

การศึกษาผลของแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มต่ออาคารข้างเคียง

THE STUDY OF VIBRATION EFFECT FROM PILE DRIVING
TO THE ADJACENT BUILDING



นาย กิตติ ประยูรพันธุ์รัตน์

MR. KITTI PRAYOONPHANRAT

นาย อรุณ ไชยศิรินนท์

MR. AROON CHAISIRINON

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

033263

**THE STUDY OF VIBRATION EFFECT FROM PILE DRIVING
TO THE ADJACENT BUILDING**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
BECHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลของแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มต่ออาคารข้างเคียง
นักศึกษา 1. นาย กิตติ ประยูรพันธุ์รัตน์ รหัสประจำตัว 33100023
2. นาย อรุณ ไชยศิรินนท์ รหัสประจำตัว 33100508
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. อำนวย พานิชกุลพงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
อ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ
อ. ศรีกริช หิรัญมาศ
อ. สกฤต ห่อวโนทยาน
อ. อำนวย พานิชกุลพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ ๒๑ เดือนเมษายน พ.ศ. ๒๕๖๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มต่ออาคารข้างเคียง
 THE STUDY OF VIBRATION EFFECT FROM PILE DRIVING
 TO THE ADJACENT BUILDING

โดย นาย กิตติ ประยูรพันธุ์รัตน์
 นาย อรุณ ไชยศิรินนท์
 อาจารย์ที่ปรึกษา อ. อำนวย พานิชกุลพงศ์

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในบริเวณกรุงเทพฯ บางครั้งจำเป็นต้องตอกเสาเข็มใกล้กับอาคารข้างเคียงมากดังนั้นการตอกเข็มจึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงได้แรงสั่นสะเทือนจากการตอกวัดออกมาในรูป peak particle velocity ซึ่งสามารถบอกระดับความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงได้โดยใช้ code ของต่างประเทศ เช่น Dutch Cur-57 recommendation , DIN standard และ Whiffin & Leonard

peak particle velocity ขึ้นอยู่กับ ระยะห่างจากจุดตอก, พลังงานในการตอก, ความลึกต่างๆของชั้นดิน และ ชนิดของดิน ดังนั้นเราสามารถหาวิธีป้องกันเพื่อลดค่า peak particle velocity ไม่ให้เกินค่าที่กำหนดได้

Abstract

Piling for large building foundation in Bangkok poses a high risk of damages to adjacent structures. Vibration from pile driving is measured in the unit of peak particle velocity which can predict damages to the adjacent building by comparing to the international code such as Dutch Cur-57 recommendation , DIN standard and Whiffin & Leonard standard

Peak particle velocity depends on several factors . Those factors are distance from pile driving , pile driving energy, depth of pile embedment and type of soil. Hence we can prevent damages to the adjacent building in the way which reduce the surplus peak particle velocity.

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ อำนวย พานิชกุลพงศ์ และจากอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์มากมาย และขอขอบคุณ บริษัท Pyramid , บริษัท Inter Consult , บริษัท บางบัวทองพัฒนาคอนกรีต , บริษัท MCO และ บริษัท Power-P ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการค้นหาข้อมูล ตลอดจนเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด และที่ขาดเสียมิได้ คือ นุพการี ผู้ให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้มาโดยตลอด

ผู้จัดทำ

นาย กิตติ ประยูรพันธุ์รัตน์

นาย อรุณ ไชยศิรินนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 พฤติกรรมการสันสเทือนจากการตอกเข็ม	3
2.1 ธรรมชาติของการสันสเทือนบนพื้นดินจากการตอกเข็ม	3
2.2 ผลของแรงสันสเทือนต่อมนุษย์และอาคาร	5
2.3 สนามคลื่นจากการตอกเข็ม	5
2.4 ความถี่จากการตอกเข็ม	9
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการส่งผ่านแรงสันสเทือน	9
2.6 การทรุดตัวแบบ dynamic จากการตอกเสาเข็ม	13
2.7 ตัวอย่างการศึกษาแรงสันสเทือนจากการตอกเสาเข็ม	14
ต่ออาคารข้างเคียง	
2.8 วิธีป้องกันความเสียหายจากแรงสันสเทือนในการตอกเข็ม	18
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 ลักษณะหน่วยงานต่างๆ	19

	หน้า
3.2 วิธีการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	29
4.1 ศึกษาแรงต้านสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆของเข็ม	29
4.2 ศึกษาแรงต้านสะท้อนที่ระยะต่างๆและพิจารณา ระยะตอกเข็มปลอดภัย	31
4.3 ศึกษาเปรียบเทียบแรงต้านสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆ ระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะ	49
4.4 ศึกษาหน้าตัดเข็มต่อแรงต้านสะท้อน	50
4.5 ข้อมูลการทดสอบเพิ่มเติมจากบริษัท Pyramid	50
บทที่ 5 สรุปผลกรทดลอง	86
หนังสืออ้างอิง	88



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนต่อมนุษย์และอาคาร Whiffin & Leonard	6
ตารางที่ 2.2 Dutch Cur-57 recommendation	7
ตารางที่ 2.3 DIN Standard	8
ตารางที่ 2.4 ความถี่ในชั้นดินต่างๆเนื่องจากการตอกเสาเข็ม (Wiss,1967)	9
ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองแสดงความถี่ในชั้นดินต่างๆในประเทศญี่ปุ่น (Kobayashi,1767)	12
ตารางที่ 2.6 แสดงความ Sensitivityของเครื่องมือในห้อง lab ต่อแรง สั่นสะเทือน (Whiffin & Leonard,1967)	16
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงาน อาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว	33
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงาน สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	37
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงาน ยงเจริญคอมพิวเตอร์	40
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการทำเข็มเจาะหน่วยงาน โรงพยาบาลปิตินครินทร์	42
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงาน บ้านพักอาศัย 2 ชั้น ซอยเมตตา 3	44
ตารางที่ 4.6 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆของหน่วยงาน อาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว	45
ตารางที่ 4.7 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆของหน่วยงาน สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	47

ตารางที่ 4.8 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆของหน่วยงาน ยงเจริญคอมเพล็กซ์	48
ตารางที่ 4.9 แสดงค่า particle velocity ที่ระยะ 2.3 เมตร ของหน่วยงาน Thai Central Chemical	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นสนามแบบ verticle จากฐานรากรูปวงกลม (Richart , Hall and Woods)	4
รูปที่ 2.2 มาตรฐานกำหนดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียง (Langefors , Edwards , Bumines)	10
รูปที่ 2.3 แสดงคลื่นสนามจากการตอกเสาเข็ม (Attewell และ Farmer , 1973)	10
รูปที่ 2.4 แสดงแผนการตอกเข็มเพื่อควบคุมแรงสั่นสะเทือน (Crocket , 1965)	17
รูปที่ 3.1 แสดง soil profile หน่วยงาน อาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว	23
รูปที่ 3.2 แสดง soil profile หน่วยงาน สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	24
รูปที่ 3.3 แสดง soil profile หน่วยงาน โรงพยาบาลปิโตรเคมีและหน่วยงาน ยงเจริญคอมเพล็กซ์	25
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือ VMS พร้อมขาวัดชนิด spike	26
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องมือ VMS พร้อมขาวัดชนิด tripod	27
รูปที่ 3.6 แสดงการใช้เครื่องมือ VMS วัดค่า peak particle velocity	28

บทที่ 1

บทนำ

INTRODUCTION

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่กรุงเทพฯ มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการก่อสร้างอาคารขนาดสูงและอาคารขนาดใหญ่ และระบบคมนาคมและสาธารณูปโภคมากขึ้น เนื่องจากราคาที่ดินในกรุงเทพฯ มีราคาสูงขึ้นมาก ดังนั้นการลงทุนในโครงการก่อสร้างใหญ่ๆ ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของ กรุงเทพฯ ซึ่งมักต้องทำในบริเวณที่มีอาคารสิ่งปลูกสร้างอยู่รอบข้างจึงจำเป็นต้องทำการก่อสร้างให้แล้วเสร็จอย่างรวดเร็ว และต้องมีการออกแบบให้มีการใช้พื้นที่อย่างเต็มที่

พื้นดินกรุงเทพฯ ปกคลุมด้วยชั้นของดินเหนียวอ่อนหนาถึง 12-16 เมตรจากผิวดิน ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำมาก ดังนั้นนอกจากอาคารขนาดเล็กไม่เกิน 2 ชั้นแล้ว อาคารอื่นๆ มักจำเป็นต้องใช้ฐานรากแบบเสาเข็มยาวถ่ายน้ำหนักลงไปชั้นดินดาน (stiff clay) หรือ ชั้นทรายที่อยู่ใต้ชั้นดินเหนียวอ่อน และอ่อนปานกลางถัดลงไป ซึ่งอยู่ประมาณ 20 เมตร สำหรับอาคารสูงเกินกว่า 20 ชั้น มักจะจำเป็นต้องใช้ฐานรากเสาเข็มยาวมากขึ้นไปอีกเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งอยู่ลึกลงไปประมาณ 40-50 เมตร เพื่อช่วยลดปัญหาการทรุดตัวของอาคาร

เสาเข็มรับอาคารสูงที่ใช้ในกรุงเทพฯ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เสาเข็มตอกคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ คอนกรีตอัดแรง และเสาเข็มเจาะหล่อในที่ ถ้าฐานรากต้องการเสาเข็มยาวไม่เกิน 30 เมตร อาจจะใช้เสาเข็มตอกหรือเจาะก็ได้ แต่ถ้าต้องการใช้เสาเข็มหยั่งถึงชั้นทรายที่ 2 แล้วจำเป็นที่จะต้องเลือกเข็มเจาะ เพราะความยากในการตอกเข็มคอนกรีตทะลุลงไปถึงระดับความลึกดังกล่าว ถ้าจะเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะแล้ว เข็มตอกนั้นถูกกว่า ใช้เวลาในการก่อสร้างสั้นกว่า เพราะหลักรองงานควบคุมคุณภาพได้ดีกว่า มีอัตราการบรรทุกลำน้ำหนักดีกว่า และมีข้อจำกัดด้านความลึกและการตอกเข็มจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนรบกวนพื้นที่ข้างเคียง อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างรอบข้างได้ ซึ่งบางกรณีเกิดเป็นกรณีพิพาท เป็นข่าวใหญ่โตและเกิดความล่าช้าเสียหาย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มที่ระยะต่างๆ จากจุดที่ตอกเสาเข็มถึงจุดที่ทำการพิจารณาแรงสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม ณ ระดับความลึกต่างๆจากผิวดิน
3. เพื่อทราบถึงระดับความเสียหายที่จะเกิดขึ้น พร้อมทั้งหาวิธีลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ

1. ใช้เกณฑ์การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทางปฐพีกลศาสตร์
2. ทฤษฎีและแนวความคิดจากมาตรฐานกำหนดความเสียหายจากการตอกเสาเข็มต่ออาคารข้างเคียงของต่างประเทศ ได้แก่ DIN Standard , Dutch Cur-57 recommendation , Leonard & Whiffin
3. ทฤษฎีการกำเนิดคลื่นจากการตอกเสาเข็ม

1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ทำการศึกษาแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจากสถานที่จริง ณ หน่วยงานต่างๆในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนที่วัดได้จากหน่วยงานต่างๆ ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล
3. ทำการเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนที่วัดได้กับมาตรฐานกำหนดความเสียหายจากการตอกเสาเข็มของต่างประเทศ
4. ศึกษาวิธีป้องกันความเสียหายจากแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

1. วัดแรงสั่นสะเทือนด้วยเครื่องมือ Vibration Monitoring System
2. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลจากบริษัท Pyramid

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการใช้เครื่องมือ Vibration Monitoring System
2. สามารถทราบถึงระยะตอกเข็มปลอดภัยจากอาคารข้างเคียง
3. วิธีลดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียง

บทที่ 2

พฤติกรรมการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม (VIBRATION BEHAVIOUR FROM PILE DRIVING)

(2.1) ขบวนการสั่นสะเทือนบนพื้นดินจากการตอกเข็ม

(Nature of Ground Vibration from pile driving)

การตอกเข็มไม่ว่าจะใช้วิธีใด จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในดินกระจายไปรอบข้าง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ในการตอกเข็มนั้น วิธีการก็คือ การส่งถ่ายพลังงานให้กับเสาเข็มโดย Hammer เพื่อบังคับให้เข็มนั้นเคลื่อนเจาะดินลงไป แต่โดยทั่วไปแล้วพลังงานที่ให้กับเข็มจะมีเพียงบางส่วนที่ถูกใช้ penetrate เข็มลงไปดิน ส่วนที่เหลือจะสูญเสียในลักษณะต่างๆ ในกรณีตอกเข็มในชั้นดินแข็ง พลังงานปริมาณมากจำนวนหนึ่งจะถูก Reflect กลับเข้าไปในตัวเข็มเนื่องจากความต้านทานของดินสูงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในตัวเข็ม และเกิดคลื่นความสั่นสะเทือนที่ปลายเข็มถ่ายสู่ดิน

เพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมของพื้นดินแบบ dynamic ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นต่างๆจากการตอกเข็มดังนี้

Ground wave แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. body wave ประกอบไปด้วย

1.1 compressive wave (p-wave) compressive wave หน้าคลื่นจะกระจายออกเป็นทรงกลมและเดินทางด้วยความเร็วสูงคลื่นชนิดนี้จะอ่อนตัวลงตามระยะทางแบบสามมิติที่มันแพร่ขยายออกไป

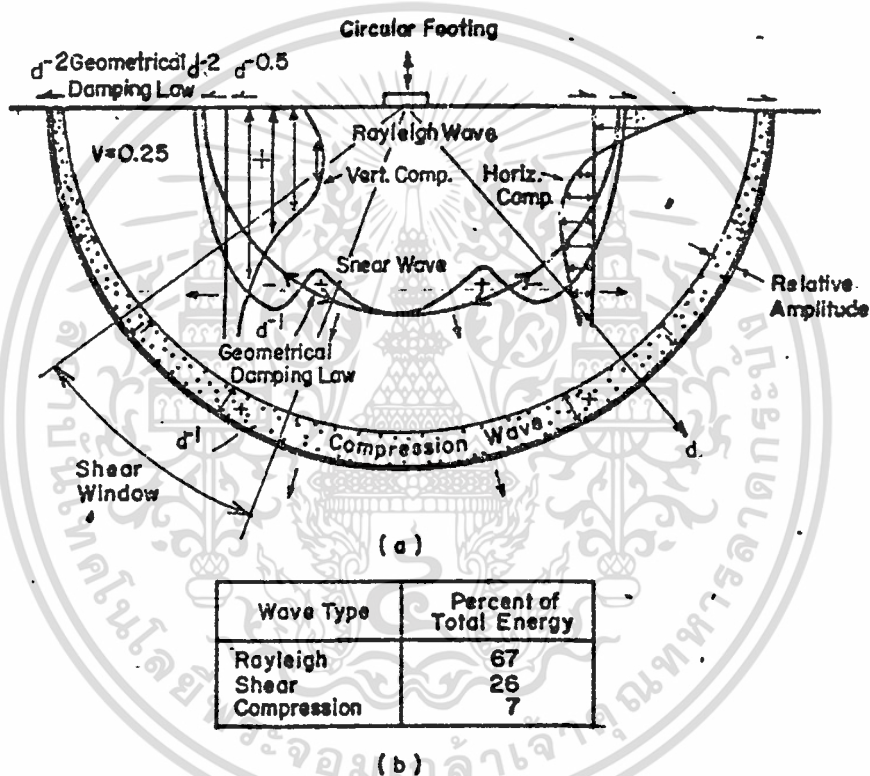
1.2 shear wave หน้าคลื่นจะแพร่ขยายออกไปเป็นลักษณะทรงกลมเช่นเดียวกันแต่จะแพร่ขยายออกไปด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าๆกับคลื่นที่เดินทาง ในเชิงซึ่งถูกกระตุกที่ปลายขณะวางอยู่บนพื้น

2. Rayleigh wave (R-wave) ที่ผิวหน้าคลื่นชนิดนี้จะมีทั้งส่วนประกอบที่เป็นทั้งแนวตั้งและแนวนอน

เป็นที่สังเกตว่าที่จุดใดๆของตัวกลาง Compressive wave จะเดินทางมาถึงก่อน ตามด้วย shear wave และสุดท้ายจะเป็น Rayleigh wave

ต่อไปจะเป็นตัวอย่าง การเกิดคลื่นสั่นสะเทือนจากฐานรากวงกลมที่ระยะทางต่างๆดังรูปที่ 2.1 จากการทดลองของ Woods(1968) จากรูป จะเห็นว่าคลื่นทุกชนิดจะต้องพบกับมวล

ดินขนาดใหญ่เมื่อพวกมันเดินทางออกมาคั้งนั้นความเข้มของพลังงานในแต่ละคลื่นจะลดลงแปรผันตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น การลดลงของความเร็วพลังงานหรือการลดลงของ amplitude นี้ เรียกว่า "geometrical damping"(Richart,Hall และ Woods,1970) และจากการทดลองการลดลงของระยะ amplitude ของ Ewing,Jardetsky และ Press ปี1967 สรุปได้ว่า amplitude ของ body wave จะแปรผกผันกับ d (d คือระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น) ยกเว้นที่บริเวณตามผิวหน้าดิน amplitude จะแปรผกผันกับ d^2 และ amplitude ในคลื่น Rayleigh จะลดลงในอัตราส่วน $1/\sqrt{d}$



รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นสนามแบบ verticle จากฐานรากรูปวงกลม (Richart, Hall and Woods)

สำหรับคลื่นพลังงานที่ขยายตัวออกเป็นวงกลมจาก circular footing ซึ่งต้นตัวในแนวตั้งบนผิวดิน Miller และ Pursey(1955) ได้พิจารณาพลังงานที่แพร่ออกไปในรูปคลื่นทั้ง 3 ชนิดโดยพลังงานออกไปกับคลื่นแบบ Rayleigh 67%, shear wave 26% , compression wave 7% จะเห็นว่าพลังงานทั้งหมดนี้จะออกไปกับคลื่นแบบ Rayleigh ถึง 2/3 ของพลังงานทั้งหมด

คลื่นแบบ Rayleigh จะอ่อนกำลังลงเมื่อเทียบกับระยะทางช้ากว่า body wave มาก เพราะฉะนั้น คลื่นชนิด Rayleigh จะเป็นคลื่นที่ถูกพิจารณามากที่สุดที่บริเวณผิวดิน

(2.2) ผลของแรงสั่นสะเทือนต่อมนุษย์และอาคาร (Reaction of People and Damang to Buildings at Various Vibration Levels)

WHIFFIN และ LEONARD ได้ทำการทดลองและสรุปผลของแรงสั่นสะเทือนต่อ มนุษย์และอาคารข้างเคียง ดังตารางที่ 2.1 สำหรับมาตรฐานกำหนดความเสียหายต่ออาคารข้าง เคียงอื่นๆ ได้แก่

1.มาตรฐานของ Långfors (Sweden), Edwards (Canada) และ BuMines (U.S.A) แสดงค่า peak particle velocity ต่อความเสียหายของโครงสร้างอาคาร (structural damage) แสดงดังรูปที่ 2.2

2.Dutch cur-57 recommendation เป็น code ของประเทศเนเธอร์แลนด์ แสดงดัง ตารางที่ 2.2 กำหนด peak particle velocity ไว้ไม่เกิน 4.5 mm/s

3.DIN standard เป็น code ของประเทศเยอรมัน แสดงดังตารางที่ 2.3 กำหนด peak particle velocity ไว้ไม่เกิน 10 mm/s

(2.3) สนามคลื่นจากการตอกเข็ม (Wave Fields Generated by Pile Driving)

การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็มจะมีความยุ่งยากในเรื่องของสนามคลื่น ที่เกิดซับซ้อนกัน การตอกเข็มในช่วงแรกๆเมื่อต้อน้ำหนักกระทบหัวเสาเข็ม สนามคลื่นจะถูก สมมติให้คล้ายกับแหล่งพลังงานทรงกลมที่ถูกสั่นในแนวตั้งจากบนผิวดินดังตัวอย่างที่แล้ว ใน ระหว่างการเจาะทะลุน้ดินของเข็มในชั้นต่างๆ การเบาบางลงของแรงสั่นสะเทือนบนพื้นดิน จะอธิบายโดย ATTEWELL และ FARMER (1973) ดังนี้

การตอกลงบนเข็มโดยต้อน้ำหนักจะก่อให้เกิด body wave เดินทางไปตามเสาเข็ม ถึงแนวสัมผัสระหว่างปลายเข็มและดิน ที่ผิวสัมผัสนี้ส่วนหนึ่งของพลังงานจะถูกส่งผ่านไปยัง ดินและส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับแสดงให้เห็นว่า amplitude ของคลื่นลึกลับขึ้นอยู่กับมุมตก กระทบของคลื่น และอัตราส่วนของความหนาแน่นต่อความเร็วคลื่นในสื่อกลางทั้งสอง ใน กรณี bodywave เคลื่อนที่ผ่านผิวสัมผัสดินและเหล็กซึ่งวางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของ คลื่น มุมของการตกกระทบจะเท่ากับศูนย์ อัตราส่วนระหว่างamplitudeคลื่นตกกระทบ ต่อ amplitude คลื่นสะท้อนจะมีค่าประมาณ 2 ต่อ 1 ,สำหรับเสาเข็มที่ผิวสัมผัสเข็มและดิน พลังงานคลื่นจะตกกระทบเข็มด้วยมุมตกกระทบ 90 องศา และมีพลังงานจำนวนน้อยมากที่จะ

ตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่ระดับต่างๆที่มีต่อมนุษย์และอาคาร (Whiffin and Leonard, 1971)

Peak particle velocity (mm/sec)	ผลกระทบต่อมนุษย์	ผลกระทบต่ออาคาร
0 - 0.15	- ไม่มีความรู้สึกใดๆ	- แรงสั่นสะเทือนไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ
0.15 - 0.13	- เริ่มที่จะมีความรู้สึกต่อแรงสั่นสะเทือน	- แรงสั่นสะเทือนไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ
2.0	- รู้สึกต่อแรงสั่นสะเทือน	- ซากบ้านผนังหรือสถานที่เก่าแก่โบราณจะเกิดความเสียหายได้
2.5	- แรงสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วนี้จะรบกวนต่อมนุษย์ได้	- ไม่ทำอันตรายต่อโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของอาคารทั่วไป
5	- แรงสั่นสะเทือนจะรบกวนมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในอาคารบ้านพัก	- มีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของอาคารบ้านพักอาศัยทั่วไปซึ่งเป็นผนังและเพดานฉาบปูนเรียบ
10 - 15	- ก่อความรู้สึกที่ไม่สบายต่อคนที่อาศัยอยู่ภายในบ้าน และเป็นค่าที่ยอมรับไม่ได้สำหรับผู้คนสัญจรบนสะพาน	- ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมและก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหลักของอาคารเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 Dutch Cur-57 recommendation

zone	limit mm/s	Assessment of the effect on human beings	Assessment of the effect on buildings.
A	25.1	not allowable	danger of collapsing
B	10.6	not allowable	local damage
C	4.5	hardly allowable	cracks in masonry
D	1.9	only allowable in heavy industry	start of cracking
E	0.8	short time in houses	no influence on normal buildings
F	0.3	long time in houses	no influence
G		allowable	no influence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 DIN standard

Line	Type of structure	Vibration velocity, \dot{u} , in mm/s			
		Foundation			Plane of floor of uppermost full storey
		less than 10 Hz	At a frequency of		Frequency mixture
		10 to 50 Hz	50 to 100*) Hz		
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Dwellings and buildings of similar design and/or use	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, do not correspond to those listed in lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. buildings that are under a preservation order)	3	3 to 8	8 to 10	8

*) For frequencies above 100 Hz, at least the values specified in this column shall be applied

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หักเหออกจากเข็ม พลังงานส่วนใหญ่จะวิ่งผ่านไปยังปลายเข็ม การหักเหและการสะท้อนของ p-wave และ s-wave จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปคลื่นของ p-wave และ s-wave ใกล้เคียงกับเสาเข็มซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของพื้นดิน รูปที่ 2.3 แสดงสนามคลื่นซึ่งเกิดจากการตอกเข็ม

(2.4) ความถี่จากการตอกเข็ม (Characteristic Frequencies Produced by Pile Driving)

Wiss(1967) พบว่า การสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจะมีความถี่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินดังตาราง 2.4 ในประเทศญี่ปุ่น Kobayashi พบว่าความถี่ที่มีอำนาจสูง เช่น ความถี่ 40 ที่ amplitude สูงสุดจะมีค่าสูงในชั้นดินที่มีความหนาแน่นสูงและมีค่าต่ำในชั้น unconsolidated subsoil และเขาพบว่าความถี่จะสูงมากเมื่อเสาเข็มตกลงไปถึงชั้นหินข้างใต้ ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ความถี่ในชั้นดินต่างๆ เนื่องจากการตอกเสาเข็ม (Wiss, 1967)

Soil Type	Frequencies
Alluvial Fill	5-10 cps
Clay	15-25 cps
Sand	30-40 cps

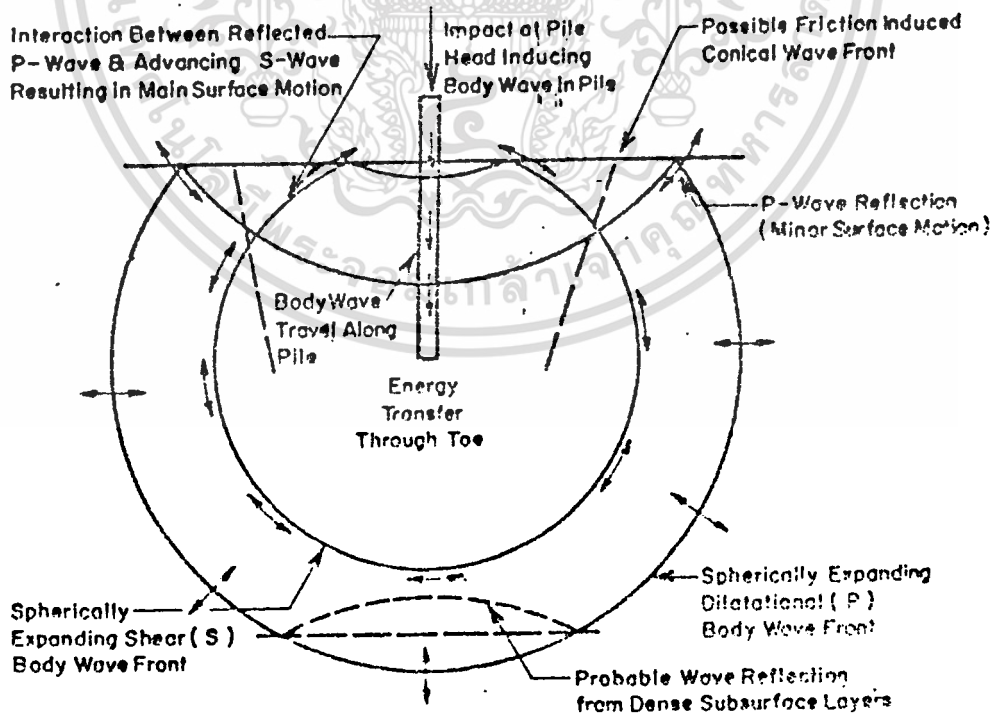
(2.5) ปัจจัยที่มีผลต่อการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือน (Factors Affecting Transmission of Vibration)

เมื่อค้ำน้ำหนักกระทบที่หัวเข็ม พลังงานที่ให้เข้าไปจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของน้ำหนักค้ำและระยะยกค้ำน้ำหนัก และพลังงานที่ให้ออกมาจะสูญเสียไปกับสิ่งเหล่านี้ซึ่ง PRAKASH และ JAIN ได้กล่าวไว้ในปี 1970 ดังนี้

- (1) พลังงานจะสูญเสียไปกับการเจาะทะลุทะลวงลงไปของเสาเข็มผ่านชั้นดินต่างๆ
- (2) การเสียรูปแบบ elastic และ plastic ของหมอนรองเสาเข็ม
- (3) การอัดแบบยืดหยุ่นของเสาเข็ม

Peak Particle Velocity, mm/sec.	250	Serious Cracking	Damage	Major Damage (fall of plaster serious cracking)	
	200	Cracking			
	150	Fine Cracking and Fall of Loose Plaster			Minor Damage (fine plaster cracks, opening of old cracks)
	100	Caution			Caution
	50	No Noticeable Damage			Safe Limit
		Langefors (Sweden)	Edwards (Canada)	BuMines (U.S.A.)	

รูปที่ 2.2 มาตรฐานกำหนดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียง
(Langefors, Edwards, BuMines)



รูปที่ 2.3 แสดงคลื่นสนามจากการตอกเสาเข็ม (Attewell และ Farmer, 1973)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) การสะท้อนของค้ำน้ำหนัก

(5) การเลือกรูปแบบ elastic และ plastic ของดินบริเวณรอบๆเสาเข็ม
ปัจจัยซึ่งมีผลต่อพลังงานที่ถูส่งผ่านจากหัวเสาเข็มมีดังต่อไปนี้

(5.1) ระยะห่างจากจุดตอก โดยแรงสั่นสะเทือนจะแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดตอกเสาเข็ม

(5.2) พลังงานในการตอก ความเข้มของการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการตอก ถ้าพลังงานที่ใช้ในการตอกมีค่ามาก การส่งถ่ายพลังงานไปยังผิวดินก็จะยิ่งมาก

(5.3) ความลึกต่างๆของชั้นดิน ภาพแสดงการสั่นสะเทือนของพื้นดินสำหรับการตอกในแต่ละครั้งที่ระยะห่างจากเข็ม 33 เมตรจากกึ่งกลางเสาเข็ม (ศึกษาโดย O'NEIL (1970)) แสดงในรูป 2.4 จะเห็นว่าในช่วงแรกๆของการตอก เช่น การเขี่ยค้ำเข็ม, การตอก 1-2 ครั้งแรก amplitude ของคลื่นจะน้อยมากเนื่องจากพลังงานในการตอกจะถูกดูดกลืนไปกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มลงไป ในชั้นดินค้ำน้ำหนักของตัวเข็มเอง หลังจากการตอกประมาณ 10 ครั้ง amplitude ของคลื่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลงตลอดการตอก

(5.4) ชนิดของดิน ในชั้นดินแข็งเป็นชั้นที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านพลังงานมากที่สุด ในขณะที่ชั้นดินอ่อนและชั้นดินอ่อนปานกลางจะดูดซับพลังงานเหล่านี้ไว้ ดังนั้นในชั้นดินแข็งคลื่นจะเดินทางด้วยระยะทางที่ไกลและการเสื่อมลงของความเข้มการสั่นสะเทือนจะเกิดในอัตราที่น้อย

เราไม่สามารถบอกได้ว่า ดินชนิดหนึ่งดีกว่าดินอีกชนิดหนึ่งเพราะว่า จะต้องพิจารณา ลักษณะการ ยึดหยุ่นและการ damping ของดินด้วย ตัวอย่างเช่น ในการสำรวจแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร ในชั้น sand จะมีความเร็วคลื่นต่ำกว่าชั้น wet clay ในขณะที่แรงสั่นสะเทือนจะลดลงในชั้น wet clay ได้เร็วกว่าในชั้น sand

ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองแสดงความถี่ในชั้นดินต่างๆ ในประเทศญี่ปุ่น (Kobayashi, 1967)

Location	Piling machine	Pile	Length	Geology	Predominant frequency
Yamashina, Kyoto (Horizontal)	Unknown	Concrete	10 m	Gravelly clay	24 cps 25 40
Kation road 1, Kyoto (Horizontal)	Diesel Hammer	H-beam	Un- known	Sandy loam, gravelly silt	6-7
Homoto Er. Kyoto (Horizontal)	Drop Hammer	Concrete	10 m	Alternation of Sandy clay and sand	13 7-8
Tarumi, Hyogo (Horizontal)	Diesel Hammer	Concrete	Un- known	Alternation of silt and sand	7-10 16
Ogikubo, Tokyo (Horizontal)	Diesel Hammer	Concrete	Un- known	Loam, gravel sand and clay	40 20
Ogikubo, Tokyo (Vertical)	"	"	"	"	30 10 10
Mikawashima, Tokyo (Horizontal) (Vertical)	Diesel Hammer	Concrete	30 m	Silty clay	4-7 4-7
(Horizontal) (Vertical)	"	Steel pipe	30 m	"	5-8, 30 5-7, 25

(5.5) ชนิดของโครงสร้าง รูปร่างของอาคารก่อสร้างเป็นปัจจัยหนึ่งในการส่งผ่านพลังงานสั่นสะเทือน คุณสมบัติการ damping ของวัสดุในอาคารจึงเป็นปัจจัยสำคัญและโดยปรกติแล้วโครงสร้างอาคารคอนกรีตและอิฐจะสามารถส่งถ่ายแรงสั่นสะเทือนได้ดีจากการวัดแรงสั่นสะเทือนบนอาคารที่มีการออกแบบต่างๆ กันภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน Genschel พบว่าชนิดที่แตกต่างกันของโครงสร้างจะให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อคำนึงถึงพฤติกรรมทางด้าน dynamic แต่อย่างไรก็ตามผู้เชี่ยวชาญชาวเยอรมันได้กล่าวว่า โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นกล่องแข็งเกร็ง (rigid, box-like) จะก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนน้อย

(5.6) แรงสั่นสะเทือนจากแหล่งอื่น ในบางกรณี ขณะที่มีการตอกเสาเข็ม อาคารข้างเคียงอาจถูกแรงสั่นสะเทือนจากแหล่งอื่นได้ ตัวอย่างเช่น จากการจราจร และเครื่อง

จักร เป็นต้น ฐานรากที่อยู่แยกตัวออกมาจะถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อป้องกันแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องจักร เนื่องจากว่าอาคารส่วนใหญ่ในเมืองจะอยู่ติดกับริมถนน ดังนั้นการสั่นสะเทือนจากการจราจรจะเป็นแรงสั่นสะเทือนที่เพิ่มเข้ามานอกเหนือจากการตอกเสาเข็ม

Sutherland (1950) ได้ทำการศึกษาแรงสั่นสะเทือนจากการจราจรบนท้องถนน เขากล่าวไว้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อแรงสั่นสะเทือนมีดังนี้ น้ำหนักของรถ, ความเร็วของรถ, ลักษณะการเบรกและความเร่งของรถ, สภาพของพื้นผิวถนน เช่น ตะปุ่มตะป่ำหรือเรียบ, ความหนาของชั้นไผ่ถนน, ระยะทางจากถนนถึงตัวอาคาร และธรรมชาติของดินข้างใต้ถนน ในปัจจัยเหล่านี้ Sutherland พบว่า สภาพของพื้นผิวถนนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด และการสั่นสะเทือนที่มีค่ามากที่สุดในการทดลองจะไม่ทำอันตรายให้กับอาคาร ดังนั้นเขาได้สรุปว่า การสั่นสะเทือนจากการจราจรไม่ใช่สาเหตุโดยตรงของความเสียหาย แต่อย่างไรก็ตาม การสั่นสะเทือนจากการจราจรอาจก่อให้เกิดความเสียหายเพิ่มเติมขึ้นจากความเสียหายที่เกิดจากสาเหตุอื่นอยู่ก่อนแล้ว

NELSON และ VIRANUVAT ได้ค้นคว้าทางด้าน traffic vibration ในบริเวณกรุงเทพฯ โดยศึกษาแรงสั่นสะเทือนจากการจราจรบริเวณ วัดโพธิ์ กรุงเทพฯ วิหาร ในวัดโพธิ์เริ่มที่จะมีรอยแตกร้าวในช่วงเวลา 4-5 ปี พวกเขาเชื่อว่า ความเสียหายเกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากรถที่วิ่งผ่านไปมาบริเวณนั้น เนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากควรจะต้องเสร็จสิ้นสมบูรณ์เมื่อ 100 ปีมาแล้ว จากการวัดแรงสั่นสะเทือนที่หลายๆจุด พวกเขาพบว่าแรงสั่นสะเทือนจากการจราจรมีขนาดไม่มากพอที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างอย่างไรก็ตามแรงสั่นสะเทือนที่เกิดในอดีตอาจมีขนาดมากพอเนื่องมาจากสภาพของถนนที่ไม่ดี ดังนั้นพวกเขาสรุปว่า สาเหตุของความเสียหายอาจเกิดมาจาก 1 หรือทั้ง 2 ข้อดังต่อไปนี้

(1) การเสื่อมสภาพลงของฐานรากที่เก่าแก่มาก

(2) การทรุดตัวเนื่องมาจากการอ่อนตัวของดินบริเวณ โครงสร้างจาก traffic vibration

การสำรวจอย่างละเอียดของแรงสั่นสะเทือนจากการจราจรได้ถูกศึกษาโดย WHIFFIN และ LEONARD (1971)

(2.6) การทรุดตัวแบบ Dynamic จากการตอกเสาเข็ม

(Dynamic Settlement from pile driving)

การสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มก่อให้เกิดการทรุดตัวของโครงสร้างบริเวณข้างเคียงได้หลายๆทางด้วยกัน การตอกเสาเข็มต้นใหม่ใกล้ๆกับเสาเข็มที่รับ load แล้วจะเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวที่เป็นอันตรายต่อเข็มเหล่านี้ได้ โดยเข็มเหล่านี้จะสูญเสียค่า frictional resistance และทำให้เกิดการทรุดตัวในเข็มชนิด end bearing ได้ (ONBIL, 1970) ผลอื่นๆจาก

แรงสั่นสะเทือนของการตอกเสาเข็มคือ มุมของ granular soil จะลดลง 50% และสามารถในการแบกทานของฐานรากข้างเคียงจะลดลงยิ่งไปกว่านั้นแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็มจะส่งผลต่อ void ratio ของ granular soil รอบๆเสาเข็ม เช่น- แรงสั่นจะลด void ratio และส่งผลให้ดินอัดแน่นและเกิดการทรุดตัวในที่สุด

ผลของแรงสั่นสะเทือนที่มีต่อ skin friction ของเข็มในดินชนิดไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soils) Prakash และ Agarwal ได้ทำการทดลองในปี 1971 โดยนำเข็มจำลองทำด้วย aluminium ยาว 55 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. เข็มจำลองซึ่งถูกฝังอยู่ในทรายจะถูกดึงขึ้นในทิศทางตรงๆ และ นำมาหาค่า ultimate frictional resistance ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า สำหรับค่าความเร่งหนึ่ง ความต้านทานของเข็มจะลดลงเมื่อจำนวนครั้งของการทำซ้ำมากขึ้น ตัวอย่าง เสาเข็มถูกดึงขึ้นด้วยความเร่ง 1.0g ความต้านทานจะลดลงเหลือ 30 % ของ static value หลังจากการดึงขึ้นลงซ้ำ 100 ครั้ง ความต้านทานของเข็มจะลดลงเหลือ 20 % ของ static value เมื่อมีการดึงขึ้นลง 600 ครั้ง ภายใต้ความเร่ง 0.1g

(2.7) ตัวอย่างการศึกษาแรงสั่นสะเทือนต่ออาคารข้างเคียง

(Some case studies associated with Vibration from pile driving)

(1) ความเสียหายของอาคารในบริเวณกรุงเทพมหานคร

ตัวอย่างการก่อสร้าง บริษัท Allied Newspaper บนถนนพระราม 4 กรุงเทพฯ ใช้การตอกเสาเข็มในการก่อสร้าง การตอกเข็มจะตอกใกล้กับอาคารข้างเคียงมาก ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีต 2 ชั้น ใช้เข็มไม้ยาว 6 เมตร เข็มคอนกรีตขนาด 0.35*0.35*23.00 เมตร ถูกตอกห่างจากรั้วอิฐประมาณ 60 ซม.และห่างจากกำแพงอิฐประมาณ 3 เมตร ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณมุมผนังอิฐและที่มุมบานหน้าต่างไม้ซึ่งมีลักษณะถูกบิดเป็นเกลียว ที่บริเวณกลางแผ่นพื้นปูนขึ้นมาประมาณ 15 ซม. ขณะที่ รั้วอิฐเอียงทำมุมประมาณ 20 องศา กับแนวตั้ง

หลังจากสำรวจความเสียหาย สรุปได้ว่า การตอกเสาเข็มใกล้กับอาคารข้างเคียงมากเกินไปอาคารข้างเคียงจะเสียหายเนื่องจากเหตุ 2 ประการ คือ

1. จากแรงสั่นสะเทือน
2. จากการเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็ม

เนื่องจากรั้วอิฐก่อนข้างเก่าและผ่านการทรุดตัวมาแล้วระยะเวลาหนึ่ง แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็มจะไปเพิ่มรอยแตกร้าวบริเวณที่ไม่แข็งแรง เนื่องจากอาคารที่สร้างอยู่ก่อนแล้วได้รับแรงสั่นสะเทือนจากรถบรรทุกบนถนน ดังนั้นการถูกแรงสั่นสะเทือนซ้ำจากการตอกเข็มจะก่อให้เกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นได้ สำหรับการโก่งตัวขึ้นของพื้นอาจเนื่องมาจากการเคลื่อน

ตัวของคืนได้

ในระหว่างการตอกเสาเข็มการเรียกร้องความเสียหายจากผู้อยู่อาศัยข้างเคียงเกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ 1. แรงสั่นสะเทือนจะก่อความรำคาญ และเกิดเสียงดังรบกวนต่อสภาพการอยู่อาศัย 2. ผู้อยู่อาศัยกลัวว่าอาคารจะเกิดการพังทลาย แต่อย่างไรก็ตามในโครงสร้างหลักๆของอาคารข้างเคียงไม่ปรากฏว่าพบรอยร้าวแต่อย่างไร โชคไม่คินัก ที่ยังไม่มีการวัดแรงสั่นสะเทือนในสมัยนั้น วิธีการหนึ่งที่จะลดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็ม คือ การลดระยะยกตัมน้ำหนัก ซึ่งก็คือการลดพลังงานในการตอกลงนั่นเอง

(2) การควบคุมการตอกเข็ม

ปัญหาอย่างร้ายแรงที่ส่งผลต่ออาคารข้างเคียงจากการตอกเสาเข็ม คือ การตอกใกล้ห้องทำการทดลอง เนื่องจากการทำงานในห้องทดลอง แรงสั่นสะเทือนอาจมีผลกระทบต่อเครื่องมือบางชนิดในห้องทดลอง เช่น ผลกระทบต่อการอ่านค่าจากเครื่อง galvanometers หรือการทดลองที่ต้องอาศัยการสังเกตระดับของเหลว ตารางที่ 2.6 แสดงความ sensitivity ของเครื่องมือในห้อง lab ต่อแรงสั่นสะเทือน ดังนั้นการตอกเข็มบริเวณห้องทดลองจะต้องมีการวางแผนการตอกเพื่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด

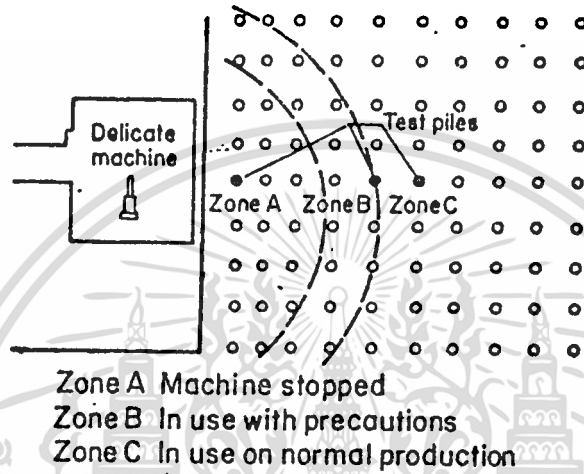


ตารางที่ 2.6 แสดงความ Sensitivity ของเครื่องมือในห้อง Lap ต่อแรงสั่นสะเทือน
(Whiffin and Leonard, 1971)

Type of instrument	Displacement in microns	
	Satisfactory	Excessive
Mettler analytical balance	R	0.1
Sartorius analytical balance	0.2	0.8
Leeds-Northrup reflective galvanometer	0.02	0.1
Zeiss interferometer microscope	R	0.1
Electron microscope	0.5	12.0
Photo-microscope	1.25	11.5
Watts Microptic autocollimator	0.05	0.07
Haas standard barometer	0.25	0.7

ตัวอย่างการควบคุมการตอกเสาเข็มใกล้บริเวณห้องทดลองซึ่ง Crocket (1965) ได้เสนอไว้มีดังนี้

ระหว่างการผลิตสายเคเบิลโทรศัพท์ ที่ แอตแลนติก ในขณะนั้นทางบริษัทจะทำการตอกเสาเข็มรอบๆบริเวณโรงงาน การสำรวจอย่างละเอียดของขบวนการผลิตทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า หัวที่ไหลออกมาจากสายเคเบิลหัวหนึ่งมีความไวต่อ ความถี่และ amplitude ของแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มมาก ทำให้การผลิตไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ดังนั้น ผู้รับเหมาเสาเข็มจึงได้วางแผนงานการตอกเข็ม ดังแสดงในรูป 2.5 แสดงให้เห็นว่าเข็มบางต้นตอกได้ในช่วงสุดสัปดาห์ที่เครื่องจักรไม่ได้ทำงานเท่านั้นเข็มบางต้นสามารถตอกได้ตามปกติโดยไม่รบกวนเครื่องจักรเนื่องจากอยู่ห่างไกลพอ



รูปที่ 2.4 แสดงแผนการตอกเข็มเพื่อควบคุมแรงสั่นสะเทือน (Crocket, 1965)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.8) วิธีการป้องกันความเสียหายจากแรงสั่นสะเทือนในการตอกเสาเข็ม

ในงานตอกเข็มใกล้อาคารปัญหาความเสียหายต่อโครงสร้างเนื่องจากผลของแรงสั่นสะเทือน สามารถป้องกันหรือบรรเทาได้ถ้าเลือกใช้วิธีการป้องกันที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่ วิธีต่อไปนี้

1. ใช้วิธีการเจาะนำ (Pre-bore)
2. ปรับระดับความถี่ของเครื่องตอกเข็มให้ห่างจากความถี่พื้นฐานของโครงสร้าง
3. หลีกเลี่ยงการใช้เครื่องตอกแบบ Vibratory hammer ใช้แบบ Impact hammer แทน
4. เลือกใช้เข็มที่มี Impedance สูง เพื่อช่วยลดปริมาณพลังงานที่สูญเสียในการตอกเข็มอันทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นแทน
5. เลือกขนาด hammer และ drop height ที่เหมาะสม ในกรณีของ hard driving การเพิ่มน้ำหนักค้อน การยกกระดบ drop ให้ต่ำลง และการใช้วัสดุรองหัวเข็มที่ไม่ stiff มาก จะช่วยลดแรงสั่นสะเทือนลง แม้ว่าจะทำให้ ประสิทธิภาพในการตอกต่ำลงบ้าง
6. เริ่มตอกเข็มแนวที่ใกล้กับโครงสร้างก่อน เพื่อใช้เป็น screen สะท้อนและหักเหคลื่นสั่นสะเทือนเพื่อลดปริมาณแรงสั่นสะเทือนที่จะส่งผ่านไปยังบริเวณข้างเคียง
7. ตอก sheet pile เป็น screen กันระหว่างบริเวณตอกเข็มและอาคารข้างเคียง
8. ขุดร่องดินระหว่างบริเวณตอกเข็มและอาคารข้างเคียงเพื่อช่วย dissipate แรงสั่นสะเทือนลง

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

EXPERIMENTAL INVESTIGATION

(3.1) ลักษณะหน่วยงานต่างๆ

หน่วยงานอาคารพาณิชย์สูง 3 ชั้นบริเวณถนนกิ่งแก้ว กม.ที่ 7

บริเวณใกล้ๆหน่วยงานมีโรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะซึ่งระยะห่างจากเสาเข็มใกล้สุดกับกำแพงอาคารเป็นระยะ 9.2 เมตร เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็ม I-35 ยาวต้นละ 12 เมตร ใช้ 2 ต้นต่อกันโดยการเชื่อม ใช้ Drop Hammer ในการตอก ตุ่มน้ำหนักหนัก 4.2 ตัน ระยะยกในการตอกโดยประมาณ 0.3 เมตร ใช้จำนวนเสาเข็ม 47 ต้น ปั่นจั่น 1 ตัว

เนื่องจากหน่วยงานนี้ไม่ได้ทำการเจาะสำรวจดิน จึงใช้ Profile ดินจากการเจาะสำรวจสนามบินหนองงูเห่า

ลักษณะของชั้นดินต่างๆ แสดงจาก soil Profile รูปที่ 3.1 ชั้นดินจากพื้นผิวดินถึงระดับความลึก 28 เมตร สามารถแบ่งชั้นดินได้เป็น 4 ชั้น คือ

1. ที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 1.5 เมตร เป็นชั้น weathered crust
2. ที่ระดับความลึก 1.5 เมตรจนถึง 8 เมตร เป็นดินประเภท very soft clay มี wasteproduct และ shell fragment ปะปนอยู่ สีของดิน คือ dark brown และ dark gray
3. ที่ระดับความลึก 8 เมตรถึง 15 เมตร เป็นดินประเภท soft to medium clay สีของดิน คือ light grayish brown
4. ที่ระดับความลึก 15 เมตรถึง 28 เมตร เป็น stiff clay

สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หน่วยงานนี้ไม่ได้ติดกับอาคารข้างเคียง ดังนั้นการทดลองจึงทดลองวัดความเร็วจากการสั่นสะเทือนที่ระยะต่างๆเพื่อหาระยะปลอดภัยใกล้สุดในการตอกเข็มกรณีมีอาคารข้างเคียงและทำการทดลองวัดความเร็วจากการสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆเพื่อดูว่าที่ชั้นดินใดก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนมากน้อยอย่างไร

เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็ม spun เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซม. ยาว 12 เมตร ใช้ 2 ต้นต่อกันโดยการเชื่อม ใช้ drop hammer ในการตอก ตุ่มตอกหนัก 4.2 ตัน ระยะยกตุ้มตอก 0.5 เมตร ใช้เสาเข็มจำนวน 484 ต้น ปั่นจั่นทั้งหมด 3 ตัว

ลักษณะของชั้นดินต่างๆ ในหน่วยงานนี้ แสดงได้จาก soil profile รูปที่ 3.2 ชั้นดินจากระดับพื้นดินถึงระดับความลึก 28.95 เมตร สามารถแบ่งชั้นดินได้เป็น 4 ชั้น คือ

1. ที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 1.5 เมตร เป็นทรายถมอัดแน่น

2. ที่ระดับความลึก 1.5 เมตรถึง 19.5 เมตร เป็นดินประเภท silty clay และ clayey silt (CH.MH-OH) พบว่ามี Organics ปะปนอยู่บ้าง มีความแน่นอยู่ในช่วง very soft to soft สีของดิน คือ Greenish Grey และ Dark Grey ชั้นดินนี้มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ต่ำและมีความสามารถในการยุบอัดตัวได้สูง

3. ที่ระดับความลึก 19.5 เมตร ถึง 24.0 เมตร เป็นดินประเภท silty clay (CH.CL) มีความแน่นอยู่ในช่วง stiff to very stiff สีของดิน คือ Yellowish Brown and Light Grey ชั้นดินนี้มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกไม่สูงมากนักและมีความสามารถในการยุบอัดตัวได้สูง

4. ที่ระดับความลึก 24.0 เมตรถึง 28.95 เมตร เป็นดินประเภท silty sand (SM.SC, SM-SW) สีของชั้นดินเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง Brown and Light Grey ค่าความแน่นของชั้นดินอยู่ในช่วง Dense to very Dense ชั้นดินนี้เป็นชั้นดินที่มีเสถียรภาพในการรับน้ำหนักได้ดี และให้ค่าการยุบอัดตัวน้อย

โรงพยาบาลปิณฑรินทร์ ถนนอ่อนนุชซอย 76

หน่วยงานนี้ใช้เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ควบคุมงานโดย บริษัท Power-P ด้านข้างหน่วยงานติดกับบ้านพักอาศัย เข็มเจาะที่ใช้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ซม. จำนวน 13 ต้น ขนาด 80 ซม. จำนวน 311 ต้น และขนาด 1 เมตร จำนวน 119 ต้น โดยเจาะลงไปทีละระดับความลึก 45 เมตร ปลอกเหล็กที่ใช้มีความยาว 16 เมตร

soil profile แสดงดังรูปที่ 3.3 เป็นชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจ 4 หลุม สามารถบรรยายสรุปได้ดังนี้

1. ดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง พบจากผิวดินลงไปจนถึงความลึก ประมาณ 13.5 เมตร โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอน อยู่ระหว่าง 0.5-4.0 ตัน/ม²

2. ดินเหนียวปนซิลต์ แข็ง อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียวอ่อนลงไป จนถึงความลึกประมาณ 19 เมตร

3. ดินเหนียวปนทรายถึงทรายปนดินเหนียว พบที่ระดับ 19-23 เมตร

4. ทรายเม็ดละเอียดถึงเม็ดปานกลาง แน่นปานกลางถึงแน่นมาก พบที่ระดับ 23-32.5 เมตร

5. ดินเหนียวปนซิลต์ แข็งมากถึงคานแข็งมาก พบที่ระดับความลึกระหว่าง 32.5-49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร โดยที่บางระดับความลึกจะพบชั้นทรายแทรกตัวอยู่

6.ดินเหนียว แข็ง สีเทาเข้ม พบอยู่ที่ระดับ 49-52 เมตร และ 49-50 เมตร คาดว่าดินชั้นนี้จะมีคุณสมบัติการยุบอัดตัวได้สูง

7.ดินเหนียวปนซิลต์ คานแข็งมาก สลับกับชั้นทรายแน่นมาก ถูกพบอยู่ตอนล่างสุดของการเจาะสำรวจ

หน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์ ถนนศรีนครินทร์ ซอยสุภาพงษ์ 3

เป็นคอนกรีตเสริมสูง 9 ชั้น หลายอาคาร สภาพทั่วไปของไซต์งานไม่ติดกับอาคารบ้านพักของคนอยู่อาศัยมาก่อน แต่จะเป็นอาคารที่ก่อสร้างขึ้นมาพร้อมๆกันกับโครงการซึ่งยังก่อสร้างไม่เสร็จ

เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็ม I-35 ยาวต้นละ 11.5 เมตร ใช้ 2 ต้นต่อโดยการเชื่อม ใช้ drop hammer ในการตอก ต้มตอกหนัก 4.5 ตัน ระยะขยในการตอก 40 ซม. ปั่นจั่น 7 ตัว

เนื่องจากหน่วยนี้ไม่ได้ทำการเจาะสำรวจดิน จึงใช้ soil profile จากหน่วยงานโรงพยาบาลปิณฑนครินทร์ (รูปที่ 3.3) ซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน

บ้านพักอาศัยซอย เมตตา 3 พหลโยธิน 50

ใช้เข็ม I 22 และ I 26 ยาว 9 เมตร ใช้ 2 ต้นต่อด้วยการเชื่อม ต้มตอกหนัก 3 ตัน ระยะขยต้ม 30 ซม. ระยะห่างจากศูนย์กลางเข็มตัวริมสุดถึงอาคารข้างเคียงมีระยะ 1.35 ม. สำหรับหน่วยงานนี้ได้ทำการทดลองวัดค่าแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเข็ม โดยใช้เข็มหน้าตัด 2 ชนิด คือ I-22 และ I-26 ที่ระยะห่างเดียวกัน เพื่อดูผลของหน้าตัดเข็มที่มีต่อแรงสั่นสะเทือนจากการตอก

โครงการ Thai Central Chemical ถนนสุขสวัสดิ์ สมุทรปราการ

เป็นข้อมูลที่ทำโดยบริษัท Pyramid โดยใช้เครื่อง vibration monitoring วัดบริเวณอาคารข้างเคียงซึ่งใกล้กับเสาเข็มที่ตอก การเก็บข้อมูลเก็บโดยใช้ geophone วัดในแนว horizontal และแนว vertical ข้อมูลแรงสั่นสะเทือนสามารถรู้ค่า amplitude และ ความถี่ของแรงสั่นสะเทือน

สำหรับโครงการนี้ใช้เข็ม I-400 mm. ยาว 28 เมตร ใช้ drop hammer ตอกโดยมีต้มตอกหนัก 6.5 ตัน ระยะขยต้มตอก 0.3-0.5 เมตร

สภาพการทำงานมีอาคารข้างเคียงห่างออกไประยะ 2.3 เมตร บริษัท Pyramid ทำการวัดแรงสั่นสะเทือนที่อาคารข้างเคียงและเทียบค่า particle velocity (mm/s) กับ DIN standard ซึ่งเป็น code ของประเทศเยอรมัน กำหนด particle velocity ไม่เกิน 10 มม./วินาที

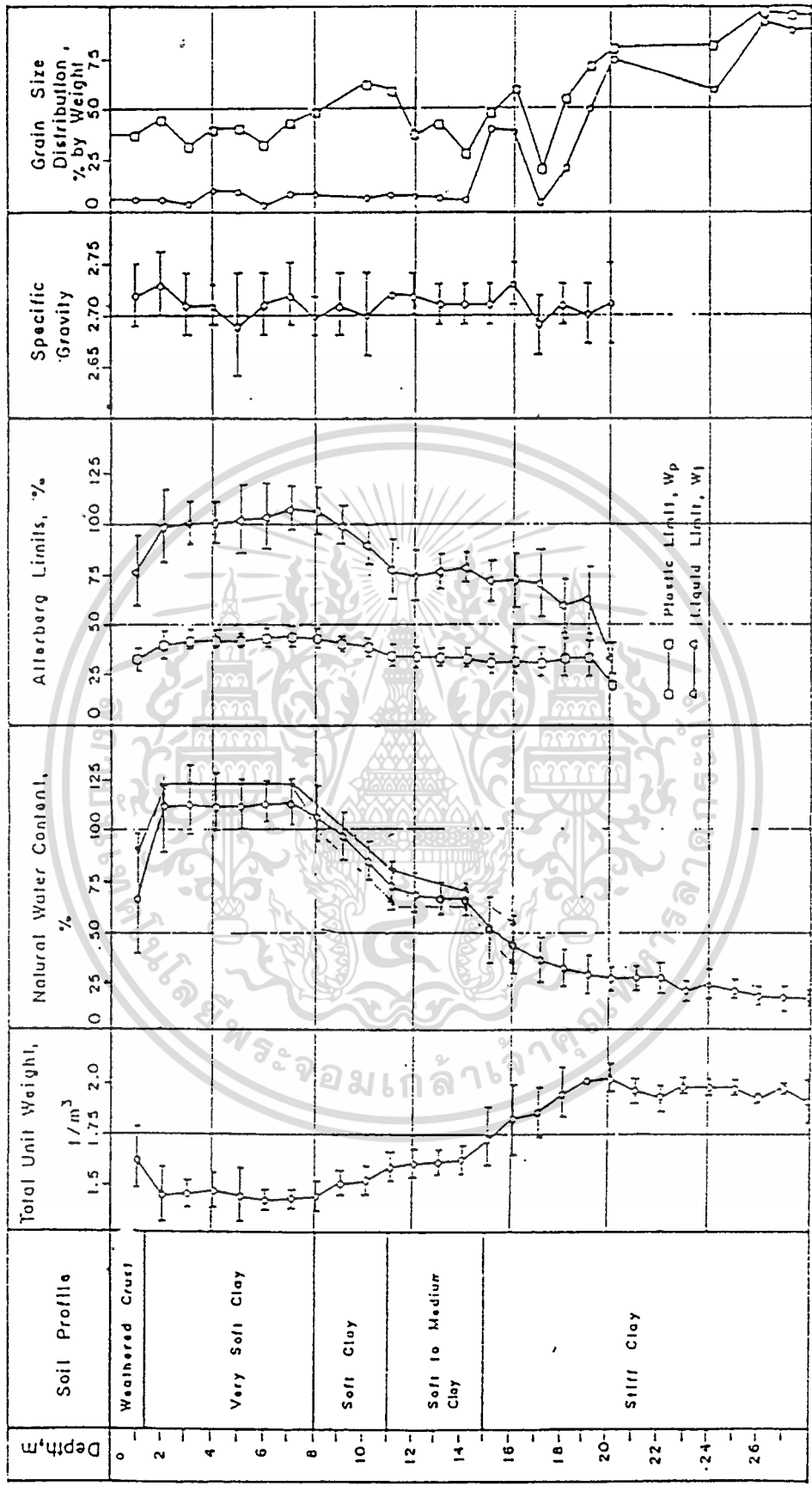
(3.2) วิธีการทดลอง

เมื่ออยู่หน้าหน่วยงาน

1. ใช้ซอล์กซิคทุกระยะ 1 เมตร ที่เสาเข็มที่จะทำการวัดทุกต้น จากรูป 3.6 จะเห็นเส้นซอล์กที่ซิคทุกระยะ 1 เมตร
2. ติดตั้งเครื่องมือ vms ณ จุดที่จะทำการวัด โดยใช้หัววัดแบบ spike กรณีวัดบนดิน ดังรูปที่ 3.4 และใช้หัววัดแบบ tripod กรณีวัดบริเวณผิวหน้าแข็ง ดังรูปที่ 3.5
3. เปิดเครื่องเพื่อเริ่มการวัด แสดงดังรูป 3.6
4. บันทึกเวลาที่จอเครื่อง vms เมื่อเข็มจมลงไปที่ระยะความลึกต่างๆ โดยดูจากซิคเครื่องหมายที่ ซิคไว้ในข้อ 1 ขั้นตอนนี้เราสามารถรู้เวลาที่เข็มจมที่ความลึกต่างๆ

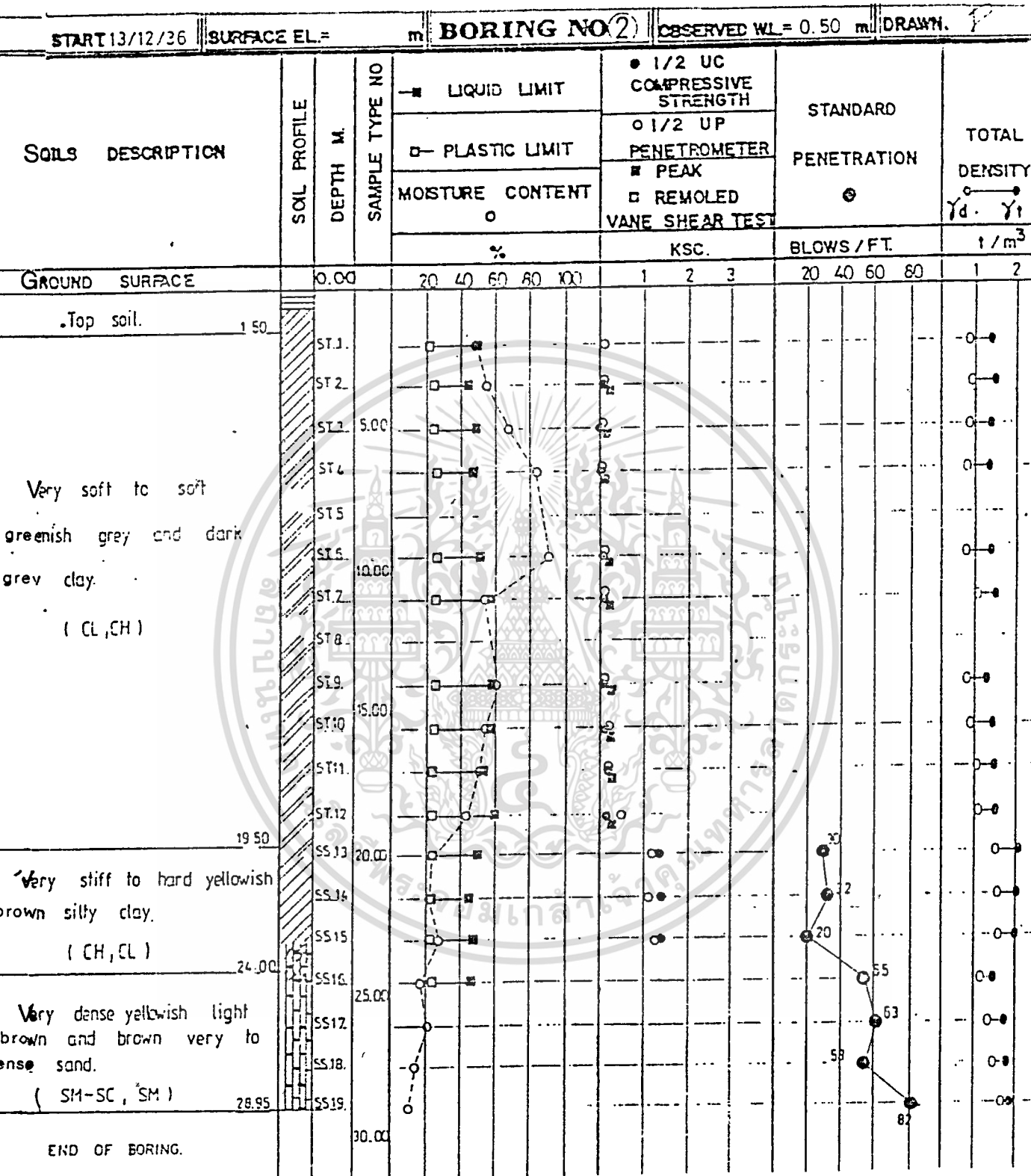
ขั้นตอนการถอดข้อมูลจากเครื่อง vms

1. ต่อเครื่อง vms เข้ากับเครื่อง Computer โดยใช้ RS-232 cable
2. เข้าโปรแกรม vms
3. load ข้อมูลจากเครื่อง vms เข้า computer โดยกดปุ่ม Alt เพื่อเข้าสู่ main menu, เลือก vms และ load vms data โปรแกรมจะให้ตั้งชื่อไฟล์ที่ load เข้ามา
4. กดปุ่ม alt เพื่อเข้า main menu เลือก menu processing เลือก select file เลือก display data
5. นำข้อมูลคือเวลาที่เข็มจมลงระยะต่างๆ บันทึกค่า peak particle velocity
6. นำ ค่า peak particle velocity มาเขียนกราฟแปรตามความลึกที่เข็มจมลงไป



รูปที่ 3.1 แสดง soil profile หน่วยงานอาคารพาณิชย์บริเวณถนนกิ่งแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



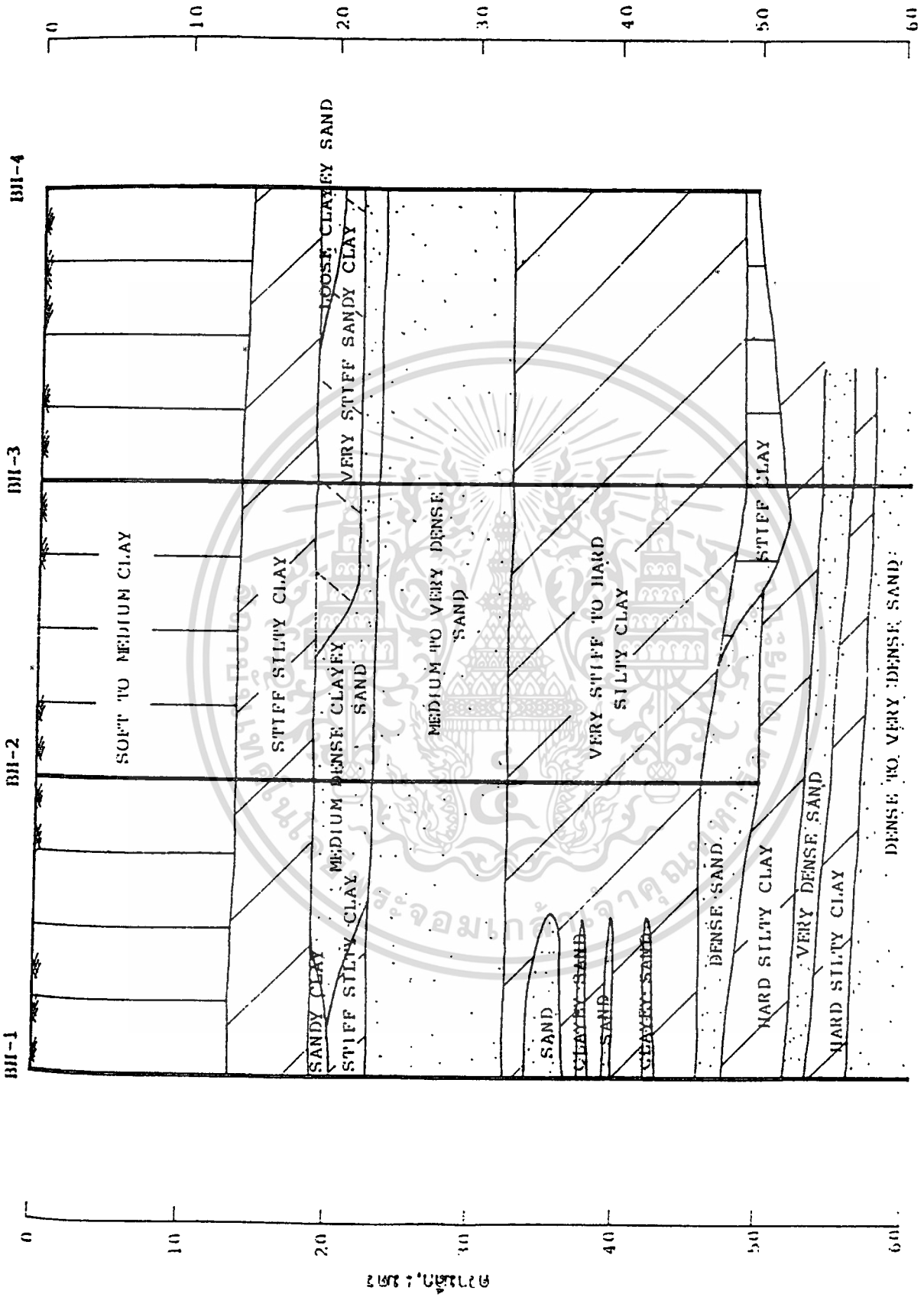
รูปที่ 3.2 แสดง soil profile หน่วยงานสำนักงานหลุมตกลาง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

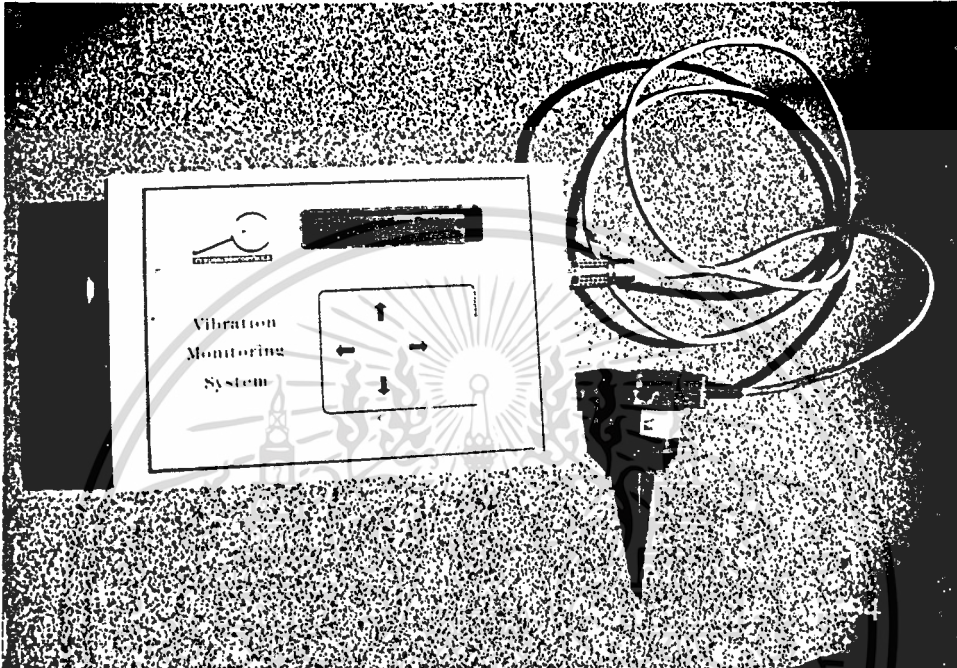
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึก, เมตร



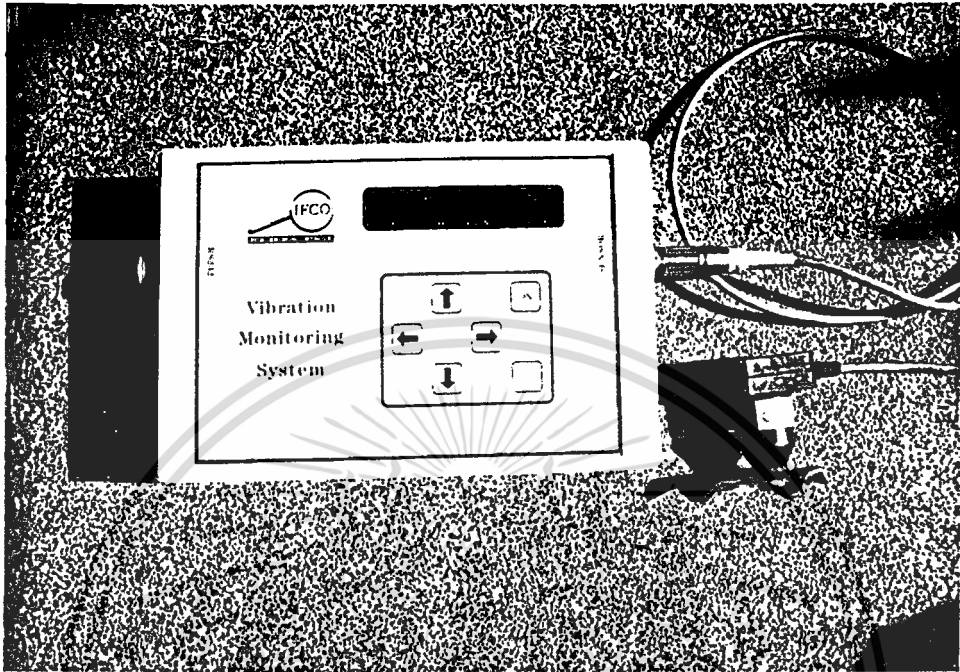
รูปที่ 3.3 แสดง soil profile หน่วยงานโรงพยาบาลปัตตานีครีเทร
และหน่วยงานเจริญคอมเพลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



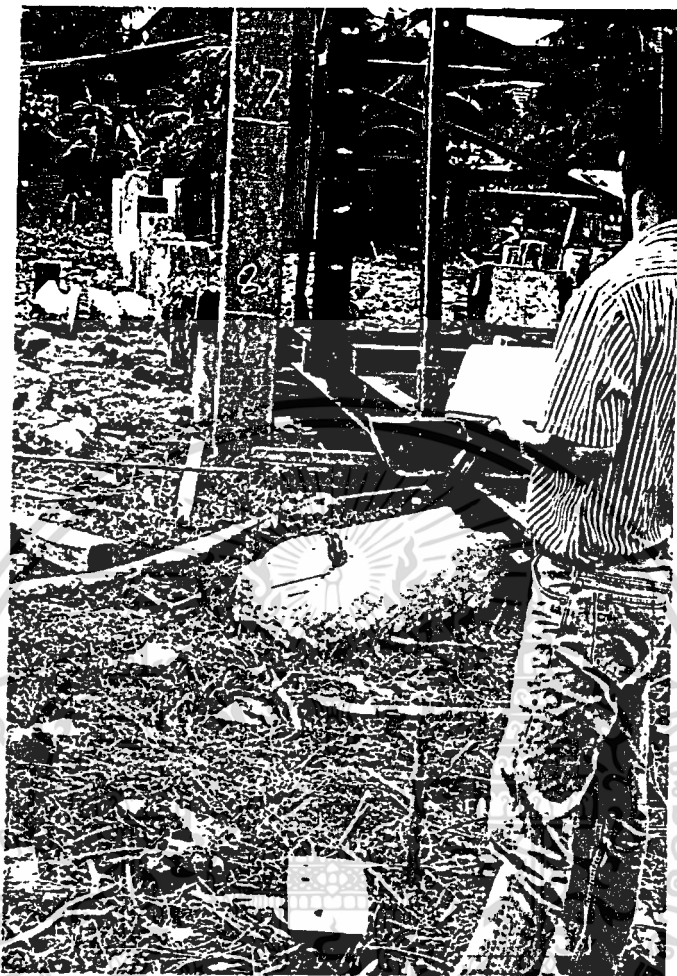
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือ VMS พร้อมขั้ววัดชนิด spike

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องมือ vms และขาตั้งชนิด tripod

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงการใช้เครื่องมือ VMS วัดค่า peak particle velocity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

RESULTS AND DISCUSSION

(4.1) ศึกษาแรงดันสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆของเข็ม

หน่วยงานที่ทำกรทดลอง 1. อาคารพาณิชย์ 3 ชั้น บนถนนกิ่งแก้ว

2. สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. ยงเจริญคอมเพล็กซ์ คอนโดมิเนียม 9 ชั้น

ผลการทดลอง

1. อาคารพาณิชย์ 3 ชั้น บนถนนกิ่งแก้ว แสดงดังตารางที่ 4.1

2. สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังตารางที่ 4.2

3. ยงเจริญคอมเพล็กซ์ แสดงดังตารางที่ 4.3

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงค่า peak particle velocity ที่ระดับความลึกต่างๆ ณ จุดห่างจากศูนย์กลางเข็มต่างๆกัน จากผลการทดลองนี้สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึก(ม) และ peak particle velocity (มม/วินาที)

1) วิเคราะห์ผลหน่วยงานอาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว

พิจารณารูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง peak particle velocity และ ความลึกที่เข็มถูกทดลองไปดังกราฟที่ 4.1-4.9 จะเห็นว่า peak particle velocity จากกราฟจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็นช่วงๆดังนี้ คือ

1) ช่วงแรก เมื่อเข็มถูกตอกผ่านชั้นทรายถมซึ่งหนาประมาณ 1.5 เมตร จะเห็นว่า ช่วงความลึกประมาณ 0-2 เมตร particle velocity จะมีค่ามาก เนื่องจากเป็นชั้น top soil ชั้นแรก แรงต้านทานต่อการเจาะจึงมีค่าสูง

2) ช่วงสอง เมื่อเข็มเจาะผ่านชั้นทรายถมลงไปแล้วเข็มจะสามารถเจาะทะลุผ่านชั้นดินด้วยน้ำหนักของเข็มเองโดยลงไปี่ระดับความลึกประมาณ 7-8 เมตรจาก soil profile รูปที่

3.1 ช่วงระดับความลึก 1.5-8 เมตรเป็น very soft clay ซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ต่ำ และมีความสามารถในการยุบอัดตัวได้สูง ดังนั้น particle velocity ในช่วงนี้จะมีค่าน้อย และการวัด particle velocity ในช่วงนี้จะเป็นการวัดโดยประมาณ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงไปดินเร็วมาก และแสดงเป็นเส้นปะในกราฟ 4.1-4.9

3) ช่วงสาม particle velocity จะเพิ่มขึ้นที่ระดับความลึกประมาณ 7-8 เมตร ซึ่งเป็นชั้น soft to medium clay

4) ช่วงสี่ particle velocity จะเพิ่มขึ้นที่ระดับความลึกประมาณ 18-19 เมตร จาก soil profile คือชั้น stiff clay, penetration resistance จะมีค่าสูง

จากการวิเคราะห์กราฟ 4.1-4.9 จะเห็นว่า ค่า max particle velocity จะเกิดที่บริเวณ top soil เมื่อระยะห่างจากเข็มอยู่ในช่วง 1-9 เมตร และค่า max particle velocity จะเกิดที่ชั้น stiff clay เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางเข็มมีระยะตั้งแต่ประมาณ 9 เมตรขึ้นไป

2) วิเคราะห์ผลสำนักหอสมุดกลางพระจอมเกล้า

จากกราฟรูปที่ 4.10-4.18 peak particle velocity จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

1) ช่วงแรก ช่วงความลึกประมาณ 0-2 เมตร particle velocity จะมีค่ามากเช่นเดียวกับหน่วยงานแรก จาก soil profile ในรูปที่ 3.2 จะพบว่าเป็นชั้น top soil ซึ่งในหน่วยงานนี้ใช้เป็นทรายถมสูงประมาณ 1.5-2 เมตร เนื่องจากช่วงนี้เป็นเปลือกแข็งช่วงแรก แรงต้านทานต่อการเจาะจึงมีค่าสูง

2) ช่วงสอง particle velocity จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความลึกเข็มประมาณ 2 เมตร จาก soil profile พบว่าเป็นชั้น soft to very soft clay ซึ่งเป็นชั้นดินที่มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่ำ และมีการยุบอัดตัวสูง particle velocity ช่วงนี้จึงมีค่าน้อยเข็มสามารถเจาะทะลุผ่านชั้นดินนี้ด้วยน้ำหนักตัวมันเอง การวัด particle velocity ในช่วงนี้จึงใช้การวัดโดยประมาณ และแสดงเป็นเส้นปะแสดงในกราฟรูปที่ 4.10-4.18

3) ช่วงสาม ที่ระดับความลึกประมาณ 19-20 เมตร particle velocity จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งเป็นชั้น stiff clay

3) วิเคราะห์ผลหน่วยงานยงเจริญคอมเพล็กซ์

พิจารณากราฟที่ 4.19-4.23 สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลง peak particle velocity ได้ดังนี้

นี้

- 1) ช่วงแรก ช่วงความลึกประมาณ 0-2 เมตร particle velocity จะมีค่ามาก
- 2) ช่วงสอง ช่วงความลึกประมาณ 2-7 เมตร particle velocity จะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนและมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงแรก เมื่อพิจารณา soil profile รูปที่ 3.3 ประกอบจะพบว่าชั้นดินนี้เป็นชั้น soft to medium clay ซึ่งเป็นชั้นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกไม่สูงมากนัก และมีความสามารถในการยุบอัดตัวสูง particle velocity จึงมีค่าน้อย ช่วงนี้เข็มสามารถเจาะทะลุผ่านชั้นดินด้วยน้ำหนักเข็มเอง และเจาะทะลุลงไปเร็วมาก ดังนั้นการวัด particle velocity ช่วงนี้จะเป็นการวัดโดยประมาณ และแสดงเป็นเส้นปะในกราฟรูปที่ 4.19-4.23
- 3) ช่วงสาม ช่วงความลึกประมาณ 12-15 เมตร particle velocity จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จาก soil profile พบว่าเป็นชั้น stiff silty clay ซึ่ง max particle velocity จะอยู่ที่ประมาณชั้นนี้
- 4) ช่วงสี่ ช่วงความลึกประมาณ 15 จนถึง 22 เมตร particle velocity มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับช่วงสาม จาก soil profile เป็นชั้น medium to very dense sand

(4.2) ศึกษาแรงสั่นสะเทือนที่ระยะต่างๆ และพิจารณาระยะปลอดภัยของหน่วยต่างๆ

หน่วยงานที่ทำการทดลอง 1. อาคารพาณิชย์ 3 ชั้นบนถนนกิ่งแก้ว

2. สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. ยงเจริญคอมเพล็กซ์

ผลการทดลองแสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆ

1. อาคารพาณิชย์ 3 ชั้นบนถนนกิ่งแก้ว แสดงดังตารางที่ 4.5

2. สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังตารางที่ 4.6

3. ยงเจริญคอมเพล็กซ์ แสดงดังตารางที่ 4.7

จากผลการทดลองตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 จะเห็นว่าระยะทางจากเข็มมีผลต่อแรงสั่นสะเทือนโดยมีค่าแปรผกผันกัน ดังนั้น การตอกเข็มชิดกับริมอาคารควรมีระยะห่างที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียง สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานกำหนดว่า particle

velocity ไม่อนุญาตให้เกินค่าเท่าไรจึงไม่เกิดความเสียหาย ในที่นี้จึงใช้ Code จากต่างประเทศ และจากการทดลองในต่างประเทศ ได้แก่ตารางที่ 2.1 Whiffin and Leonard, ตารางที่ 2.2 Dutch Cur-57 recommendation ของประเทศเนเธอร์แลนด์ และตารางที่ 2.3 DIN standard ของประเทศเยอรมัน สำหรับตารางนี้จำเป็นต้องทราบความถี่ของคลื่นจากการตอก แต่มาตรฐานนี้มีกำหนดไว้ว่า particle velocity ไม่ควรเกิน 10 มม/วินาที

วิเคราะห์หน่วยงานอาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว

สามารถแสดงค่า particle velocity สูงสุดที่ระยะต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงาน
อาคารพาณิชย์บนถนนกิ่งแก้ว

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	1.00	1.20	1.50	2.00	3.00
1	20.0	16.4	20.1	15.8	11.3
2	20.2	18.5	19.7	16.3	10.9
3	9.8	12.2	7.3	8.4	5.1
4	5.0	3.0	2.5	2.0	1.8
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	11.9	8.6	8.9	6.4
8	11.0	10.8	11.5	10.2	5.3
9	12.4	11.6	12.5	10.2	7.4
10	10.8	11.1	11.5	9.8	7.9
11	9.8	10.8	12.1	10.2	7.8
12	10.1	11.8	10.2	8.7	8.3
13	8.7	8.2	9.3	6.9	7.7
14	8.8	9.9	10.1	8.3	6.9
15	6.4	7.6	10.2	8.1	7.3
16	5.7	6.8	7.3	5.2	7.1
17	5.9	6.2	5.4	4.4	6.5
18	6.1	5.4	4.3	4.7	6.1
19	7.5	6.5	5.9	6.1	5.8
20	8.7	7.0	6.4	6.7	6.2
21	9.2	7.9	6.9	7.3	6.9
22	13.3	10.1	7.5	9.4	7.5
23	14.2	13.1	8.2	11.1	9.7
24	14.6	12.5	10.8	10.2	8.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	3.50	4.00	5.00	6.00	7.00
1	10.9	8.4	8.0	5.3	4.8
2	10.0	7.7	7.7	6.1	4.2
3	5.2	4.8	5.1	3.3	3.6
4	1.5	-	1.3	-	1.4
5	-	-	-	-	-
6	-	5.3	-	-	-
7	-	4.7	3.4	3.2	3.6
8	5.3	6.7	3.7	1.9	3.8
9	6.1	6.2	2.8	1.8	2.2
10	6.5	6.2	2.3	1.7	2.8
11	7.1	7.3	3.1	1.9	2.7
12	7.0	5.2	2.9	2.2	3.3
13	7.5	6.2	3.3	3.1	3.5
14	7.3	7.2	4.2	1.7	2.7
15	6.9	6.1	4.4	1.6	2.1
16	7.2	5.3	5.1	1.9	1.7
17	6.8	4.4	4.9	2.2	1.9
18	6.2	4.2	4.7	1.9	2.0
19	5.9	4.2	3.9	1.8	1.9
20	5.7	5.3	4.2	2.3	2.4
21	5.9	6.4	4.4	3.2	2.9
22	6.5	9.4	4.0	3.4	3.1
23	9.7	9.7	3.9	3.6	2.8
24	9.8	9.8	4.3	3.8	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	8.00	9.00	9.20	13.00	15.00
1	4.1	2.5	2.5	1.9	1.5
2	4.0	1.9	2.4	1.7	1.6
3	0.9	0.8	0.8	0.2	0.9
4	-	0.7	-	-	-
5	-	0.3	-	-	-
6	-	-	0.5	-	-
7	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5
8	1.6	0.5	0.5	0.6	0.5
9	1.7	0.5	0.4	0.5	0.4
10	1.2	0.6	0.5	0.5	0.5
11	1.1	0.6	0.5	0.4	0.4
12	1.6	0.2	0.4	0.3	0.3
13	1.5	0.2	0.5	0.4	0.4
14	1.9	0.9	0.6	0.7	0.6
15	1.7	0.9	0.8	0.7	0.8
16	1.5	1.1	0.9	0.8	0.7
17	1.8	0.5	1.2	1.4	0.9
18	1.6	0.3	0.7	1.0	0.9
19	1.7	0.8	0.8	0.9	1.1
20	2.2	1.2	1.4	1.2	1.2
21	2.6	1.9	1.7	1.3	1.4
22	2.8	1.8	1.9	1.5	1.5
23	2.5	2.2	2.1	1.8	1.8
24	2.9	3.9	3.7	3.5	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	17.00	18.00	20.00		
1	0.9	0.7	0.6		
2	0.8	0.8	0.7		
3	0.1	0.6	0.5		
4	-	0.3	0.2		
5	-	0.3	0.1		
6	-	-	0.1		
7	-	-	-		
8	0.3	0.4	0.5		
9	0.3	0.6	0.5		
10	0.7	0.8	0.7		
11	0.8	0.6	0.5		
12	0.5	0.5	0.3		
13	0.4	0.5	0.8		
14	0.7	0.4	0.9		
15	0.8	0.7	1.2		
16	0.5	0.9	0.9		
17	0.9	0.7	1.0		
18	0.7	1.0	0.8		
19	0.6	1.5	1.2		
20	1.5	1.8	1.2		
21	1.8	1.6	1.4		
22	1.9	1.9	1.2		
23	1.5	1.8	1.7		
24	2.2	1.7	1.8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองแรงสั่นและเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงานสำนัก
หอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
1	11.7	9.6	6.3	9.3	9.1
2	10.5	9.8	6.5	9.6	9.4
3	2.7	3.7	5.1	1.5	1.7
4	2.1	1.9	1.7	-	1.4
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	5.9	6.5	5.9	5.9	4.2
10	7.0	7.1	6.5	6.0	4.2
11	6.8	7.4	6.5	7.0	4.6
12	7.1	8.3	7.7	9.1	6.5
13	16.6	11.1	9.8	9.3	7.4
14	15.5	11.2	9.6	11.5	5.6
15	18.3	9.4	9.1	12.1	5.6
16	21.2	13.6	9.8	10.8	7.0
17	22.4	14.2	9.6	10.4	7.3
18	20.4	12.1	10.5	11.9	8.2
19	27.7	13.2	11.6	12.2	8.8
20	29.4	14.4	11.3	10.4	8.0
21	28.5	13.9	10.3	12.7	8.4
22	26.3	15.9	10.4	12.2	8.2
23	18.7	15.2	11.8	12.8	7.7
24	27.4	15.6	15.6	14.2	12.8
25	31.6	23.0	26.2	29.3	16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	4.00	5.00	6.00	9.00	11.00
1	7.4	7.3	6.8	4.9	4.3
2	6.8	7.0	7.1	4.4	4.5
3	1.4	2.1	1.5	1.1	1.1
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	3.6	2.4	3.5	3.1	2.2
10	4.0	3.8	3.8	2.8	1.9
11	3.9	4.0	3.3	3.1	1.7
12	5.5	4.8	4.5	2.9	2.2
13	6.9	5.3	5.2	3.8	1.6
14	5.6	5.0	5.1	4.2	2.3
15	5.1	4.4	3.8	3.5	2.4
16	6.0	5.3	4.7	3.9	0.9
17	6.1	6.0	5.8	2.4	1.8
18	6.8	5.8	4.3	3.0	1.2
19	6.9	5.7	5.1	2.4	1.7
20	8.6	6.0	6.5	2.7	1.5
21	6.6	6.3	6.0	3.2	1.7
22	6.8	6.1	6.0	4.9	3.1
23	8.6	7.8	8.6	5.1	4.0
24	10.2	10.2	8.8	6.3	4.3
25	15.5	12.3	9.1	7.1	5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	12.00	13.00	15.00	18.00	20.00
1	4.3	3.8	2.7	2.1	1.0
2	4.3	3.8	2.5	1.9	0.9
3	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2
4	0.8	0.8	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	0.8
9	2.5	2.1	1.5	0.7	0.6
10	1.8	1.9	1.3	0.8	0.6
11	1.7	1.8	1.0	0.6	0.6
12	2.4	1.7	1.4	0.9	0.6
13	2.0	1.6	1.7	1.2	0.6
14	2.2	1.9	1.7	0.3	0.5
15	2.3	2.4	1.5	0.4	0.3
16	1.8	1.9	1.3	0.4	0.2
17	1.7	1.5	1.4	0.6	0.8
18	1.2	1.5	0.9	0.9	0.5
19	1.6	1.3	0.8	0.8	0.4
20	2.5	2.2	1.5	1.4	0.6
21	3.8	2.9	1.6	2.2	0.6
22	3.2	3.3	2.5	2.1	0.9
23	3.1	3.4	2.9	2.3	1.1
24	3.9	3.7	3.2	2.4	1.3
25	4.1	3.9	3.6	2.9	1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มหน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
1	16.3	14.6	11.2	10.8	5.1
2	13.5	12.2	9.3	8.4	5.3
3	6.7	7.0	6.4	4.3	4.2
4	-	-	-	-	1.9
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	7.1	5.8	-	3.7	3.6
9	6.1	6.2	4.3	4.9	4.3
10	9.2	7.6	5.9	3.2	4.0
11	8.9	6.7	5.3	4.5	4.3
12	9.0	8.8	7.4	5.6	6.4
13	14.4	10.8	10.8	9.8	9.3
14	12.8	13.3	11.9	9.0	9.2
15	10.5	11.1	9.2	10.3	7.3
16	9.3	9.7	8.8	6.6	5.8
17	9.2	8.9	8.5	5.4	5.3
18	8.6	7.3	8.2	4.5	5.2
19	9.7	8.2	7.3	3.4	4.9
20	8.1	9.3	7.8	5.5	5.5
21	9.4	9.6	7.2	6.6	5.7
22	10.2	8.8	8.6	7.5	6.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
1	7.0	5.4	5.7	4.0	4.7
2	5.8	5.3	5.2	3.1	4.2
3	2.5	3.1	2.4	-	2.1
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	2.1	3.7	-	-	-
9	1.8	4.3	3.1	3.2	3.3
10	3.2	4.0	3.4	4.0	3.1
11	2.3	3.2	3.2	3.5	3.6
12	4.5	3.6	3.9	5.4	3.6
13	7.1	6.2	5.3	5.3	3.8
14	5.7	6.5	5.8	5.2	4.2
15	6.5	5.8	5.1	5.3	4.6
16	4.8	4.5	4.2	4.8	4.2
17	5.5	4.6	3.1	4.5	4.1
18	4.3	3.3	3.3	3.2	3.3
19	3.6	4.1	2.6	2.5	3.1
20	3.2	3.6	3.5	2.1	2.5
21	3.2	3.2	3.7	3.1	2.4
22	3.6	3.7	3.4	3.5	2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองหน่วยงานโรงพยาบาล บิดินครินทร์ ถนน อ่อนนุช

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.)	1.50		2.00		3.00	
	กต	ถอน	กต	ถอน	กต	ถอน
	peak partictc velocity (mm/s)					
1	15.8	0.4	21.9	0.4	16.8	0.3
2	22.1	0.4	18.6	0.4	3.9	0.3
3	14.6	0.4	8.4	0.4	8.4	0.3
4	8.8	0.4	7.5	0.4	7.4	0.3
5	7.0	0.4	8.1	0.4	6.8	0.3
6	5.7	0.7	6.7	0.4	4.6	0.3
7	4.8	0.4	5.1	0.4	4.7	0.3
8	6.3	0.4	4.3	0.4	4.6	0.3
9	7.9	0.4	6.1	0.4	6.3	0.3
10	7.8	0.4	6.3	0.6	6.8	0.3
11	6.2	0.4	6.5	0.4	6.1	0.3
12	6.3	0.4	5.9	0.4	6.0	0.3
13	5.4	2.0	5.4	1.7	5.2	1.2
14	3.5	1.7	3.2	2.1	4.0	1.9
15	3.4	3.4	3.5	3.5	3.1	3.0
16	4.0	6.6	3.8	3.4	3.3	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ต่อ

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.) ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)				
	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
1	14.2	10.4	7.2	6.2	5.1
2	14.8	11.5	4.1	2.4	5.3
3	10.1	7.7	3.2	2.3	1.6
4	9.3	7.1	3.5	2.3	1.7
5	5.6	5.2	3.2	2.1	1.2
6	7.1	5.1	3.2	1.8	1.4
7	4.6	5.3	3.3	1.6	1.1
8	3.6	4.5	3.3	1.7	1.1
9	4.1	3.2	2.8	1.7	1.0
10	4.3	3.1	3.4	1.6	0.8
11	5.1	3.5	4.3	0.9	0.8
12	5.8	3.9	3.6	2.2	0.8
13	4.3	3.2	1.9	1.9	1.3
14	3.1	2.8	2.8	1.7	1.1
15	3.2	2.7	1.6	1.5	0.9
16	2.9	2.7	1.7	1.6	1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองหน่วยงานบ้านพักอาศัย 2 ชั้น พหุโชน 50 ซอยเมตตา 3

ระยะจากศูนย์กลางเข็ม (ม.)	1.35		4.55		8.55	
	I-22	I-26	I-22	I-26	I-22	I-26
ขนาดเสาเข็ม (ซม.)						
ความลึก (ม.)	peak particle velocity (mm/s)					
1	3.6	3.3	2.5	2.8	1.6	2.1
2	1.2	1.6	1.3	0.8	0.7	1.2
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	2.0	2.3	2.7	2.8	1.0	0.8
9	2.6	2.7	2.5	2.3	0.8	0.7
10	3.1	2.8	2.8	1.9	0.6	0.7
11	2.9	2.7	1.9	1.8	1.2	1.1
12	2.6	2.5	1.5	1.6	1.4	1.3
13	3.1	3.2	1.9	1.8	1.1	1.1
14	3.4	3.3	2.3	2.5	1.2	1.1
15	4.6	5.1	3.4	3.3	1.5	1.5
16	7.0	6.3	3.4	3.1	1.6	1.7
17	6.7	6.7	3.6	4.8	2.7	2.5
18	6.7	7.1	5.9	5.6	3.0	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างจากศูนย์กลางเข็ม (ม.)	Max Peak particle Velocity (mm/s)
1.0	20.2
1.2	18.5
1.5	20.1
2.0	16.8
3.0	11.3
3.5	10.9
4.0	9.8
5.0	8.0
6.0	6.1
7.0	4.8
8.0	4.1
9.0	3.9
9.2	3.7
13.0	3.5
15.0	3.1
17.0	2.2
18.0	1.9
20.0	1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางค่าที่ระยะ 1.5 เมตร มีค่ามากกว่าที่ระยะ 1.2 เมตร อาจเกิดจากการผิดพลาดขณะทดลอง เนื่องจากอาจมีแรงสั่นสะเทือนรอบข้างจากสิ่งอื่น เช่น คนงานเดินผ่าน หรือมีรถบรรทุกวิ่งผ่านถนนหน้าไซต์งานและก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือน

จากค่าในตาราง 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกับ Dutch Cur-57 recommendation ดังตารางที่ 2.2 ค่า peak particle velocity ไม่ควรเกิน 4.5 มม/วินาที ในบริเวณตอกเข็มสร้างอาคารมีอาคารข้างเคียงเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนเหล็กโดยมีระยะห่างจากเสาเข็มต้นใกล้อาคารที่สุดถึงอาคารข้างเคียงเป็นระยะ 9.2 เมตรซึ่งเกิดค่า maxparticle velocity 3.7 mm/s ดังนั้นการตอกเข็มในไซต์นี้จึงไม่เป็นอันตรายต่ออาคารข้างเคียงเมื่อเทียบกับ Dutch Cur-57 recommendation

จาก DIN Standard ตารางที่ 2.3 กำหนดค่า Peak Particle Velocity ไว้ไม่เกิน 10 มม/วินาที เมื่อเทียบกับ Dutch Cur-57 แล้วจะเห็นว่า Dutch Cur-57 เป็นมาตรฐานที่เพื่อความปลอดภัยไว้สูงที่สุดมาก ดังนั้นเมื่อใช้ DIN Standard จะเห็นว่า ไซต์นี้สามารถตอกเข็มใกล้กับอาคารข้างเคียงแล้วไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่ออาคารได้ที่ระยะห่าง 4 เมตร ซึ่งสามารถตอกเข็มได้ใกล้กว่าใช้มาตรฐาน Dutch Cur-57 มาก เมื่อเทียบกับมาตรฐานของ Whiffin & Leonard ดังตารางที่ 2.1 peak particle velocity ไม่อนุญาตให้เกิน 5 มม/วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับ Dutch Cur-57 ดังนั้นอาคารข้างเคียงซึ่งอยู่ที่ระยะ 9.2 เมตรจะไม่เกิดความเสียหาย และสามารถตอกที่ระยะห่างจากอาคารข้างเคียงและไม่เกิดความเสียหายที่ระยะ 6 เมตร

วิเคราะห์หน่วยงานสำนักหอสมุดกลางพระจอมเกล้า

ตารางแสดงค่า peak particle velocity สูงสุดที่ระยะจากเข็มต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างจากเข็ม (เมตร)	Max peak particle velocity (mm/s)
1.0	31.6
1.5	25.0
2.0	26.2
2.5	29.3
3.0	16.9
4.0	15.5
5.0	12.3
6.0	9.1
9.0	7.1
11.0	5.5
12.0	4.3
13.0	3.9
15.0	3.6
18.0	2.9
20.0	1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยงานหอสมุดกลางเป็นพื้นที่โล่งไม่มีอาคารข้างเคียงดังนั้นการตอกเข็มจึงทำได้โดยสะดวก แต่ถ้าสมมุติให้มีอาคารข้างเคียงอยู่ จะสามารถตอกเข็มที่ระยะห่างจากอาคารข้างเคียงใกล้สุดระยะ 12 เมตร สำหรับ Dutch Cur-57 recommendation และสำหรับ DIN standard สามารถตอกเข็มห่างจากอาคารข้างเคียงได้ใกล้สุดที่ระยะ 6 เมตร และสำหรับมาตรฐานของ Whiffin & Leonard สามารถตอกเข็มห่างจากอาคารที่ระยะปลอดภัยคือ 12 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับใช้ Dutch Cur-57

วิเคราะห์หน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์

ค่า max particle velocity ที่ระยะต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดง max particle velocity ที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างจากเข็ม (เมตร)	Max peak particle velocity (mm/s)
1.0	16.3
2.0	14.6
3.0	11.9
4.0	10.8
5.0	9.3
6.0	7.1
7.0	6.5
8.0	5.8
9.0	5.4
10.0	4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหน่วยงานนี้สามารถดกเข้มห่างจากอาคารข้างเคียงได้โดยปลอดภัยที่ระยะมากกว่า 10 เมตรขึ้นไป สำหรับ Dutch Cur-57 recommendation

สำหรับ DIN standard ต้องดกเข้มที่ระยะตั้งแต่ 4 เมตรขึ้นไป อาคารข้างเคียงจึงปลอดภัย

สำหรับ Whiffin and Leonard ต้องดกเข้มที่ระยะห่างจากอาคารข้างเคียงตั้งแต่ 9 เมตรขึ้นไป อาคารข้างเคียงจึงปลอดภัย

(4.3) ศึกษาเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะ

หน่วยงานที่ทำการทดลอง 1. โรงพยาบาลปิโตรเคมีภัณฑ์ซึ่งใช้เข็มเจาะขนาดใหญ่ เปรียบเทียบกับ หน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์ซึ่งใช้เข็มตอก ทั้ง 2 หน่วยงานอยู่ในบริเวณเดียวกัน ดังนั้น soil profile สำหรับหน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์จึงใช้ soil profile ของโรงพยาบาลปิโตรเคมีภัณฑ์ซึ่งมีการขุดเจาะสำรวจดิน

ผลการทดลอง 1. โรงพยาบาลปิโตรเคมีภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4.4

2. หน่วยงานของเจริญคอมเพล็กซ์ แสดงดังตารางที่ 4.3

3. กราฟแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ

เปรียบเทียบระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะ
ที่ระยะจากศูนย์กลางเข็มระยะต่างๆ กราฟ
ที่ 4.24-4.30

วิเคราะห์ผล

particle velocity สำหรับเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่ระดับความลึกต่างๆ จะมีค่ามากในช่วง 1-2 เมตรแรก เนื่องมาจากการทำงานของ ไวโบรมอเตอร์ ในช่วงแรกจะสั่นมากจึงทำให้ peak particle velocity สูงในช่วงแรก แต่เมื่อ ไวโบรมอเตอร์ทำงานได้สักระยะหนึ่งก็จะสั่นเป็นปกติ ค่า particle velocity จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อปลอกเหล็กถูกกดจมลงไป แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมากในช่วงแรกจะเกิดขึ้นไม่นานมากจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่ออาคารข้างเคียง

เมื่อเปรียบเทียบ particle velocity ระหว่างเข็มเจาะและเข็มตอกแล้ว จะเห็นว่า particle velocity ของเข็มเจาะจะไม่ขึ้นอยู่กัลักษณะของชั้นดินมากนัก ขณะที่ particle velocity ของเข็มตอกจะมีลักษณะขึ้นๆลงๆตามแต่สภาพชั้นดินที่เข็มเจาะผ่านลงไป โดยมี max particle velocity อยู่

ที่ประมาณชั้น stiff clay ระดับความลึกประมาณ 12-15 เมตร

(4.4) ศึกษาหน้าตัดเข้มต่อแรงสั่นสะเทือน

หน่วยงานที่ทำการทดลอง 1. ไซท์บ้านพักอาศัย 2 ชั้น พหลโยธิน 50 ซอยเมตตา

3

ผลการทดลอง

1. ตารางที่ 4.5 แสดงแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆของเข้ม I-22 และ I-26 ที่ระยะต่างๆ
2. กราฟที่ 4.31-4.33 แสดงแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆของเข้ม I-22 และ I-26 ที่ระยะต่างๆ

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟที่ 4.31-4.33 จะเห็นว่าค่า particle velocity มีค่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากเป็นหน้าตัดขนาดใกล้เคียงกันจึงใช้ดัมตอกหนักเท่ากัน ระยะยกดัมตอกขนาดเท่ากัน คือ 30 ซม. ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการตอกจึงเท่ากัน particle velocity จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

(4.5) ข้อมูลเพิ่มเติมจากบริษัท Pyramid

โครงการ Thai Central Chemical ถนนสุขสวัสดิ์ สมุทรปราการ

บริษัททำการวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยเครื่องมือ vibration monitoring โดยวัดบนพื้นดินที่ระยะ 2.3 เมตรในแนว horizontal และ vertical โดยใช้ geophone ที่มี 2 channel วัดพร้อมกัน ข้อมูลที่เก็บได้จะวัดออกมาทางจอออสซิลอสโคป ข้อมูลที่เก็บได้สามารถอ่านค่า amplitude และความถี่คลื่นได้ และนำมาหาเป็นค่า particle velocity ได้ดังตารางที่ 4.9 และเขียนกราฟ peak particle velocity และ depth ดังกราฟที่ 4.34

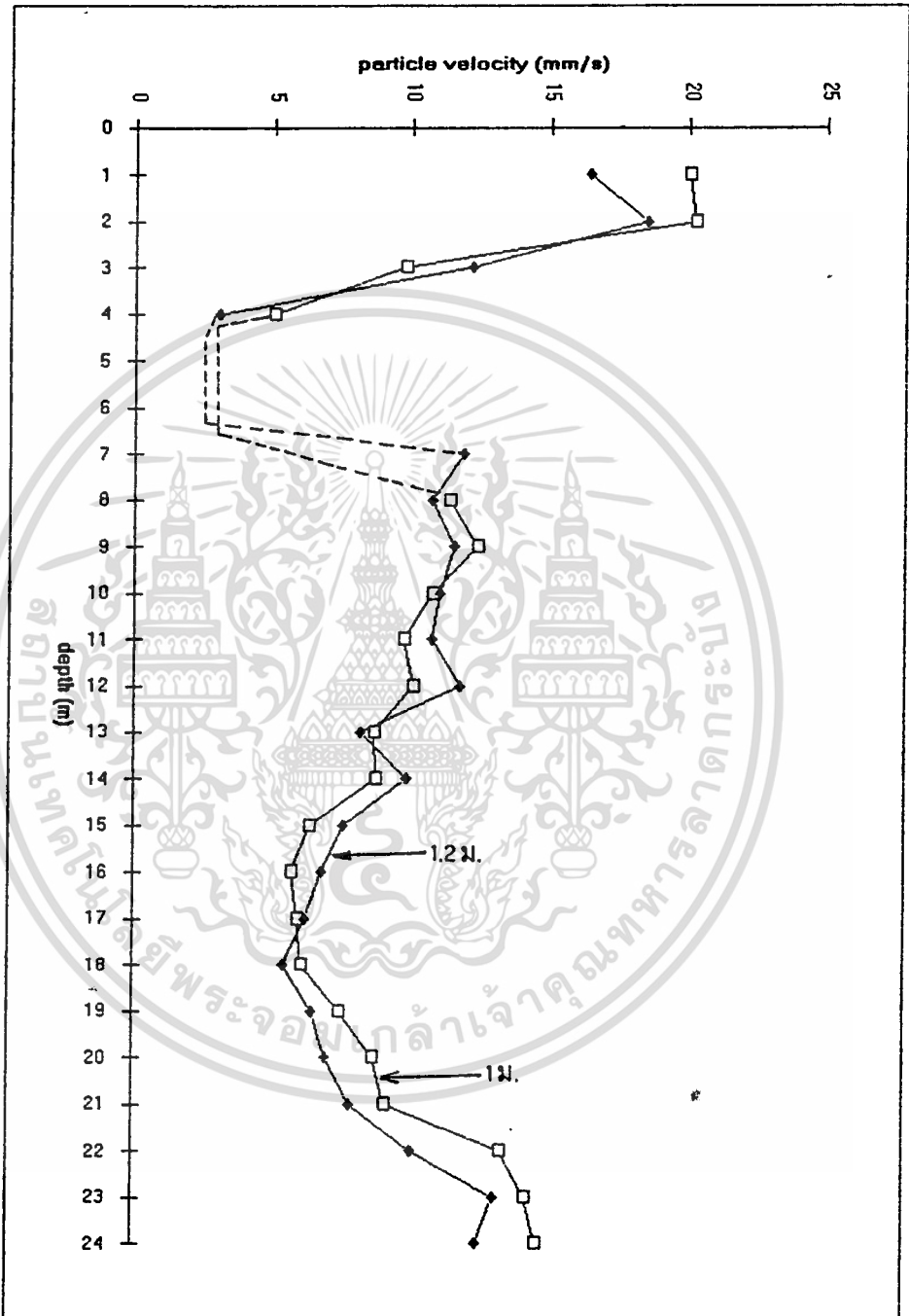
จากกราฟจะเห็นว่า max particle velocity เกิดที่ชั้นความลึก 26 เมตรมีค่า particle velocity 13.78 mm/s ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ DIN standard แล้วเกิน 10 มม/วินาที ทางบริษัท Pyramid จึงแนะนำให้บริษัทตอกเสาเข็มทำการลด drop height ลงจาก 0.5 เมตรเป็น 0.3 เมตร ซึ่งจากตาราง 4.8 จะเห็นว่า ที่ระดับความลึก 26 เมตร เมื่อใช้ drop height 0.30 เมตรจะให้ค่า particle velocity ลดลง

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า particle velocity ระยะ 2.3 ม.

Thai Central Chemical

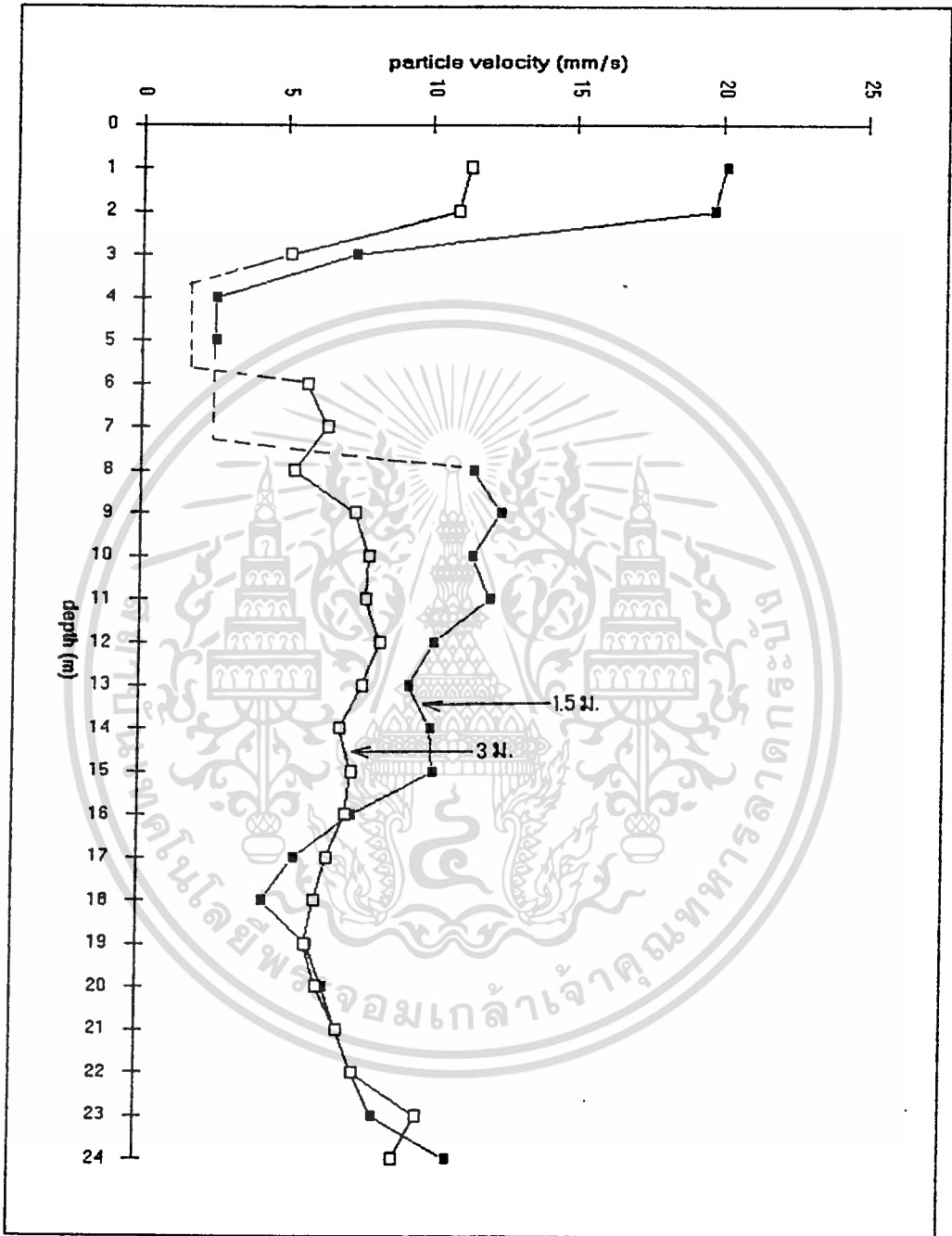
File No.	Distance (m.)	Drop Height (m.)	Penetration (m.)	Practical Velocity (mm/s)
TP # 3	2.30	0.50	15.00	2.85
		0.50	16.00	3.37
		0.50	17.00	2.93
		0.50	18.00	4.03
		0.50	19.00	3.04
		0.50	20.00	2.82
		0.50	21.00	5.19
		0.50	22.00	4.72
		0.50	23.00	8.78
		0.50	24.00	11.28
		0.50	25.00	13.01
		0.50	26.00	13.78
		0.30		10.79
		0.50	27.00	13.12
		0.50	28.00	12.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



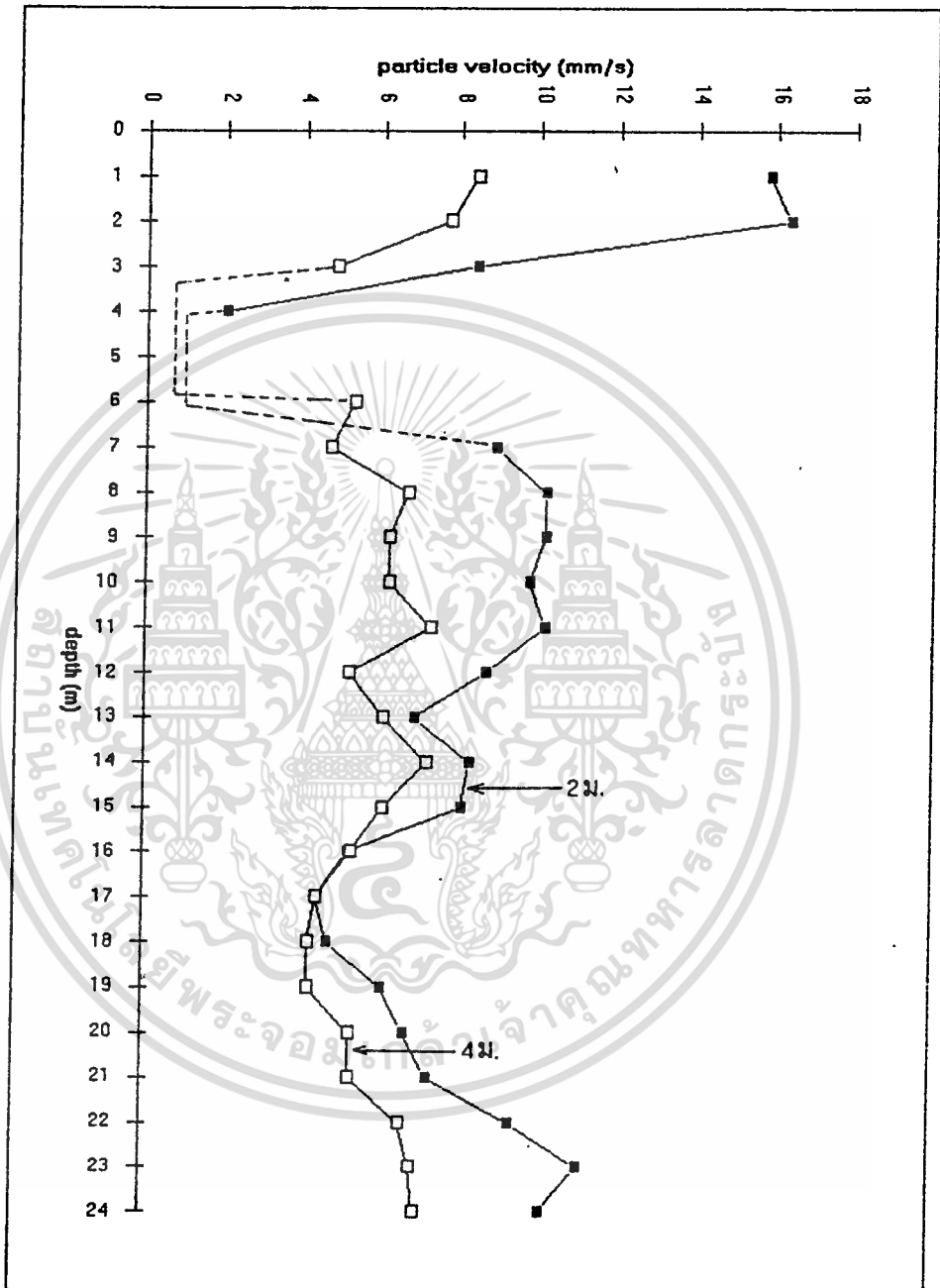
ภาพที่ 4.1 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 1 ม. และ 1.2 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



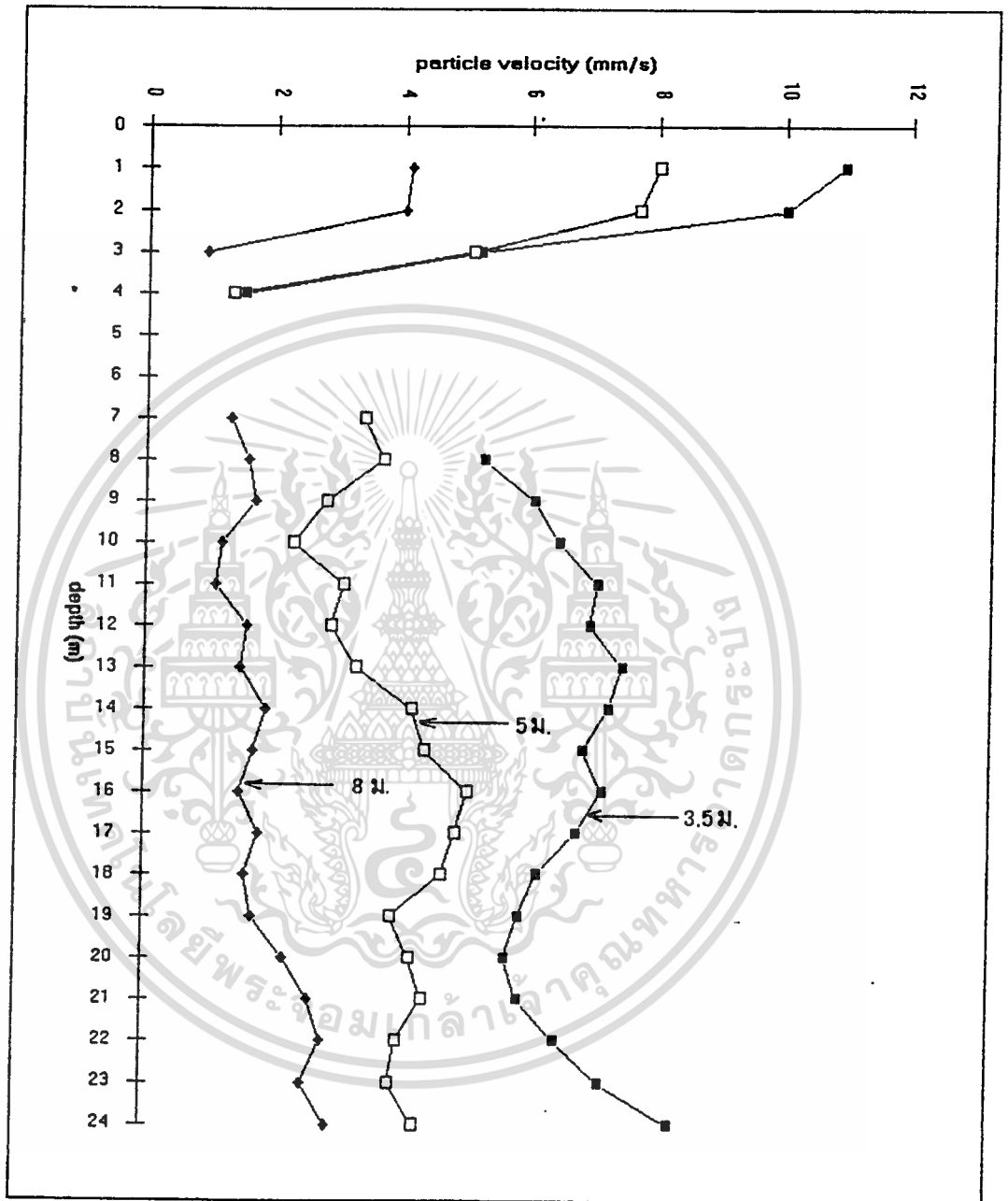
กราฟที่ 4.2 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 1.5 ม. และ 3 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



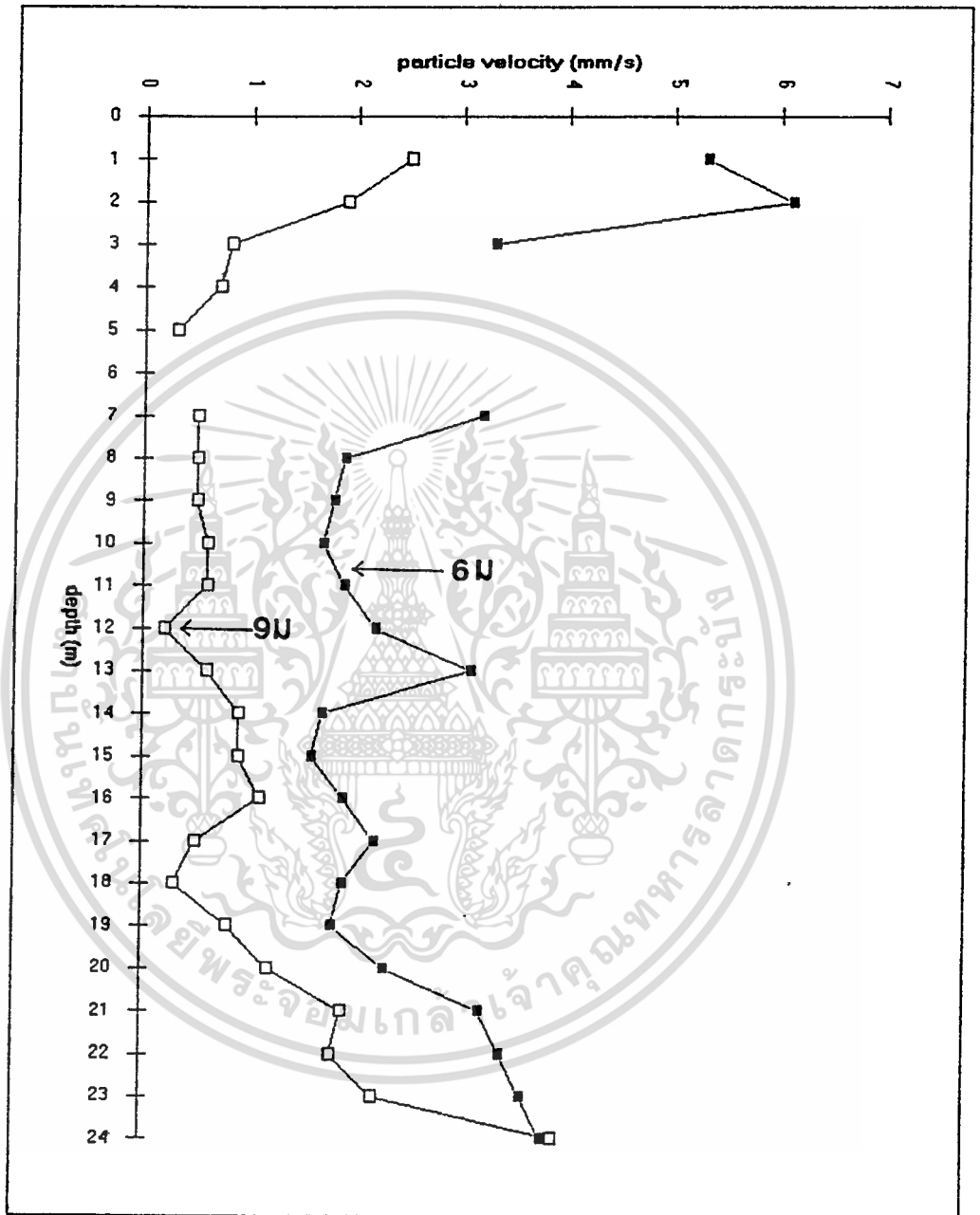
กราฟที่ 4.3 แสดงค่าแรงขึ้นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 2 ม. และ 4 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



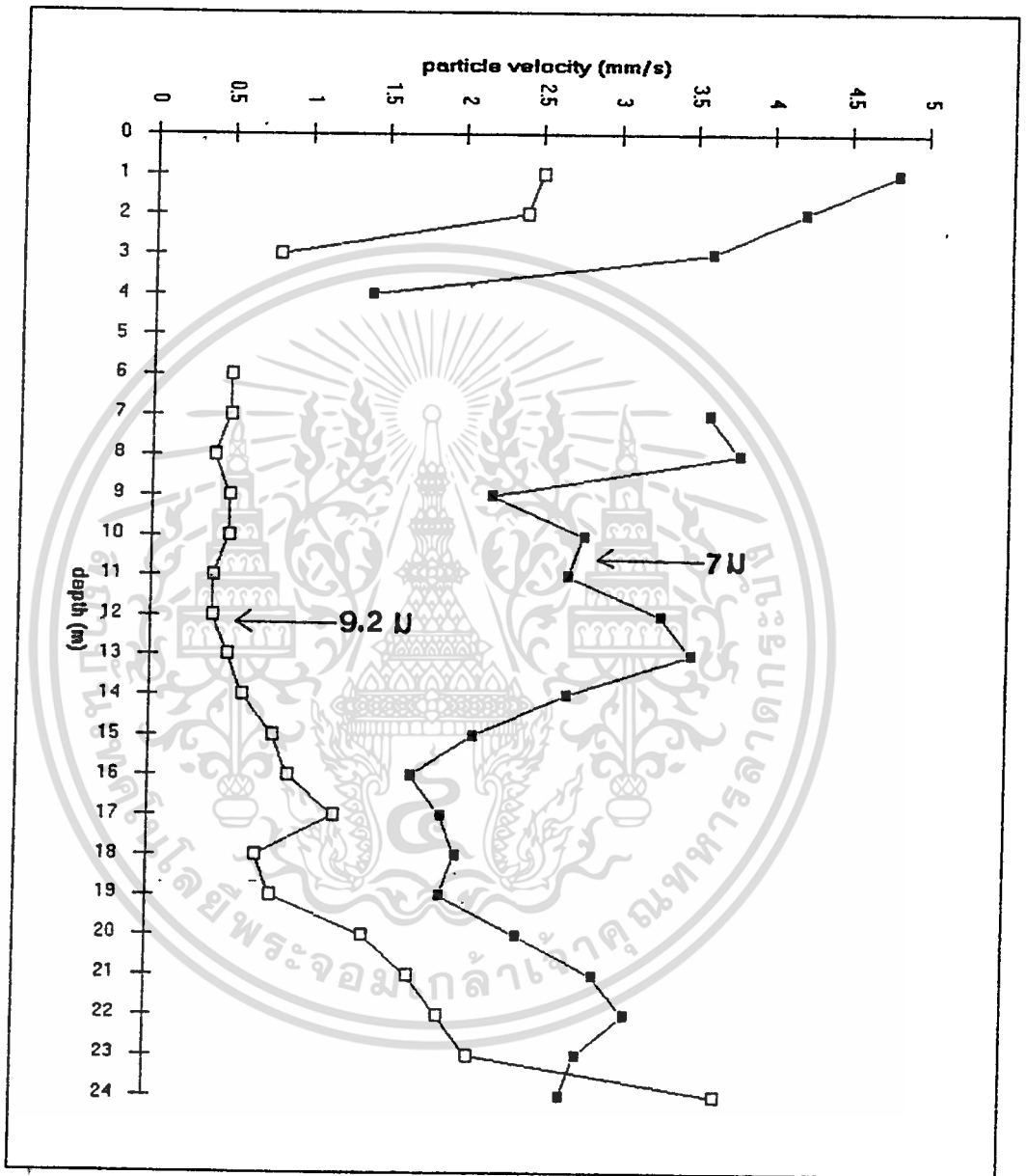
กราฟที่ 4.4 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 3.5 , 5 และ 8 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



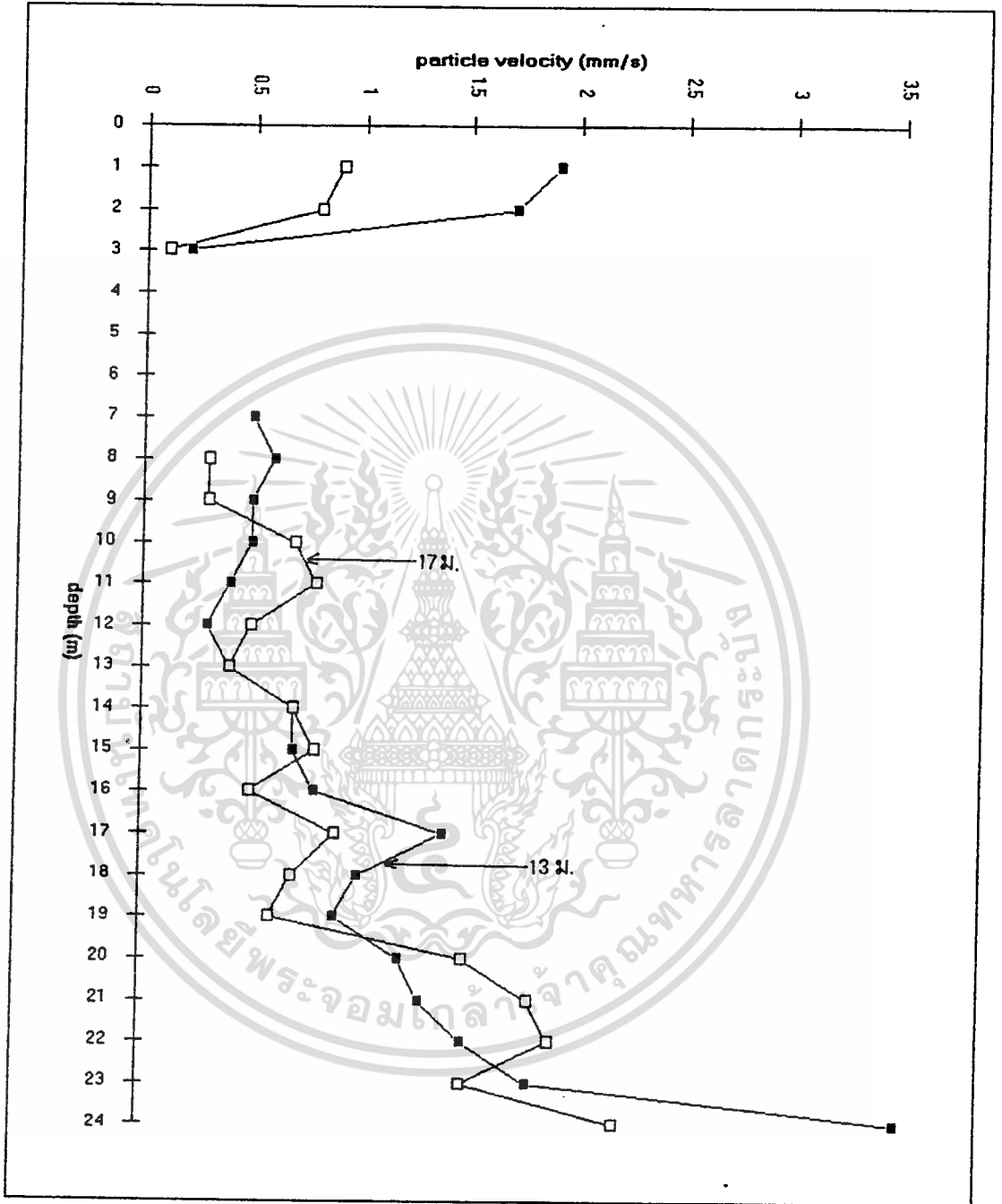
กราฟที่ 4.5 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 6 ม. และ 9 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



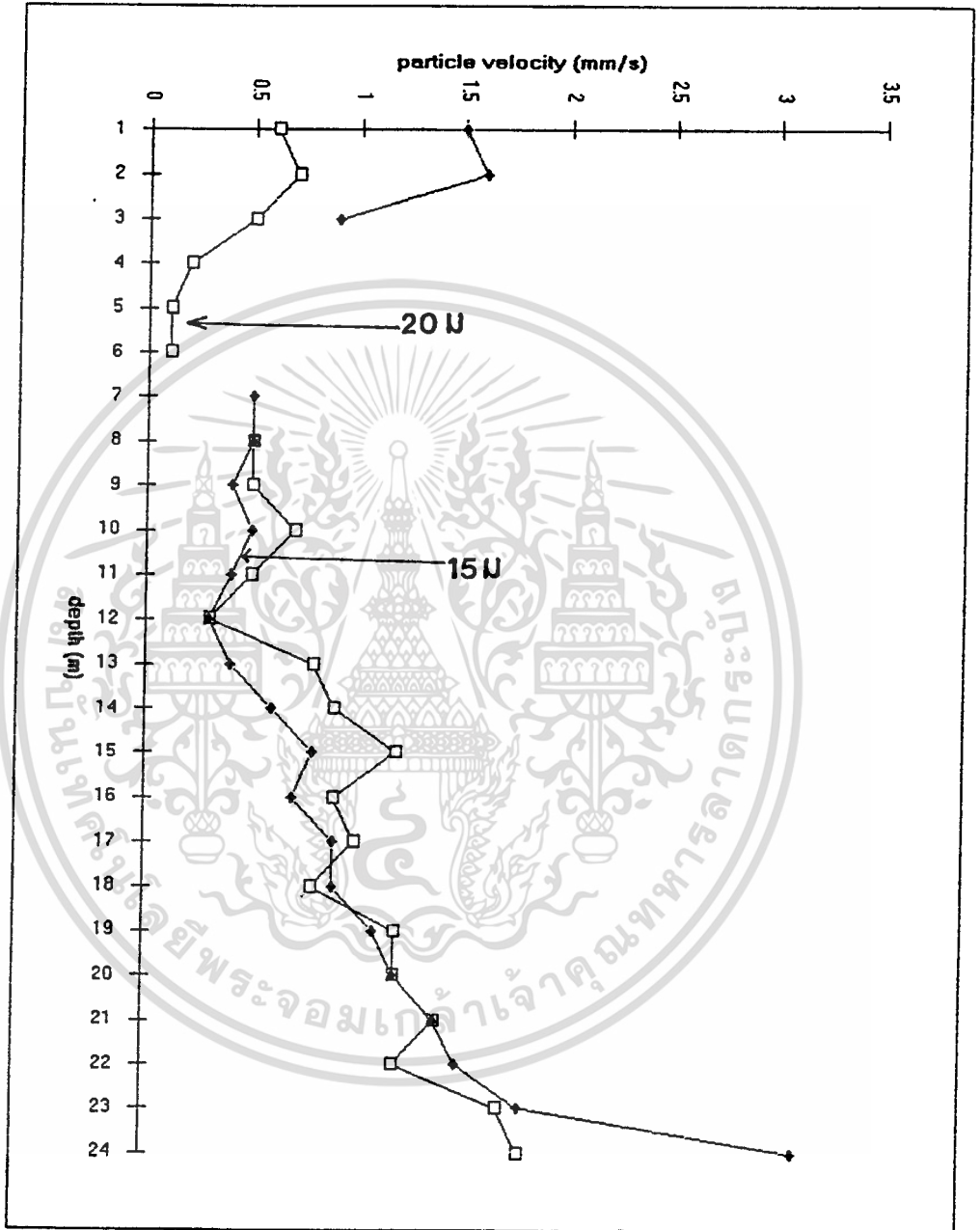
ภาพที่ 4.6 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 7 ม. และ 9.2 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



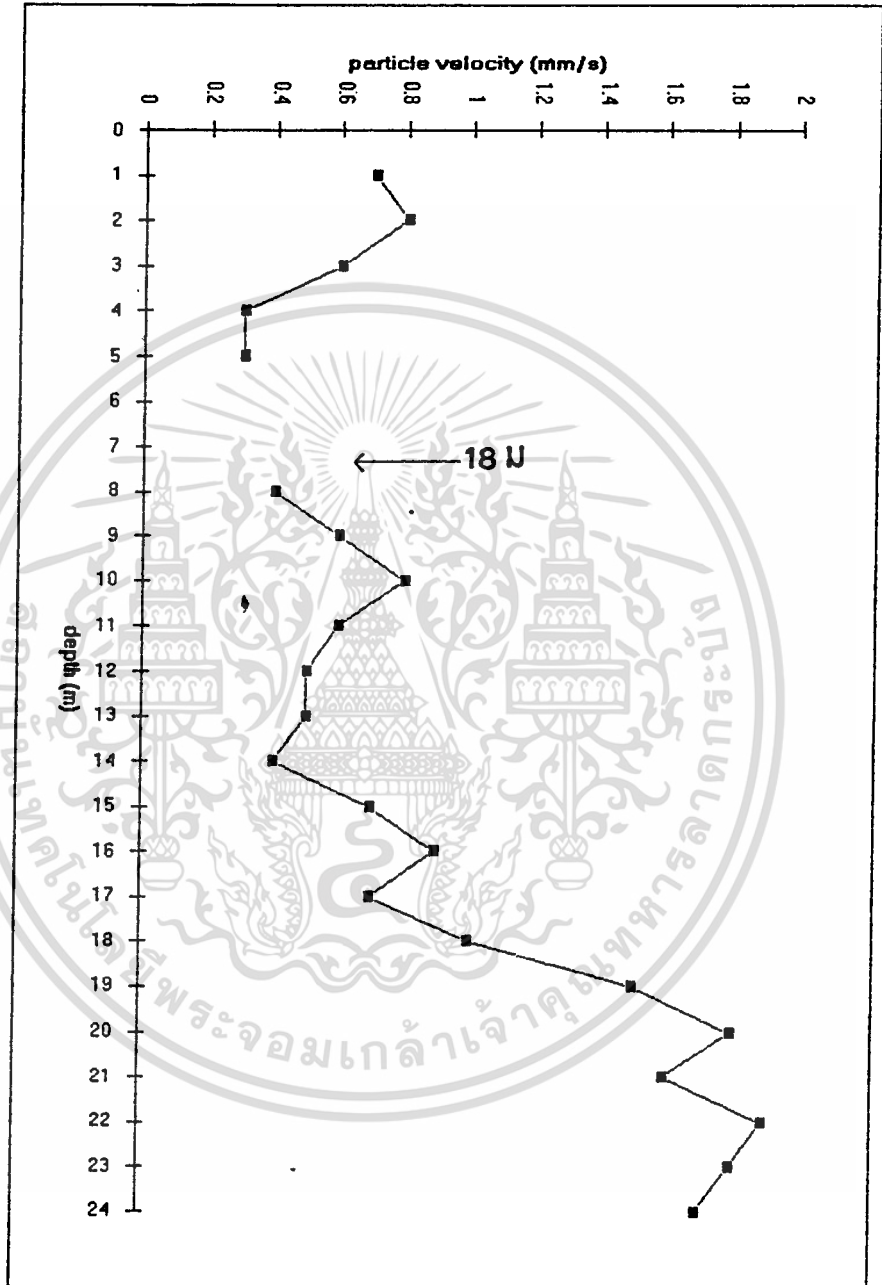
กราฟที่ 4.7 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระหว่าง 13 ม. และ 17 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



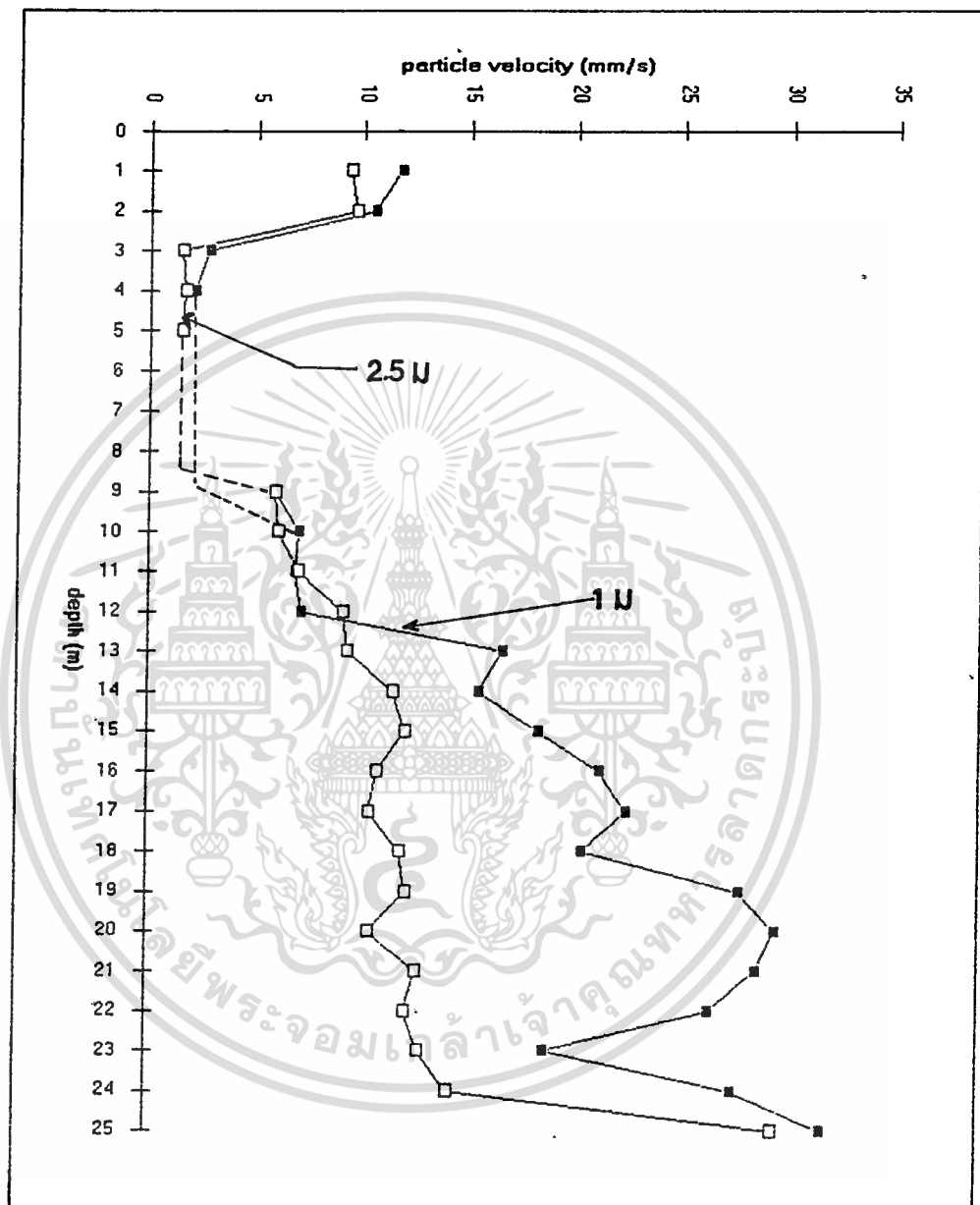
กราฟที่ 4.8 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 15 ม. และ 20 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



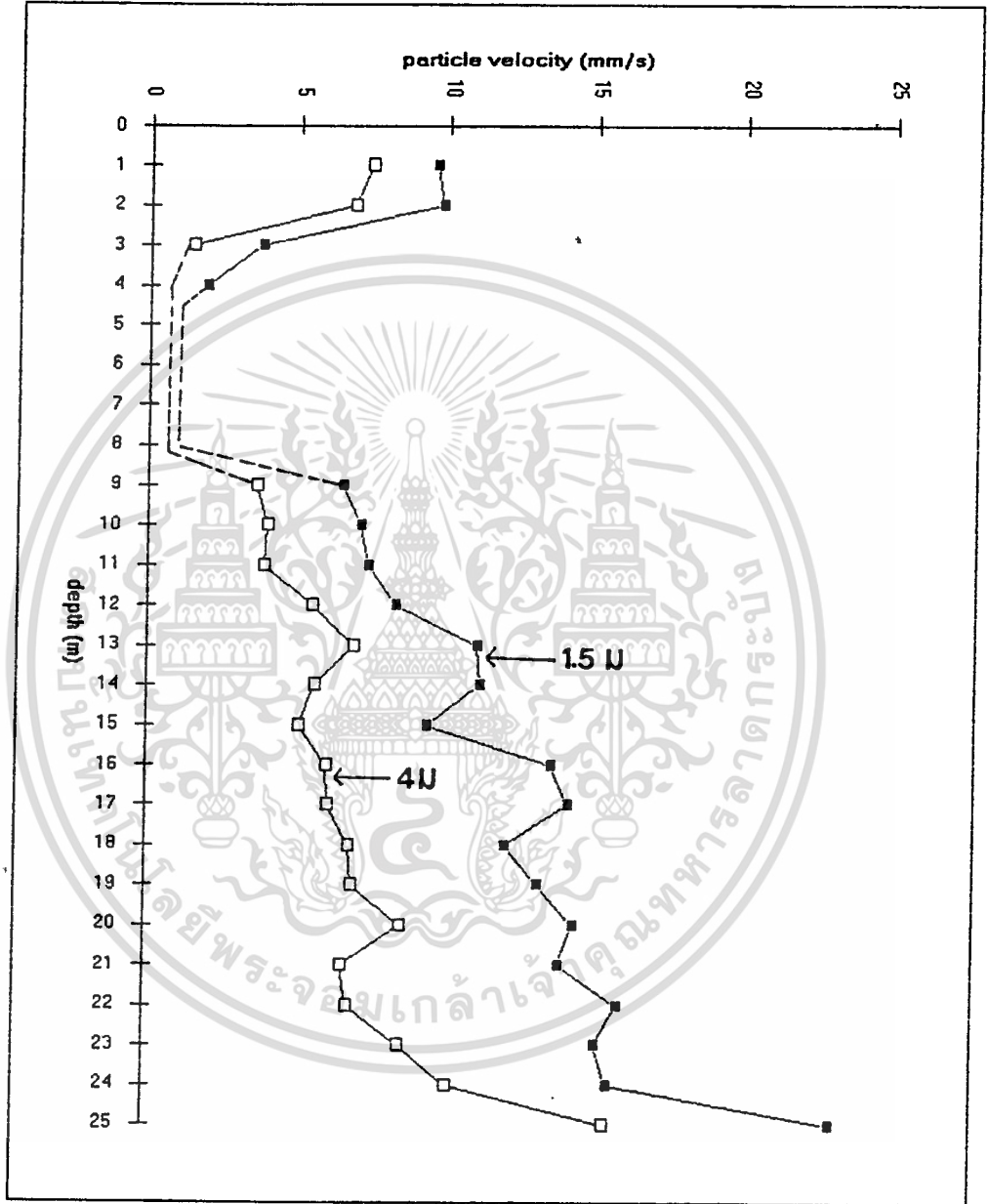
กราฟที่ 4.9 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 18 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



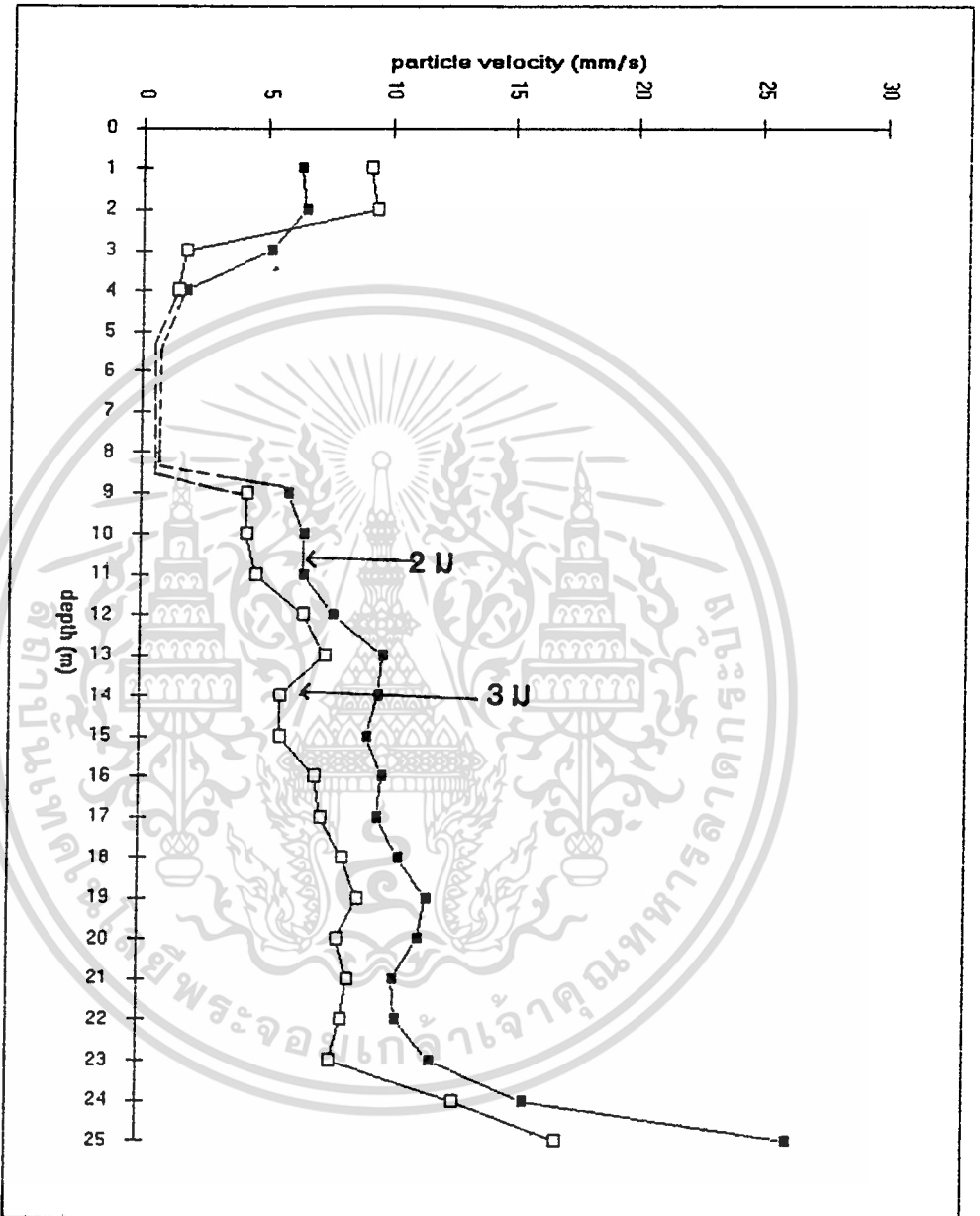
กราฟที่ 4.10 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 1 ม. และ 2.5 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



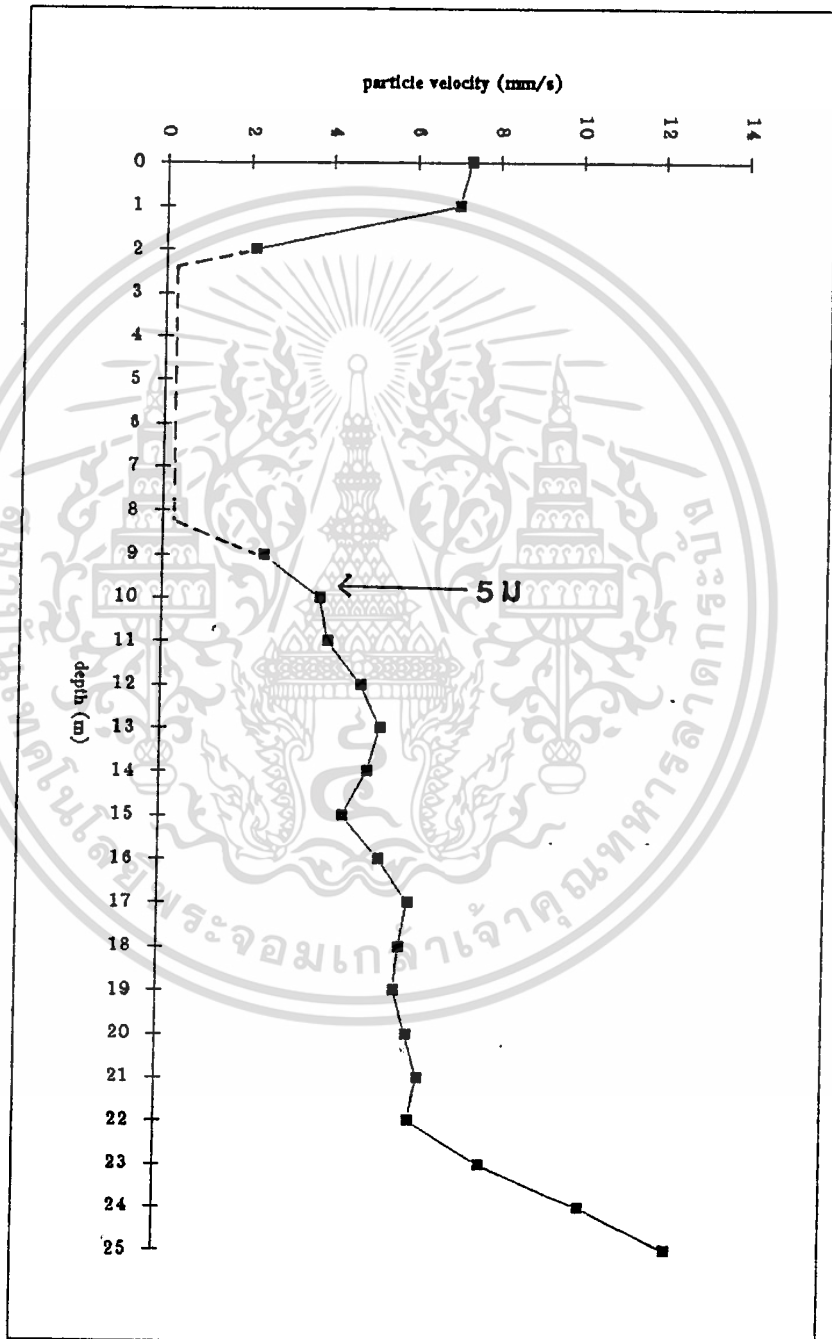
กราฟที่ 4.11 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 1.5 ม. และ 4 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



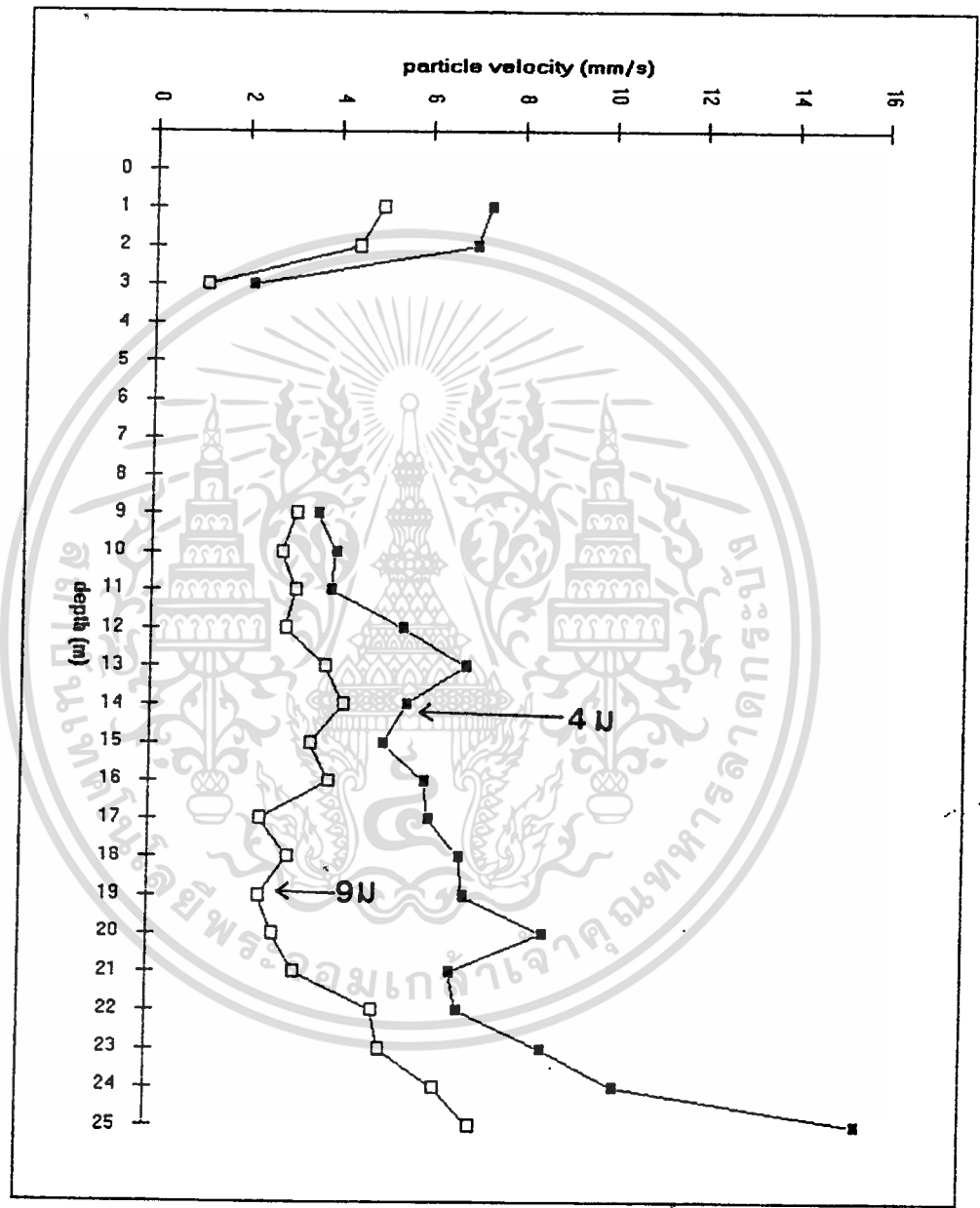
กราฟที่ 4.12 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 2 ม. และ 3 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



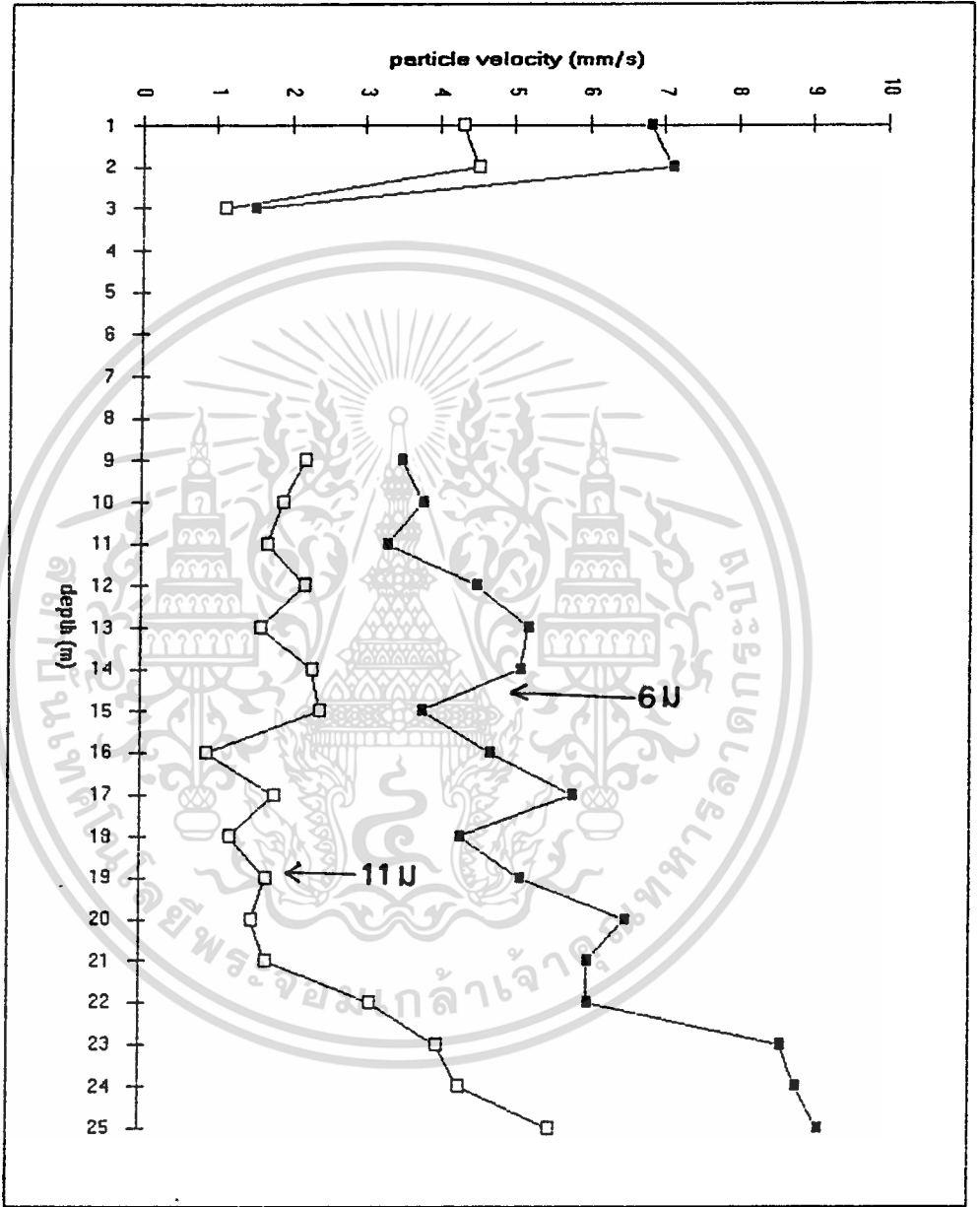
กราฟที่ 4.13 แสดงค่าแรงดันสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 5 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



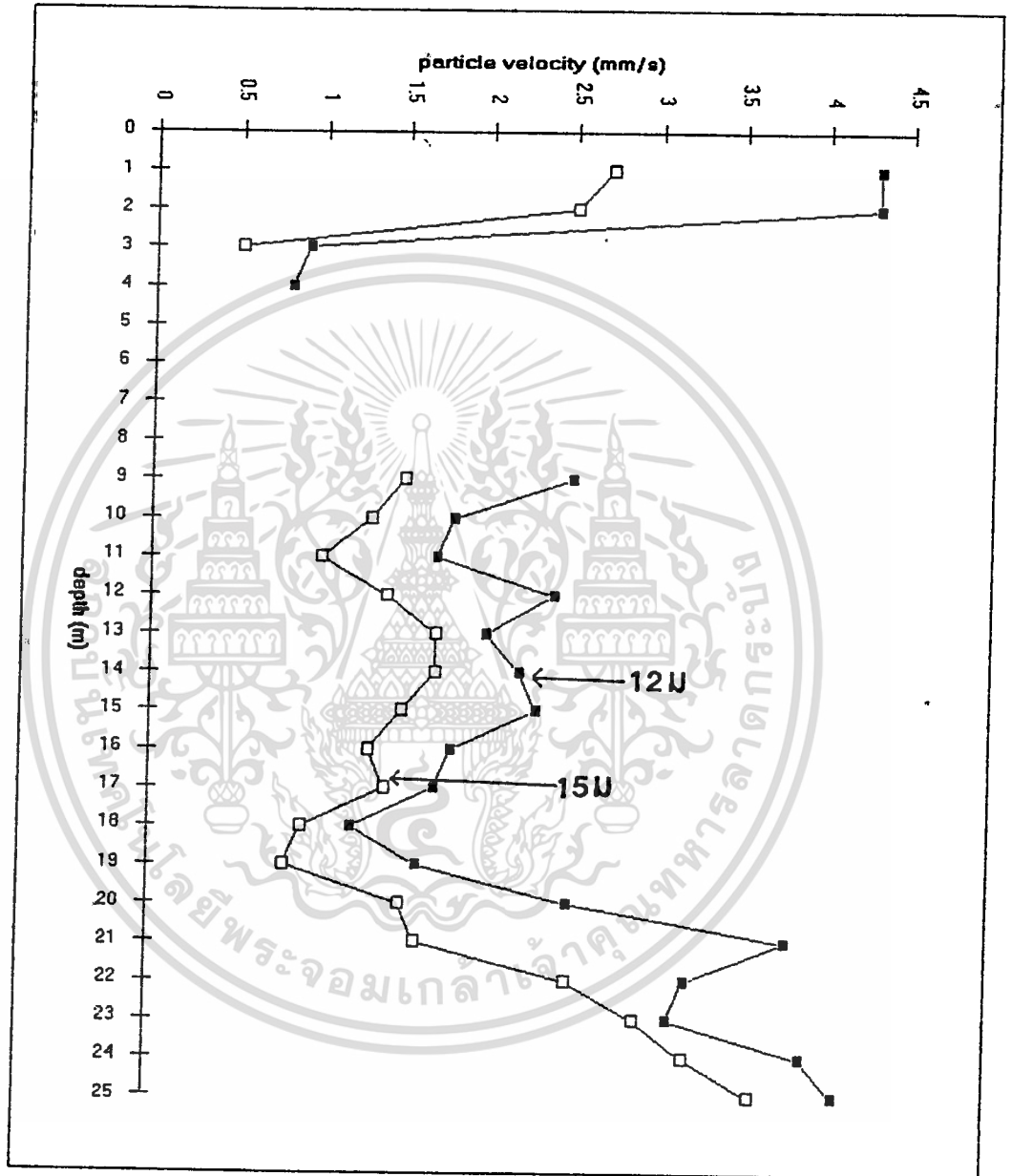
ภาพที่ 4.14 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 4 ม. และ 9 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



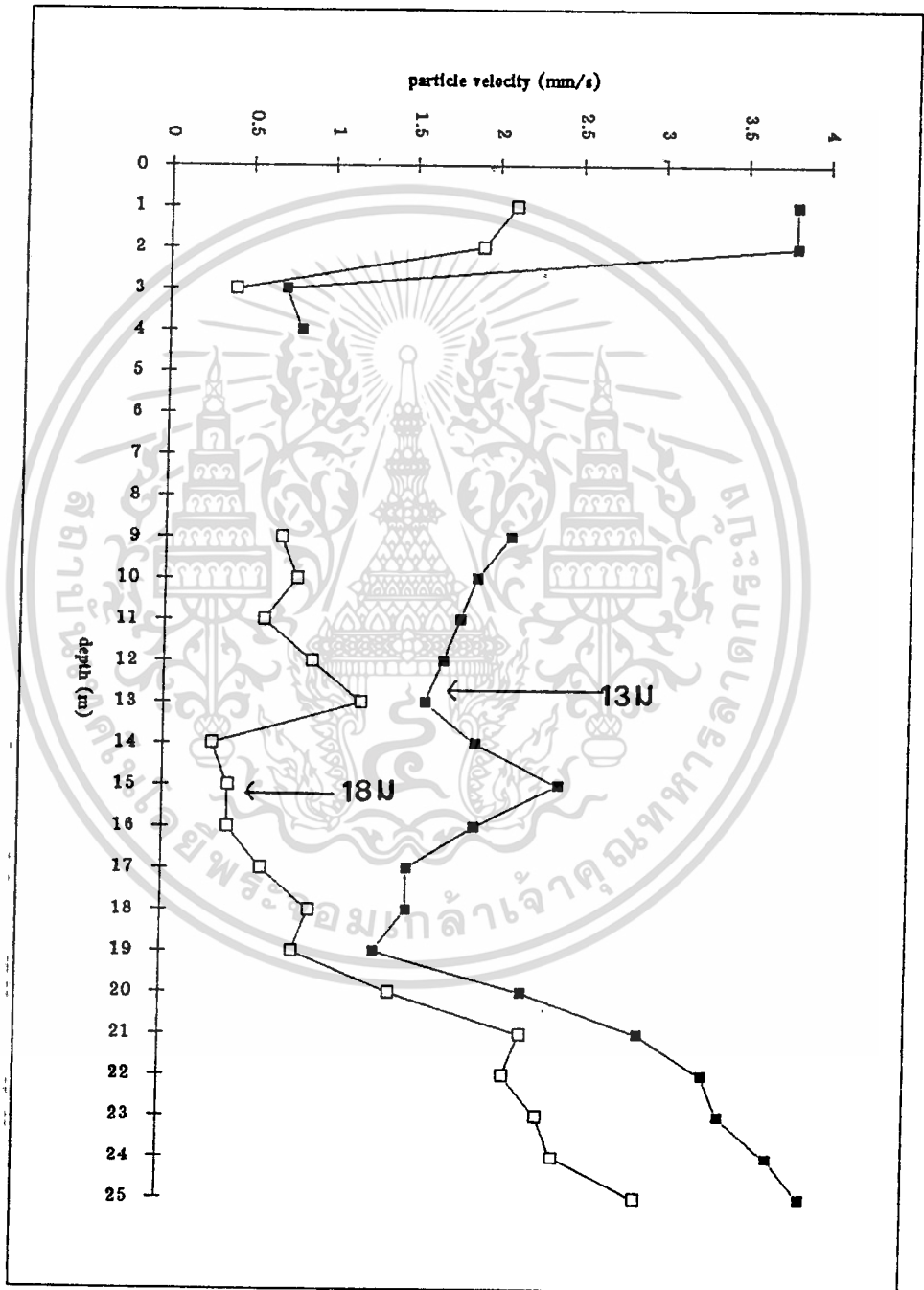
กราฟที่ 4.15 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 6 ม. และ 11 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



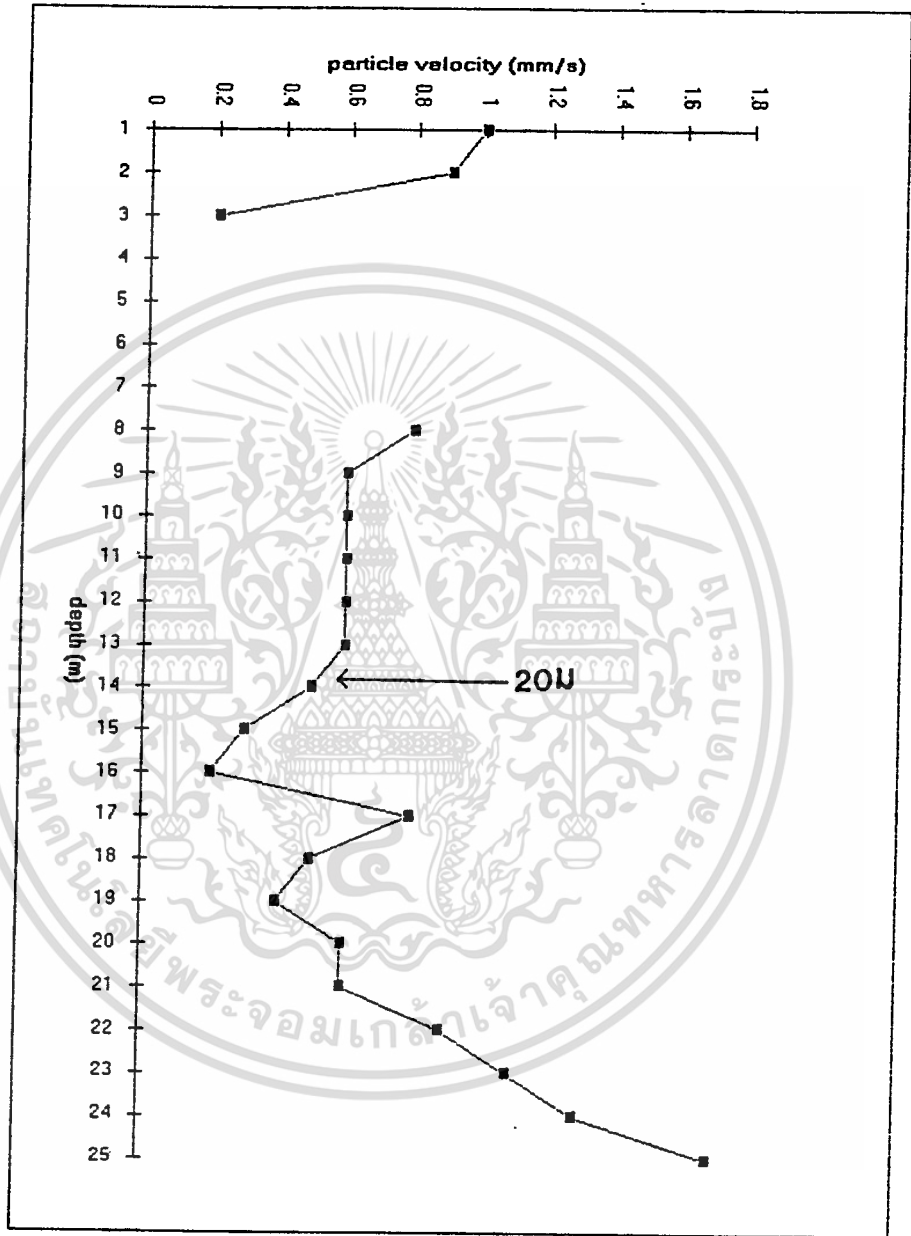
กราฟที่ 4.16 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 12 ม. และ 15 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



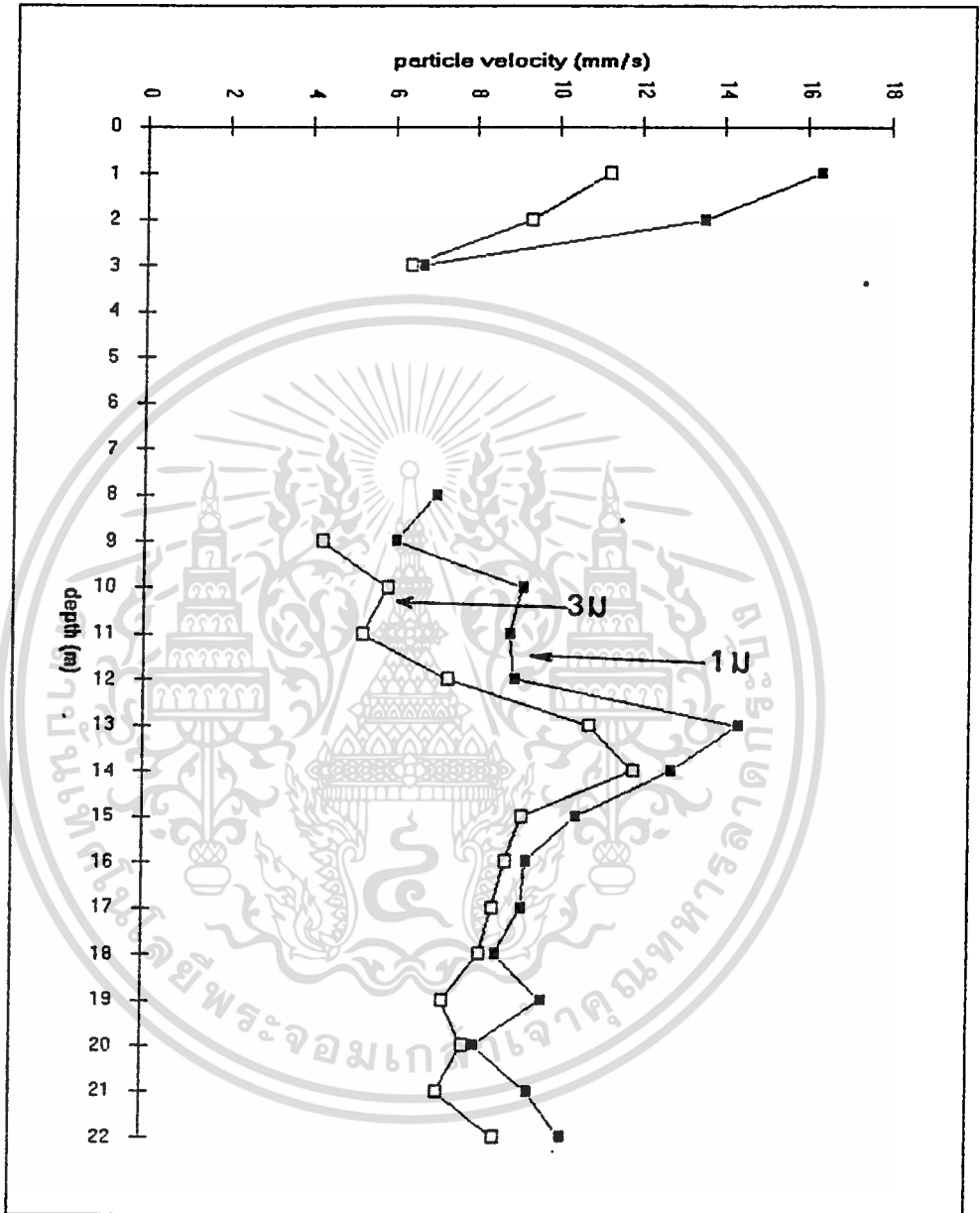
กราฟที่ 4.17 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 13 ม. และ 18 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



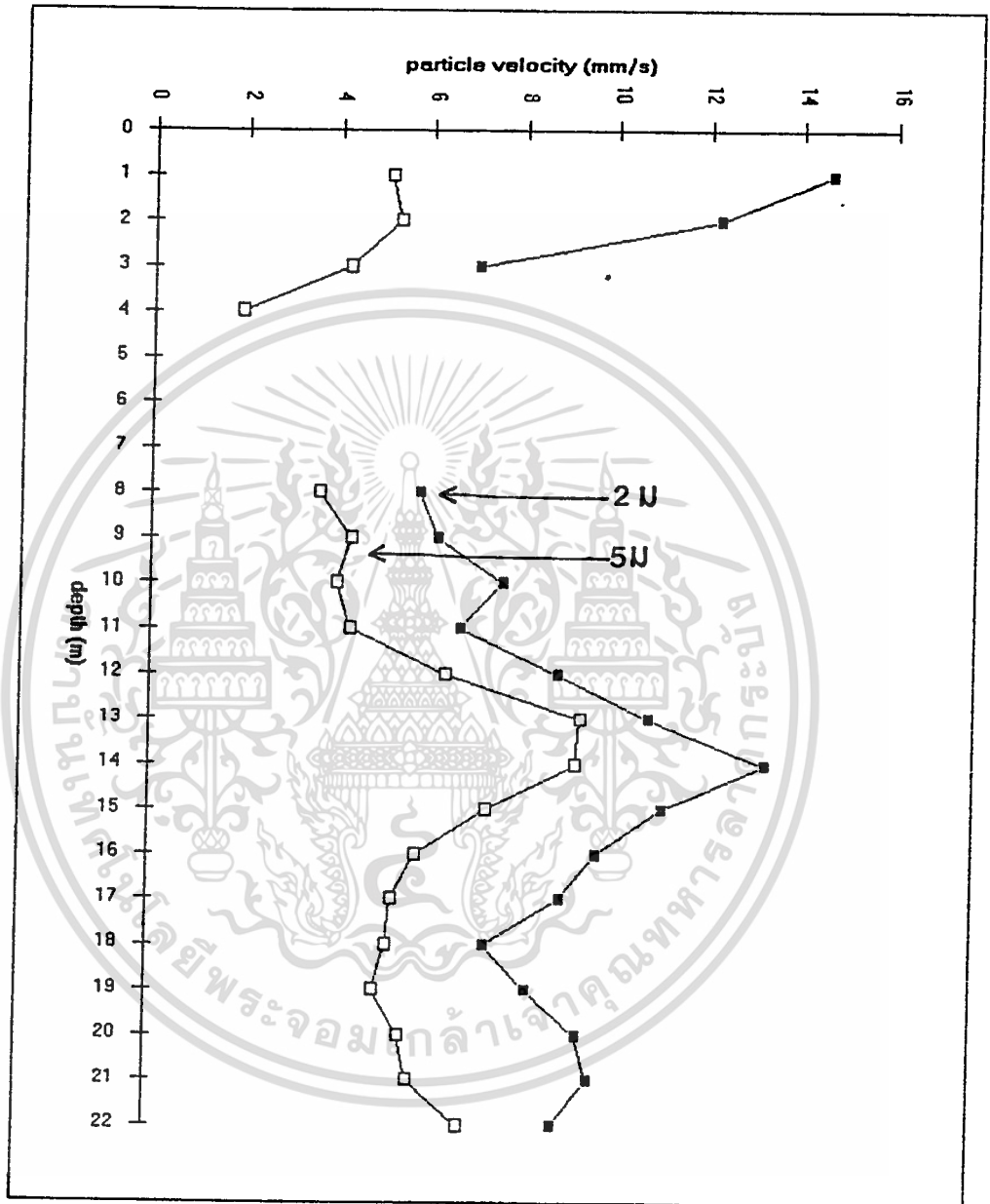
กราฟที่ 4.18 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 20 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



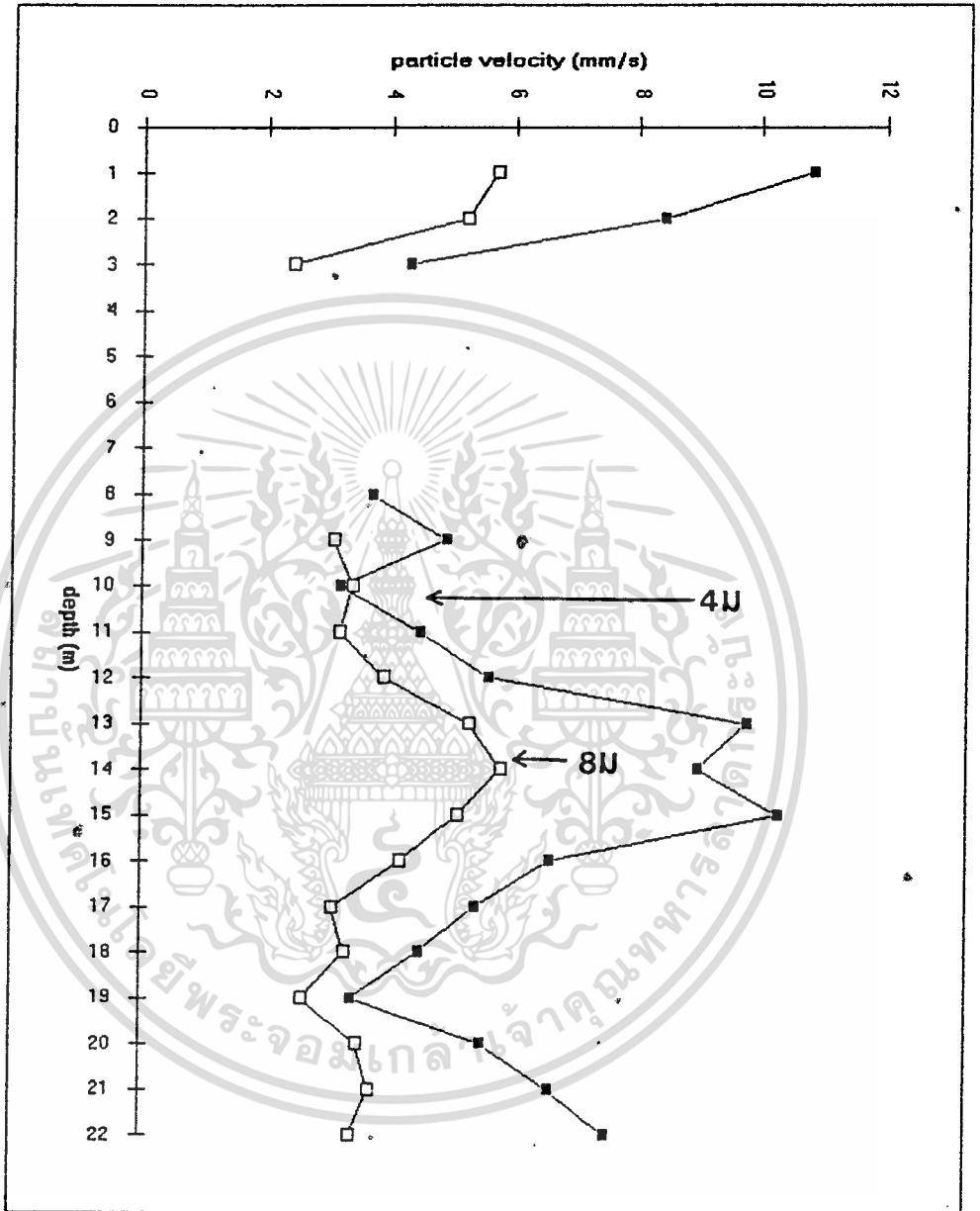
กราฟที่ 4.19 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 1 ม. และ 3 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



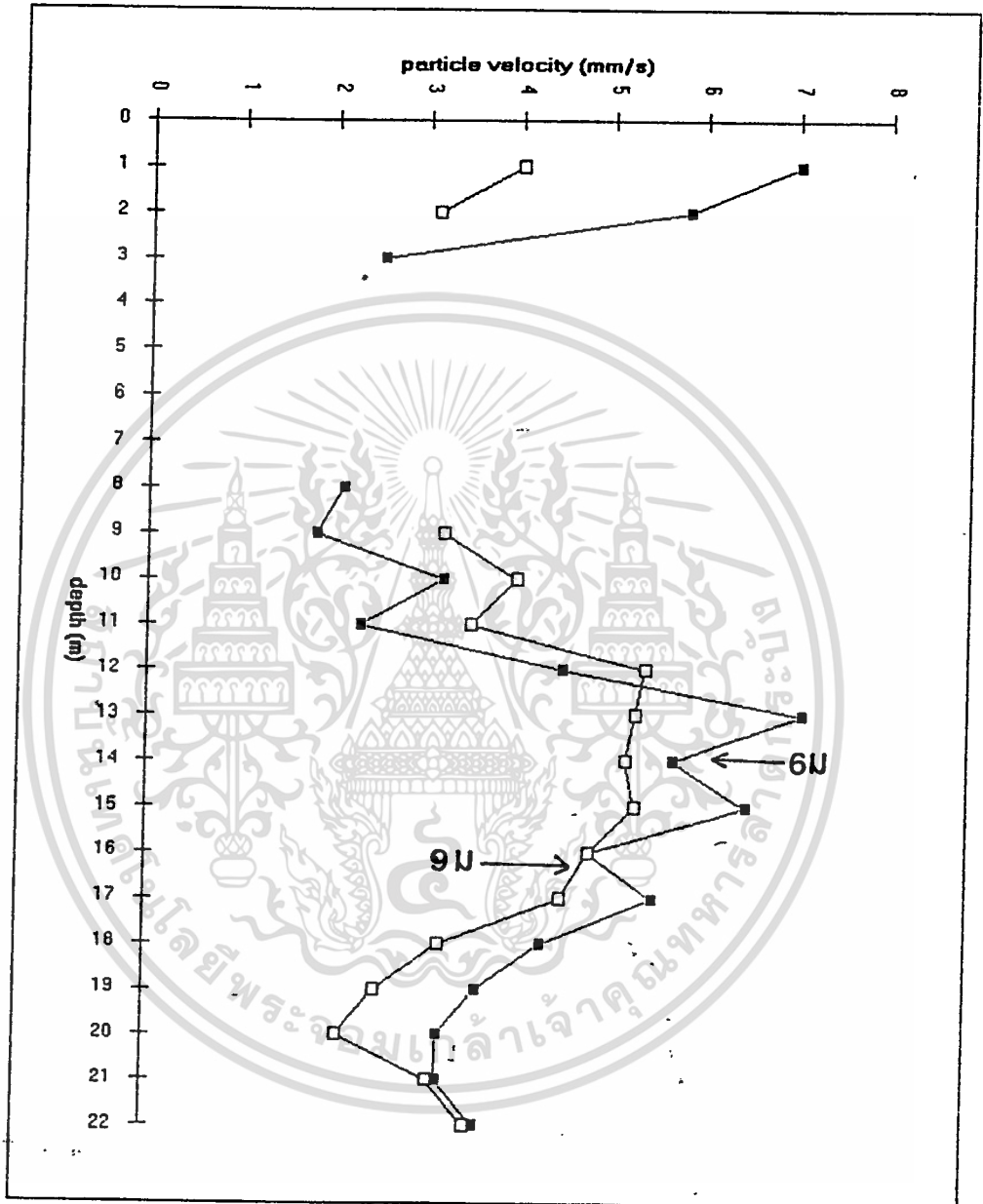
กราฟที่ 4.20 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 2 ม. และ 5 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



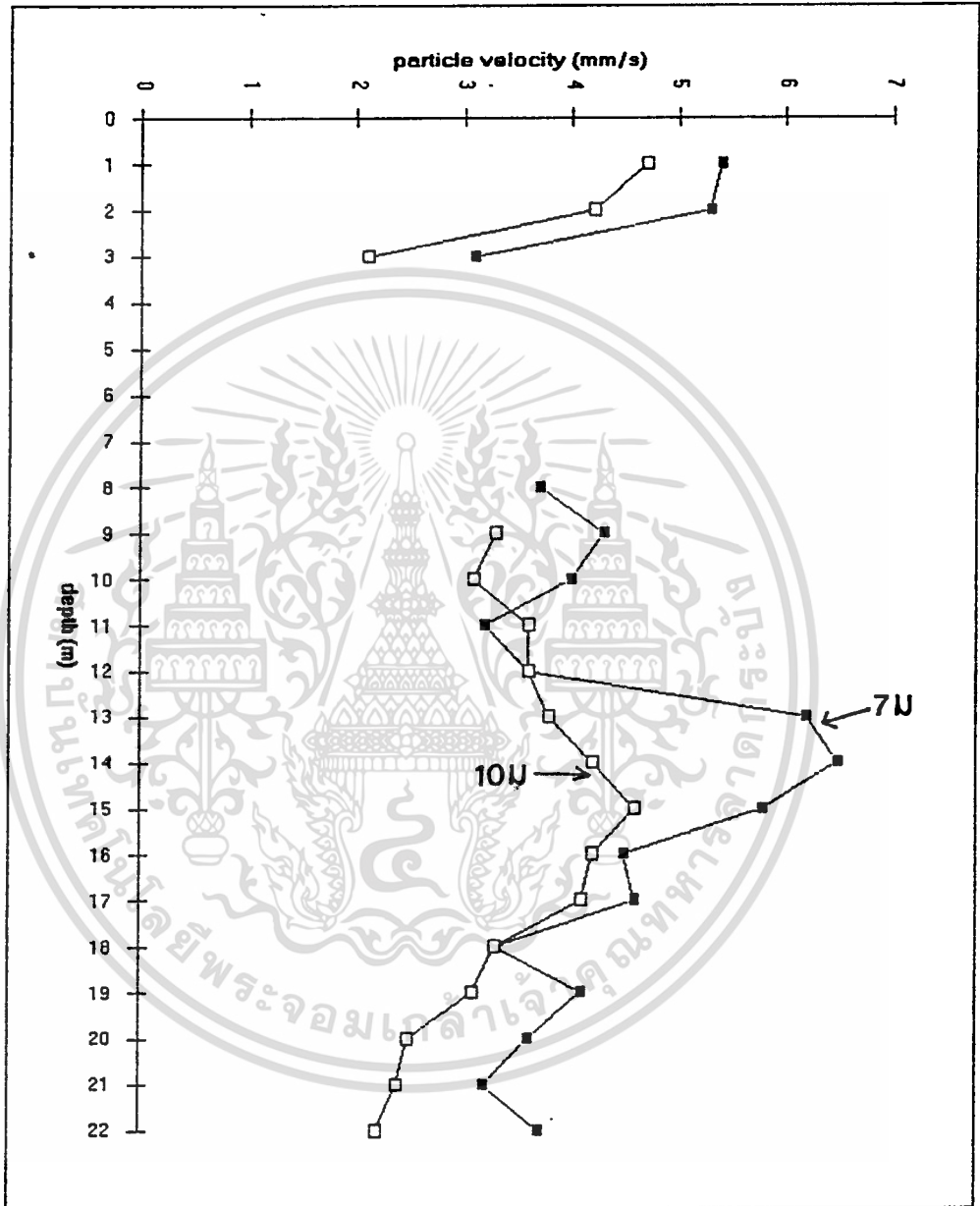
กราฟที่ 4.21 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 4 ม. และ 8 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



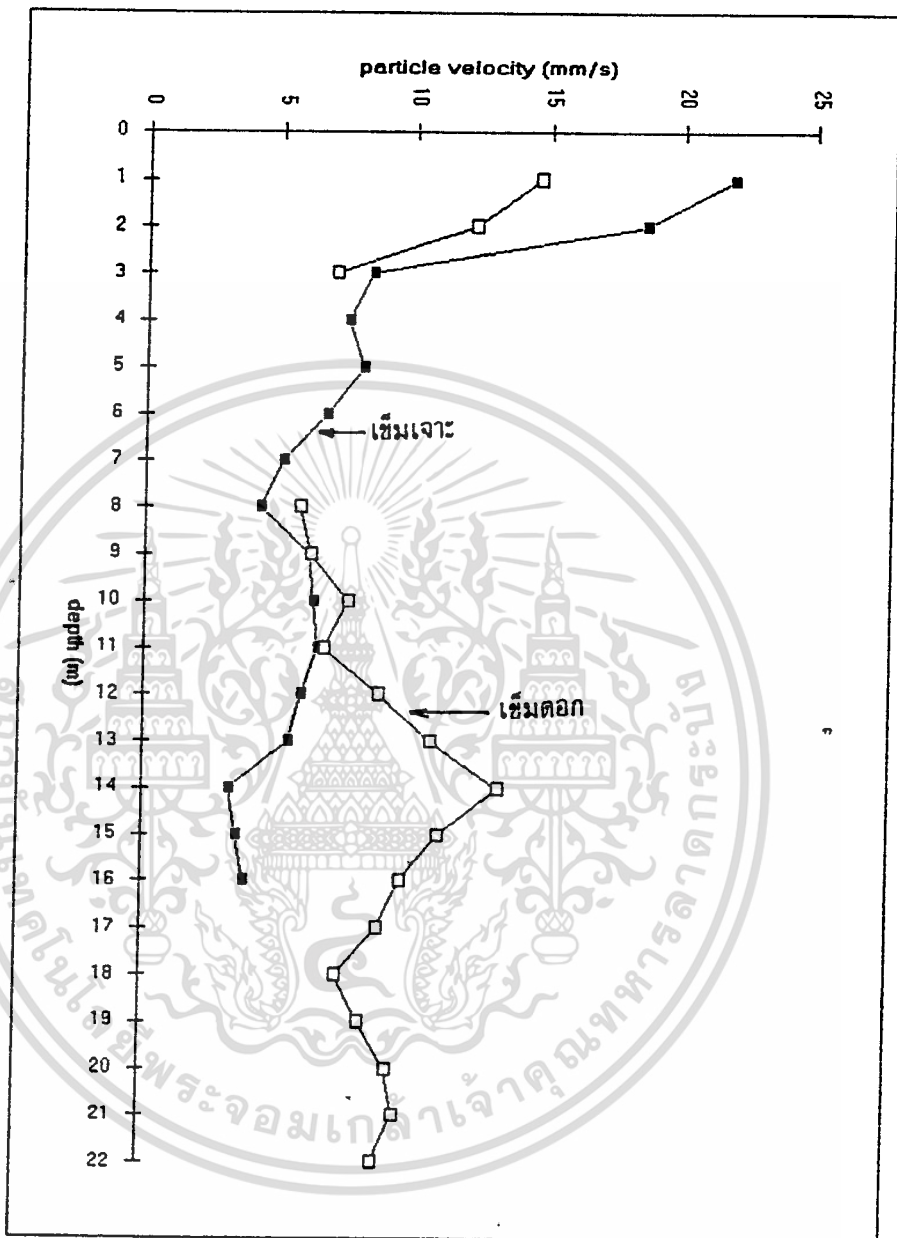
กราฟที่ 4.22 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 6 ม. และ 9 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.23 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 7 ม. และ 10 ม.

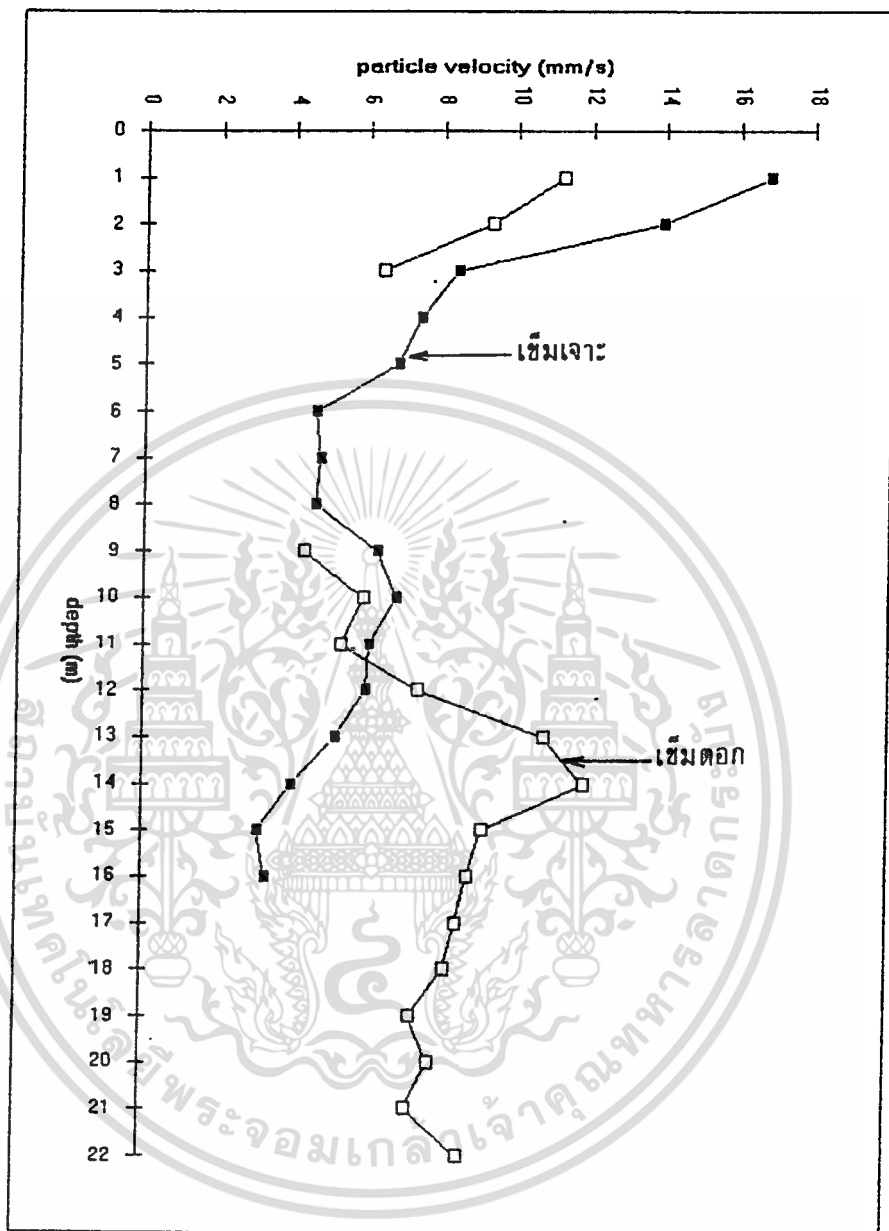
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.24 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 2 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง ซีเมนต์ดอกและ ซีเมนต์เจาะ

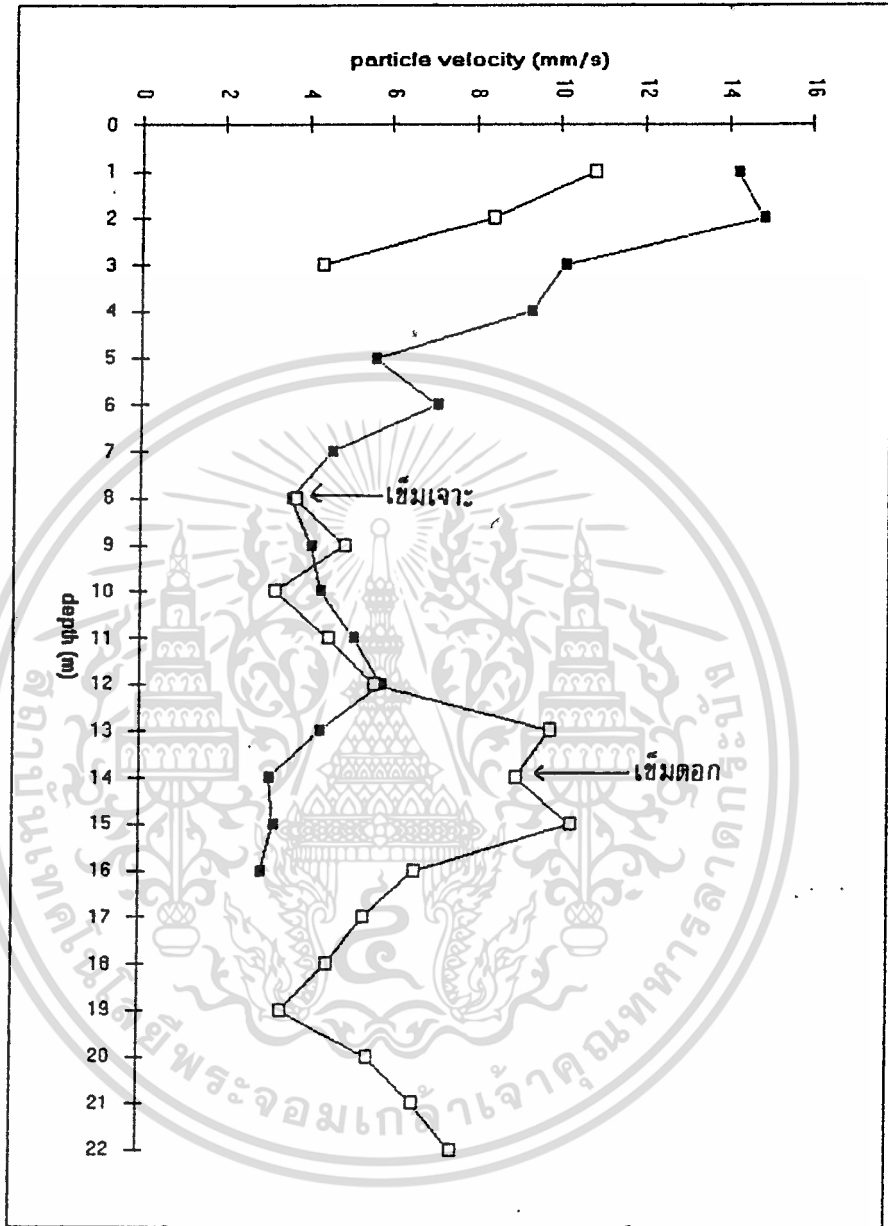
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.25 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 3 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง เชื่อมตอกและ เชื่อมเจาะ

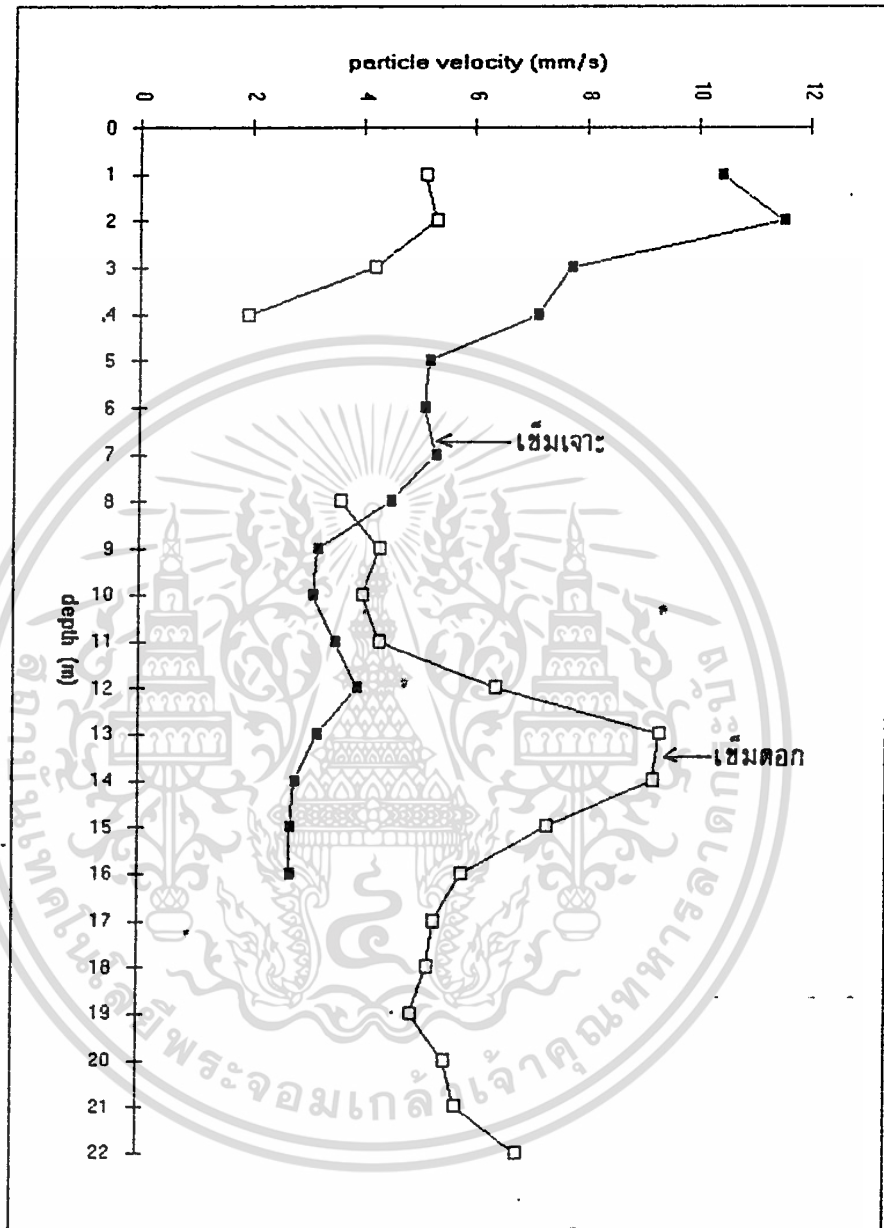
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.26 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 4 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง เชื่อมตอกและเชื่อมเจาะ

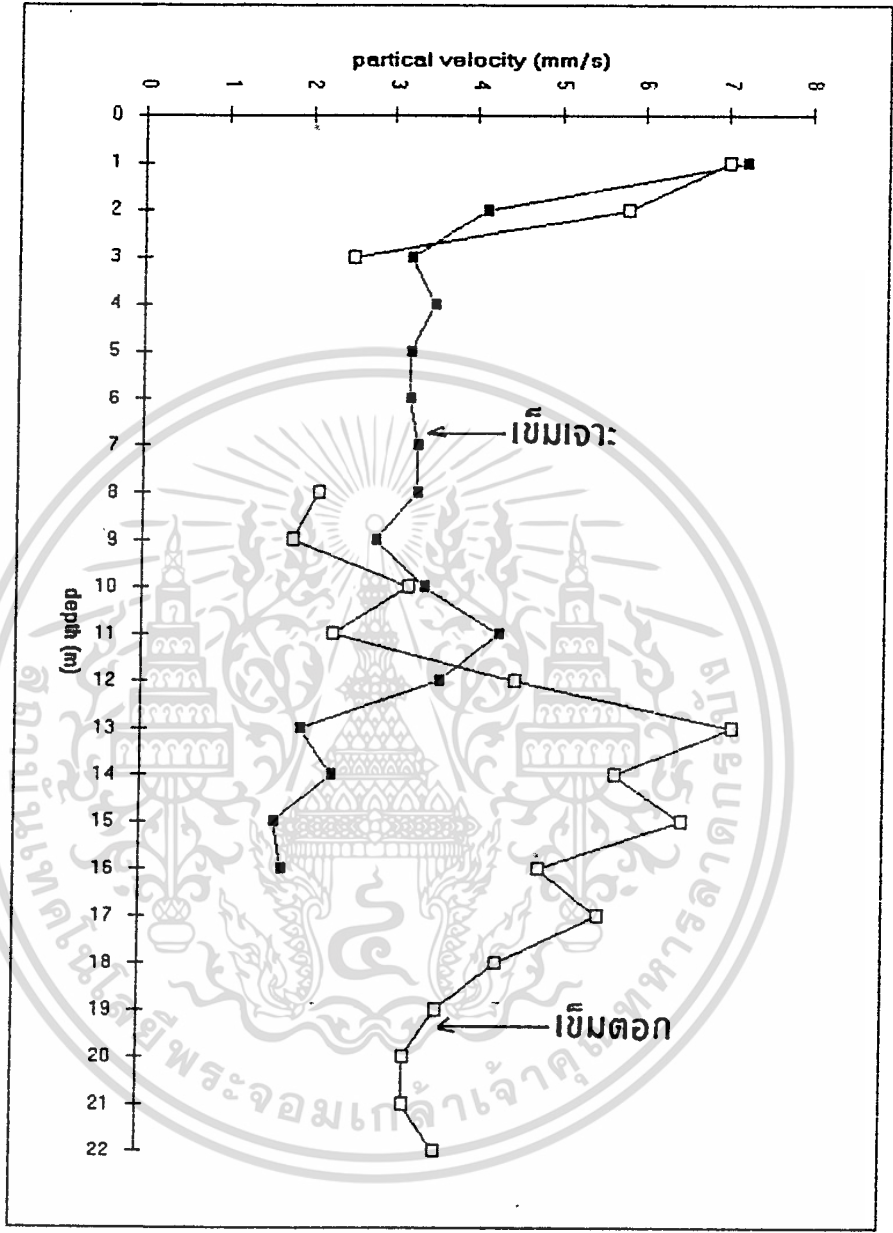
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.27 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 5 ม.

เปรียบเทียบระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะ

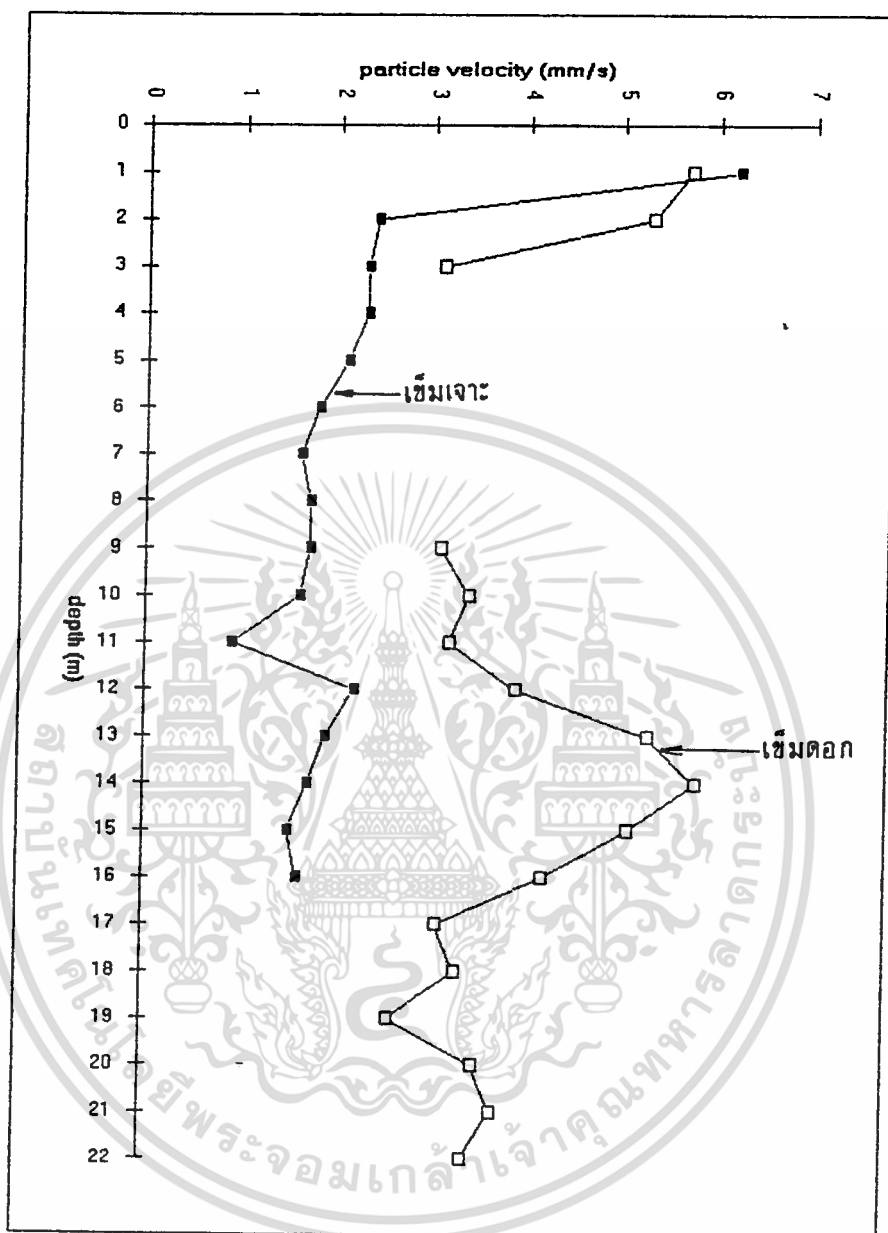
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.28 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 6 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง เข็มตอกและ เข็มเจาะ

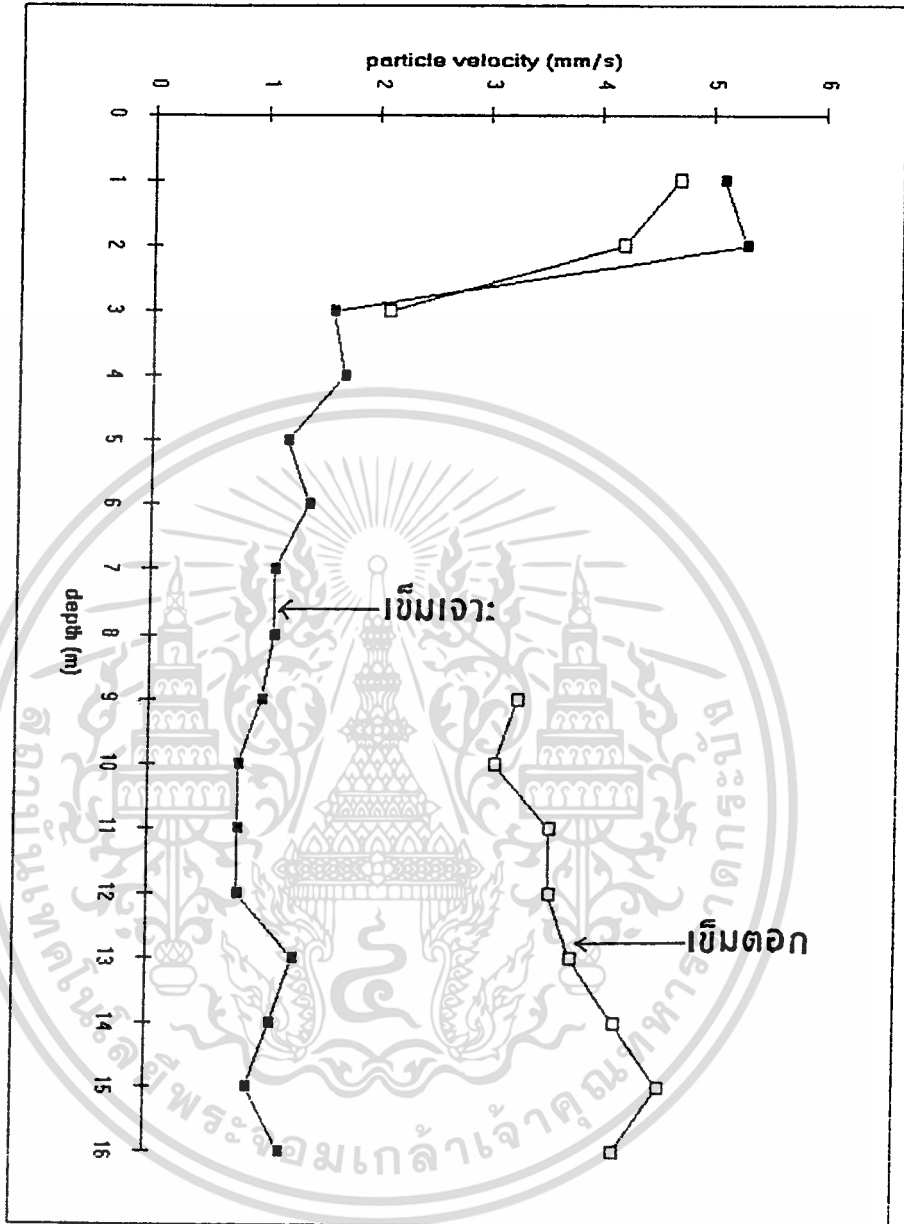
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.29 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 8 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง ซีมตอกและซีมเจาะ

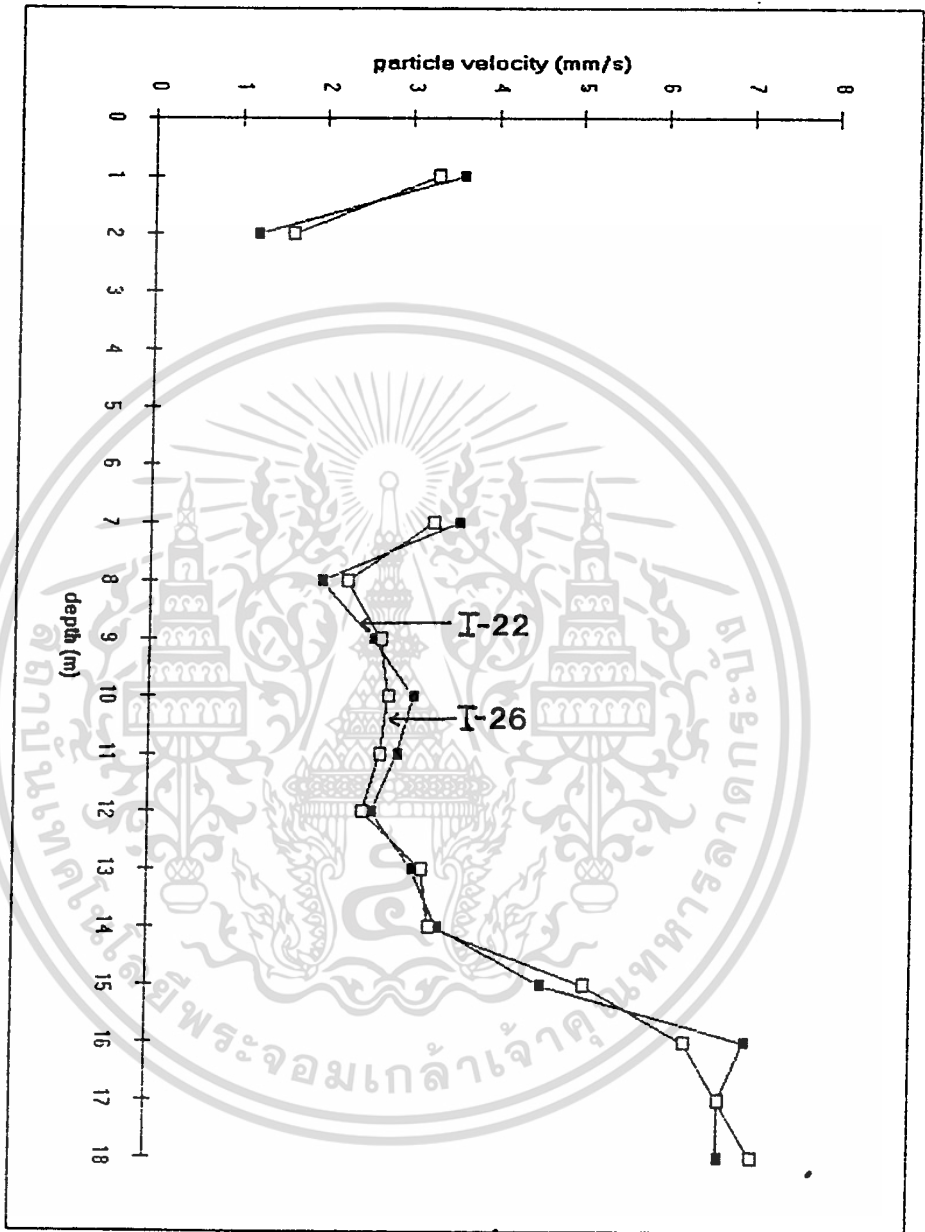
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 10 ม.

เปรียบเทียบระหว่าง เข็มตอกและเข็มเจาะ

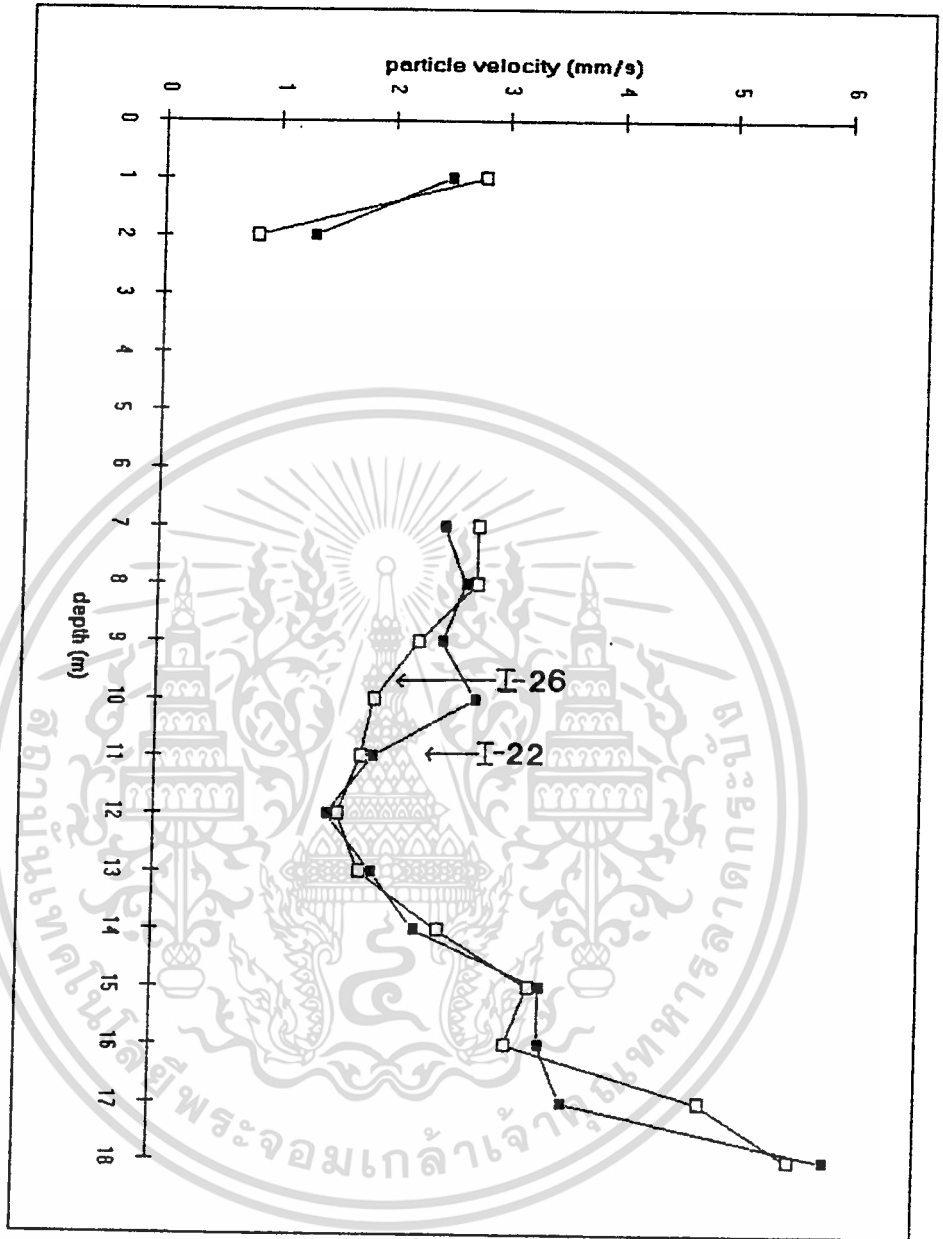
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.31 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 135 ม.

ระหว่างเข็มขนาด I-22 และ I-26

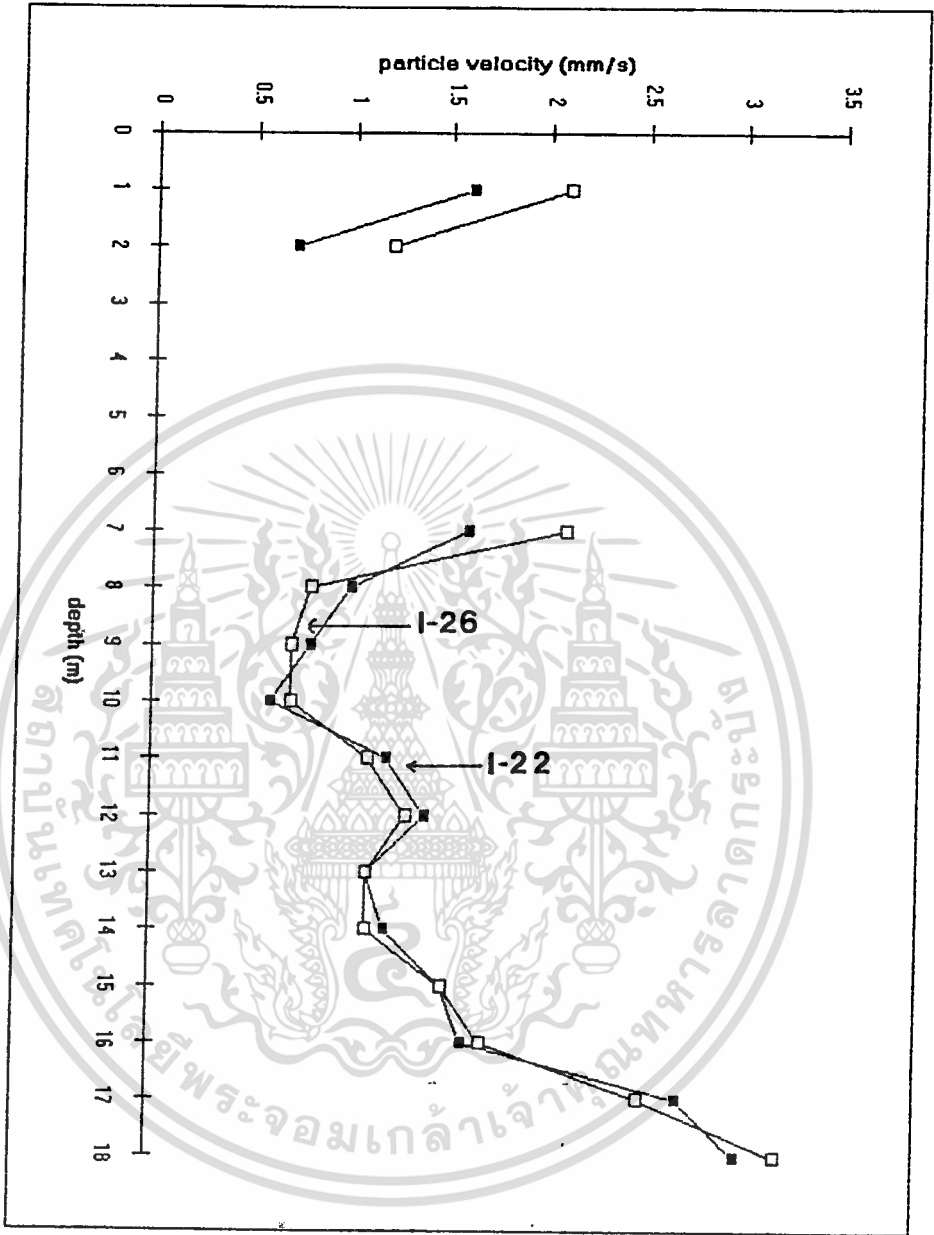
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.32 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 4.55 ม.

ระหว่างเข็มขนาด I-22 และ I-26

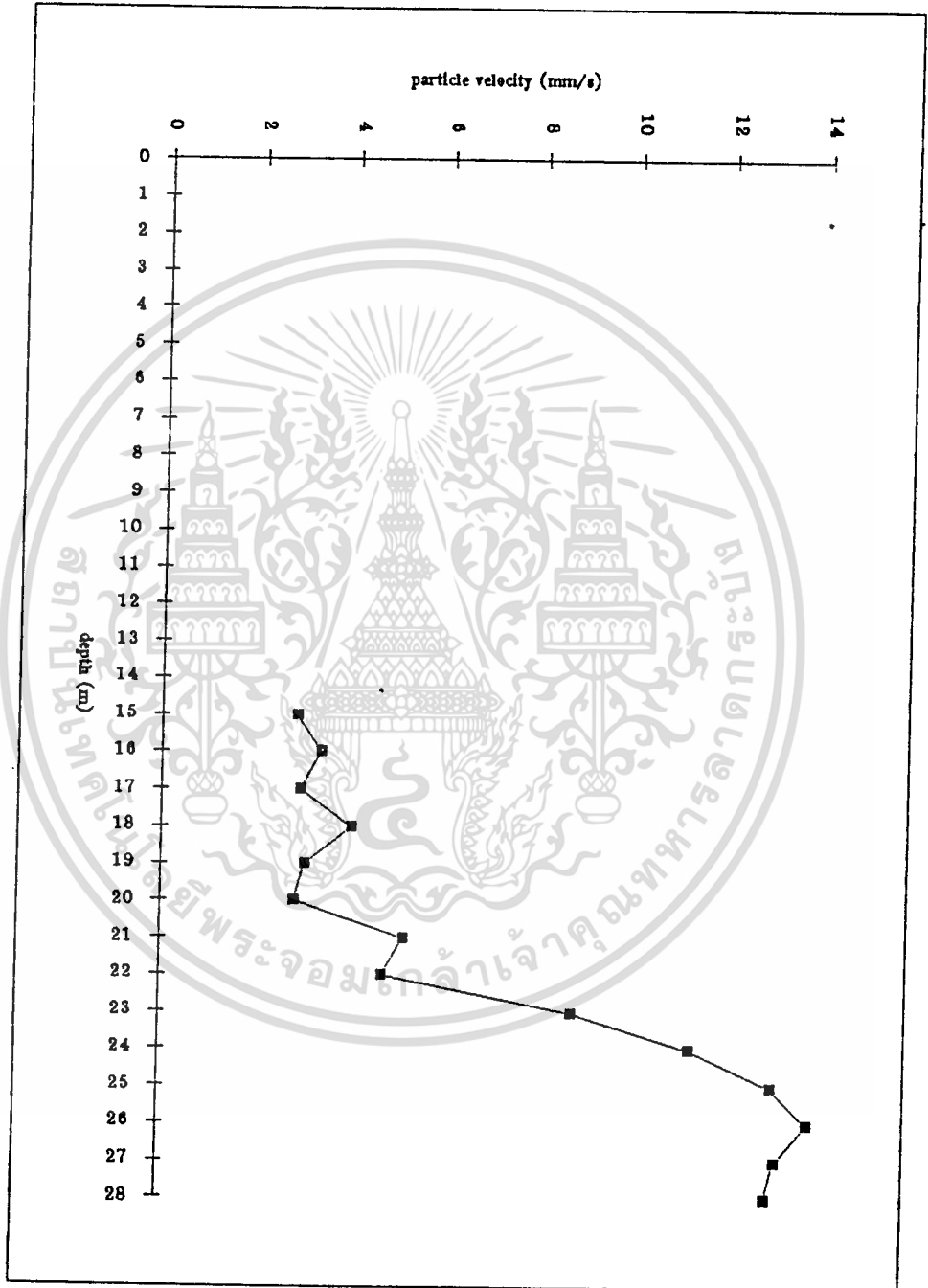
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.33 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 8.55 ม.

ระหว่างเข็มขนาด I-22 และ I-26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.34 แสดงค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระดับความลึกต่างๆ ระยะ 2.3 ม.

หน่วยงาน Thai Central Chemical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

CONCLUSION

1. แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มสามารถวัดออกมาในรูปของ Peak Particle Velocity ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับ

1.1 ระยะห่างจากจุดตอกเข็ม โดย peak particle velocity จะแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดตอก สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานกำหนดค่าความปลอดภัยว่า particle velocity ควรอยู่ในช่วงใดจึงจะปลอดภัย ในที่นี้จึงใช้มาตรฐานของต่างประเทศ ได้แก่ Leonard & Whiffin ซึ่งกำหนด particle velocity ปลอดภัยไว้ไม่เกิน 5 mm/s , Dutch CUR-57 recommendation ของประเทศเนเธอร์แลนด์ กำหนด particle velocity ไว้ไม่เกิน 4.5 mm/s และ DIN standard ของประเทศเยอรมัน กำหนด particle velocity ไว้ไม่เกิน 10 mm/s

1.2 พลังงานในการตอก โดยพลังงานในการตอกมีค่าเท่ากับ ผลคูณของระยะยกตุ้มตอก และ น้ำหนักตุ้มตอก

1.3 ความลึกต่างๆของชั้นดิน โดย particle velocity จะแปรตามความลึกชั้นดิน สังเกตจากกราฟจะแบ่งออกได้เป็นช่วงๆดังนี้

1.3.1 ช่วงแรกประมาณความลึก 1-2 เมตร particle velocity จะมีค่ามาก เนื่องจากเป็นชั้น top soil ในการตอกเข็มผ่านชั้นนี้จึงต้องใช้พลังงานมากพอสมควรเพื่อเจาะทะลุผ่านชั้นนี้ลงไป

1.3.2 เมื่อเข็มเจาะทะลุผ่านชั้น top soil ลงมา ค่า peak particle velocity จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก เป็นชั้นดินชนิด soft clay เข็มสามารถเจาะทะลุผ่านชั้นดินนี้ด้วยน้ำหนักตัวเข็มเอง ค่า peak particle velocity จึงมีค่าน้อยมาก

1.3.3 เมื่อเข็มเจาะทะลุมาพบกับชั้น stiff clay ค่า peak particle velocity จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก

1.4 ชนิดของดิน ในชั้นดินแข็ง (stiff clay) จะเป็นชั้นดินที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านพลังงานมากที่สุด ในขณะที่ชั้นดินอ่อนและชั้นดินอ่อนปานกลาง (soft to medium clay) จะดูดซับพลังงานเหล่านี้ไว้ ดังนั้นในชั้นดินแข็งคลื่นจะเดินทางด้วยระยะทางที่ไกลและการเสื่อมลงของความเข้มการสั่นสะเทือนจะเกิดในอัตราที่น้อย

2. แรงสั่นสะเทือนในการทำเข็มเจาะ จากกราฟที่ 4.24-4.29 จะเห็นว่า peak particle velocity มีค่ามากในช่วงแรก เนื่องจาก แรงสั่นสะเทือนจากเครื่อง vibro hammer การทำ

งานของเครื่อง vibro hammer ในช่วงแรกของการเปิดเครื่องจะมีแรงสั่นสะเทือนมากหลังจากเครื่องทำงานเป็นปรกติสักครู่ แรงสั่นสะเทือนจะน้อยลง และ peak particle velocity จะมีเกือบคงที่ และมีค่าน้อยตลอดการทดสอบ และ peak particle velocity จะไม่ขึ้นอยู่กั้กับชั้นดินที่ปลอกกดผ่านทะลุไป

๓



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. วิศวกรรมสาร เล่มที่ 2 กุมภาพันธ์ 2534
2. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม แต่งโดย มณเฑียร กังศศิเทียม
3. วิศวกรรมฐานราก แต่งโดย ดร. วรากร ไม้เรียง
4. เสาเข็ม โดย ชมรมวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. EFFECTS OF VIBRATION DUE TO PILE DRIVING Thesis by BOONCHAI CHITTIKULADILOK , ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY BANGKOK THAILAND
6. FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN by JOSEPH E. BOWLES 4th Edition
7. GERMAND STANDARDS ORGANIZATION. DIN 4150 part 3 STRUCTURAL VIBRATION IN BUILDINGS EFFECTS ON STRUCTURES
8. GROUND VIBRATIONS FROM IMPACT PILE DRIVING DURING ROAD CONSTRUCTION by DJ Martin Phd MInstP MIOA
9. VIBRATIONS FROM PILE DRIVING IN THE BANGKOK AREA by R. PETER BRENNER and BOONCHAI CHITTIKULADILOK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้