างแผ่นพื้นที่น่ามาแสดงนี้ เป็นแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีแรงกระทำจากการเดินโดยที่มีคนเดิน 4 คนลักษณะเป็นแถวเรียงสอง เป็นแผ่นพื้นตัวอย่างที่มีความหนา 0.24 เมตร ไม่มีความหน่วง หรือความหน่วงเป็นร้อยละ 0 จะเห็นได้ว่าค่าการแอ่นตัว ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นพื้น มีการแอ่นตัวเท่ากับ 0.3149 มิลลิเมตร และค่าความเร่ง เท่ากับ 3.7193%g ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดสำหรับผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นที่มีแรงกระทำจากการเดิน โดยที่มีคนเดินบนแผ่นพื้น 4 คนเรียงสองได้แสดงในรูปตารางซึ่งทำให้ทราบแนวโน้มทั้งหมดของ การแอ่นตัว และ ความเร่งดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 Finite element results of simply supported floor under walking load 4 คนเรียงสอง

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.3251	0.3027	0.3149	3.4908	3.5184	3.7193
	1	0.1980	0.1655	0.1675	0.1405	0.2353	0.1902
	2	0.1678	0.1371	0.1306	0.1100	0.1524	0.1137
	3	0.1439	0.1162	0.1106	0.0901	0.1167	0.0851
	5	0.1099	0.0904	0.0872	0.0703	0.0822	0.0641
0.26	0	0.2488	0.2200	0.4733	3.3469	3.1151	14.6017
	1	0.1600	0.1344	0.1392	0.1316	0.2238	0.1793
	2	0.1423	0.1171	0.1138	0.1047	0.1474	0.1096
	3	0.1249	0.1012	0.0953	0.0867	0.1134	0.0822
	5	0.0991	0.0809	0.0776	0.0677	0.0802	0.0621
0.28	0	0.2088	0.1855	0.2432	3.9175	3.2138	4.6245
	1	0.1313	0.1107	0.1155	0.1236	0.2148	0.1688
	2	0.1201	0.0997	0.0983	0.0997	0.1427	0.1056
	3	0.1077	0.0881	0.0844	0.0835	0.1102	0.0796
	5	0.0887	0.0717	0.0683	0.0653	0.0783	0.0602

จากค่าที่แสดงในตารางข้างต้น เมื่อความหนาเปลี่ยนแปลงไปทำให้การแอ่นตัวที่กึ่งกลางเปลี่ยนไปด้วย โดยการแอ่นตัวจะค่อย ๆ ลดลงมาเมื่อมีการเพิ่มความหนา การเดินก็มีผลต่อการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพื้นเช่นเดียวกัน โดยการเดินอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดการแอ่นตัวมากที่สุด ส่วนทางกับความเร่งโดยความเร่งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความแข็ง (stiffness) ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง และผลการวิเคราะห์การตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างจะแสดงในรูปกราฟ ซึ่งเป็นการนำเสนอผลของการวิเคราะห์ด้วย ไฟไนท์อีลิเมนต์ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 Finite element results of simply supported floor under walking load 4 คน

เดินเรียงหน้ากระดาน

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.6118	0.5347	0.6088	7.1630	7.2042	9.3120
	1	0.2769	0.2842	0.2808	0.2097	0.2097	0.2212
	2	0.2768	0.2473	0.2033	0.1179	0.1179	0.1379
	3	0.2416	0.2157	0.2057	0.0816	0.0816	0.1034
	5	0.1866	0.1678	0.1616	0.0493	0.0493	0.0719
0.26	0	0.4711	0.3935	0.6924	6.7610	6.7865	16.8336
	1	0.2585	0.2312	0.2305	0.2008	0.2013	0.2133
	2	0.2313	0.2068	0.1953	0.1138	0.1138	0.1348
	3	0.2076	0.1840	0.1744	0.0794	0.0794	0.1011
	5	0.1675	0.1503	0.1443	0.0486	0.0048	0.0703
0.28	0	0.3718	0.3371	0.3928	7.4303	6.0430	7.1652
	1	0.2110	0.1890	0.1915	0.2023	0.1949	0.2063
	2	0.1929	0.1733	0.1671	0.1099	0.1099	0.1320
	3	0.1771	0.1584	0.1470	0.0772	0.0772	0.0990
	5	0.1490	0.1332	0.1272	0.0477	0.0477	0.0687

เราจะเห็นแนวโน้มของการแอ่นตัวและความเร่งโดยที่ค่า การแอ่นตัวลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่วนความเร่งมีแนวโน้มที่ลดลงอันเนื่องมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของแผ่นพื้นนั่นเอง

♦ จุตรองรับยึดแน่น(Fixed supported)

ในกรณีจุตรองรับยึดแน่น พฤติกรรมต่างๆของแผ่นพื้นตัวอย่างได้เปลี่ยนจากจุตรองรับอย่างง่ายโดยที่ จุตรองรับยึดแน่นถ่ายเทแรงจากแผ่นพื้นไปสู่จุตรองรับจึงเสมือนเป็นการเพิ่มความแกร่งให้กับแผ่นพื้นด้วย แผ่นพื้นจะสามารถต้านทานน้ำหนักที่มากกระทำได้มากขึ้นดังผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.11 จากผลที่ได้ทำการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่างแล้วจะพบว่าที่ความหนาต่างๆแผ่นพื้นมีความเร่งในรูปของ %g และค่าการแอ่นตัวที่แตกต่างกันออกไป โดยที่ค่าวิกฤติจะเป็นการเดินอย่างช้า ๆและไม่มีควมหน่วงในตัวอาคารโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความหนา 0.26 เมตร และ 0.24 เมตรจะมีความเร่งที่สูงสุดและรองลงมาตามลำดับ และการแอ่นตัว ที่สูงที่สุดจะเป็นการเดินอย่างช้า ๆ ซึ่งใกล้เคียงกับการเดินแบบเร่งรีบ ดังนั้นในลักษณะการเดินเช่นนี้ สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการออกแบบก็คือการเดินอย่างช้า ๆ และการเดินที่เร่งรีบ

ตารางที่ 4.11 Finite element results of fixed supported floor under walking load 4 คนเรียง
สอง

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Wal	Brisk Walk
0.24	0	0.1130	0.0864	0.1057	3.5739	3.2682	3.2055
	1	0.0699	0.0606	0.0649	0.1903	0.1902	0.2306
	2	0.0671	0.0586	0.0615	0.1025	0.1025	0.1562
	3	0.0651	0.0569	0.0584	0.0702	0.0812	0.1234
	5	0.0609	0.0531	0.0519	0.0560	0.0595	0.0904
0.26	0	0.0860	0.0695	0.0858	3.5932	2.7629	2.8992
	1	0.0560	0.0484	0.0520	0.1860	0.1859	0.2133
	2	0.0536	0.0467	0.0495	0.1001	0.1008	0.1476
	3	0.0523	0.0457	0.0476	0.0686	0.0787	0.1192
	5	0.0498	0.0435	0.0435	0.0538	0.0578	0.0879
0.28	0	0.0656	0.0570	0.0685	2.5416	2.6066	2.6639
	1	0.0457	0.0394	0.0425	0.1823	0.1822	0.1991
	2	0.0436	0.0379	0.0404	0.0992	0.0991	0.1396
	3	0.0426	0.0371	0.0391	0.0679	0.0763	0.1152
	5	0.0410	0.0358	0.0367	0.0520	0.0562	0.0866

ในลำดับต่อมาจะพิจารณาลักษณะการเดินสี่คนเรียงหน้ากระดาน โดยผลการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์อีลีเมนต์เป็นแบบจำลองในการศึกษาพฤติกรรมการสั่นของแผ่นพื้นชนิดนี้โดยที่มีจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น (Fixed supported) ซึ่งจะได้แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 Finite element results of fixed supported floor under walking load 4 คนเรียง
หน้ากระดาน

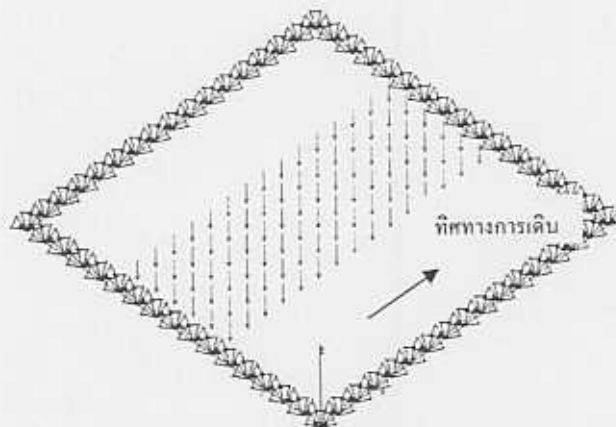
Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.130331	0.105737	0.119	3.691335	3.184954	3.603517
	1	0.093294	0.079744	0.081883	0.190261	0.304151	0.213273
	2	0.090206	0.075928	0.078284	0.130205	0.203712	0.16216
	3	0.087159	0.072928	0.075427	0.112516	0.157739	0.119001
	5	0.082691	0.068227	0.068154	0.087659	0.112866	0.082874
0.26	0	0.106487	0.082957	0.094251	4.269881	2.66735	2.999327
	1	0.074164	0.063892	0.065373	0.186009	0.287354	0.227478
	2	0.072068	0.06093	0.062473	0.122535	0.195489	0.15373
	3	0.070228	0.058958	0.060973	0.106791	0.152399	0.114398
	5	0.067069	0.05562	0.056817	0.08437	0.109542	0.080047
0.28	0	0.077426	0.074056	0.077037	2.532508	2.540754	2.993751
	1	0.059948	0.052115	0.053016	0.182265	0.272904	0.216625
	2	0.058419	0.049633	0.050982	0.115729	0.188345	0.145548
	3	0.057226	0.048213	0.049664	0.101515	0.147371	0.109782
	5	0.05478	0.045797	0.047351	0.081235	0.106388	0.077486

จากผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะการเดินเช่นนี้ความเร่งมีค่าสูงที่สุดอย่างชัดเจนเมื่อการเดินอย่างช้า ๆ และที่ความหนา 0.24 เมตรจะให้ค่าการแอ่นตัวที่มากที่สุด ที่ความหนา 0.26 เมตรค่า

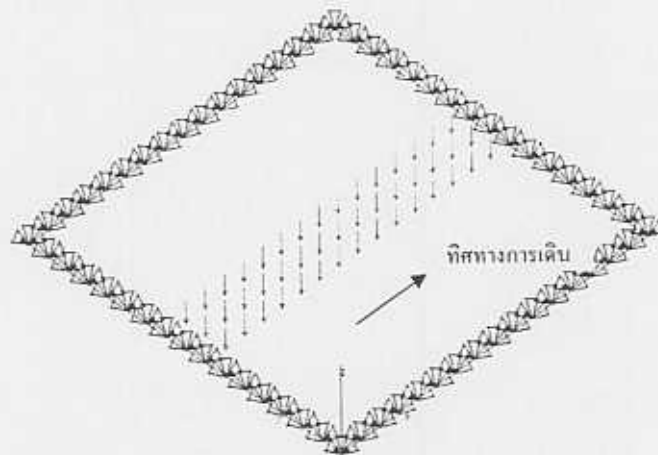
ความเร่งมีค่าสูงสุดเมื่อการเดินอย่างช้า ๆ ทั้งนี้จุดที่ต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังคือที่ความหนา 0.26 เมตรโดยที่พื้นไม่มีความหน่วงในอาคารและการเดินอย่างช้า ๆ ซึ่งจะให้ความเร่งที่มีค่าสูงสุด ทั้งนี้ควรหาทางลดความเร่งที่เกิดกับแผ่นพื้นชนิดนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะตามมา

4.5 ผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากการเดิน (6 คน)

กรณีที่มีแรงกระทำกับแผ่นพื้นตัวอย่างเป็นกลุ่มใหญ่จะมีรูปแบบการเดินที่หลากหลายแต่ทั้งนี้ได้นำเอากรณีที่มีคนเดินบนแผ่นพื้นตัวอย่าง 6 คนเป็นตัวแทนของกรณีดังกล่าว ซึ่งลักษณะการเดินนี้มีรูปแบบที่เหมือนกับสองกรณีที่ผ่านมาข้างต้นนี้ ซึ่งแผ่นพื้นจะมีการรับแรงกระทำจากการเดิน จากการเดินของตัวอย่าง 6 คน โดยที่แบบแรกจะเป็นการเดินเป็นหน้ากระดานตลอดทั้งแผ่นพื้นตัวอย่างโดยให้ผู้เดิน เดินอยู่ในแนวกึ่งกลางของแผ่นพื้นตัวอย่างโดยพยายามแบ่งข้างให้สมดุลที่สุด และแบบที่สองคือแบบที่มีการเดินแบบแถว (column) ซึ่งตัวอย่างแผ่นพื้นตัวอย่างแบบแรกและแบบที่สองแสดงอยู่ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

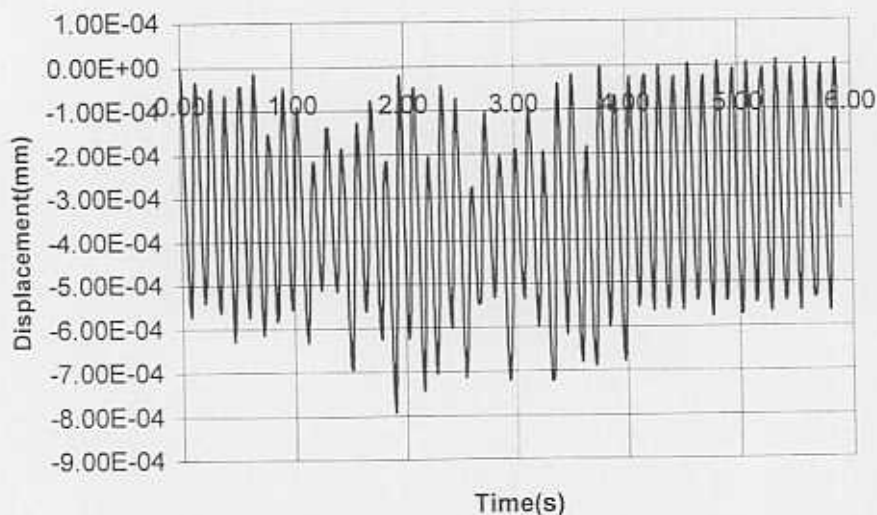


รูปที่ 4.17 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจากการเดินแบบ 6 คนเรียงหน้ากระดาน

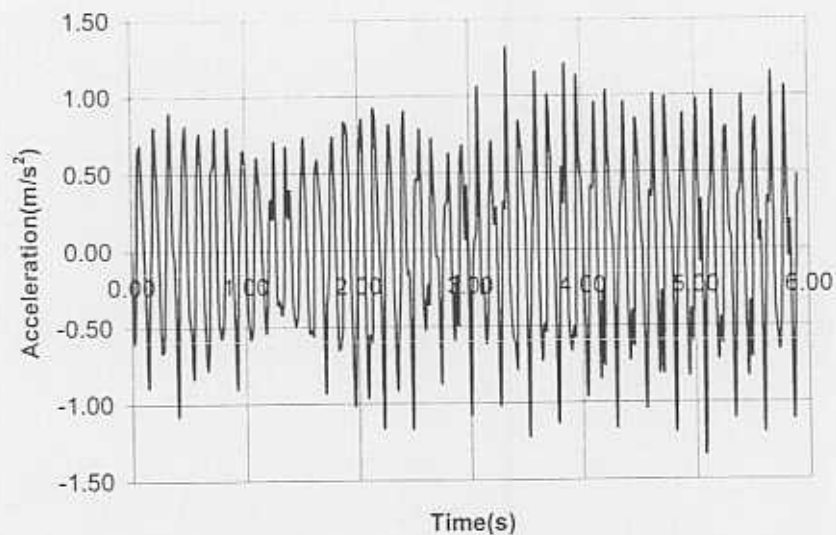


รูปที่ 4.18 แสดงแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นเนื่องจาก 6 คนเดินแบบเรียงสาม

เมื่อนำแผ่นพื้นตัวอย่างมาวิเคราะห์แล้วทำให้ได้ค่าการแอ่นตัวและ ความเร่ง ซึ่งและเป็นตัวบอกให้เราทราบว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นเมื่อใด และมีค่าสูงสุดเป็นเท่าใด เป็นการบอกว่าแผ่นพื้นตัวอย่างชนิดนี้เหมาะสมที่จะนำมาออกแบบใช้จริงหรือไม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องความถี่ธรรมชาติต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ค่า Displacement time history ของแผ่นพื้นตัวอย่างนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 ส่วนค่า Acceleration time history จะแสดงในรูปที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 แสดง Displacement time history ของ Walking load แบบ 6 คนเดิน ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.20 แสดง Acceleration time history Walking load แบบ 6 คนเดิน ความหนา 0.24 เมตร เดินด้วยความถี่ในการก้าว = 2.77 เฮิรตซ์

ผลการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างที่แสดงอยู่ข้างต้นนี้เป็นตัวอย่างแผ่นพื้นที่มีขนาดความหนา 0.24 เมตร โดยแผ่นพื้นไม่มีความหน่วงกระทำ (damping 0%) โดยเป็นการเดินแบบเรียงหน้ากระดาน จะเห็นว่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.7884 มิลลิเมตร ที่เวลาประมาณ 2 นาที ส่วนค่าความเร่งให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 13.4110%g จะเห็นว่าความเร่งมีค่าสูงขึ้นมากจากแผ่นพื้นตัวอย่างที่ผ่านมา โดยพบว่าถ้ายิ่งแผ่นพื้นมีความหนามากเท่าใดความเร่งจะยิ่งเพิ่มขึ้นตามมา ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่างทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 Finite element results of simply supported floor under walking load 6 คนเดินเรียงหน้ากระดาน

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.7588	0.6811	0.7884	9.0321	9.1112	13.4100
	1	0.4069	0.3626	0.3610	0.2343	0.2351	0.2316
	2	0.3611	0.3201	0.2968	0.1339	0.1339	0.1375
	3	0.3142	0.2778	0.2593	0.0931	0.0929	0.1046
	5	0.2412	0.2146	0.2032	0.5469	0.0547	0.0731
0.26	0	0.5911	0.4977	0.9458	8.7201	8.3226	23.9161
	1	0.3272	0.2923	0.2956	0.2307	0.2313	0.2286
	2	0.2995	0.2663	0.2540	0.1275	0.1275	0.1339
	3	0.2704	0.2395	0.2198	0.0904	0.0904	0.1022
	5	0.2173	0.1929	0.1816	0.0546	0.0546	0.0714
0.28	0	0.4855	0.4198	0.5047	8.2837	8.3286	8.2423
	1	0.2657	0.2378	0.2436	0.2246	0.2251	0.2234
	2	0.2491	0.2215	0.2165	0.1206	0.1207	0.1304
	3	0.2308	0.2046	0.1911	0.0872	0.0873	0.0999
	5	0.1937	0.1714	0.1603	0.0541	0.0541	0.0699

เราจะเห็นแนวโน้มของการแอ่นตัวและความเร่งโดยที่ค่าการแอ่นตัวมีค่าลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเร่งมีแนวโน้มที่ลดลงอันเนื่องมาจากค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นของแผ่นพื้นนั่นเอง ส่วนกรณีที่แผ่นพื้นตัวอย่างรับแรงกระทำจากการเดินที่มีการเดินแบบแถวหน้ากระดานเรียงสามผลการวิเคราะห์แสดงอยู่ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 Finite element results of simply supported floor under walking load 6 คน
เดินเรียงสาม (สดมภ์)

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak accoeration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.5547	0.5415	0.5541	5.5793	6.5436	6.7974
	1	0.3333	0.2865	0.2856	0.2524	0.2523	0.2535
	2	0.2853	0.2399	0.2257	0.1316	0.1530	0.1325
	3	0.2447	0.2063	0.1960	0.0913	0.1162	0.0877
	5	0.1893	0.1611	0.1550	0.0701	0.0817	0.0647
0.26	0	0.4409	0.3907	0.7386	6.2241	5.7841	21.3047
	1	0.2683	0.2321	0.2365	0.2460	0.2459	0.2462
	2	0.2413	0.2037	0.1949	0.1305	0.1480	0.1315
	3	0.2118	0.1778	0.1668	0.0878	0.1126	0.0872
	5	0.1695	0.1440	0.1379	0.0684	0.0797	0.0628
0.28	0	0.3631	0.3324	0.3922	6.9984	5.6350	8.0144
	1	0.2192	0.1904	0.1956	0.2396	0.2395	0.2389
	2	0.2031	0.1730	0.1681	0.1289	0.1438	0.1297
	3	0.1832	0.1539	0.1454	0.0865	0.1095	0.0871
	5	0.1508	0.1255	0.1213	0.0659	0.0758	0.0612

เราจะเห็นแนวโน้มของการแอ่นตัวและความเร่งโดยที่ค่าการแอ่นตัว มีค่าลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเร่งมีแนวโน้มที่ลดลงอันเนื่องมาจากค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นของแผ่นพื้นนั่นเอง

♦ จูตรองรับแบบยึดแน่น(Fixed supported)

ในกรณีจูตรองรับเป็นแบบยึดแน่นนี้ลักษณะแรงที่กระทำที่เกิดจากการเดินมีลักษณะดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยการเดินแบบ 6 คนนี้ถือได้ว่าเป็นตัวแทนของการเดินเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ลักษณะเช่นนี้จะพบเห็นได้โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นห้างสรรพสินค้าหรือแม้แต่โรงแรมหรูพ โดยมีลักษณะใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

ลักษณะการเดินอย่างแรกที่น่ามาวิเคราะห์และแสดงผลคือ การเดินแบบ 6 คนแบบหน้ากระดานแถวเดียวโดยรูปแบบการเดินดังแสดงในรูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์จากตารางทำให้ทราบว่าลักษณะการเดินอย่างช้า ๆ (slow walking) ทำให้เกิดความเร่งที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อมีความหนาเข้ามาเกี่ยวข้องแล้วทำให้ความเร่งของพื้นตัวอย่างลดลงไปอย่างมาก ซึ่งหากเปรียบเทียบกับกรณีที่ เป็นจูตรองรับอย่างง่ายแล้วจะพบว่าความเร่งที่เกิดขึ้นจูตรองรับยึดแน่น จะมีค่าที่สูงกว่า จุด

รองรับอย่างง่ายเท่าตัวแต่การแอ่นของพื้นที่กึ่งกลางมีค่าลดลง ซึ่งจุดที่ทำให้ต้องพิจารณาเป็นพิเศษคือกรณีที่ไม่มีความหวังโดยมีน้ำหนักกระทำเป็นการเดินช้าๆ และการเดินเร็ว

ตารางที่ 4.15 Finite element results of fixed supported floor under walking load 6 คนเดิน
เรียงหน้ากระดาน

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk
0.24	0	0.261732	0.210285	0.26714	10.310296	8.174434	10.221814
	1	0.163489	0.142509	0.152055	0.356844	0.357064	0.357411
	2	0.158479	0.13883	0.145867	0.195353	0.195627	0.194332
	3	0.155011	0.135889	0.14019	0.137202	0.137217	0.142294
	5	0.148171	0.128954	0.113034	0.087971	0.087982	0.080449
0.26	0	0.204021	0.172752	0.204212	9.118236	8.298471	8.567503
	1	0.130791	0.113575	0.121536	0.333483	0.333445	0.33475
	2	0.126106	0.110332	0.11688	0.195158	0.195413	0.194506
	3	0.123918	0.108627	0.113144	0.129172	0.129174	0.138063
	5	0.119725	0.104469	0.105962	0.085202	0.085209	0.098634
0.28	0	0.159446	0.138292	0.167462	6.878858	7.116687	6.907482
	1	0.10652	0.092115	0.099168	0.307379	0.307085	0.309021
	2	0.102096	0.089198	0.094943	0.191928	0.19212	0.191692
	3	0.100428	0.087956	0.092608	0.12917	0.129384	0.134006
	5	0.097746	0.085551	0.088005	0.082073	0.081814	0.096279

และในกรณีสุดท้ายที่หยิบยกมาเป็นตัวอย่างของการเดินแบบกลุ่มคือการเดินแบบ 6 คนที่มีลักษณะการเดินเป็นแบบสดมภ์ ลักษณะการเดินดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยที่ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 Finite element results of fixed supported floor under walking load 6 คน
เรียงสามจำนวนสองแถว(สดมภ์)

Thickness(m)	Damping(%)	Peak displacement(mm)			Peak acceration(%g)		
		Slow Walk	Normal Walk	Brisk Walk	Slow Walk	Normal Wal	Brisk Walk
0.24	0	0.215837	0.182316	0.196289	6.749337	5.977401	6.514353
	1	0.147467	0.129032	0.133552	0.370226	0.370125	0.368848
	2	0.144904	0.125607	0.129014	0.201912	0.210015	0.202345
	3	0.141606	0.122062	0.125175	0.137682	0.158652	0.138205
	5	0.139514	0.11519	0.11431	0.088773	0.112271	0.085185
0.26	0	0.173453	0.148528	0.157519	7.265392	5.123272	5.811091
	1	0.116739	0.102503	0.106029	0.361013	0.360897	0.358924
	2	0.115088	0.100053	0.103109	0.197734	0.202479	0.197815
	3	0.113307	0.097995	0.10074	0.135844	0.153514	0.136263
	5	0.109722	0.09353	0.094854	0.085411	0.108675	0.082866
0.28	0	0.129691	0.119407	0.130631	4.865382	4.899147	5.392661
	1	0.094101	0.082971	0.085608	0.353161	0.353043	0.350588
	2	0.092814	0.080932	0.083656	0.19366	0.196378	0.19337
	3	0.091794	0.079615	0.081761	0.133698	0.149119	0.133944
	5	0.089213	0.076753	0.078652	0.821864	0.105617	0.081561

ผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นตัวอย่างด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์พบว่าความเร่งที่เกิดบนแผ่นพื้นตัวอย่างลดลงจากกรณีเดินหน้ากระดานแถวเดียวประมาณร้อยละ 40 และลักษณะการเดินที่ทำให้เกิดความเร่งสูงสุดคือการเดินอย่างช้า ๆ รองลงมาคือการเดินแบบเร่งรีบและเมื่อมีความหน่วงในองค์อาคารแล้วจะทำให้ความเร่งลดลงเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากเปรียบเทียบกับกรณีจุดรองรับอย่างง่ายแล้วจะพบว่าความเร่งมีค่าใกล้เคียงกัน

หากจะกล่าวโดยสรุปกรณีจุดรองรับแบบยึดแน่นความเร่งที่เกิดกับพื้นตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่ามากกว่ากรณีที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ประมาณร้อยละ 20 เมื่อมีความหน่วงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจะสามารถลดความเร่งที่เกิดกับพื้นตัวอย่างลดลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ความหน่วงจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการลดความเร่งที่เกิดกับพื้นตัวอย่างได้กว่าร้อยละ 50

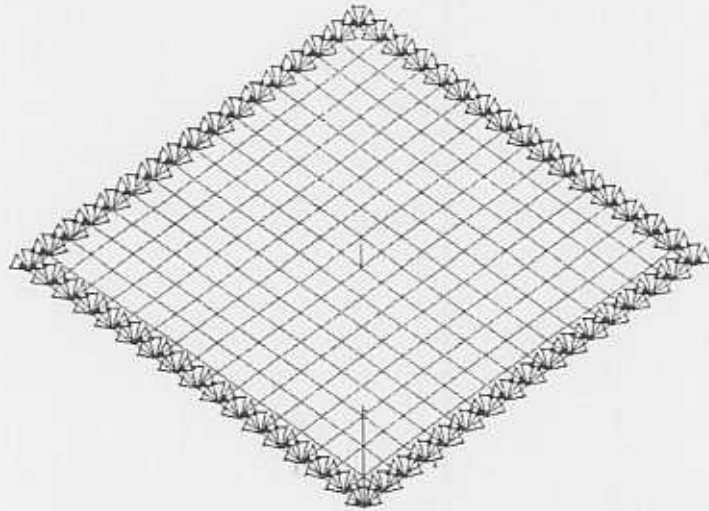
4.6 ผลการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นขนาดใหญ่ภายใต้น้ำหนักที่เกิดจากการกระโดด

โดยทั่วไปเราจะพบเห็นแผ่นพื้นขนาดใหญ่ได้ตามอาคารขนาดใหญ่ ต้องการใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ ดังจะเห็นได้จากตามศูนย์การค้า อาคารสำนักงาน โรงมหรสพรวมไปถึงสถานที่ออกกำลังกาย เป็นต้น จะเห็นได้ว่าอาคารที่กล่าวมาข้างต้นนี้ล้วนแต่เป็นอาคารสาธารณะที่มีผู้ใช้สอยเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน ซึ่งมีกิจกรรมต่าง ๆ มากมายในแต่ละวัน และโดยทั่วไปอาคารมีการสั่นอยู่ในตัว เมื่อมีกิจกรรมต่างเกิดขึ้นย่อมหมายถึงการไปเร่งการสั่นให้ตัวอาคารมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาพฤติกรรมการสั่นของอาคารภายใต้น้ำหนักที่เกิดจากการกระโดด

การกระโดดจัดเป็นการสั่นแบบ Steady-state vibration ซึ่งเป็นการสั่นที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซ้ำ ๆ กันตลอดช่วงเวลาที่มือน้ำหนักกระทำ เมื่อน้ำหนักที่กระทำสิ้นสุดลงพื้นยังมีการสั่นต่อไปอีกระยะหนึ่ง สิ่งที่น่ากังวลก็คือ กำทอน (Resonance) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่จากการสั่นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุชนิดนั้น จะทำให้เกิดแอมพลิจูดการสั่นที่รุนแรง จนทำให้พื้นเกิดการแกว่งที่รุนแรงอันเนื่องมาจาก ความถี่ธรรมชาติของพื้นนั้นถูกกระตุ้นด้วยความถี่จากกำทอน (Resonance) และเมื่อทำการจำลองแผ่นพื้นที่ความหนาต่าง ๆ คือ ที่ความหนา 0.24 0.26 และ 0.28 เมตรทำให้ทราบพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นเมื่อมีการกระโดดบนแผ่นพื้นนั้น โดยทำการจำลองให้มีคนกระโดดอยู่บนแผ่นพื้น 1 คน 2 คน 4 คน และ 6 คน โดยปราศจากวัสดุที่จะเป็นตัวหน่วงแผ่นพื้น จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรณีที่มีตัวหน่วงบนพื้นโดยใช้ความหน่วงที่ร้อยละ 1, 2, และ 5 สิ่งที่ทำการศึกษาวิเคราะห์คือการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางและความเร่งที่เกิดขึ้นบนแผ่นพื้นที่ทำการจำลองขึ้นมา ซึ่งให้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.6.1 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 1 คน

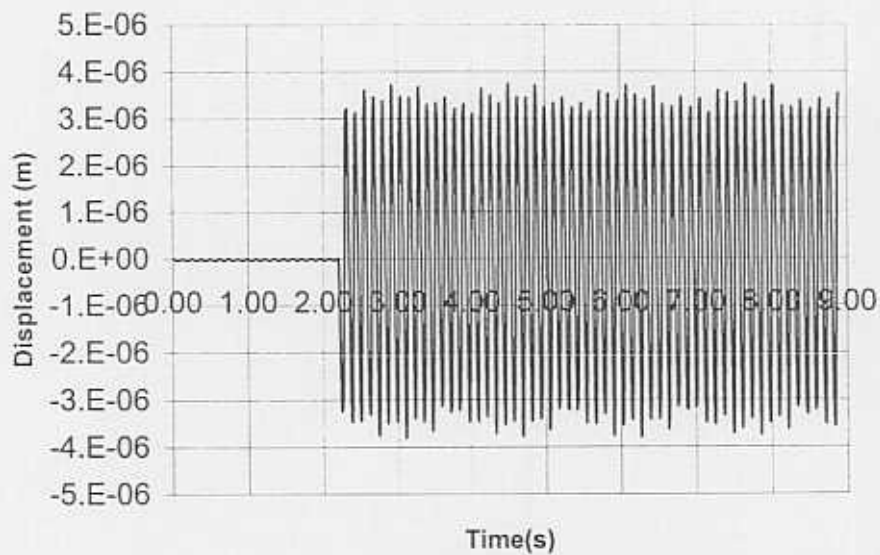
การกระโดดที่เกิดจากคนหนึ่งถือว่าเป็นกรณีอย่างง่ายที่สุดที่ทำการศึกษา ซึ่งในความเป็นจริงสามารถเกิดขึ้นได้ โดยทำการวิเคราะห์กรณีนี้ที่จุดรองรับทั้งสี่ด้านเป็นจุดรองรับอย่างง่าย (Simply support) และเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ภายใต้สภาพที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยที่รูปแสดงลักษณะแรงกระทำที่เกิดจากการกระโดดโดยคน 1 คน กระโดดในตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นพื้นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงแรงกระทำโดยคน 1 คนกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่าง
ดังนั้นสามารถแยกการกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่างได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิรตซ์

กรณีที่ความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิรตซ์ นั้นกรณีที่ จะให้ความเร่งในการสั่นมากที่สุด คือกรณีที่พื้นมีความหนา 0.24 เมตร โดยไม่มีความหน่วงบนแผ่นพื้นตัวอย่างเลย ตัวอย่างกราฟการตอบสนองการแอ่นตัวสั้นที่เกิดจากการกระโดดที่ความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งเกิดจากคน 1 คนกระโดดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางพื้น



รูปที่ 4.22 แสดง Displacement time history ความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ จุตรองรับแบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร

จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าความหน่วงสามารถช่วยลดการตอบสนองของแผ่นพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 ดังแสดงในตารางที่ 4.17

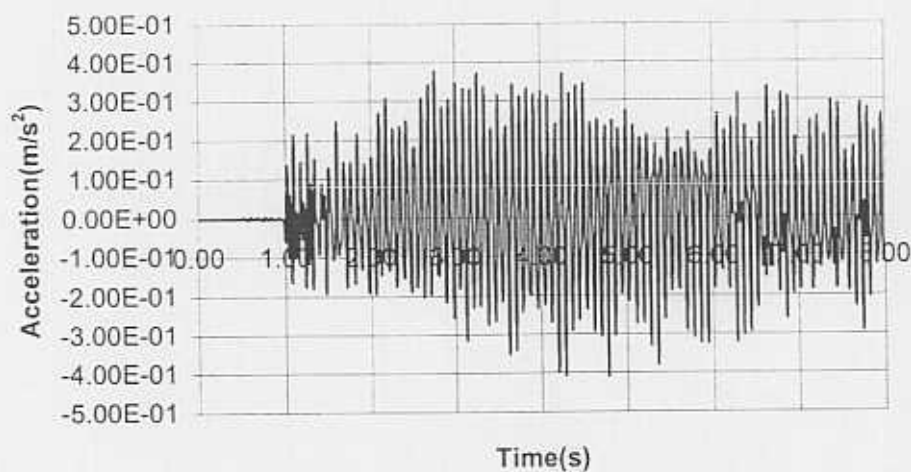
ตารางที่ 4.17 Finite element results โดยคน 1 คน ความถี่ 1.87 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.00443	0.00254	0.5048	0.6386
	1	0.00040	0.00038	0.2344	0.2343
	2	0.00030	0.00027	0.1855	0.1793
	5	0.00018	0.00017	0.1150	0.1150
0.26	0	0.00381	0.00195	0.4762	0.5896
	1	0.00035	0.00034	0.2190	0.2190
	2	0.00025	0.00024	0.1716	0.1716
	5	0.00015	0.00015	0.0111	0.1113
0.28	0	0.00313	0.00159	0.4933	0.4929
	1	0.00032	0.00030	0.2051	0.2050
	2	0.00022	0.00021	0.1643	0.1643
	5	0.00014	0.00014	0.1079	0.1079

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.0 เฮิรตซ์

การกระโดดที่เกิดจากความถี่ 2.0 เฮิรตซ์เป็นอีกหนึ่งกรณีที่ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความถี่ในการกระโดดที่แตกต่างกัน ซึ่งล้วนแล้วแต่

มีผลกับการตอบสนองของพื้นทั้งสิ้น รูปที่ 4.23 คือกราฟแสดงการตอบสนองความเร่งของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำแบบกระโดดจากคน 1 คน ที่มีความถี่ในการกระโดด 2.0 เฮิรตซ์ โดยมีจุดรองรับอย่างง่าย



รูปที่ 4.23 Acceleration time history ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ จุดรองรับยึดแน่น ความหนา 0.24 เมตร

โดยผลการวิเคราะห์การตอบสนองของแผ่นพื้นนั้นสามารถแสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 Finite element results โดยคน 1 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

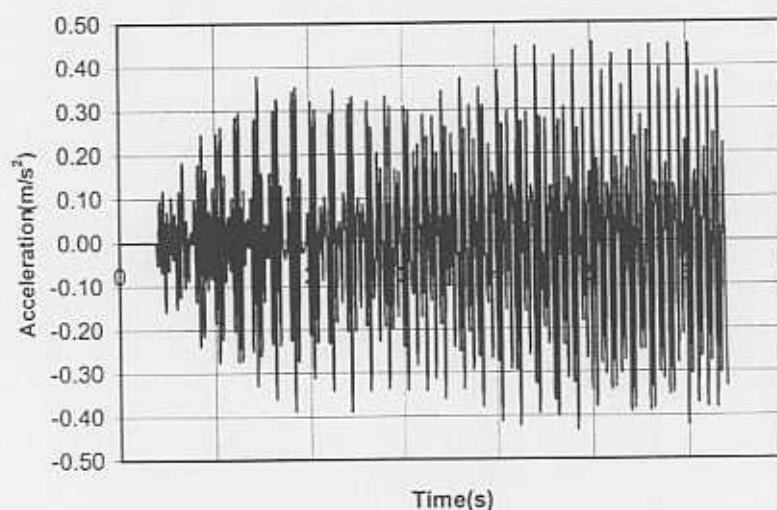
Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.03122	0.03372	2.2121	3.8353
	1	0.00163	0.00133	0.8800	0.8090
	2	0.00119	0.00099	0.6733	0.6178
	5	0.00074	0.00065	0.4313	0.3954
0.26	0	0.03809	0.00872	2.9060	1.9644
	1	0.00141	0.00118	0.8223	0.7557
	2	0.00105	0.00086	0.6441	0.5914
	5	0.00067	0.00058	0.4175	0.3828
0.28	0	0.01275	0.00535	5.1114	1.7052
	1	0.00124	0.00106	0.7701	0.7079
	2	0.00093	0.00075	0.6169	0.5665
	5	0.00060	0.00051	0.4049	0.3713

จากตารางที่ 4.18 พบว่าความเร่งของการตอบสนองของแผ่นพื้นที่ความหนา 0.24 เมตรเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีแรกมาก ที่ความหนา 0.26 เมตรการแอ่นตัวของพื้นเกิดขึ้นสูงสุดในกรณีจุดไม่มี

ความหน่วง ผลของความหน่วงบนแผ่นพื้นสามารถลดขนาดการตอบสนองของแผ่นพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.5 เฮิรตซ์

การกระโดดที่มีความถี่ 2.5 เฮิรตซ์เปรียบได้กับการเดินจังหวะที่เร็วเช่น จังหวะร็อก ความถี่ในระดับสูงเช่นนี้ย่อมจะส่งผลต่อการตอบสนองของแผ่นพื้นมากเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กำลังมาแล้วข้างต้นอื่นๆ พบว่าความเร่งของการตอบสนองแผ่นพื้นเพิ่มมากขึ้นกว่าทุกกรณี โดยที่ความหนา 0.26 เมตรความเร่งจะเกิดสูงสุดโดยที่พื้นไม่มีความหน่วง และเมื่อมีความหน่วงจะช่วยให้ลดผลการตอบสนองของพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 รูปที่ 4.24 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.24 Acceleration time history ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ จักรกรรับแบบง่าย ความหนา 0.28 เมตร

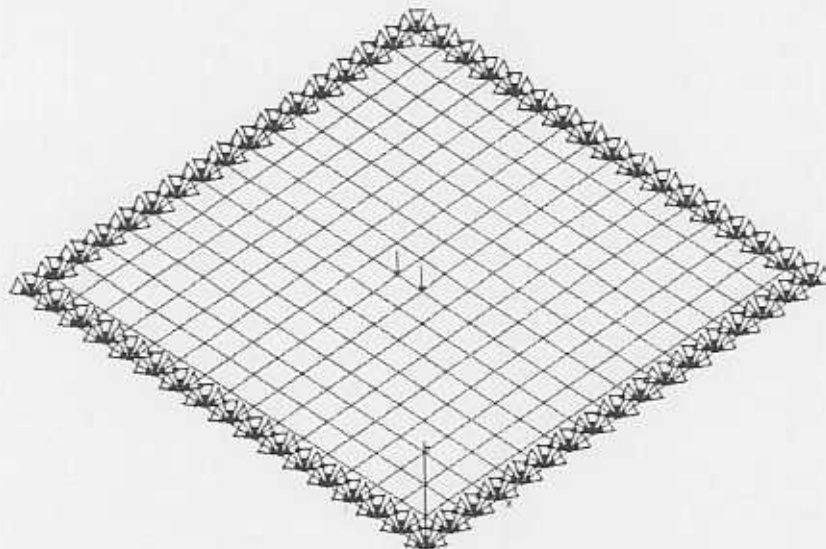
ตารางที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์การกระโดดที่เกิดจากคน 1 คนกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่าง ด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ ที่เงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 4.19 Finite element results โดยคน 1 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.06127	0.02191	4.0889	4.5139
	1	0.00171	0.00168	2.0388	2.5285
	2	0.00124	0.00136	1.7959	2.3050
	5	0.00077	0.00107	1.3714	1.9660
0.26	0	0.01755	0.02768	3.6733	4.8940
	1	0.00149	0.00144	1.9015	2.3472
	2	0.00110	0.00115	1.6903	2.1569
	5	0.00069	0.00090	1.2989	1.8285
0.28	0	0.01175	0.00992	4.6229	3.7948
	1	0.00129	0.00126	1.7918	2.1919
	2	0.00097	0.00099	1.5972	2.0272
	5	0.00062	0.00077	1.2406	1.7130

4.6.2 กรณีที่มีการกระโดดจากคน 2 คน

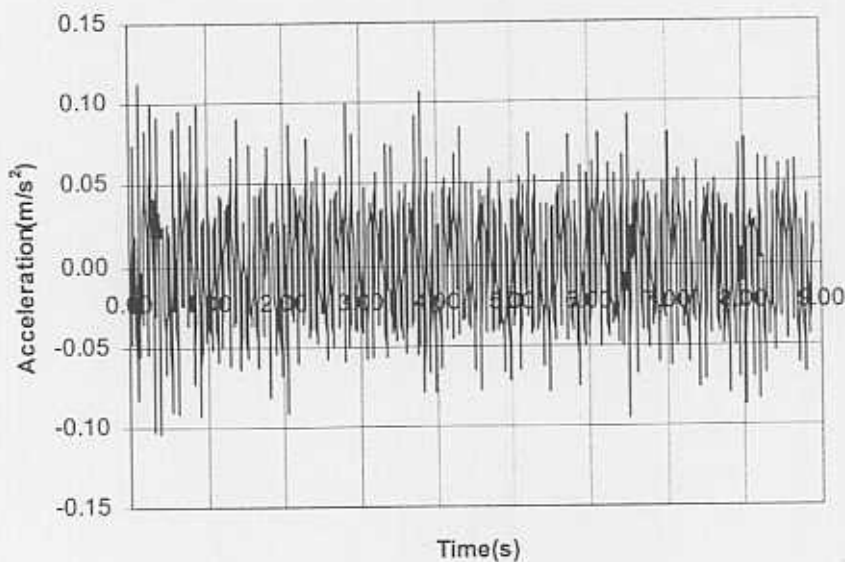
กรณีที่มีคน 2 คนกระโดดบนพื้นตัวอย่างถือว่าเป็นตัวแทนของแรงที่กระทำเป็นกลุ่ม โดยมีเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำบนพื้นที่มีน้ำหนักกระทำมากกว่าหนึ่งคนนี้ จุดที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ การตอบสนองของแผ่นพื้นโดยเฉพาะความเร่งที่แผ่นพื้นถูกกระตุ้น ซึ่งถือว่าทุกคนกระโดดพร้อมกันด้วยความถี่เดียวกัน ดังนั้นจะเกิดความเร่งที่เสริมกัน ทำให้ขนาดของความเร่งใหญ่ขึ้น ใกล้เคียงธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ ตัวอย่างรูปแสดงลักษณะการกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่างจากคน 2 คน ดังรูปที่ 4.25



รูปที่4.25 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 2 คน

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิรตซ์

การกระโดดที่เกิดจากคนสองคนกระโดดบนแผ่นพื้นนั้นสามารถแยกได้หลายกรณี ซึ่งในกรณีแรกนี้คือ การกระโดดที่ทำให้เกิดความถี่ในการกระโดดเท่ากับ 1.87 เฮิรตซ์ เปรียบได้กับจังหวะเพลงช้า ๆ แล้วมีการเต้นบนแผ่นพื้นนั้น โดยถือว่าคนที่กระโดดอยู่บนพื้นมีความถี่ในการกระโดดเท่ากัน ทุกคนกระโดดพร้อมกันด้วยความถี่ที่เท่ากันนี้ จะก่อให้เกิดความเร่งบนแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ โดยจะทำให้มีการเสริมความเร่งกันและกัน ตัวอย่างกราฟแสดงการตอบสนองโดยความเร่งของแผ่นพื้นจาก 2 คนกรณีจุดรองรับยึดแน่นความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 Acceleration time history 2 คนความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ จุดรองรับยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร

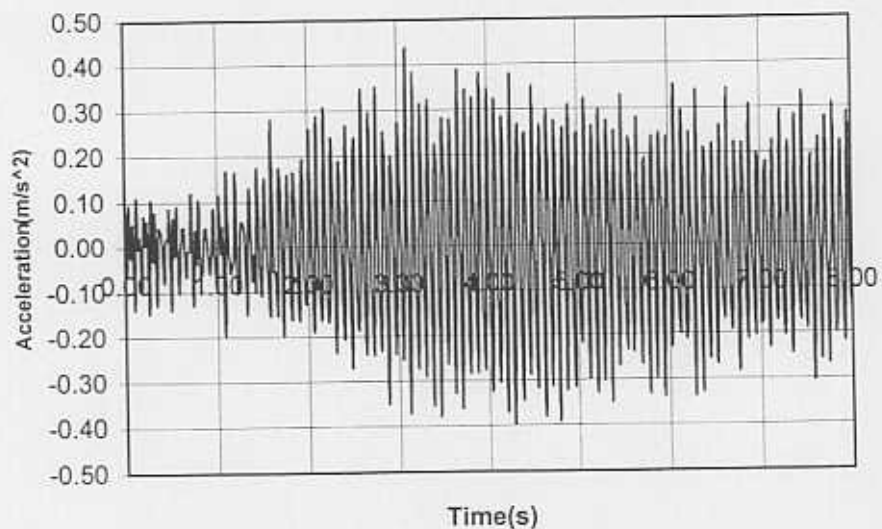
เมื่อนำแผ่นพื้นตัวอย่างมาวิเคราะห์ พบว่าเงื่อนไขของจุดรองรับทั้งสองด้านมีผลโดยตรงกับขนาดความเร่งและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางพื้น โดยที่ความหนา 0.24 เมตรจุดรองรับแบบง่าย (Simply supported) หรือ Pin supported จะเกิดความเร่งที่มากที่สุด โดยที่พื้นไม่มีวัสดุหน่วงและเกิดการแอ่นตัวที่กึ่งกลางแผ่นพื้นสูงสุดด้วย ส่วนจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ที่ความหนา 0.26 เมตรจะทำให้เกิดความเร่งบนแผ่นพื้นสูงที่สุด โดยที่พื้นไม่มีความหน่วง และเมื่อพื้นมีความหน่วงเกิดขึ้นจะส่งผลให้แผ่นพื้นมีความเร่งลดลงได้มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนการแอ่นตัวเมื่อเทียบเฉพาะในส่วนที่มีความหน่วงแล้วจะพบว่ามียุทธเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งผลการวิเคราะห์การกระโดดของคน 2 คน ด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.0436	0.0187	1.6719	1.3157
	1	0.0237	0.0118	0.4690	0.4704
	2	0.0237	0.0116	0.3589	0.3591
	5	0.0216	0.0115	0.2301	0.2301
0.26	0	0.0369	0.0164	1.6531	1.3644
	1	0.0187	0.0094	0.4387	0.4388
	2	0.0187	0.0093	0.3434	0.3436
	5	0.0178	0.0091	0.2226	0.2226
0.28	0	0.0292	0.0123	1.2642	1.1464
	1	0.0151	0.0076	0.4105	0.4106
	2	0.0150	0.0075	0.3286	0.3288
	5	0.0146	0.0073	0.2159	0.2159

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.0 เฮิรตซ์

ที่ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ เปรียบได้กับเพลงที่มีจังหวะธรรมดาทั่วไป ไม่หือไม่เร็วจนเกินไป โดยมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์เช่นเดิม คือแผ่นพื้นมีความหนา 3 ค่า คือ 0.24 0.26 และ 0.28 เมตร โดยที่กราฟแสดงการตอบสนองของพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 Acceleration time history 2 คนความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ จุตรองรับยึดแน่น ความหนา 0.24 เมตร

เมื่อทำการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่มีความหน่วงบนแผ่นพื้นและมีความหน่วงที่ร้อยละ 1 2 และ 5 ซึ่งผลการเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.21

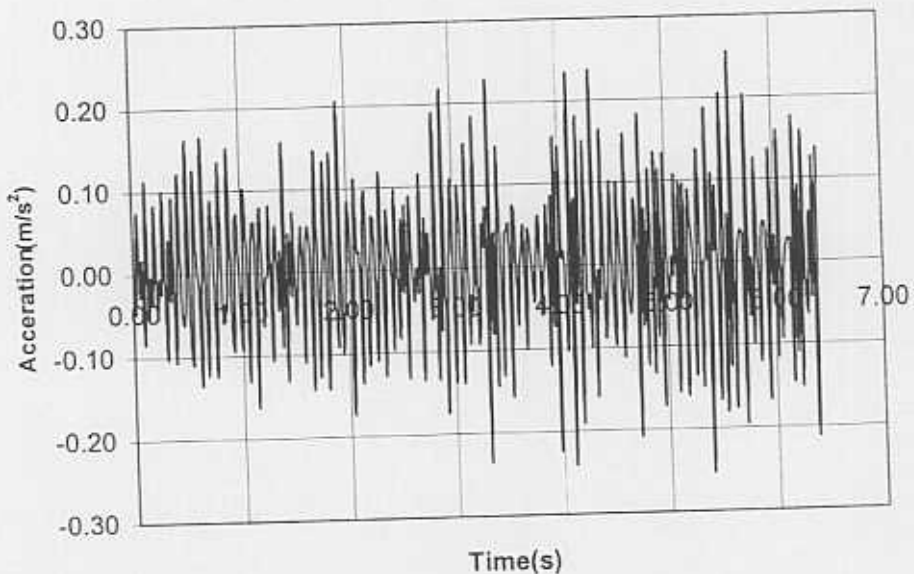
ตารางที่ 4.21 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.0529	0.0504	2.1284	4.3567
	1	0.0247	0.0127	0.7143	0.4697
	2	0.0239	0.0122	0.5219	0.3595
	5	0.0213	0.0117	0.3018	0.2317
0.26	0	0.0696	0.0167	2.9016	1.3559
	1	0.0196	0.0101	0.6764	0.4393
	2	0.0190	0.0098	0.5009	0.3439
	5	0.0177	0.0093	0.2927	0.2242
0.28	0	0.0374	0.0167	4.4301	1.7115
	1	0.0159	0.0083	0.6410	0.4111
	2	0.0154	0.0079	0.4809	0.3291
	5	0.0146	0.0076	0.2856	0.2173

จากตารางพบว่าที่ความหนา 0.24 เมตรไม่มีความหน่วงบนพื้นจะทำให้เกิดความเร่งถึง 4.3567 %g และเมื่อมีความหน่วงบนพื้นจะทำให้สามารถลดความเร่งที่เกิดบนพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.5 เฮิรตซ์

ตัวอย่างกราฟการตอบสนองของพื้นต่อแรงกระทำแบบกระโดดจากคน 2 คนด้วยความถี่ในการกระโดดเท่ากับ 2.5 เฮิรตซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 Acceleration time history 2 คนความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ จุตรองรับยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร

เมื่อนำผลมาวิเคราะห์การตอบสนองต่อการกระโดดด้วยความถี่เดียวกันนี้ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.22

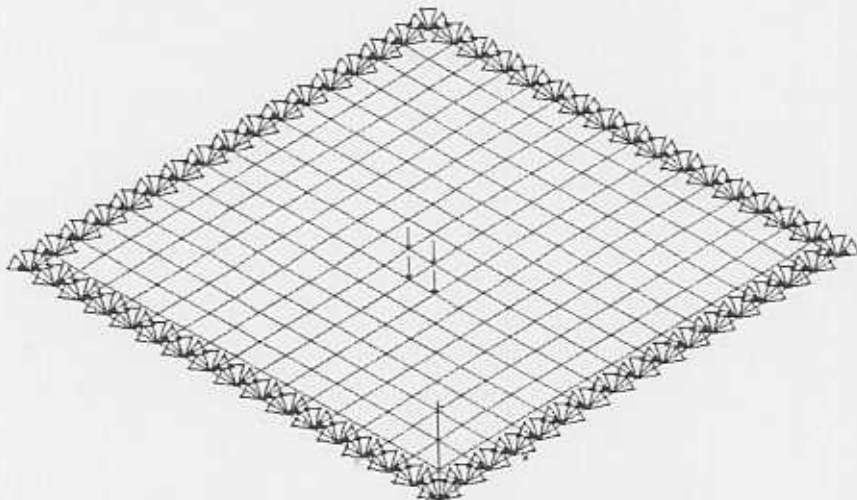
ตารางที่ 4.22 Finite element results โดยคน 2 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.1014	0.0333	3.9072	3.0794
	1	0.0246	0.0130	0.4695	0.4698
	2	0.0236	0.0127	0.3593	0.3595
	5	0.0200	0.0124	0.2247	0.2248
0.26	0	0.0503	0.0401	2.0998	4.5560
	1	0.0196	0.0104	0.4392	0.4393
	2	0.0189	0.0101	0.3438	0.3440
	5	0.0169	0.0098	0.2178	0.2178
0.28	0	0.0350	0.0203	4.5884	2.5976
	1	0.0159	0.0084	0.4110	0.4111
	2	0.0153	0.0082	0.3289	0.3292
	5	0.0142	0.0079	0.2113	0.2114

จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความหนา 0.26 เมตรแผ่นพื้นจะตอบสนองต่อความเร่งที่เกิดจากการกระโดดสูงสุด โดยความหน่วงสามารถลดผลการตอบสนองต่อความเร่งบนแผ่นพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนการแอ่นตัวที่กึ่งกลางนั้น ความหน่วงจะช่วยลดการแอ่นตัวของพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีความหน่วง

4.6.3. กรณีที่มีการกระโดดจากคน 4 คน

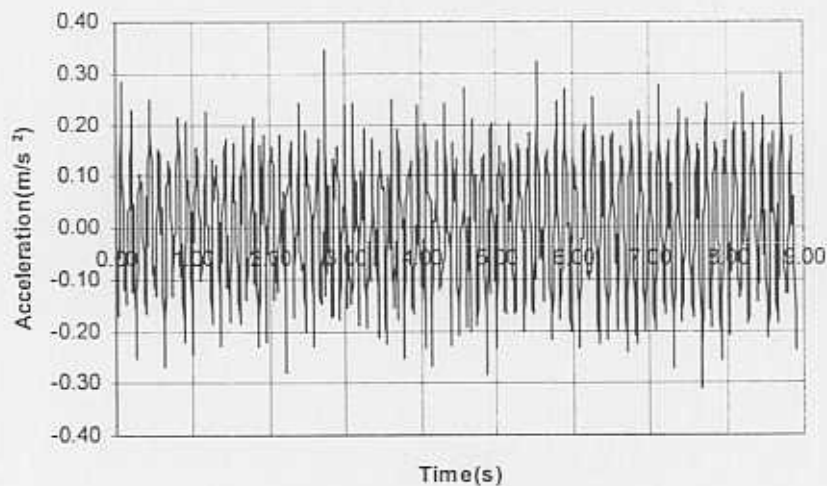
การกระโดดจากคน 4 คน เมื่อนำมาวิเคราะห์การสั่นบนแผ่นพื้นตัวอย่างจะได้รูปแสดงลักษณะการกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่างได้ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 4 คน

• การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิร์ตซ์

สำหรับกรณีที่เกิดจากการโดดโดยคนสี่คนนั้นถือว่าเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการกระโดดที่เป็นกลุ่มซึ่งในกรณีนี้เป็นการกระโดดที่มีความถี่ 1.87 เฮิร์ตซ์ ถือว่าเป็นการกระโดดที่มีจังหวะที่ซ้ำ โดยที่ถือว่าทุกคนกระโดดพร้อมกันทำให้เกิดความแรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องมาจากความถี่มีการเสริมกัน ซึ่งกราฟแสดงการตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.30



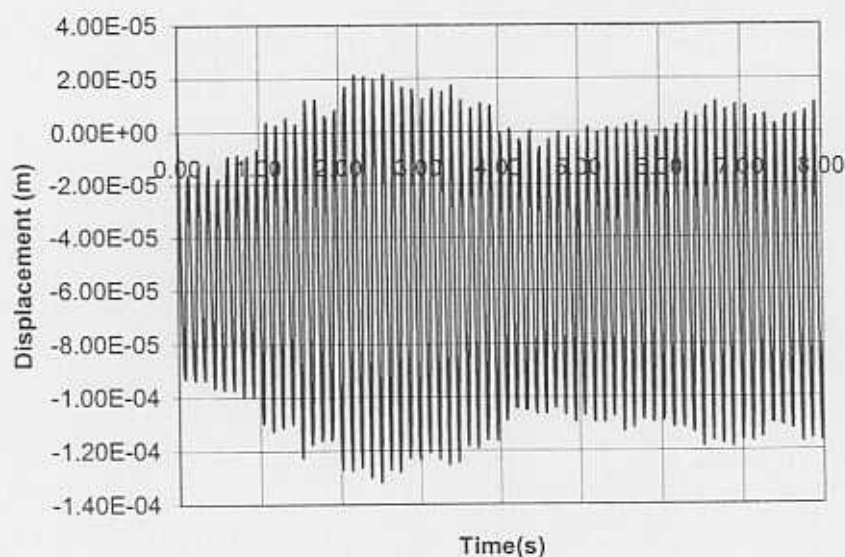
รูปที่ 4.30 Acceleration time history 4 คนความถี่ 1.87 เฮิร์ตซ์ จตุรรองรับแบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร

ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.23 โดยจะเห็นว่ามีการตอบสนองมีความคล้ายคลึงกับกรณีที่ได้อีกแล้วมาแล้วข้างต้น โดยที่แต่ในกรณีที่มีความถี่ 1.87 เฮิร์ตซ์ สิ่งที่น่าสนใจก็คือที่ความหนา 0.24 เมตร จะเกิดความแรงที่มากที่สุดในกรณีที่ไม่มีคานวางบนพื้น และความแรงจะลดลงตามความหนา จะเห็นได้ว่ากรณีที่ความหนา 0.24 เมตรจะเป็นกรณีที่ควรให้ความสนใจเป็นพิเศษ ส่วนในเรื่องของความหนานั้น พบว่า ความหนาสถาปัตยกรรมลดความแรงที่แผ่นพื้นตอบสนองได้มากกว่าร้อยละ 50

ตารางที่ 4.23 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.1246	0.0532	3.7367	3.3223
	1	0.0684	0.0326	0.6566	0.6580
	2	0.0682	0.0322	0.4338	0.4337
	5	0.0622	0.0322	0.2351	0.2351
0.26	0	0.1006	0.0429	3.5593	2.8453
	1	0.0538	0.0257	0.6158	0.6177
	2	0.0538	0.0256	0.4161	0.4162
	5	0.0512	0.0254	0.2289	0.2289
0.28	0	0.0798	0.0329	2.8179	2.6662
	1	0.0432	0.0207	0.5781	0.5799
	2	0.0431	0.0206	0.3987	0.3992
	5	0.0421	0.0204	0.2234	0.2234

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.0 เฮิรตซ์
จะได้ตัวอย่างกราฟการตอบสนองต่อการแอ่นตัวของพื้นจากคน 4 คนกระโดด โดยที่มีความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ จุตรองรับแบบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 Displacement time history 4 คน ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ จุตรองรับแบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร

ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของพื้นโดยคนสี่คนกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่างด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.24

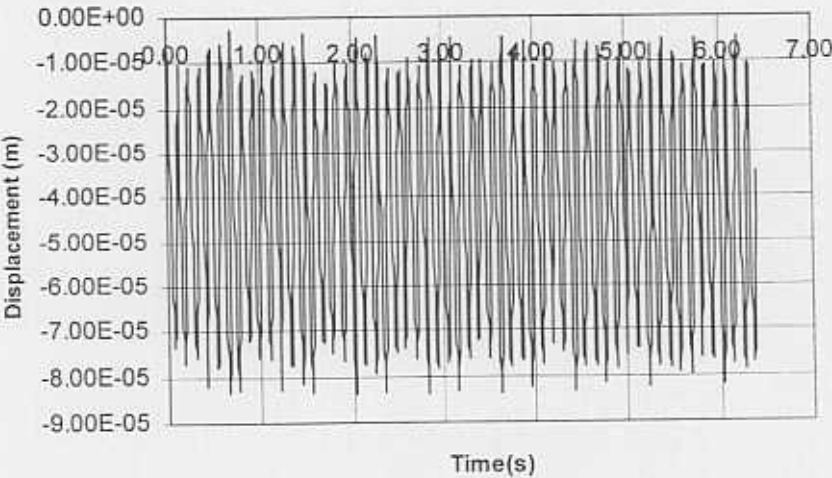
ตารางที่ 4.24 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.1254	0.0835	3.7477	6.1984
	1	0.0691	0.0334	0.6777	0.4717
	2	0.0682	0.0329	0.4977	0.4342
	5	0.0608	0.0323	0.2987	0.2353
0.26	0	0.1316	0.0411	3.7680	3.0344
	1	0.0546	0.0264	0.6165	0.6184
	2	0.0539	0.0260	0.4753	0.4167
	5	0.0511	0.0256	0.2884	0.2291
0.28	0	0.0874	0.0376	4.6542	3.2502
	1	0.0440	0.0213	0.5787	0.5806
	2	0.0434	0.0210	0.4545	0.3996
	5	0.0418	0.0206	0.2798	0.2236

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.24 บอกให้ทราบว่าจุดที่น่าจะต้องพิจารณาเป็นพิเศษคือที่ความหนา 0.24 เมตรซึ่งไม่มีความหน่วงบนพื้น จะเกิดความเร่งที่สูงที่สุดของกรณีที่มีความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ แล้วความเร่งจะลดลงตามความหนาของแผ่นพื้นที่เพิ่มขึ้น ความหน่วงสามารถลดความเร่งและการแอ่นตัวได้มากกว่าร้อยละ 50

• การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.5 เฮิรตซ์

กรณีที่ความถี่ในการกระโดดเท่ากับ 2.5 เฮิรตซ์นั้นถือว่าเป็นกรณีที่มีการกระโดดที่ถี่มากเปรียบได้กับทำนองเพลงร็อก เมื่อนำมาจำลองและวิเคราะห์ผลการตอบสนองในกรณีนี้จะทำให้ทราบพฤติกรรมการตอบสนองของพื้น ซึ่งตัวอย่างกราฟแสดงการตอบสนองจากการกระโดดได้แสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 Displacement time history 4 คน ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ จุตรองรับแบบง่าย ความหนา 0.28 เมตร

โดยผลการวิเคราะห์การตอบสนองของแผ่นพื้นตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 Finite element results โดยคน 4 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์

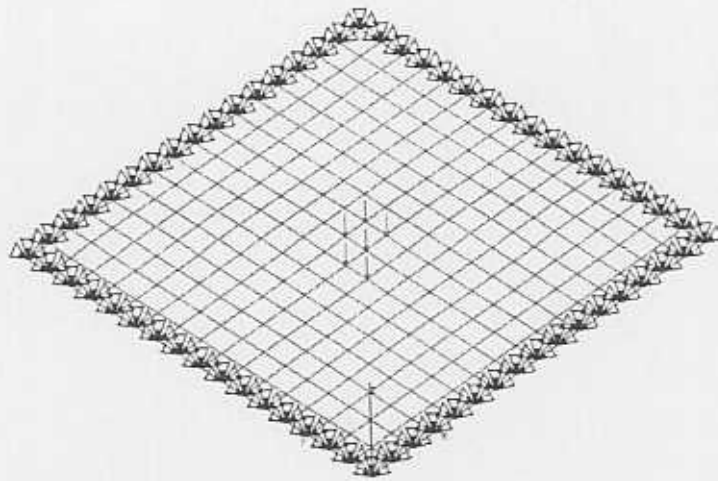
Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.1809	0.0625	5.9697	4.5575
	1	0.0689	0.0337	0.6573	0.6527
	2	0.0676	0.0334	0.4343	0.4342
	5	0.0569	0.0330	0.2354	0.2354
0.26	0	0.1140	0.0663	3.9094	5.7002
	1	0.0545	0.0267	0.6165	0.6185
	2	0.0537	0.0264	0.4165	0.4167
	5	0.0481	0.0261	0.2292	0.2292
0.28	0	0.0841	0.0409	5.0406	3.7562
	1	0.0439	0.0215	0.5787	0.5806
	2	0.0433	0.0213	3.9911	0.3997
	5	0.0405	0.0210	0.2236	0.2237

ผลการวิเคราะห์พบว่ากรณีไม่เหมือนกับสองกรณีที่กำลังมาข้างต้นคือ การตอบสนองของแผ่นพื้นในรูปของความเร่งนั้น ที่ความหนา 0.26 เมตร จะเกิดความเร่งที่สูงสุด ในกรณีจตุรกรรับแบบยึดแน่น แต่จะให้ค่าน้อยกว่าความหนาอื่น ซึ่งไม่มีความหน่วงในกรณีของจตุรกรรับอย่างง่าย ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีจตุรกรรับแบบยึดแน่น ควรให้ความสำคัญกับความหนา 0.26 เมตร และจตุรกรรับอย่างง่ายควรพิจารณาที่ความหนา 0.24 เมตร เป็นพิเศษ ส่วนในกรณีของความหน่วงนั้นสามารถที่จะลดความเร่งของการตอบสนองของแผ่นพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 แต่กรณีการแอ่นตัวจตุรกรรับแบบยึดแน่นไม่ค่อยส่งผลเท่าใดนัก แต่จตุรกรรับอย่างง่ายความหน่วงสามารถที่จะลดการแอ่นตัวได้กว่าร้อยละ 50

4.6.4. กรณีที่มีการกระโดดจากคน 6 คน

การกระโดดที่เกิดจากคนหก จะมีรองกระทำบนแผ่นพื้นที่มีขนาดมากที่สุดที่ได้ทำการจำลองบนแผ่นพื้นนี้ ถือว่าเป็นตัวแทนของแรงที่เกิดจากกระทำของกลุ่มคนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุดและมีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อย ซึ่งกรณีนี้จะพบได้มากตามลานแสดงดนตรีที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ และเมื่อมีการกระโดดด้วยความถี่ต่าง ๆ ในจังหวะช้า ธรรมดา และเร็วจะทำให้พื้นมีการตอบสนองในแบบที่แตกต่างกันเสมือนจำลอง ลานแสดงดนตรี เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นเพื่อจะได้ทราบพฤติกรรมการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ลักษณะแรงกระทำอันเกิดจากแรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 6 คน กระทำบนแผ่นพื้นตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่

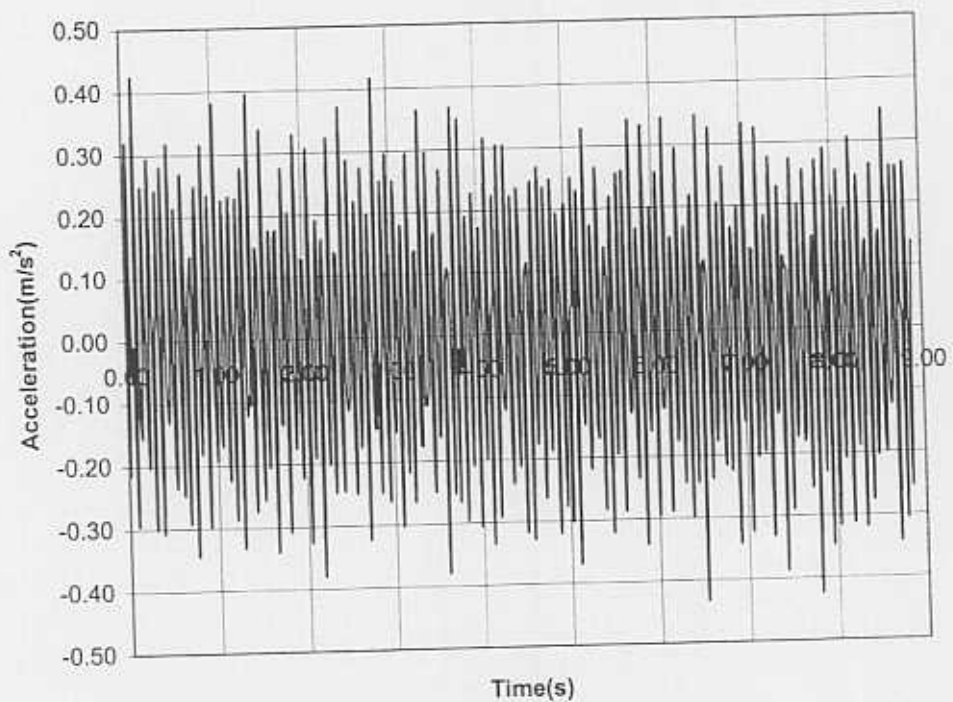
4.33



รูปที่ 4.33 แรงกระทำจากการกระโดดโดยคน 6 คน

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 1.87 เฮิรตซ์

กรณีถือว่าเป็นตัวอย่างการจำลองการเดินร่าด้วยจังหวะช้า ๆ ทั้งนี้จุดที่สำคัญคือการตอบสนองจากคนหกคน กราฟแสดงการตอบสนองต่อการกระโดดโดยคน 6 คนบนแผ่นพื้น ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 Acceleration time history 6 คนความถี่ 1.87 เฮิรตซ์ จุตรองรับยึดแน่น ความหนา 0.28 เมตร

และเมื่อนำแผ่นพื้นตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเงื่อนไขดังที่เคยกล่าวไว้แล้วข้างต้นจะได้ผลการวิเคราะห์การสั่นดังแสดงในตารางที่ 4.26

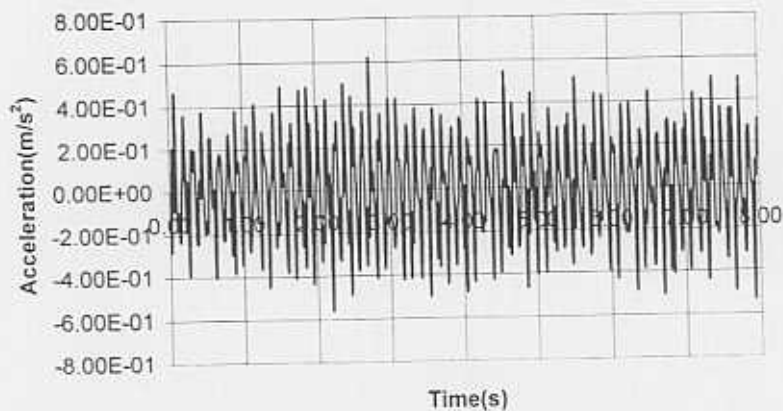
ตารางที่ 4.26 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 1.87 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.2068	0.0884	5.8861	5.3733
	1	0.1138	0.0538	0.9779	0.9750
	2	0.1134	0.0535	0.6044	0.6044
	5	0.1035	0.0535	0.2838	0.2838
0.26	0	0.1652	0.0701	5.5651	4.5333
	1	0.0896	0.0425	0.9149	0.9136
	2	0.0895	0.0423	0.5794	0.5792
	5	0.0852	0.0422	0.2776	0.2777
0.28	0	0.1310	0.0541	4.4405	4.3163
	1	0.0718	0.0344	0.8561	0.8579
	2	0.0718	0.0340	0.5573	0.5577
	5	0.0701	0.0339	0.2723	0.2722

จากตารางพบว่าที่ความหนา 0.24 เมตรจะเกิดความเร่งสูงสุดทั้งในกรณีจตุรกรรับอย่างง่ายและจตุรกรรับแบบยึดแน่นและความเร่งจะค่อย ๆ ลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของแผ่นพื้น โดยที่ความหน่วงจะช่วยให้การลดผลการตอบสนองได้มากกว่าร้อยละ 50

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.0 เฮิรตซ์

กรณีนี้เปรียบเสมือนกับการเดินร่าบนลานในจังหวะที่ธรรมดาไม่เร็วหรือช้าจนเกินไป ซึ่งกรณีถือได้ว่าเป็นตัวแทนของกลุ่มคนที่เดินร่าในจังหวะทั่วไป ได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างกราฟการตอบสนองการแอ่นตัวเนื่องจากคน 6 คน โดยจตุรกรรับแบบง่ายที่ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 Acceleration time history 6 คน ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ จตุรกรรับแบบง่าย ความหนา 0.26 เมตร

ผลการวิเคราะห์การสั่นโดยคน 6 คนกระโดดบนแผ่นพื้นตัวอย่างด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.27

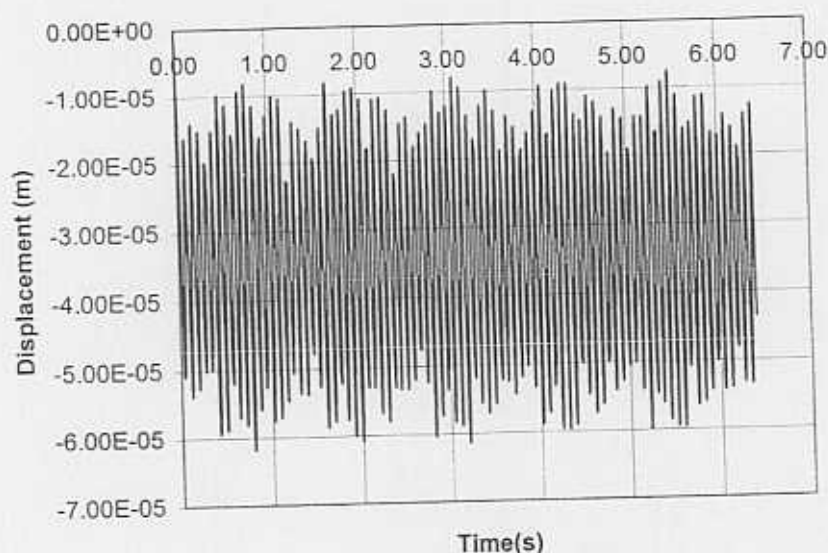
ตารางที่ 4.27 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.2072	0.1175	5.5562	8.0401
	1	0.1144	0.0540	0.9788	0.9167
	2	0.1133	0.0536	0.6051	0.5675
	5	0.1011	0.0530	0.2840	0.2691
0.26	0	0.1938	0.0676	6.3206	4.7128
	1	0.0903	0.0428	0.9160	0.8615
	2	0.0896	0.0424	0.5800	0.5448
	5	0.0839	0.0419	0.2779	0.2647
0.28	0	0.1385	0.0586	4.8834	4.7890
	1	0.0725	0.0344	0.8572	0.8109
	2	0.0720	0.0341	0.5579	0.5284
	5	0.0695	0.0337	0.2726	0.2598

ผลจากการวิเคราะห์พบว่ากรณีจตุรกรรับแบบยึดแน่นความถี่จะเกิดสูงสุดที่ความหนา 0.24 เมตร แต่ในกรณีจตุรกรรับอย่างง่าย ความถี่ที่เกิดขึ้นสูงสุดจะเกิดที่ความหนา 0.26 เมตร ความหนา 0.24 เมตร และ 0.28 เมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อจตุรกรรับเปลี่ยนไป การตอบสนองของพื้นแตกต่างกัน ออกไป ทั้งนี้ควรพิจารณาถึงกรณีวิกฤติที่สุดของแต่ละกรณี และเมื่อพื้นมีความหน่วงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จะสามารถลดการตอบสนองได้มากกว่าร้อยละ 50

- การกระโดดที่มีความถี่ในการกระโดด 2.5 เฮิรตซ์

การตอบสนองของพื้นต่อความถี่ในการกระโดด 2.5 เฮิรตซ์นั้นเปรียบได้กับการเดินในจังหวะที่เร็ว ตัวอย่างกราฟการตอบสนองต่อการแอ่นตัวของคน 6 คนที่ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 Displacement time history 6 คน ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ จูตรองรับแบบยึดแน่น
ความหนา 0.28 เมตร

เมื่อทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ต่อการตอบสนองของแผ่นพื้นที่มีการกระโดดโดยคน 6 คน กระโดดด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 Finite element results โดยคน 6 คนด้วยความถี่ 2.5 เฮิรตซ์

Thickness(m.)	Damping(%)	Peak displacement(mm.)		Peak acceration(%g)	
		Pin	Fixed	Pin	Fixed
0.24	0	0.2601	0.0959	7.7534	5.9514
	1	0.1142	0.0543	0.9787	0.9168
	2	0.1124	0.0540	0.6051	0.5676
	5	0.0945	0.0535	0.2840	0.2692
0.26	0	0.1782	0.0917	5.8295	6.7540
	1	0.0901	0.0429	0.9160	0.8617
	2	0.0893	0.0426	0.5800	0.5449
	5	0.0799	0.0423	0.2779	0.2647
0.28	0	0.1340	0.0610	5.1128	4.9967
	1	0.0724	0.0345	0.8571	0.8111
	2	0.0718	0.0343	0.5679	0.5254
	5	0.0672	0.0341	0.2725	0.2599

ผลการวิเคราะห์พบว่ากรณีจูตรองรับแบบยึดแน่นโดยที่ไม่มีความหนาของพื้นที่มีความหนา 0.26 เมตร จะมีความเร่งสูงสุด แต่ในกรณีของจูตรองรับอย่างง่ายที่ความหนา 0.24 เมตรจะมีค่าความเร่งที่สูงสุดและสูงกว่ากรณีจูตรองรับแบบยึดแน่นด้วย และเมื่อมีความหน่วงบนแผ่นพื้นจะสามารถลดการตอบสนองได้มากกว่าร้อยละ 50

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นที่มีขนาดใหญ่ ได้ถูกทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Finite element method) ในการศึกษา ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม JL Analyzer ในการคำนวณตลอดทั้งโครงการ ซึ่งคุณสมบัติของโปรแกรมนี้เป็นไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรมที่สามารถใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้หลายสาขา อาทิ เช่น Static, Dynamic, Buckling, Frequency, Thermal, Electric และงานวิศวกรรมด้านอื่น ๆ โดยจุดเด่นของโปรแกรมนี้อยู่ที่การใช้งานที่ง่ายและสามารถแสดงผลแบบกราฟฟิคที่หน้าจอได้

ไฟไนท์อีลิเมนต์โมเดลของแผ่นพื้นที่มีความหนาต่าง ๆ กันได้ถูกสร้างขึ้น เพื่อที่จะทำการจำลองพฤติกรรมของแผ่นพื้นภายใต้น้ำหนักจากการเดินที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน จากการศึกษาพบว่าขนาดของการตอบสนองของแผ่นพื้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่การก้าวกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้น

กรณีแผ่นพื้นตัวอย่างภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการกระโดดที่นำมาวิเคราะห์นี้เปรียบเสมือนเป็นตัวแทนของแรงที่กระทำในแบบต่าง ๆ บนแผ่นพื้นที่สามารถจะเกิดขึ้นได้ เพื่อที่จะศึกษาผลการตอบสนองของพื้นที่มีต่อการกระโดดที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน และเมื่อเปลี่ยนความหนาจะสามารถลดการตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าจุดรองรับจะเป็นตัวแปรแรกที่จะต้องพิจารณา ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าแม้ว่าจะมีความหนาของพื้นที่เท่ากันแต่จุดรองรับแตกต่างกันการตอบสนองของแผ่นพื้นก็แตกต่างกันไปด้วย จากผลการวิเคราะห์พบว่าความหน่วงสามารถลดผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นบนพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 ทั้งในกรณีของความเร่งและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางพื้น สุดท้ายคือความหนาของพื้น ความหนาของพื้นมีผลต่อการตอบสนองของพื้น เพราะโดยธรรมชาติพื้นจะมีความถี่ธรรมชาติซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาอยู่แล้ว จากผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นจะมีการตอบสนองกับความถี่ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าความถี่พื้นได้รับมีค่าใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่มีอยู่แล้วมากน้อยเพียงไร และถ้าความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติแม้เพียง 1 ใน 3 ของความถี่ธรรมชาติก็สามารถที่จะทำให้พื้นเกิดการสั่นที่รุนแรงได้ ดังนั้นควรที่จะได้ศึกษาถึงความถี่ธรรมชาติของพื้นแต่ละชนิด ก่อนการออกแบบทุกครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงความ

เสียหายที่จะเกิดตามมาในภายหลัง เพราะว่าการเพิ่มความหนาของพื้นชั้นก็หมายถึงการเพิ่มราคาของพื้นชั้นอีก ดังนั้นควรหาจุดที่ทำให้เกิดความประหยัดและปลอดภัย

ความหน่วง เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดขนาดของการสั่นของแผ่นพื้น กล่าวคือการเพิ่มค่า ความหน่วงสามารถลดขนาดของการตอบสนองของแผ่นพื้นได้กว่า 50% ในส่วนของการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นพบว่ามีส่วนช่วยในการลดขนาดของการตอบสนองแต่ก็มีประสิทธิภาพน้อยกว่าความหน่วง สุดท้ายการเพิ่ม ความหนาให้แก่จตุรรองรับก็สามารถช่วยลดขนาดของการตอบสนองได้ประมาณร้อยละ 10 ดังนั้นในการออกแบบวิศวกรผู้ออกแบบควรให้ความสำคัญกับความหน่วงที่เกิดขึ้นบนพื้นเพราะว่าความหน่วงสามารถลดการตอบสนองของพื้นได้มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนเงื่อนไขจตุรรองรับนั้น โดยทั่วไปพื้นจะมีลักษณะเป็นพื้นต่อเนื่องดังนั้นจตุรรองรับจึงค่อนข้างเป็นแบบยึดแน่น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะจตุรรองรับมีผลในการลดการตอบสนองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อนำข้อมูลแต่ละตัวมาเปรียบเทียบพบว่าแนวโน้มการตอบสนองต่อการแอ่นตัวจะลดลงอย่างเป็นเส้นตรง ทั้งนี้เมื่อนำค่าการแอ่นตัวที่มากที่สุดที่ความหน่วงร้อยละ 5 โดยตารางเปรียบเทียบการแอ่นตัวดังแสดงในหัวข้อถัดไป

5.2 การเปรียบเทียบค่าสูงสุดของการเดินแต่ละความถี่ เมื่อมีเงื่อนไขของจำนวนคนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการเดินในแต่ละแบบจตุรรองรับแบบง่าย

ความถี่การก้าว(เฮิรตซ์)	ความหนา(เมตร)	การตอบสนองต่อการแอ่นตัวสูงสุด			
		1 คน	2 คน	4 คน	6 คน
1.87	0.24	0.0840	0.0840	0.1866	0.2412
	0.26	0.0751	0.0751	0.1675	0.2173
	0.28	0.0665	0.0665	0.1490	0.1937
2.0	0.24	0.0755	0.0755	0.1678	0.2146
	0.26	0.0675	0.0675	0.1503	0.1929
	0.28	0.0597	0.0597	0.1332	0.1714
2.77	0.24	0.0730	0.0730	0.1616	0.2032
	0.26	0.0649	0.0649	0.1443	0.1816
	0.28	0.0572	0.0572	0.1272	0.1603

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการเดินในแต่ละแบบจตุรรองรับแบบยึดแน่น

ความถี่การก้าว (เฮิรตซ์)	ความหนา(เมตร)	การตอบสนองต่อการแอ่นตัวสูงสุด			
		1 คน	2 คน	4 คน	6 คน
1.87	0.24	0.0138	0.0609	0.0827	0.1482
	0.26	0.0115	0.0498	0.0671	0.1239
	0.28	0.0095	0.0410	0.0548	0.0977
2.0	0.24	0.0094	0.0531	0.0682	0.1290
	0.26	0.0079	0.0435	0.0568	0.1045
	0.28	0.0067	0.0358	0.0458	0.0856
2.77	0.24	0.0103	0.0519	0.0682	0.1130
	0.26	0.0088	0.0435	0.0568	0.1131
	0.28	0.0075	0.0367	0.0474	0.0880

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการกระโดดในแต่ละแบบจตุรกรรับแบบง่าย

ความถี่การกระโดด(เฮิรตซ์)	ความหนา(เมตร)	การตอบสนองต่อการแอ่นตัวสูงสุด			
		1 คน	2 คน	4 คน	6 คน
1.87	0.24	0.00018	0.02160	0.06220	0.10350
	0.26	0.00015	0.01780	0.05120	0.08520
	0.28	0.00014	0.01460	0.04210	0.07010
2.0	0.24	0.00074	0.02130	0.06080	0.10110
	0.26	0.00067	0.01770	0.05110	0.08390
	0.28	0.00060	0.01460	0.04180	0.06950
2.5	0.24	0.00077	0.02000	0.05690	0.09450
	0.26	0.00069	0.01690	0.04810	0.07990
	0.28	0.00062	0.01420	0.04050	0.06720

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของการกระโดดในแต่ละแบบจตุรกรรับแบบยึดแน่น

ความถี่การกระโดด(เฮิรตซ์)	ความหนา(เมตร)	การตอบสนองต่อการแอ่นตัวสูงสุด			
		1 คน	2 คน	4 คน	6 คน
1.87	0.24	0.00017	0.01150	0.03220	0.05350
	0.26	0.00015	0.00910	0.02540	0.04220
	0.28	0.00014	0.00730	0.02040	0.03390
2.0	0.24	0.00065	0.01170	0.03230	0.05300
	0.26	0.00054	0.00930	0.02560	0.04190
	0.28	0.00051	0.00760	0.02060	0.03370
2.5	0.24	0.00107	0.04010	0.03300	0.05350
	0.26	0.00090	0.00980	0.02610	0.04230
	0.28	0.00077	0.00790	0.02100	0.03410

5.3 สิ่งที่สามารถศึกษาในขั้นต่อไป

งานวิจัยที่น่าจะศึกษาต่อไปคือ การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นพื้นชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น Composite Floor, Precast concrete floor ที่ต่อเนื่องกันหลายช่วงของอาคารสาธารณะที่ต้องรองรับแรงกระทำแบบเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ห้องเดินแอโรบิค ลานสเก็ต สไลเดอร์ ลานจอดรถ สะพานลอยคนข้าม เป็นต้น ซึ่งอาคารที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดล้วนแล้วแต่เป็นอาคารสาธารณะที่มีลักษณะเป็นพื้นขนาดใหญ่ และเกิดการสั่นจากการเคลื่อนที่ไปมาในช่วงเวลาสั้น ๆ (Incidental load) ดังนั้นถ้าหากมีการศึกษาในด้านนี้เชื่อว่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับวิศวกรผู้ออกแบบ ซึ่งน่าจะเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเสมอในการออกแบบอาคารสาธารณะ สุดท้ายนี้เทคนิคการจำลองแรงกระทำแบบเคลื่อนที่ (Moving load) ที่ได้นำเสนอในรายงานวิจัยฉบับนี้ก็สามารถนำไปใช้ในการจำลองแรงเคลื่อนไหวชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับการเดินอันได้แก่ แรงแบบเคลื่อนไหวที่มีลักษณะการกระทำแบบซ้ำ ๆ ได้

บรรณานุกรม

- Allen, D.E. (1990). **"Design criteria for walking vibrations"** Private correspondence
- Allen, D.E. (1990a). **"Building Vibrations from Human Activities"** *Concrete International: Design and Construction, American Concrete Institute*, vol. 12, no. 6. 66-73.
- Allen, D.E. (1990b). **"Floor Vibrations from Aerobics"** *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 5. 771-779.
- Allen, D.E. and Rainer, J.H. (1975). **"Vibration Criteria for Long-Span Floors"** *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 3, no. 2. 165-173.
- Allen, D.E., Rainer, J.H., and Pernica, G. (1985). **"Vibration Criteria for Assembly Occupancies"** *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 12, no. 3. 617-623.
- Allen, D.L. and Swallow, J.C. (1975). **"Annoying Floor Vibrations - Diagnosis and Therapy"**, *Sound and Vibration*, March. 12-17.
- Bachmann, H. and Ammann, W. (1987), **"Vibration in structures: induced by man and machine"**, IABSE, Zurich, Switzerland
- Dossing, Ole (1988). **"Structural Testing Part II: Modal Analysis and Simulation"**. Bruel & Kjaer.
- Hanagan, L.M. (1994). **"Active Control of Floor Vibrations"** Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Hanes, R.M. (1970). **"Human Sensitivity to Whole-Body Vibration in Urban Transportation Systems: A Literature Review"** Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Silver Springs, MD.
- Harris, C.M. (1996). **"Shock and Vibration Handbook"** McGraw-Hill Book Co. New York, NY.
- K. Kuntiyawichai, N. Sangtian, 2002, **"Finite element study of long-span flat concrete floor subjected to walking load"**, International Conference on Structural Stability and Dynamics 2002 at Singapore, pp. 522-527.

- K. Kuntiyawichai, N. Sangtian, S. Kanarkard, 2002, **“Dynamic behaviour of long-span flat concrete floor due to walking load”**, The 8th National Convention on Civil Engineering 2002 at Khon Kaen, pp. STR124-129
- S. Nilrat, W. Puatatsananon, K. Kuntiyawichai, 2004, **“Vibration behaviour of long-span flat concrete floor subjected to human walking”**, The 9th National Convention on Civil Engineering 2003 at Cha-um, Petchaburi, pp. STR78-83
- Lenzen, K.H. (1966). **“Vibration of Steel Joist-Concrete Slab Floors”** *AISC Engineering Journal*, vol. 3, no. 3. 133-136.
- Meriam, J.L. and Kraige, L.G. (1992). **“Dynamics”**. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Mouring, S.E. and Ellingwood, B.R. (1994). **“Guidelines to Minimize Floor Vibrations from Building Occupants”** *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(2), 507-526
- Murray, T.M. (1979). **“Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations”** *Sound and Vibration*, November. 24-30.
- Murray, T.M. (1991). **“Building Floor Vibrations”** *AISC Engineering Journal*, vol. 28, 3rd qtr. 102-109.

