

การคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มด้วยการวิเคราะห์สมการคลื่น

นางสาวช่อธรรม ศรีนิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREDICTION OF PILE DRIVING VIBRATION BY WAVE EQUATION ANALYSIS

Miss Chortham Srinil

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนจากการตอก
	เสาเข็มด้วยการวิเคราะห์สมการคลื่น
โดย	นางสาวช่อธรรม ศรีนิล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัตร บุญญะฐิติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัตร บุญญะฐิติ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ ธิขิตเลอสงวง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาตล คงสมบุญรัตน์)

ช่อธรรม ศรีนิล : การคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มด้วยการวิเคราะห์สมการคลื่น. (PREDICTION OF PILE DRIVING VIBRATION BY WAVE EQUATION ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.จิววัตร บุญญะฐิติ, 251 หน้า.

การประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มโดยส่วนใหญ่อาศัยสูตรเชิงประสบการณ์ซึ่งเชื่อมโยงขนาดของแรงสั่นสะเทือนเข้ากับพลังงานของตอกโดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของแรงต้านทานดิน ในการศึกษาวิจัยได้ประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มนี้โดยคำนึงถึงลักษณะชั้นดินควบคู่ไปกับพลังงานการตอกโดยอาศัยโปรแกรมวิเคราะห์คลื่นหน่วยแรง (GRL Wave Equation Analysis Program, GRLWEAP) และเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่คำนวณได้จากข้อมูลความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดิน (Peak particle velocity, PPV) จากการตรวจวัดจริงด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Regression analysis) โดยคำนึงถึงลักษณะการถ่ายแรงของเสาเข็มไปสู่ดินและการส่งผ่านพลังงานคลื่นระหว่างชั้นดินต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าสามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการประมาณการสั่นสะเทือนที่ผิวดินตามระยะทางต่างๆ จากจุดตอกเสาเข็มได้ โดยแบ่งตามสภาพชั้นดินและเสาเข็มเป็นสามกรณีคือ 1) กรณีที่เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงและตอกในลักษณะชั้นดินที่ด้านบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนโดยมีชั้นดินทรายแข็งวางตัวอยู่ที่ระดับปลายเสาเข็ม 2) กรณีที่เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงและตอกในชั้นดินที่มีชั้นดินอ่อนแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินทรายแข็งโดยปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ชั้นดินอ่อนหรือระดับดินทรายแข็ง และ 3) กรณีที่เสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง

เมื่อประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณที่ได้เสนอขึ้นในการประเมินการสั่นสะเทือนที่ผิวดินตามระยะทางต่างๆ จากจุดตอกเสาเข็ม โดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงในสนามพบว่ามีความสอดคล้องกันดีและสามารถนำไปใช้ในการวางแผนและป้องกันผลกระทบจากการสั่นสะเทือนในงานตอกเสาเข็มได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....      ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....      ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

ปีการศึกษา.....2555.....



## 5470166821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : DYNAMIC SOIL RESISTANCE / WAVE EQUATION ANALYSIS / PILE  
DRIVING VIBRATION

CHORTHAM SRINIL: PREDICTION OF PILE DRIVING VIBRATION BY WAVE  
EQUATION ANALYSIS. ADVISOR: ASSOC. PROF. TIRAWAT BOONYATEE,  
D. Eng., 251 pp.

Ground vibration due to pile driving is usually estimated from empirical formula based on driving energy without consideration of ground condition. This research tried to employ wave equation analysis considering both ground properties and pile driving energy for the estimation of ground vibration. A commercial program GRLWEAP was used to estimate vibration and internal forces in pile body during driving. Based on field measurements, relationships between values calculated by GRLWEAP and peak particle velocity (PPV) at ground surface were developed from regression analysis.

Three equations were proposed for each ground and pile conditions which are 1) piles with high tip resistance during driving embedded in soft clay layer underlain by stiff sand at pile tip level, 2) piles with high tip resistance during driving embedded in alternating layers of clay and sand layer, 3) piles with high shaft resistance during driving.

Proposed equations were validated by comparing estimated PPV at various distance from driving point with field measurements data. It was found that the predicted data agree well with measured values. These equations can be applied for mitigation of vibration effects due to pile driving activities.

Department:..... Civil Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study:..... Civil Engineering ..... Advisor's Signature.....

Academic Year:..... 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัย หัวข้อ “การคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มด้วยการวิเคราะห์สมการคลื่น” นั้นสามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากหลายท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินงาน ชี้แนะแนวทาง แก้ไขปัญหา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของการทำวิจัยตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณพี่ๆทุกคนในบริษัท เอส ที เอส อินสตรูเมนต์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ขอขอบพระคุณนายรัฐวุฒิ เหมะภูลิน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือด้านการเก็บข้อมูลภาคสนาม

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และรุ่นน้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านร่างกายและแรงใจตลอดมา

สุดท้ายนี้บุคคลที่จะกล่าวถึงในพระคุณของท่านก็คือ บิดา และมารดาผู้ซึ่งเปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียน และคอยช่วยเหลือ สนับสนุน ให้กำลังใจจนกระทั่งประสบความสำเร็จจนบัดนี้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับข้อมูลการดำเนินงานวิจัย .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 กระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มไปยังสิ่งปลูกสร้าง .....	5
2.2 ปฏิสัมพันธ์เชิงพลวัตระหว่างดินกับเสาเข็ม(DYNAMIC PILE-SOIL INTERACTION).....	7
2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกโดยทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง.....	8
2.3.1 แบบจำลองการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAP .....	9
2.3.1.1 หลักการทำงานของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก (ECH) .....	9
2.3.1.2 แบบจำลองค้อนเสาเข็ม .....	9
2.3.1.3 แบบจำลองระบบตอกเสาเข็ม .....	11

2.3.1.4	แบบจำลองเสาเข็ม.....	13
2.3.1.5	แบบจำลองดิน.....	13
2.3.2	การวิเคราะห์แบบพลวัตประเภทต่างๆของโปรแกรม GRLWEAP .....	15
2.3.2.1	การวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟกำลังรับน้ำหนัก (bearing graph).....	16
2.3.2.2	การวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟสำหรับควบคุมงาน (inspector's chart) .....	16
2.3.2.3	การวิเคราะห์ความสามารถในการตอก (drivability analysis) .....	16
2.3.3	การวิเคราะห์แรงต้านทานดินเชิงสถิต (static geotechnical analysis) .....	18
2.3.3.1	พิจารณาชนิดของดิน (soil type based method; ST).....	18
2.3.3.2	พิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก (SPT N-value based method; SA) .....	18
2.4	PILE DRIVING ANALYZER (PDA) .....	19
2.5	การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม .....	20
2.6	การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นดิน (WAVE PROPAGATION IN THE GROUND).....	24
2.6.1	แบบจำลองการลดทอนของคลื่นจากการตอกเสาเข็ม.....	24
2.6.2	ระยะทางวิกฤตจากแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือนที่ไม่พบคลื่นระยะดี .....	27
2.6.3	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และการสะท้อนกลับของคลื่น.....	29
2.6.3.1	สัมประสิทธิ์การสะท้อน ( reflection coefficient, $R$ ) .....	31
2.6.3.2	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( transmission coefficient, $T$ ) .....	31
2.6.4	คุณสมบัติทางอีลาสติกของดิน (elastic properties of soil).....	32
2.6.4.1	โมดูลัสแรงเฉือน(shear modulus, $G$ ) .....	32
2.6.4.2	อัตราส่วนปัวซอง(Poisson ratio; $\nu$ ).....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....		35
3.1	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.1.1	การตรวจวัดความไหวสะเทือนที่ผิวดินจากการตอกเสาเข็ม .....	35
3.1.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และเก็บข้อมูล .....	35

3.1.1.2	ขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม.....	35
3.1.1.3	ข้อมูลจากการตรวจวัด.....	36
3.1.2	ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มขณะตอกโดย PDA.....	37
3.1.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และเก็บข้อมูล.....	37
3.1.2.2	ขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม.....	37
3.1.2.3	ข้อมูลจากการตรวจวัด.....	37
3.1.3	ข้อมูลของระบบการตอกเสาเข็ม และข้อมูลดินใช้ในการวิเคราะห์GRLWEAP.....	38
3.1.3.1	การบันทึกข้อมูลภาคสนาม.....	38
3.1.3.2	ข้อกำหนดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม GRLWEAP.....	38
3.2	การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย.....	43
3.2.1	การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน.....	43
3.2.2	การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม.....	45
3.2.2.1	ยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาเข็มที่หัวจากการคาดการณ์ GRLWEAP ด้วยความเร็วเสาเข็มจากการตรวจวัด PDA.....	46
3.2.2.2	วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP.....	46
3.2.2.3	วิเคราะห์ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม.....	47
3.2.2.4	วิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด.....	48
3.2.2.5	วิเคราะห์การส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน.....	49
3.2.3	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน.....	50
3.2.3.1	วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน.....	51
3.2.4	ประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน.....	52
3.3	ตัวอย่างรายการคำนวณ.....	56
3.3.1	ตัวอย่างการคำนวณความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด.....	56
3.3.2	ตัวอย่างรายการคำนวณการวิเคราะห์การส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน.....	58
บทที่ 4 ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....		59

4.1	โครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย .....	59
4.2	ข้อมูลเสาเข็ม และระบบตอกเสาเข็ม.....	63
4.3	ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน .....	66
4.4	ข้อมูลการดำเนินงานตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มที่ผิวดิน .....	66
4.5	ข้อมูลการดำเนินงานทดสอบเสาเข็มขณะตอกด้วยวิธีPDA.....	67
4.6	การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP .....	68
4.6.1	ป้อนข้อมูลวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP.....	68
4.6.2	ป้อนข้อมูลชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรมGRLWEAP .....	69
4.7	การวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม .....	69
4.7.1	พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิด .....	70
4.7.2	พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามความลึกของการตอก .....	70
4.7.3	วิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม .....	72
4.8	ผลการศึกษาการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม .....	77
4.8.1	กำหนดความลึกการตอกเสาเข็มในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP .....	77
4.8.2	ยืนยันความถูกต้องค่าจากการคาดการณ์ของGRLWEAPด้วย PDA.....	78
4.8.3	วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP .....	79
4.8.4	วิเคราะห์ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม .....	79
4.8.5	วิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิด.....	81
4.8.6	วิเคราะห์การส่งผ่านความเร็วการสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน .....	81
4.8.7	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน .....	81
บทที่ 5	การวิเคราะห์ผลในภาพรวมทุกโครงการทดสอบ .....	82
5.1	การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน.....	82
5.1.1	การวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม.....	82
5.1.2	วิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม .....	83

5.2 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม .....	85
5.2.1 ยืนยันความถูกต้องของค่าจากการคาดการณ์ของGRLWEAP ด้วย PDA .....	85
5.2.2 ความถี่ของแรงที่กระทำ.....	86
5.2.2.1 กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ(อยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์) ....	86
5.2.2.2 กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง (อยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์) ...	88
5.2.3 ความเร็วการสั่นสะเทือน และการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน .....	90
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน .....	91
5.3.1 กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง .....	93
5.3.2 กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง .....	96
5.3.3 แบ่งกลุ่มข้อมูลตามชนิดดินที่ระดับปลายเสาเข็ม .....	97
5.3.1 การประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน .....	100
บทที่ 6 สรุปผล.....	109
6.1 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน.....	109
6.2 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม .....	109
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน .....	110
6.4 การประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน.....	111
6.5 ข้อเสนอแนะ .....	112
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	133
ภาคผนวก ค.....	138
ภาคผนวก ง .....	144

ภาคผนวก จ.....	158
ภาคผนวก ฉ.....	177
ภาคผนวก ช.....	194
ภาคผนวก ซ.....	203
ภาคผนวก ฌ.....	224
ภาคผนวก ญ .....	235
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	251



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์การตอกของค้อนเสาเข็มประเภทต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2-2 พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ด้วยGRLWEAP.....	15
ตารางที่ 2-3 ตัวประกอบการพัฒนากำลังสำหรับดินสัมพัทธ์ ( $f_s$ ).....	17
ตารางที่ 2-4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตในแหล่งกำเนิดคลื่นแบบต่างๆ.....	25
ตารางที่ 2-5 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตในดินชนิดต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2-6 ชนิดของดินกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ, $\alpha$ .....	26
ตารางที่ 2-7 ชนิดของดินกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ, $\alpha$ และช่วงของความถี่.....	27
ตารางที่ 2-8 ระยะเวลาวิกฤติตามความลึกการตอกเสาเข็ม .....	29
ตารางที่ 2-9 สหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่น $V_s$ เชื่อมกับค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT) .....	33
ตารางที่ 2-10 อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) ของดินชนิดต่างๆ .....	34
ตารางที่ 3-1 ค่า ELASTIC MODULUS และค่า C.O.R. สำหรับวัสดุต่างๆ .....	43
ตารางที่ 3-2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตตามลักษณะของแหล่งกำเนิด และชนิดคลื่น .	44
ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด .....	49
ตารางที่ 4-1 โครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย .....	60
ตารางที่ 4-2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยของแต่ละโครงการ .....	62
ตารางที่ 4-3 รายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม และระบบตอกเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ .....	63
ตารางที่ 4-4 การดำเนินงานทดสอบเสาเข็มขณะตอกด้วยวิธีPDA .....	67
ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบความเร็วอนุภาคสูงสุด(PPV)ในแนวแกนตั้ง รัศมี และตั้งฉาก .....	69
ตารางที่ 4-6 ช่วงความลึกที่สามารถสังเกตอิทธิพลของค่า N ที่มีต่อPPV ได้เด่นชัด .....	70
ตารางที่ 4-7 ระยะเวลาจากแหล่งกำเนิดที่PPVได้รับอิทธิพลจากค่าNที่แตกต่างกัน.....	72
ตารางที่ 4-8 ช่วงความลึกในการวิเคราะห์ และระยะเวลาวิกฤติในแต่ละโครงการทดสอบ.....	74
ตารางที่ 4-9 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ( $\alpha$ ) และค่าคงที่(K)จากการวิเคราะห์ในแต่ละโครงการทดสอบ .....	75

ตารางที่ 4-10 ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรในแต่ละช่วงความลึกของแต่ละ โครงการทดสอบ .....	76
ตารางที่ 4-11 ระดับความลึกการตอกเสาเข็มในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP .....	77
ตารางที่ 4-12 เปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์กับค่าตรวจวัดโดยเฉลี่ยเมื่อ เทียบกับค่าตรวจวัดในแต่ละโครงการทดสอบ .....	78
ตารางที่ 4-13 ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็มที่แต่ละช่วงความลึกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ในแต่ละโครงการ.....	80
ตารางที่ 5-1 อัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน( $\psi$ ) กับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน( $T$ ) .....	91
ตารางที่ 5-2 การวัดการกระจายสัมพัทธ์ของข้อมูลอัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการ สั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) .....	92
ตารางที่ 5-3 แนวโน้มของ $\psi$ กับ ค่าต้านทานการตอก N-SPT .....	94
ตารางที่ 5-4 ค่าแนะนำ $\psi$ ในการใช้งาน .....	97
ตารางที่ 5-5 อัตราส่วนของ $V_{CAL} / V_{REF}$ ในแต่ละโครงการทดสอบ .....	98
ตารางที่ 5-6 อัตราส่วนของ $V_{CAL} / V_{REF}$ ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของ แรงกระทำต่ำ.....	99
ตารางที่ 5-7 อัตราส่วนของ $V_{CAL} / V_{REF}$ ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของ แรงกระทำสูง.....	100

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 กระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนของการตอกเสาเข็มลงดินและสิ่งปลูกสร้างบริเวณ ข้างเคียง( MASSARSCH & FELLENIUS, 2008) .....	5
รูปที่ 2-2 คลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม(JIN SUN KIM AND DONG SOO KIM, 1999) .....	6
รูปที่ 2-3 การจำแนกแรงทางพลศาสตร์ตามระยะเวลาการให้แรง และจำนวนรอบของแรง .....	8
รูปที่ 2-4 แบบจำลองระบบตอกเสาเข็มของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก.....	12
รูปที่ 2-5แบบจำลองเสาเข็มและดิน .....	14
รูปที่ 2-6 การแบ่งดินชั้นบน และดินชั้นล่างด้วยเส้น AB และรูปแบบการเปลี่ยนรูปแยกกัน ระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง .....	22
รูปที่ 2-7 คลื่นที่เกิดระหว่างแรงปฏิกริยาระหว่างเสาเข็มกับดิน .....	28
รูปที่ 2-8 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นกรณีมุมตกกระทบใดๆ.....	29
รูปที่ 2-9 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นกรณีมุมตกกระทบปกติ .....	30
รูปที่ 3-1 อ่างอิงระดับของปลายเสาเข็มขณะตอก .....	36
รูปที่ 3-2 การตรวจวัดความไหวสะเทือนจากการตอกเสาเข็มที่ผิวดิน.....	36
รูปที่ 3-3 มาตรฐานวัดสัญญาณการทดสอบ PDAชนิดไร้สาย.....	37
รูปที่ 3-4 การทดสอบด้วยPILE DRIVING ANALYZER (PDA).....	38
รูปที่ 3-5 หน้าต่างการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์แบบพลวัตประเภทต่างๆของโปรแกรม GRLWEAP .....	39
รูปที่ 3-6 หน้าต่างการป้อนชนิดดินสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิตด้วยGRLWEAP โดยการพิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก(SA).....	40
รูปที่ 3-7 หน้าต่างการป้อนค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT) ตามความลึกสำหรับการ วิเคราะห์เชิงสถิตด้วยGRLWEAP โดยการพิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก(SA).....	40
รูปที่ 3-8 หน้าต่างการกำหนดตัวประกอบพัฒนากำลังสัมบูรณ์ของโปรแกรม GRLWEAP.....	41

รูปที่ 3-9 หน้าต่างการกำหนดค่าตัวประกอบพัฒนากำลังสัมพัทธ์ของดินแต่ละชนิด ของโปรแกรม GRLWEAP .....	42
รูปที่ 3-10 วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตขณะตอกเสาเข็ม .....	47
รูปที่ 3-11 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่ง ปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) ที่เวลาใดๆ .....	47
รูปที่ 3-12 การส่งผ่านความเร็วการสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน .....	50
รูปที่ 3-13 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	53
รูปที่ 3-14 แผนผังการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน .....	54
รูปที่ 3-15 แผนผังการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม .....	55
รูปที่ 4-1 ตำแหน่งโครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย .....	59
รูปที่ 4-2 เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมตัน .....	64
รูปที่ 4-3 เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวไอ .....	64
รูปที่ 4-4 เสาเข็มสปัน .....	64
รูปที่ 4-5 เครื่องตอกแบบลูกตุ้มปล่อยตก(DROP HAMMER) .....	65
รูปที่ 4-6 เครื่องตอกเสาเข็มไฮดรอลิก(SINGLE ACTION HYDRAULIC HAMMER) .....	65
รูปที่ 4-7 หมอนรองค้อนเสาเข็ม และหมอนรองหัวเสาเข็มแบบต่างๆ .....	65
รูปที่ 4-8 การติดตั้ง GEOPHONE ที่ระยะทางต่างๆ .....	66
รูปที่ 4-9 มาตรฐานวัดสัญญาณการทดสอบ PDA ชนิดสายเคเบิล .....	67
รูปที่ 4-10 การติดตั้งมาตรฐานวัดสัญญาณการทดสอบ PDA บริเวณหัวเสาเข็ม .....	68
รูปที่ 5-1 แผนภูมิฮิสโตแกรมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) แต่ละโครงการทดสอบ .....	84
รูปที่ 5-2 แผนภูมิฮิสโตแกรมของค่าคงที่ K แต่ละโครงการทดสอบ .....	84
รูปที่ 5-3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์ด้วยGRLWEAP กับผลตรวจวัด จากการทดสอบPDAโดยเฉลี่ยของแต่ละโครงการทดสอบ .....	85

รูปที่ 5-4 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่ง ปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ.....	87
รูปที่ 5-5 การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ .....	88
รูปที่ 5-6 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่ง ปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง.....	89
รูปที่ 5-7 การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง.....	90
รูปที่ 5-8 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ $V_{CAL}$ / PPV ในแต่ละโครงการทดสอบ .....	92
รูปที่ 5-9 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ $V_{CAL}$ / PPV ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของ แรงกระทำต่ำ.....	93
รูปที่ 5-10 ลักษณะเฉพาะของชั้นดินในกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 .....	94
รูปที่ 5-11 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ $V_{CAL}$ / PPV ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของ แรงกระทำสูง.....	96
รูปที่ 5-12 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 19.00 เมตร ถึง 23.00 เมตร โครงการที่ 1 .....	101
รูปที่ 5-13 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 10.20 เมตร ถึง 11.00 เมตร โครงการที่ 3 .....	101
รูปที่ 5-14 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 21.00 เมตร ถึง 22.00 เมตร โครงการที่ 6 .....	102
รูปที่ 5-15 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 23.00 เมตร ถึง 24.00 เมตร โครงการที่ 7 .....	102
รูปที่ 5-16 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 20.50 เมตร ถึง 21.00 เมตร โครงการที่ 8 .....	103

รูปที่ 5-17 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 16.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร โครงการที่ 9 .....	103
รูปที่ 5-18 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 6.00 เมตร ถึง 6.50 เมตร โครงการที่ 2 .....	104
รูปที่ 5-19 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 9.00 เมตร ถึง 10.00 เมตร โครงการที่ 3 .....	104
รูปที่ 5-20 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 14.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร โครงการที่ 3 .....	105
รูปที่ 5-21 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 16.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร โครงการที่ 1 .....	106
รูปที่ 5-22 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 5.00 เมตร ถึง 5.50 เมตร โครงการที่ 2 .....	106
รูปที่ 5-23 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร โครงการที่ 3 .....	107
รูปที่ 5-24 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 15.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร โครงการที่ 6 .....	107
รูปที่ 5-25 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 17.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร โครงการที่ 7 .....	108
รูปที่ 5-26 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ ข้อมูลในช่วงความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร โครงการที่ 9 .....	108

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของงานวิจัย

ฐานรากเสาเข็มใช้เป็นฐานรากอาคารเมื่อดินในบริเวณนั้นไม่สามารถรับน้ำหนักจากฐานราก  
แผ่ได้ การก่อสร้างฐานรากเสาเข็มอาจแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ เสาเข็มเจาะ และเสาเข็มตอก

การก่อสร้างฐานรากเสาเข็มเจาะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ก่อสร้างที่จำเป็นต้องมีการ  
ควบคุมมลภาวะทางด้านแรงสั่นสะเทือน เนื่องจากการก่อสร้างด้วยวิธีดังกล่าวก่อให้เกิดการ  
เคลื่อนตัวของดิน และแรงสั่นสะเทือนขณะทำงานต่ำทำให้ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงไม่มาก  
นัก แต่เนื่องจากมีต้นทุนการก่อสร้าง และวัสดุสูง อีกทั้งต้องการการควบคุมงานที่มีคุณภาพเพื่อ  
ป้องกันความคลาดเคลื่อนของคุณภาพเสาเข็มที่จะเกิดขึ้นขณะก่อสร้าง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้  
ในปัจจุบันพบว่า การก่อสร้างฐานรากเสาเข็มตอกยังเป็นทางเลือกที่นิยมใช้งานกันอย่างมาก  
เนื่องจากมีต้นทุนการก่อสร้าง และวัสดุไม่สูงมาก สะดวกในการทำงาน ประหยัดเวลา และมีความ  
คลาดเคลื่อนด้านคุณภาพของเสาเข็มต่ำแต่เนื่องจากขณะตอกเสาเข็มจะเข้าไปแทนที่ดินโดยตรง  
ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน และเกิดแรงสั่นสะเทือนมากซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง  
บริเวณข้างเคียงได้

การประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มก่อนการทำการก่อสร้างจึงเป็นแนวทาง  
หนึ่งที่สามารถใช้ในการวางแผนป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้ โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการ  
ประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มนั้นมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนซึ่งเกี่ยวข้องกับ  
กระบวนการการส่งผ่านคลื่นคือ ความรุนแรงของแหล่งกำเนิดคลื่น การลดทอนเนื่องจากตัวกลาง  
และเงื่อนไขของอาคารหรือตัวรับ องค์ประกอบทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์กัน และส่งผลต่อขนาด  
ความรุนแรงของผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรการการป้องกัน และลดผลกระทบของการ  
สั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มของหน่วยงานภาครัฐไว้หลายฉบับ โดยกำหนดอยู่ในรูปของขนาด  
ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแต่ละความถี่จากการตอกเสาเข็มแยกตามประเภทของอาคาร และจุด  
ตรวจวัด อ้างอิงตามมาตรฐาน DIN4150 เช่น ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่  
37 ของกรมควบคุมมลพิษ และประกาศกรุงเทพมหานคร เป็นต้น และขอแนะนำด้านระยะห่าง  
ระหว่างจุดตอกเสาเข็มกับอาคารที่แรงสั่นสะเทือนไม่ก่อให้เกิดความเสียหายตามมาตรฐานกรม  
โยธาธิการ และผังเมืองซึ่งอยู่ในระหว่างขั้นประชาพิจารณ์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ถูกเสนอใน

การวางมาตรการดังกล่าวนั้นอ้างอิงข้อมูลจากต่างประเทศซึ่งขาดข้อมูลสนับสนุนทางด้านลักษณะการทำงาน วิธีการก่อสร้าง ลักษณะชั้นดิน และชนิดของเสาเข็มที่สะท้อนการทำงานจริงในประเทศไทย ทำให้ผลการวิเคราะห์อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

การประเมินระดับการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่ใช้สูตรอย่างง่ายซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการตอก และระยะทาง โดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลจากแรงต้านทานดินที่มีต่อเสาเข็ม ตัวอย่างเช่น Attwell & Farmer (1973) และ Wiss (1981) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดต่างๆกับพลังงานการตอก และระยะทาง ดังนี้

$$v = k \left( D / \sqrt{W_r} \right)^{-n} \quad (1.1)$$

เมื่อ	$v$	คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุดของคลื่นไหวสะเทือน
	$k$	คือ ค่าความเร็วที่ระยะทางหนึ่งหน่วย
	$D$	คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิด
	$W_r$	คือ พลังงานที่แหล่งกำเนิด
	$n$	คือ ความชันในกราฟ log-log หรืออัตราการลดทอน (อยู่ในช่วง 1.0 – 2.0)

อย่างไรก็ตามบรรเจิด (2532) พบว่า ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่เกิดขึ้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อลักษณะชั้นดินบริเวณปลายเสาเข็มแตกต่างกัน แต่ชนิดเสาเข็ม ความลึกเสาเข็ม และพลังงานการตอกใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าความต้านทานการตอกของชั้นดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อระดับการสั่นสะเทือนที่แหล่งกำเนิดเป็นอย่างมาก จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สูตรอย่างง่ายที่เสนอไว้นั้นไม่สามารถประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มในพื้นที่ต่างๆซึ่งมีเงื่อนไขของสภาพชั้นดินที่แตกต่างกันมากได้

นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาแบบแยกส่วนโดยไม่มีการศึกษาพฤติกรรมร่วมของการส่งผ่านพลังงานในเสาเข็ม การส่งผ่านพลังงานระหว่างเสาเข็มกับดิน และการลดทอนของคลื่นไหวสะเทือนตามระยะทางเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น Paikowsky & Hajduk (2000) ซึ่งรายงานการลดทอนความเร่งในเสาเข็มตามความลึก โดยไม่มี การเชื่อมโยงความเร่งในเสาเข็มกับความเร่งในดิน

สำหรับงานวิจัยที่เชื่อมโยงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินกับคุณสมบัติของตุ้มตอก และเงื่อนไขสภาพชั้นดินมีตัวอย่างเช่น Ramshaw et al. (2000) ซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์แบบ finite element ในการคำนวณหาความเร็วอนุภาคสูงสุดจากข้อมูลสภาพชั้นดินจริง แต่งานวิจัยดังกล่าวยังมีข้อมูลสนับสนุนไม่มากนัก และยากต่อการนำไปใช้งานในแต่ละพื้นที่ที่เงื่อนไขเปลี่ยนแปลงไป



เนื่องจากเงื่อนไขทางด้านสภาพชั้นดินมีอิทธิพลต่อระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมาก การศึกษานี้จึงได้เสนอแนวทางในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนโดยคำนึงถึงอิทธิพลของสภาพชั้นดิน โปรแกรมGRLWEAPซึ่งเป็นโปรแกรมทางพาณิชย์จึงถูกนำมาใช้เพื่อเชื่อมโยงเงื่อนไขสภาพชั้นดินในแต่ละพื้นที่เข้ากับคุณสมบัติของตุ้มตอกในการพิจารณาความรุนแรงที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิด โดยงานวิจัยนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานเชิงพลวัตของดินซึ่งคาดการณ์จากGRLWEAP กับความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินจากการตรวจวัดจริงที่ระยะทางต่างๆในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการกำหนดระยะห่างจากจุดตอกถึงอาคาร และยังเป็นการอ้างอิงข้อมูลที่สะท้อนการทำงานจริงในประเทศไทยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการกำหนดมาตรฐานการการป้องกัน และลดผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มในประเทศไทยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นดำเนินการวิจัยโดยอ้างอิงข้อมูลที่สะท้อนการทำงานจริงในประเทศไทยเพื่อสามารถนำผลการศึกษาดังกล่าวมาใช้ในประเทศไทยได้โดยตรง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวิธีการที่สามารถประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆ โดยคำนึงถึงอิทธิพลของคุณสมบัติตุ้มตอก ชนิดเสาเข็ม และสภาพชั้นดิน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กตอกด้วยค้อนเสาเข็มแบบกระแทก(external combustion hammers; ECH) ซึ่งประกอบด้วย ระบบการตอกโดยวิธีลูกตุ้มปล่อยอิสระ(drop hammer) และระบบการตอกโดยใช้แรงดันน้ำมัน(hydraulic hammer)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงเข้ากับคุณสมบัติของตุ้มตอก และเงื่อนไขสภาพชั้นดินในแต่ละพื้นที่
2. สามารถคาดคะเนความเสียหายที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้จึงสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างจุดตอกเสาเข็มกับอาคารข้างเคียงซึ่งทำให้ผู้ทำการก่อสร้าง และผู้ที่อยู่อาศัยสามารถวางแผนป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อาคารข้างเคียงไว้ได้ตั้งแต่ยังไม่เริ่มทำการก่อสร้าง

### 1.5 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับข้อมูลการดำเนินงานวิจัย

1. ข้อมูลภาคสนามในแต่ละโครงการควรประกอบไปด้วยข้อมูลที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยอย่างครบถ้วนคือ
  - ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ GRLWEAP
  - ข้อมูลความเร็วเส้าเข็มจากการทดสอบ PDA
  - ข้อมูลความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินจากการตรวจวัด
2. สภาพชั้นดินในแต่ละโครงการทดสอบควรมีลักษณะทั้งที่เป็นดินเหนียว และดินทราย เพื่อศึกษาอิทธิพลของความต้านทานการตอกของชั้นดินที่ส่งผลต่อระดับการสั่นสะเทือนที่แหล่งกำเนิด

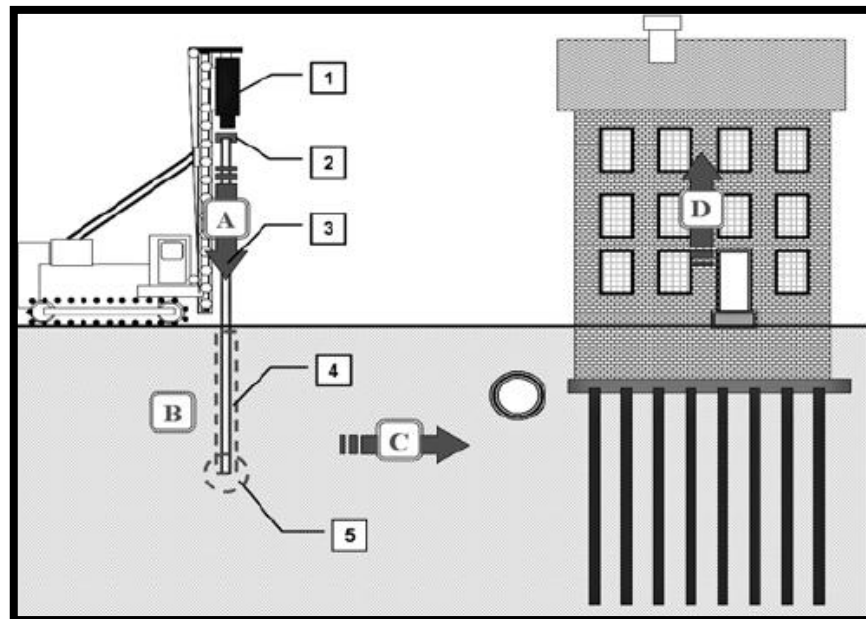
## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มไปยังสิ่งปลูกสร้าง

การประเมินระดับการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วนซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการการส่งผ่านคลื่น(wave propagation)คือ แหล่งกำเนิดคลื่น ตัวกลาง และอาคาร ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีความสัมพันธ์กัน และส่งผลต่อขนาดความรุนแรงของผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

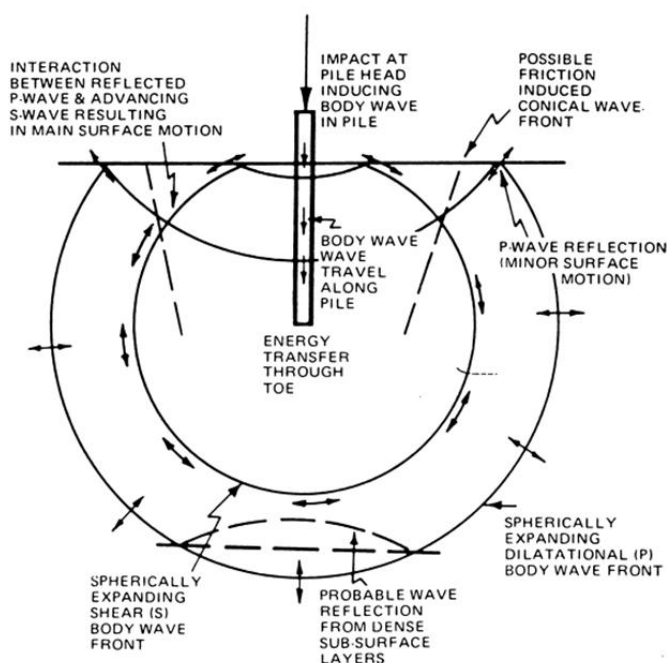
Massarsch & Fellenius (2008) ได้สรุปกระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มไปยังสิ่งปลูกสร้าง โดยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2-1 ดังนี้



รูปที่ 2-1 กระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนของการตอกเสาเข็มลงดินและสิ่งปลูกสร้าง บริเวณข้างเคียง( Massarsch & Fellenius, 2008)

- กระบวนการ A คือ การเดินทางของคลื่นในเสาเข็ม(wave propagation in the pile) พลังงานที่เกิดจากน้ำหนักของค้อนตามแรงโน้มถ่วง(หมายเลข 1)ไปกระทบที่หมอนรองเสาเข็ม และ หัวเสาเข็ม ตามลำดับ (หมายเลข 2) จากนั้นจะส่งผ่านพลังงานเคลื่อนตัวไปตามความยาวของเสาเข็ม (หมายเลข 3)
- กระบวนการ B คือ ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มกับดิน(Pile-Soil interaction)

ปฏิสัมพันธ์เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ เกิดแรงเสียดทางด้านข้างระหว่างผิวเสาเข็มกับดิน (หมายเลข 4) ซึ่งให้ลักษณะของคลื่นแบบทรงกระบอก (cylindrical Wave) และเกิดแรงปฏิกิริยาที่ปลายเสาเข็มกับดิน (หมายเลข 5) ซึ่งให้ลักษณะของคลื่นแบบทรงกลม (spherical Wave) โดยคลื่นทั้งสองนี้จะเดินทางจากแหล่งกำเนิดที่ไปตามแนวรัศมีของคลื่นคือ คลื่นแบบทรงกลมทางเดินคลื่นเป็นไปตามรัศมีของทรงกลมจากแหล่งกำเนิดที่ปลายเสาเข็ม และคลื่นแบบทรงกระบอกทางเดินคลื่นเป็นไปตามรัศมีของทรงกระบอกในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวเสาเข็ม เมื่อคลื่นทั้งสองชนิดเดินทางมาถึงผิวดินพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับลงไปในดิน ในขณะที่พลังงานอีกส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นคลื่นพื้นผิว (surface wave) โดยคลื่นพื้นผิวที่สำคัญได้แก่ คลื่นเรย์ลี (Rayleigh wave) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้ง และแนวราบในลักษณะการหมุนทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2-2 คลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม (Jin Sun Kim and Dong Soo Kim, 1999)

- กระบวนการ C คือ การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นดิน (wave propagation in the ground) เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปตามชั้นดินนั้นจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานของคลื่นสู่ดิน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในดิน และส่งไปยังบริเวณรอบๆ ด้วย โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านไปตามชั้นดินนั้นจะทำให้เกิดการลดทอนขนาดของคลื่นไหวสะเทือน
- กระบวนการ D คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างในลักษณะพลวัต (dynamic soil-structure interaction)

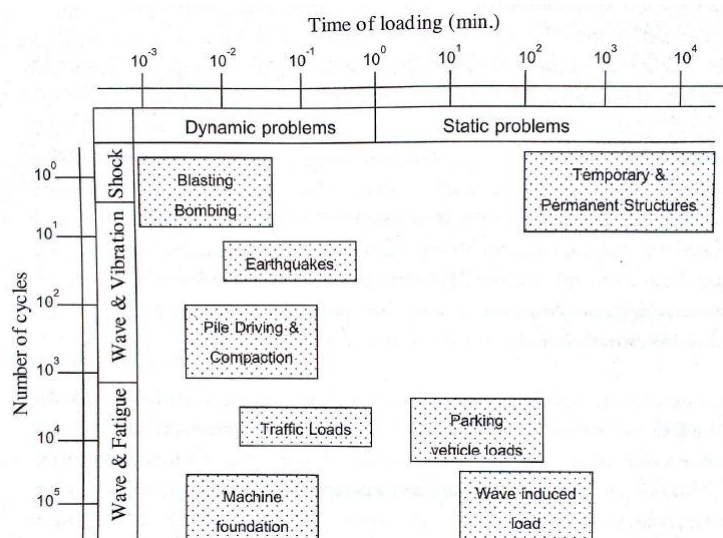
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นสู่สิ่งปลูกสร้างจะส่งผลกระทบ 2 ส่วนคือ การเคลื่อนตัวของฐานราก และต่อตัวโครงสร้าง โดยถ้าตัวโครงสร้างมีความถี่ธรรมชาติที่สอดคล้องกับคลื่นที่มากระทบก็จะทำให้ตัวโครงสร้างเกิดการสั่นพ้องไปกับคลื่นที่มากระทบซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นทั้ง 2 อย่างนี้จะสร้างความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้างได้

## 2.2 ปฏิสัมพันธ์เชิงพลวัตระหว่างดินกับเสาเข็ม(dynamic pile-soil interaction)

### แรงต้านทานของดินเชิงพลวัต (dynamic soil resistance)

การวิเคราะห์การตอบสนองของดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มนั้นถือเป็นระบบปัญหาแบบพลศาสตร์ เนื่องจากมีอัตราเร็วของการให้แรงที่ต่ำคือ น้อยกว่า 10 วินาที และมีจำนวนรอบการทำซ้ำที่สูงคือประมาณ 100 ถึง 1000 ครั้ง ที่ความถี่ในช่วง 10 ถึง 60 เฮิรตซ์(สุพจน์, 2549) ดังนั้นจากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ขณะตอกเสาเข็มจะเกิดคลื่นความเค้นเดินทางไปในเสาเข็ม เกิดปฏิสัมพันธ์เชิงพลวัตระหว่างเสาเข็มกับดิน และทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนส่งไปยังดินบริเวณรอบเสาเข็ม โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความรุนแรงของการสั่นสะเทือนดังกล่าวคือ แรงต้านทานเชิงพลวัตของดินที่ผิวเสาเข็ม และแรงต้านทานเชิงพลวัตของดินที่ปลายเสาเข็มซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดซึ่งส่งผ่านที่ระหว่างผิวเสาเข็มกับดิน โดยเมื่อแรงต้านทานเชิงพลวัตของดินเกิดขึ้นจะทำให้แรงต้านทานการตอกสุทธิเพิ่มขึ้น และการสั่นสะเทือนในดินเพิ่มขึ้นด้วย(Massarsch&Fellenius, 2008)

สำหรับแรงต้านทานเชิงพลวัตสูงสุดสามารถหาได้จากคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของดิน หรือสามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอก อย่างไรก็ตามเนื่องจากขณะตอกเสาเข็มดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม และปลายเสาเข็มจะอยู่ในภาวะวิบัติ หรือเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวเสาเข็มดินจะถูกรบกวน แรงต้านทานเชิงพลวัตในบริเวณนั้นจะลดลงอย่างมาก ทำให้มีพลังงานในการตอกเสาเข็มเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนที่ดินบริเวณรอบเสาเข็ม ดังนั้นในการคาดการณ์การสั่นสะเทือนที่สามารถส่งผ่านจากเสาเข็มผ่านบริเวณผิวเสาเข็ม และปลายเสาเข็มต้องพิจารณาถึงอิทธิพลดังกล่าวด้วย



รูปที่ 2-3 การจำแนกแรงทางพลศาสตร์ตามระยะเวลาการให้แรง และจำนวนรอบของแรง

## 2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกโดยทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่โครงสร้างเสาเข็มได้คือการคำนวณโดยทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง

สมการคลื่นหน่วยแรงถูกพัฒนา และนำมาใช้ในปัจจุบันเพื่อคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆในการประเมินกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มด้วยสมการคณิตศาสตร์โดยการจำลองพฤติกรรมของเสาเข็ม และดินขึ้นก่อน หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์สมการคลื่นสำหรับเสาเข็มตอกคือ ใช้แบบจำลองของสมการอนุพันธ์บางส่วนในการส่งผ่านพลังงานจลน์เข้าไปในเสาเข็มเพื่อที่จะเอาชนะแรงต้านทานเชิงสถิต และพลวัตในดิน ในกระบวนการตอกเสาเข็มพลังงานจลน์จากตุ้มตอกจะส่งผ่านเสาเข็มในรูปแบบของคลื่นแรงอัดที่เคลื่อนที่จากหัวเสาเข็มไปสู่ปลายเสาเข็ม แล้วสะท้อนกลับขึ้นมายังหัวเสาเข็ม

GRLWEAP เป็นโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในขณะที่ถูกตอก กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจำนวนตอก (Blow count) และยังสามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่เกิดขึ้นขณะตอกเสาเข็มได้ เช่น แรงต้านทานเชิงพลวัตของดิน ความเร็วเสาเข็ม และค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นต้น ความสามารถต่างๆ เหล่านี้มีประโยชน์ต่อการวางแผนการก่อสร้าง เพราะทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มที่จะเกิดขึ้นภายใต้สภาพการตอก และ ระบบการตอกต่างๆ แล้วเลือกใช้ระบบการทำงานที่เหมาะสมได้ แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAPอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.1

### 2.3.1 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAP(Pile Dynamic Inc., 2005)

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาไว้ที่ระบบการตอกโดยวิธีลูกตุ้มปล่อยอิสระ(Drop hammer) และระบบการตอกโดยใช้แรงดันน้ำมัน(Hydraulic hammer) จึงจะอธิบายถึงเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองพฤติกรรมของค้อนเสาเข็ม ระบบตอกเสาเข็ม เสาเข็ม และ แรงต้านทานดินที่โปรแกรม GRLWEAP ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงสำหรับค้อนเสาเข็มแบบกระแทก(ECH)เท่านั้น โดยมีรายละเอียดเป็นดังนี้

#### 2.3.1.1 หลักการทำงานของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก (ECH)

ค้อนเสาเข็มประเภทนี้ต่างจากค้อนเสาเข็มดีเซลตรงที่ใช้การกระแทกของตุ้มน้ำหนักแทนแรงดันที่เกิดขึ้นจากการสันดาป ค้อนเสาเข็มแบบนี้จะใช้พลังงานทางกลในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงดันไอน้ำ อากาศ หรือ น้ำมัน (air steam hydraulic hammers) หรือใช้เชือกและรอกในการยกตุ้มน้ำหนัก (drop hammers) แล้วปล่อยให้ตกกระแทกกับเสาเข็ม ค้อนตอกบางชนิดอาจมีการเสริมแรงขณะตุ้มน้ำหนักตกลงเพื่อทำให้พลังงานการตอกสูงขึ้นได้ด้วย ค้อนเสาเข็มประเภทนี้จะถูกเรียกในเอกสารนี้ว่าค้อนเสาเข็มแบบกระแทก (external combustion hammers, ECH) ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก ได้แก่ ความเร็วกระแทกของตุ้มน้ำหนัก (impact velocity) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพลังงานการตอก และประสิทธิภาพการตอกของค้อน

#### 2.3.1.2 แบบจำลองค้อนเสาเข็ม

- ตุ้มน้ำหนัก

ตุ้มน้ำหนักเป็นส่วนประกอบสำคัญของค้อนเสาเข็มซึ่งมักจะถูกจำลองด้วยมวลน้ำหนักที่มีสปริงรองรับอยู่ด้านล่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของตุ้มน้ำหนักได้แก่น้ำหนัก (weight) ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.1) และความแข็ง (stiffness) ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.2)

$$W_{ri} = \gamma_i A_i \Delta L_i \quad (2.1)$$

$$k_{ri} = \frac{E_i A_i}{\Delta L_i} \quad (2.2)$$

โดยที่	$\gamma_i$	คือ หน่วยน้ำหนัก
	$A_i$	คือ พื้นที่หน้าตัด
	$\Delta L_i$	คือ ความยาว
	$E_i$	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนย่อยลำดับที่ $i$

สปริงของแบบจำลองตุ้มน้ำหนักตัวกลางสุดจะมีความซับซ้อนกว่าสปริงตัวอื่นๆ โดยโปรแกรมจะบวกความแข็งที่ได้จากสปริงของแท่นตอกหรือหมวกครอบหัวเสาเข็มเข้าไปด้วย และจะใช้พารามิเตอร์เสริมอีกสามตัวเพื่อจำลองถึงการแยกตัว การอัดตัวที่บริเวณรอยต่อ และการเสียรูปของหมอนรอง ซึ่งได้แก่ ระยะแยกตัว (tension slack distance,  $d_{st}$ ) ระยะอัดตัว (compression slack distance,  $d_{sc}$ ) และ สัมประสิทธิ์การคงตัว (coefficient restitution,  $c_s$ ) ตามลำดับ

- โครงค้อน

แบบจำลองของโครงค้อนจะประกอบด้วยมวลน้ำหนัก และสปริงสองชุด น้ำหนักของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่างค้อนเสาเข็มกับตุ้มน้ำหนัก

ความแข็งสปริงของโครงค้อนสามารถคำนวณจากความแข็งของเสาที่ยึดระหว่างชิ้นส่วนด้านบนและด้านล่างของค้อนเข้าด้วยกันหรือดูจากตัวช่วยของโปรแกรม ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลที่จะเอียงเพียงพออาจจะจำลองด้วยสปริงที่ยุบตัวเท่ากับ 5 ไมโครเมตรภายใต้น้ำหนักของโครงค้อนเองก็ได้

- การสูญเสียพลังงานของค้อน (hammer energy losses)

การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงจะใช้แรงกระทำเชิงพลวัตที่หัวเสาเข็มเป็นพารามิเตอร์หลักในการวิเคราะห์ ในกรณีของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก แรงกระทำดังกล่าวจะคำนวณได้จากความเร็วตกกระทบของตุ้มน้ำหนัก (ram impact velocity,  $v_{ri}$ ) และการวิเคราะห์จะเริ่มขึ้นหลังจากการกระแทก

การสูญเสียพลังงานอาจเกิดจากแรงเสียดทานในขณะตก หรือจากปัจจัยอื่นๆ เช่น จากการเยื้องศูนย์ ฯลฯ ซึ่งสามารถจำลองโดยการปรับลดพลังงานลงด้วยค่าประสิทธิภาพการตอก ( $e_h$ ) สำหรับกรณีทั่วไปผู้วิเคราะห์อาจเริ่มต้นจากการวิเคราะห์โดยใช้ค่าที่แสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้สำหรับค้อนเสาเข็มต่างๆ ในฐานะข้อมูลของโปรแกรม อย่างไรก็ตามควรทำการตรวจสอบและปรับแก้ค่าหากมีข้อมูลการตรวจวัดจริง



ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์การตอกของค้อนเสาเข็มประเภทต่างๆ

$e_i$	ประเภทของค้อนเสาเข็ม
0.67	ค้อนเสาเข็มแบบกระแทกที่ใช้แรงดันอากาศหรือไอน้ำ (single acting air / steam hammers)
0.50	ค้อนเสาเข็มแบบกระแทกที่ใช้แรงดันอากาศหรือไอน้ำทั้งสองด้านของตุ้ม (double acting air / steam hammers)
0.80	ค้อนเสาเข็มดีเซล (diesel hammers)
0.80	ค้อนเสาเข็มแบบกระแทกที่ใช้แรงดันน้ำมัน (single acting / power assisted hydraulic hammers)
0.50	ค้อนเสาเข็มแบบกระแทกที่ใช้แรงดันน้ำมันทั้งสองด้านของตุ้ม (double acting air / steam / hydraulic hammers)
0.95	ค้อนเสาเข็มที่พลังงานระบุได้จากการตรวจวัดความเร็วตกกระทบ (hammers whose rating is based on measured impact velocity)
1.00	ค้อนเสาเข็มแบบสั่น (vibratory hammers)

### 2.3.1.3 แบบจำลองระบบตอกเสาเข็ม

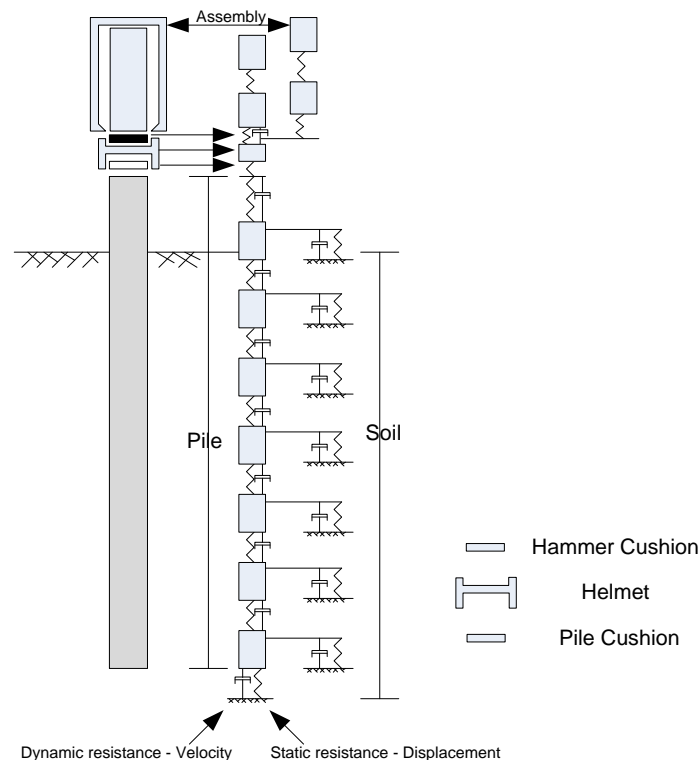
ระบบตอกเสาเข็มประกอบด้วย แผ่นรองตอก หมอนรองค้อน หมวกครอบหัวเสาเข็ม และ หมอนรองหัวเสาเข็ม(สำหรับเสาเข็มคอนกรีต) ซึ่งจำลองในโปรแกรมด้วยสปริงแบบไม่เชิงเส้น 2 ตัวประกอบอยู่ด้านบน และด้านล่างของมวลน้ำหนัก 1 ตัว นอกจากนี้ยังมีตัวหน่วงอีกหนึ่งตัวต่อขนานกับสปริงที่ใช้แทนหมอนรองค้อนด้วย มวลน้ำหนักของระบบตอกเสาเข็มจะรวมน้ำหนักของอุปกรณ์ทุกชิ้นที่อยู่ระหว่างค้อนตอกกับเสาเข็มเช่น แผ่นตอก หมอนรอง เหล็กตอกส่งหัวเสาเข็ม

สปริงด้านบนของแบบจำลองระบบตอกเสาเข็มใช้เป็นตัวแทนของหมอนรองค้อนและจะถูกรวบเป็นชิ้นเดียวกับสปริงตัวล่างสุดของแบบจำลองตุ้มน้ำหนักของค้อนตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ (ดูรูปที่ 2-4 ประกอบ) ในกรณีค้อนเสาเข็มแบบกระแทกที่ไม่ใช้หมอนรองค้อน โปรแกรมจะนำสปริงตัวล่างสุดของตุ้มน้ำหนักมาต่อกับหมวกครอบหัวเสาเข็มเลย สำหรับระบบตอกที่ไม่มีหมวกครอบหัวเสาเข็ม สปริงของตุ้มน้ำหนักตัวล่างสุดจะต่อกับสปริงตัวบนสุดของเสาเข็มโดยตรง

สำหรับค่าคงที่ของตัวหน่วงในแบบจำลอง(damping constant,  $\alpha$ ) จะคำนวณจากสมการ

$$c_{dh} = \frac{1}{50} c_{dhi} \sqrt{k_r m_a} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $c_{dhi}$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วย (โปรแกรมตั้งค่าไว้เป็น 1)  
 $k_r$  คือ ความแข็งของหมอนรองค้อน  
 $m_a$  คือ มวลของแท่นตอกหรือหมวกครอบหัวเสาเข็ม



รูปที่ 2-4 แบบจำลองระบบตอกเสาเข็มของค้อนเสาเข็มแบบกระแทก

- สัมประสิทธิ์การคืนตัว (coefficient of restitution หรือ COR)

สัมประสิทธิ์การคืนตัวของวัตถุสองวัตถุชนกันคือ อัตราส่วนของความเร็วหลังชนกับความเร็วก่อนชนที่เกิดขึ้นในแนวแกนที่วัตถุตกกระทบ

สำหรับสัมประสิทธิ์การคืนตัวของหมอนรองเสาเข็ม และหมอนรองค้อนเสาเข็มคือ คุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานซึ่งถูกกับเก็บไว้ชั่วคราวในหมอนรองขณะได้รับแรงกด สำหรับโปรแกรม GRLWEAP กำหนดให้ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 ตัวอย่างเช่น ลูกบอลเหล็กตกลงบนแผ่นเหล็กซึ่งจะเกิดการดังกลับ 100% ของความสูงที่ปล่อยลูกบอล ในกรณีนี้ COR เท่ากับ 1.0 แต่ในอีกทางหนึ่งถ้าวัสดุที่รองรับเป็นฟองน้ำลูกบอลอาจจะหยุดนิ่ง และไม่ดังกลับอีก ในกรณีนี้ COR เท่ากับ 0.0 ในโปรแกรม GRLWEAP ไม่สามารถวิเคราะห์เมื่อ COR เท่ากับ 0.0 ได้

โดยสามารถใช้ค่าต่ำสุดที่สามารถป้อนในโปรแกรมคือ 0.1 แทน ในกรณีที่เป็นวัสดุอื่น ๆ ซึ่งผลิตขึ้นโดยมนุษย์สามารถประมาณค่า COR เท่ากับ 0.8 และกรณีไม้ COR กำหนดอยู่ที่ 0.5

#### 2.3.1.4 แบบจำลองเสาเข็ม

แบบจำลองเสาเข็มประกอบด้วย สปริง มวล และตัวหน่วง (ดูรูปที่ 2-5) เสาเข็มถูกแบ่งออกเป็น  $N$  ท่อนซึ่งมีความยาวตามสมการ (2.4) โดยโปรแกรมจะคำนวณค่าตั้งต้นของ  $\alpha_i$  เพื่อให้ทำให้เสาเข็มแต่ละท่อนมีความยาวเท่ากัน และยาวท่อนละประมาณ 1 เมตร (อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถปรับค่าเพื่อให้เสาเข็มแต่ละท่อนมีความยาวน้อยลงเพื่อเพิ่มความละเอียดของการคำนวณได้ เช่นในกรณีของการตอกเสาเข็มที่ไม่ใช้หมอนรองค้อน)

$$L_i = \alpha_i L \quad (2.4)$$

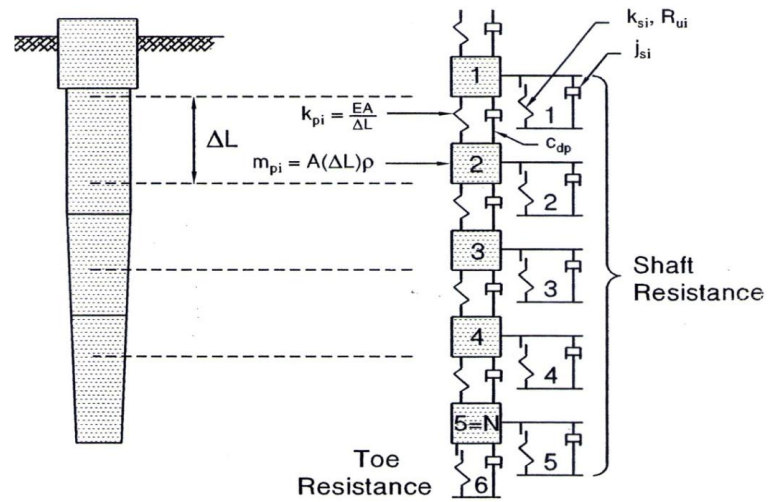
เมื่อแบ่งเสาเข็มออกเป็นท่อนย่อยๆ แล้วโปรแกรมจะคำนวณความแข็งของสปริงและน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละท่อนในลักษณะเดียวกับแบบจำลองของตึมน้ำหนัก (สมการ (2.1) และ (2.2))

#### 2.3.1.5 แบบจำลองดิน

แบบจำลองในโปรแกรม GRLWEAP มีลักษณะเหมือนกับแบบจำลองที่ถูกเสนอโดยสมิท ซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วงดังแสดงในรูปที่ 2-5 ในขณะที่เสาเข็มถูกกดให้ทรุดตัวลง แรงต้านทานดินเชิงสถิต (static resistance,  $R_{si}$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการยุบตัวของสปริง (displacement,  $u_i$ ) จนถึงระยะคราก (quake,  $q_i$ ) และหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่เท่ากับแรงต้านทานเชิงสถิตสูงสุด (ultimate static resistance,  $R_{ui}$ ) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R_{si} = \begin{cases} ku_i & ; u_i < q_i, k = \frac{R_{ui}}{q_i} \\ R_{ui} & ; u_i \geq q_i \end{cases} \quad (2.5)$$

เมื่อเสาเข็มเคลื่อนที่ขึ้น โปรแกรมใช้ความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับสมการ (2.5) แต่จะจำกัดแรงเสียดทานที่ผิวไว้ที่  $-R_{ui}$  และบังคับไม่ให้เกิดแรงดึงที่ปลายเสาเข็ม



รูปที่ 2-5 แบบจำลองเสาเข็มและดิน

จากแบบจำลองในการวิเคราะห์ข้างต้นดังนั้นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ด้วย GRLWEAP เป็นดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ด้วยGRLWEAP

ข้อมูล	รายละเอียด
ตุ้มตอกเสาเข็ม	<ul style="list-style-type: none"> <li>ชนิดของตุ้มตอกเสาเข็ม</li> <li>น้ำหนักตุ้ม</li> <li>ระยะยก</li> <li>ประสิทธิภาพการตอก</li> <li>พลังงานการตอก</li> </ul>
เสาเข็ม	<ul style="list-style-type: none"> <li>วัสดุเสาเข็ม</li> <li>ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสาเข็ม</li> <li>ความยาวเสาเข็ม</li> <li>ความลึกที่ตอกเสาเข็ม</li> <li>พื้นที่หน้าตัด</li> <li>ความยาวรอบรูปหน้าตัดเสาเข็ม</li> </ul>
หมอนรองตุ้มตอกเสาเข็ม และ หมอนรองหัวเสาเข็ม	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความแข็ง</li> <li>พื้นที่หน้าตัด</li> <li>โมดูลัสยืดหยุ่น</li> <li>ความหนาของหมอนรอง</li> <li>สัมประสิทธิ์การคืบตัว</li> <li>น้ำหนักของหมวกครอบหัวเสาเข็ม</li> </ul>
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลดินตามความลึก</li> <li>ค่า N-SPT และพารามิเตอร์อื่นๆตามความลึก</li> <li>ระดับน้ำใต้ดิน</li> </ul>

### 2.3.2 การวิเคราะห์แบบพลวัตประเภทต่างๆของโปรแกรม GRLWEAP

การวิเคราะห์แบบพลวัตของโปรแกรม GRLWEAP ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้งานสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

### 2.3.2.1 การวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟกำลังรับน้ำหนัก (bearing graph)

การวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟกำลังรับน้ำหนักจะคำนวณหาจำนวนตอกที่เกิดขึ้นภายใต้สมมติฐานของแรงต้านทานดินที่กำหนด หลังจากการคำนวณเสร็จสิ้นลงแล้วโปรแกรมจะแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนตอกกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

### 2.3.2.2 การวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟสำหรับควบคุมงาน (inspector's chart)

กราฟกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์โดยปกติตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าระยะตอกของค้อนมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง สมมติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับสภาพการทำงาน เพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าวผู้ใช้สามารถใช้ตัวเลือกการวิเคราะห์นี้เพื่อสั่งให้โปรแกรมปรับเปลี่ยนระยะตอกเป็นค่าต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ตามค่านั้นๆ ได้โดยอัตโนมัติ

สำหรับค้อนเสาเข็มแบบกระแทก โปรแกรมจะปรับระยะตอกจากค่าที่ผู้ใช้ระบุไปถึงระยะตอกสูงสุดของค้อนแล้วทำการวิเคราะห์ตามค่านั้นๆ ได้โดยอัตโนมัติเช่นกัน ในกรณีที่ผู้ใช้ไม่ได้ระบุระยะตอกขั้นต่ำโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์โดยปรับเปลี่ยนระยะตอกจากร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 100 ให้เอง

### 2.3.2.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการตอก (drivability analysis)

การวิเคราะห์ประเภทนี้แสดงผลการวิเคราะห์กราฟกำลังรับน้ำหนักตามความลึกการตอกของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นโดยอัตโนมัติ(ผู้วิเคราะห์สามารถกำหนดระดับความลึกได้) และใช้หาจำนวนตอกที่เกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มจมตัวตามความลึกต่างๆ ผลวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประมาณระยะเวลาในการก่อสร้างได้ โดยดูจากอัตราตอกของค้อนและจำนวนตอกที่เกิดขึ้นตามความลึกต่างๆ

ข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม ประกอบด้วย แรงต้านทานดินเชิงสถิตซึ่งอาจคำนวณได้จากผลเจาะสำรวจดิน หรือจากการวิเคราะห์แบบสถิตอย่างง่ายที่โปรแกรม GRLWEAP ได้จัดเตรียมไว้(อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.3) ระยะคราก สัมประสิทธิ์ความหน่วง และ ตัวประกอบการพัฒนากำลัง(gain/loss factors)

- ตัวประกอบการพัฒนากำลัง(gain/loss factors)

แรงต้านทานเชิงสถิตของดินที่ได้จากการคำนวณทั่วไปมักเป็นค่าแรงต้านทานในระยะยาวของดิน (long term static resistance, LTSR) ซึ่งแตกต่างจากแรงต้านทานเชิงสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกเสาเข็ม (static resistance to driving, SRD) โปรแกรมจะประมาณค่า SRD จาก

LTSR โดยใช้ตัวประกอบการพัฒนากำลังสัมบูรณ์ (gain/loss factors,  $f_r$ ) ซึ่งเป็นค่าควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงต้านทานสถิตสัมบูรณ์ของดิน และตัวประกอบการพัฒนากำลังสำหรับดินสัมพัทธ์ (setup factor,  $f_s$ ) ซึ่งเป็นค่าควบคุมการเปลี่ยนแปลงโดยสัมพัทธ์ของแรงต้านทานสถิตของดินชั้นต่างๆ (ตารางที่ 2-3) ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ

$$LTSR = f_s \cdot SRD \quad (2.6)$$

ส่วนกลับของตัวประกอบการพัฒนากำลังสำหรับดินมีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบการลดกำลังของดิน (reduction factor,  $f_{RD}$ )

$$f_{RD} = \frac{1}{f_s} \quad (2.7)$$

หรืออาจกล่าวได้ว่าดินมีร้อยละของการสูญเสียกำลัง (percentage of loss,  $p_L$ ) เท่ากับ

$$1 - f_{RD} \quad (2.8)$$

ตัวอย่างเช่นดินเหนียวที่มี  $f_s = 2.5$  จะมีกำลังลดลงเหลือร้อยละ 40 ( $f_{RD} = 0.4$ ) ในสภาพระยะยาวหรือสูญเสียกำลังไปเท่ากับร้อยละ 60 ( $p_L = 0.6$ )

ตารางที่ 2-3 ตัวประกอบการพัฒนากำลังสำหรับดินสัมพัทธ์ ( $f_s$ ) (Pile Dynamic Inc., 2005)

ชนิดของดิน	$f_s$
ดินเหนียว(clay)	2.00
ดินทราย(sand)	1.20
ดินทรายแป้ง(silt)	1.50

เพื่อศึกษาความอ่อนไหวของผลวิเคราะห์ต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มและการเปลี่ยนแปลงแรงต้านทานในขณะตอกเสาเข็ม โปรแกรมจะยอมให้ผู้ใช้แปรเปลี่ยนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยรวมได้โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ตัวประกอบการพัฒนากำลังของเสาเข็ม (gain/loss factor,  $f_{GL}$ )

ในการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์  $f_{GL}$  โปรแกรมจะตรวจหาชั้นดินที่สูญเสียกำลังได้ไวที่สุด (หรือมีค่า  $p_L$  มากที่สุด) แล้วกำหนดค่า  $f_{RD}$  ของชั้นดินนั้นให้เท่ากับ  $f_{GL}$  (แทนที่จะคำนวณค่าจาก

$f_s$ ) สำหรับดินในชั้นอื่นๆ ที่มีความไวตัวน้อยกว่า โปรแกรมจะคำนวณหาความไวตัวสัมพัทธ์ (relative sensitivity,  $f_{si}^*$ ) จาก

$$f_{si}^* = \frac{P_{Li}}{P_{L,max}} \quad (2-9)$$

แล้วกำหนดค่าตัวประกอบการลดกำลังของดินชั้นนั้น ( $f_{RDi}$ ) ให้มีค่าเท่ากับ

$$f_{RDi} = (1 - f_s^*) + f_s^* \cdot f_{GL} \quad (2-10)$$

ในกรณีที่ต้องการจำลองผลของดินที่ถูกรบกวนในขณะที่ตอกเสาเข็มตามความลึก เช่น ดินชั้นบนที่ตอกเสาเข็มผ่านแล้วจะมีกำลังเท่ากับแรงต้านทานเชิงสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกเสาเข็ม (SRD) ในขณะที่ดินด้านล่างที่ปลายเสาเข็มยังจมลงไม่ถึงจะมีกำลังเท่ากับแรงต้านทานในระยะยาวของดิน (LTSR) และด้วยเหตุผลดังกล่าวกำลังของดินบริเวณปลายเสาเข็มจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังในระยะยาวเสมอเมื่อใช้การวิเคราะห์แบบนี้

### 2.3.3 การวิเคราะห์แรงต้านทานดินเชิงสถิต (static geotechnical analysis)

วิธีการวิเคราะห์แรงต้านทานดินเชิงสถิตอย่างง่ายซึ่งใช้ในกระบวนการป้อนค่าแบบจำลองดินของโปรแกรม GRLWEAP สามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

#### 2.3.3.1 วิธีพิจารณาตามชนิดของดิน (soil type based method; ST)

วิธีวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้กระบวนการป้อนค่าแบบจำลองดินสำหรับการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนัก และการวิเคราะห์ความสามารถในการตอก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลดินที่ไม่ละเอียดนัก โดยอ้างอิงสมมติฐานของ Bowles และ Fellenius ซึ่งได้อ้างอิงไว้ในการศึกษาของ Hannigan et al. (1998)

#### 2.3.3.2 วิธีพิจารณาตามค่าแรงต้านทานการตอก หรือค่า N-SPT (SPT N-value based method; SA)

วิธีการวิเคราะห์นี้พิจารณาจากค่า N-SPT และชนิดของดิน โดยพารามิเตอร์ที่สามารถใช้ร่วมกับวิธีวิเคราะห์นี้ได้ต้องอยู่ในรูปแบบค่าการกระจายแรงต้านทานเท่านั้น ในกรณีที่ข้อมูลตั้งต้นเป็นข้อมูลชนิดอื่น เช่น กำลังรับแรงกดแกนเดียวของดิน เป็นต้น จำเป็นต้องแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่า N-SPT (ตัวอย่างเช่น  $S_u = (0.687N)/2$  ตัน/ตารางเมตร สำหรับกรณี CH หรือดิน



เหนียวที่มีการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินมาก บั่นได้ง่าย) โดยค่า N-SPT ที่ใช้ในโปรแกรม GRLWEAP นั้นเป็นค่าที่ไม่ผ่านการปรับแก้ โดยโปรแกรมได้จำกัดค่า N-SPT สูงสุดไว้ที่ 60 ครั้ง/ฟุต

วิธีการวิเคราะห์หิ้นไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หิ้น สำหรับดินชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ระบุในโปรแกรม ผู้วิเคราะห์ต้องป้อนค่าหน่วยแรงต้านทานที่ผิว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มด้วย นอกจากนี้ผู้วิเคราะห์ยังสามารถใส่ค่าระดับน้ำใต้ดินโดยอ้างอิงจากระดับผิวดิน และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกในอดีต เนื่องจากค่าความเค้นประสิทธิผลที่ผิวดินไม่เป็นศูนย์ได้อีกด้วย

GRLWEAP เป็นการประเมินก่อนตอกโดยใช้ข้อมูลเชิงกายภาพของอุปกรณ์การตอก และชั้นดินซึ่งอาจจะให้ผลที่ไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในขณะตอก จึงมีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในขณะตอก ค่าตรวจวัดนี้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงวิธีการคำนวณ GRLWEAP ให้แม่นยำมากขึ้นได้ และยังสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเสาเข็ม และดินได้ด้วย เครื่องมือดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า Pile Driving Analyzer (PDA)

จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ และการยืนยันความถูกต้องของผลจากการวิเคราะห์ GRLWEAP Rausche et al.(2004) ได้รายงานความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ GRLWEAP และการตรวจวัด PDA เพื่อระบุความแปรปรวน และความไม่แน่นอนของการคาดการณ์ค่าต่างๆจากการตอกเสาเข็มไว้ว่าความเค้นที่หัวเสาเข็ม และการส่งผ่านพลังงานของเสาเข็มเหล็ก และเสาเข็มคอนกรีตกับหมอนรองเสาเข็มที่ใช้แล้วมีความใกล้เคียงกัน โดยค่าจากการคาดการณ์มากกว่าค่าจากการทดสอบเล็กน้อย

นอกจากนี้ Rausche et al.(2004) ได้แนะนำการปรับปรุงวิธีวิเคราะห์ GRLWEAP ให้แม่นยำมากขึ้นโดยกำหนดคุณสมบัติของหมอนรองเสาเข็มในการวิเคราะห์ GRLWEAP ให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของหมอนรองเสาเข็มในการทดสอบจริงในแต่ละครั้ง สำหรับการตอกครั้งสุดท้ายให้กำหนดความหนาของหมอนรองเสาเข็มเท่ากับ  $2/3$  เท่าของความหนาปกติ และโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2 เท่าของค่าเดิม เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้อัดจาก 210 MPa เป็น 300 MPa เป็นต้น

#### 2.4 Pile Driving Analyzer (PDA)

การวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วย PDA ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1960 ให้เป็นวิธีการตรวจวัดการตอบสนองทางพลวัตของเสาเข็มขณะตอก เพื่อวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม และประเมินความสามารถในการตอกเสาเข็ม ตาม ASTM standard for PDA testing (ASTM D 4945-96) ได้ระบุไว้ว่าการทดสอบ PDA จะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับความเครียดหรือแรง และความเร่ง ความเร็ว หรือการเคลื่อนตัวของเสาเข็มภายใต้แรงกระแทก ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการประเมิน

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม ความเค้นในเสาเข็ม ประสิทธิภาพของตุ้มตอก และคุณลักษณะของดินเชิงพลวัตเช่น สัมประสิทธิ์ความหน่วงของดิน และค่าแควก

เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีการคำนวณทางด้านคอมพิวเตอร์ และต้นทุนที่ต่ำลง โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับสมการคลื่น และการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม เช่น CAPWAP จึงถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งของ PDA ในการวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม อย่างไรก็ตามการทดสอบPDA ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายที่จะใช้แทนการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์ตามที่ได้ระบุไว้ใน ASTM D 4945-96 เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบPDAมีค่าต่ำกว่าการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีPDAจะเป็นเครื่องมือที่ดี และสามารถช่วยลดต้นทุนได้ถ้าใช้ให้เหมาะสม และมีข้อมูลในการสนับสนุนมากเพียงพอเช่น สามารถทดสอบเสาเข็มได้จำนวนมากในโครงการหนึ่งแทนที่จะทดสอบได้เพียงหนึ่งหรือสองต้นซึ่งความแปรปรวนจากการทดสอบที่ได้สามารถลดอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้ในแต่ละโครงการลงได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลPDAอย่างต่อเนื่องโดยทางเลือกที่ดีที่สุดคือการเปรียบเทียบกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เครื่องมือPDAในการศึกษาการประเมินระดับการสั่นสะเทือนซึ่งพิจารณาจากความรุนแรงจากแหล่งกำเนิดตามแนวทางของงานวิจัยนี้ ตัวอย่างเช่น Robinson(2006) ได้รายงานว่าความเร็วที่ปลายเสาเข็มซึ่งคำนวณจากผลการตรวจวัดPDA ตามสมการที่เสนอโดยRausche et al.(1985) มีความสอดคล้องกันดีกับข้อมูลความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมีที่ผิวดิน และมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(R squared) เท่ากับ 0.838 แต่เนื่องจากข้อมูลที่แสดงความสอดคล้องกันนี้เป็นเพียงข้อมูลจากเสาเข็มเพียงต้นเดียวเท่านั้น ในขณะที่เสาเข็มต้นอื่นๆในงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ข้างต้นค่อนข้างต่ำดังนั้นข้อมูลข้างต้นในงานวิจัยนี้ยังไม่เพียงพอที่จะสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนได้

## 2.5 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม

Ginchachov และ Kovalev(1995) ได้ศึกษาการคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนขณะตอกเสาเข็มด้วยข้อมูลคุณสมบัติชั้นดิน ขนาดเสาเข็ม และพารามิเตอร์ต่างๆของระบบตอกเสาเข็ม โดยเชื่อมโยงค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม และดินรอบเสาเข็มที่ระยะอ้างอิง(ผิวเสาเข็ม)ขณะตอกซึ่งเป็นค่าจากการตรวจวัดเข้าด้วยกันให้อยู่ในรูปของตัวประกอบการลื่นไถล(slip factor;  $\psi$ ) โดย

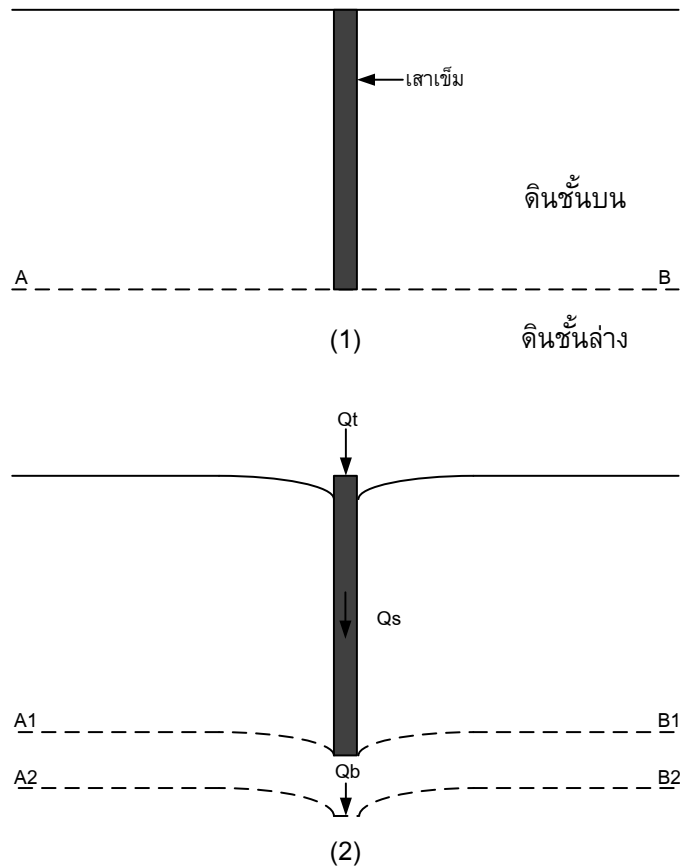
$$\psi = \frac{2a_n}{c}$$
 เมื่อ  $a_n$  คือ ขนาดการสั่นสะเทือนของดินรอบเสาเข็มขณะตอก และ  $c$  คือการทรุดตัวของ

เสาเข็มขณะตอก จากผลการศึกษาพบว่า  $\nu$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.03 สำหรับดินเหนียวที่มีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7

จะเห็นได้จากการศึกษาข้างต้น Ginchachov และ Kovalev(1995) ได้ประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวของเสาเข็มขณะตอก(เชิงพลวัต) ซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม แต่การประเมินด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องทำการทดสอบใหม่ทุกครั้งในแต่ละโครงการที่ทำการประเมินทำให้อาจไม่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ แม้ว่าการศึกษานี้จะมีการเสนอค่าการทรุดตัวของเสาเข็มขณะตอกเมื่อดินเป็นดินเหนียว และพิจารณาตามค่าขีดจำกัดเหลวเพื่อใช้ในการคาดการณ์ล่วงหน้าแล้ว แต่ยังไม่มีการศึกษาในดินชนิดอื่นเช่น ดินทราย และยังไม่คำนึงถึงอิทธิพลของคุณสมบัติของตุ้มตอกที่แตกต่างกันในแต่ละโครงการด้วย นอกจากนี้วิธีการตอกทดสอบอาจทำให้เกิดผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงได้ถ้าไม่มีการป้องกันล่วงหน้า

ในการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการพิจารณาแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจากการทรุดตัวของเสาเข็มโดยการคำนวณจากสมการรูปแบบปิด(closed form solution)ซึ่งใช้ในการคาดการณ์การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่งซึ่งมีความแม่นยำ และสามารถคำนวณได้ง่ายไม่ซับซ้อน(Randolph และ Wroth,1979) แต่เนื่องจากสมการดังกล่าวมีเงื่อนไขสำหรับดินที่มีสภาวะอีลาสติก หรือใช้สำหรับการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มในสภาวะสถิต(อัตราการใช้พลังงานแก่เสาเข็มต่ำ เช่นการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์) แรงต้านทานสุทธิที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงต้านทานที่ผิวเชิงสถิต และแรงต้านทานที่ปลายเชิงสถิต ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนไปยังดินรอบเสาเข็ม ทฤษฎี และสมการการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวเมื่อแรงกระทำในแนวดิ่งซึ่งถูกอธิบายไว้อย่างละเอียดในการศึกษาของ Randolph(1977) และ Randolph & Wroth(1978a) โดยสรุปเป็นดังนี้

การวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวเนื่องจากแรงกระทำในแนวดิ่งตั้งอยู่ในเงื่อนไขของดินที่มีสภาพเป็นอีลาสติก วิเคราะห์โดยใช้โมดูลัสของแรงเฉือน(G)ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความลึกและอัตราส่วนปริมาตรของ( $\nu$ ) ดินรอบเสาเข็มจะถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นด้วยเส้น AB ที่ระดับปลายเสาเข็ม(รูปที่ 2-6) ในขั้นต้นจะตั้งสมมติฐานว่าดินที่อยู่เหนือระดับเส้น AB จะเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นที่ส่งผ่านจากผิวเสาเข็มเท่านั้น และดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับเส้น AB จะเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นที่ปลายเสาเข็มเท่านั้น โดยสมมติฐานนี้จำเป็นต้องมีการดัดแปลงสำหรับกรณีที่เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินที่ด้านบนกับดินชั้นที่อยู่ต่ำกว่า



รูปที่ 2-6 (1) การแบ่งดินชั้นบน และดินชั้นล่างด้วยเส้น AB (2) รูปแบบการเปลี่ยนรูปร่างแยกกันระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง

การทรุดตัวเชิงสถิติของดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม (Frank, 1974; Baguelin et al., 1975) เป็นไปตามสมการที่ (2.11)

$$W_f = \frac{\zeta \tau_0 r_0}{G_f} \quad (2.11)$$

เมื่อ	$W_f$	คือ การทรุดตัวเชิงสถิติของดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม (เมตร)
	$\tau_0$	คือ ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ $\frac{Q_f}{P_L L}$ (ตัน/ตารางเมตร)
	$Q_f$	คือ แรงต้านทานเชิงสถิติที่ผิวเสาเข็ม (ตัน)
	$P_L$	คือ เส้นรอบรูปเสาเข็ม (เมตร)
	$L$	คือ ความลึกส่วนที่จมของเสาเข็ม (เมตร)
	$r_0$	คือ รัศมี หรือรัศมีเทียบเท่าของเสาเข็ม (เมตร)
	$G_f$	คือ โมดูลัสของแรงเฉือนที่ปลายเสาเข็ม (ตัน/ตารางเมตร)

$G_{\frac{l}{2}}$	คือ โมดูลัสแรงเฉือนเฉลี่ยที่กึ่งกลางชั้นดินที่อยู่เหนือระดับเส้น AB (ต้น/ตารางเมตร)
$\zeta$	คือ การเปลี่ยนแปลงแบบลอการิทึมของการทรุดตัวกับรัศมีที่ระยะทางใดๆ ( $r$ ) (หมายเหตุ: กรณีพิจารณาที่ผิวเสาเข็มจะมีค่าเท่ากับ $\ln(\frac{r_m}{r_0})$ )
$r_m$	คือ ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางเสาเข็มที่ได้รับอิทธิพลจากการทรุดตัวเชิงสถิติของดินที่รอบผิวเสาเข็ม (เมตร) มีค่าเท่ากับ $2.5mL(1-\nu)$
$m$	คือ $G_{\frac{l}{2}} / G_l$
$\nu$	คือ อัตราส่วนปัวซอง

การทรุดตัวเชิงสถิติของดินที่ปลายเสาเข็มเป็นไปตามสมการ Boussinesq (Timoshenko & Goodier, 1970) โดยพิจารณาให้ปลายเสาเข็มกระทำบนผิวของดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับเส้น AB เป็นไปตามสมการที่(2.12)

$$W_b = \frac{Q_b(1-\nu)}{4r_0G_l} \quad (2.12)$$

เมื่อ	$W_b$	คือ การทรุดตัวเชิงสถิติของดินที่บริเวณปลายเสาเข็ม (เมตร)
	$Q_b$	คือ แรงต้านทานเชิงสถิติที่ปลายเสาเข็ม (ตัน)

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประเมินระดับการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็มเป็นปัญหาในรูปแบบพลศาสตร์จึงต้องพิจารณาการทรุดตัวเชิงสถิติในรูปแบบของความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของเสาเข็มซึ่งได้รับอิทธิพลของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม ( $Q_f^*$ ) แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม ( $Q_b^*$ ) และความถี่ของแรงที่กระทำ (frequency;  $f$ )

เมื่อพิจารณาว่าคลื่นที่ส่งออกมาอยู่รูปของคลื่นไซน์ (sine wave) ตามสมการที่(2.13)

$$u = u_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.13)$$

เมื่อ	$u$	คือ ขนาดของการทรุดตัวที่เวลาใดๆ (เมตร)
	$u_0$	คือ ขนาดการทรุดตัวสูงสุด (เมตร)
	$t$	คือ เวลาที่พิจารณา (วินาที)
	$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ (เรเดียน/วินาที)
	$f$	คือ ความถี่ของแรงที่กระทำ (เฮิรตซ์)

$\phi$  คือ มุมเฟส (เรเดียน)

อนุพันธ์ของสมการที่(2.13)จะได้สมการความเร็วของการทรุดตัวที่เวลาใดๆดังสมการที่(2.14)

$$u' = u_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (2.14)$$

และจะได้ความเร็วอนุภาคสูงสุดโดยประมาณดังสมการที่(2.15)

$$u' = v \approx u_0 \omega = u_0 (2\pi f) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $u' = v$  คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุด (เมตร/วินาที)

จากการพิสูจน์ข้างต้น การทรุดตัวของดินเชิงสถิติที่บริเวณผิวเสาช่อมในสมการที่(2.11) และการทรุดตัวเชิงสถิติที่ปลายเสาช่อมในสมการที่(2.12) สามารถแสดงในรูปของความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณผิวเสาช่อม และปลายเสาช่อมได้ดังสมการที่(2.16) และสมการที่(2.17) ตามลำดับ

$$V_f = 2\pi f W_f^* = \frac{2\pi f \zeta r_0 Q_f^*}{G_l P_L L} \quad (2.16)$$

$$V_b = 2\pi f W_b^* = \frac{2\pi f Q_b^* (1-\nu)}{4r_0 G_l} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $V_f$  คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนของดินที่ผิวเสาช่อม (เมตร/วินาที)

และ  $V_b$  คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนของดินที่ปลายเสาช่อม (เมตร/วินาที)

## 2.6 การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นดิน (wave propagation in the ground)

### 2.6.1 แบบจำลองการลดทอนของคลื่นจากการตอกเสาช่อม

พลังงานของคลื่นพื้นผิวที่ส่งผ่านไปในดินจะมีขนาดลดลงแปรผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การลดทอน (attenuation) ซึ่งการลดลงของคลื่นไหวสะเทือนไปตามผิวดิน สามารถหาได้จากแบบจำลองการลดทอน (attenuation model) ซึ่งได้แสดงไว้ในงานวิจัยต่างๆ (Bonitz(1931), Woods and Jedele(1985), Massarsch(1992), Jin Sun Kim and Dong Soo Kim (1999)) ไว้ดังนี้

$$V_2 = V_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{-n} e^{-\alpha(R_2-R_1)} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $R_1$  คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือน ณ ตำแหน่งที่ 1

$R_2$  คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือน ณ ตำแหน่งที่ 2

- $V_1$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นไหวสะเทือน ที่ระยะ  $R_1$
- $V_2$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นไหวสะเทือน ที่ระยะ  $R_2$
- $n$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต (geometric damping coefficient)
- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ (material damping coefficient)

จากสมการที่ (2.18) พบว่า การลดลงของแอมพลิจูดตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นนั้น ขึ้นกับปัจจัย 2 ประการ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต,  $n$  และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ,  $\alpha$

1. การลดทอนเชิงเรขาคณิต คือ การลดทอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มของพลังงานคลื่นลดลงไปเมื่อหน้าคลื่นขยายตัวครอบคลุมบริเวณที่กว้างขึ้น โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิด ชนิดของแรงสั่นสะเทือนเช่น ฮาร์โมนิกส์ หรือ อิมพัลส์ และชนิดของคลื่นเช่น คลื่นหลัก(body wave) หรือคลื่นพื้นผิว(surface wave) เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตในแหล่งกำเนิดคลื่นแบบต่างๆเป็นดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตในแหล่งกำเนิดคลื่นแบบต่างๆ(Jin Sun Kim & Dong Soo Kim, 1999)

Vibration sources used in this study	Location/Type of source	Induced wave type	$n$
Short length and high speed train	Surface/Combination of point and infinite line	Body wave	1.5
Hydraulic compaction	Surface/Point	Surface wave	0.5
Long length and slow speed train	Surface/Infinite line	Body wave	1.0
In-depth blasting friction pile driving	In-depth/Point	Body wave	1.0

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต,  $n$  จากงานวิจัยอื่นที่หาค่าดังกล่าวในเชิงความสัมพันธ์กับชนิดของดินดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตในดินชนิดต่างๆ (Amick & Gendreau, 2000)

Investigator	Soil Type	Geometric Attenuation, $\gamma$
Wiss (1967)	Sands	1.0
	Clays	1.5
Brenner & Chittikuladilok	Surface sands	1.5
	Sand fill over soft clays	0.8 - 1.0
Attewell & Farmer	Various soils, generally firm	1.0
Nicholls, Johnson & Duvall	Firm soils and rock	1.4 - 1.7
Martin	Clay	1.4
	Silt	0.8
Amick & Ungar	Clay	1.5

2. การลดทอนเชิงวัสดุ คือ การลดทอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นดินไม่เป็นวัสดุแบบอัสลาติกโดยสมบูรณ์ ทำให้พลังงานคลื่นสูญหายไปในช่วงการเดินทางโดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิ อาทิเช่น ดินเหนียวมีการลดทอนที่สูงกว่าดินทรายเป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ,  $\alpha$  ที่เกิดจากผลงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ,  $\alpha$  (Amick & Gendreau, 2000)

Investigator	Soil Type	$\alpha$ , $m^{-1}$
Forssblad	Silty gravelly sand	0.13
Richart	4-6 in concrete slab over compact granular fill	0.02
Woods	Silty fine sand	0.26
Barkan	Saturated fine grain sand	0.10
	Saturated fine grain sand in frozen state	0.06
	Saturated sand with laminae of peat and organic silt	0.04
	Clayey sand, clay with some sand, and silt above water level	0.04
	Marly chalk	0.1
	Loess and loessial soil	0.1
	Saturated clay with sand and silt	0.0-0.12
Dalmatov, et al.	Sand and silts	0.026-0.36
Clough and Chameau	Sand fill over Bay Mud	0.05-0.2
	Dune sand	0.026-0.065
Peng	Soft Bangkok clay	0.026-0.44



ตารางที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ,  $\alpha$  และช่วงของความถี่(กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

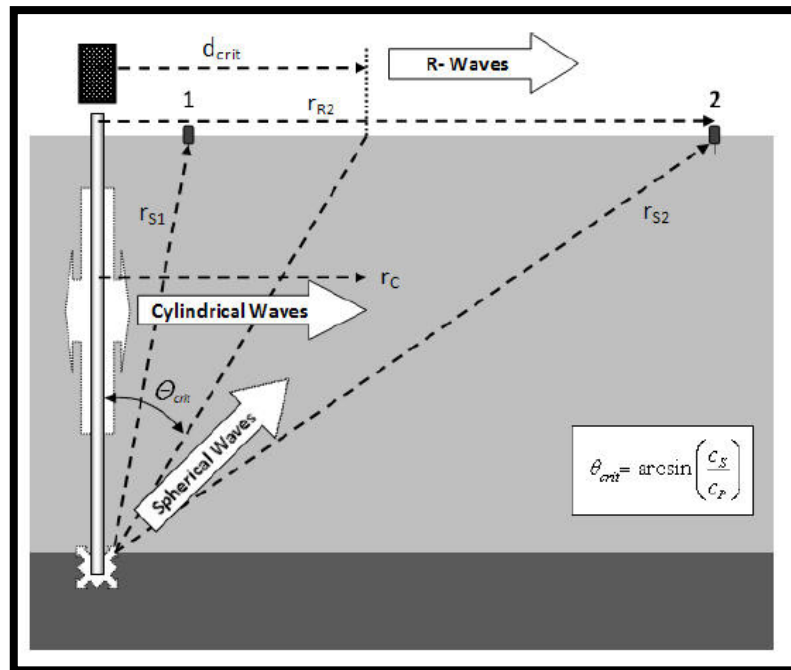
ประเภทของดิน	$\alpha$ (1/m)		หมายเหตุ
	5 เฮิรตซ์	50 เฮิรตซ์	
ดินอ่อน	0.01-0.033	0.1-0.3	N<5
ดินที่ค่อนข้างแข็ง	0.0033-0.01	0.03-0.1	5<N<15
ดินแข็ง	0.00033-0.0033	0.003-0.03	15<N<50
ดินแข็งมาก	<0.00033	<0.003	N>50

จากตารางที่ 2-4 ถึงตารางที่ 2-7 ซึ่งรายงานค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ แสดงว่าการศึกษเกี่ยวกับพฤติกรรมลดทอนคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มได้มีการศึกษากันอย่างมากในต่างประเทศ เช่น Jin Sun Kim & Dong Soo Kim(1999) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่าน และการลดทอนของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากเสาเข็มตอกชนิดเสาเข็มเสียดทานซึ่งได้อธิบายไว้ว่าแหล่งกำเนิดของคลื่นไหวสะเทือนที่เป็นเสาเข็มเสียดทานสามารถจัดเป็นคลื่นแบบจุด ที่ระดับลึก ซึ่งทำให้เกิดคลื่นหลักที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตเท่ากับ 1.0 และระยะทางการลดทอนสามารถประมาณเป็นระยะทางในแนวราบจากแหล่งกำเนิดได้ จากข้อมูลดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองการลดทอนดังสมการที่(2.18)ทำให้สามารถวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุได้ว่ามีค่าเท่ากับ  $0.026 \text{ เมตร}^{-1}$

สำหรับการศึกษาเรื่องคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มในประเทศไทย พบว่ายังมีการศึกษาไม่มากนักเช่น ช่อธรรม และ พิรพงษ์(2553) ได้ศึกษาพฤติกรรมลดทอนของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มในบริเวณเขตกรุงเทพ และปริมณฑล พบว่า คลื่นหลักที่เกิดขึ้นเป็นคลื่นอัดทรงกลม และคลื่นเฉือนทรงกระบอกซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงเรขาคณิตเท่ากับ 1.0 และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุของดินพบว่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์

## 2.6.2 ระยะทางวิกฤตจากแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือนที่ไม่พบคลื่นเรย์ลี

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ของช่วงที่คลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นเรย์ลีซึ่งพบว่าต้องมีระยะที่เกินออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นระยะทางใดๆค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ระยะทางวิกฤติ (critical distance) (Massarsch&Fellenius, 2008)แสดงดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 คลื่นที่เกิดระหว่างแรงปฏิกริยาระหว่างเสาเข็มกับดิน

เราสามารถประมาณค่าระยะทางวิกฤตได้จากความสัมพันธ์ของสมการและตารางประกอบหาราค่าของตัวแปรต่างๆดังสมการที่(2.19)

$$d_{crit} = \tan \theta_{crit} D \quad (2.19)$$

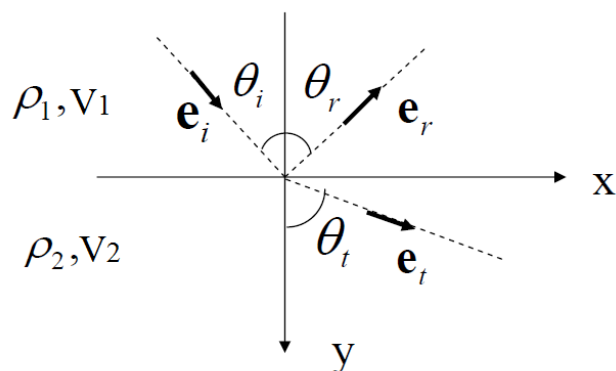
- เมื่อ  $D$  คือ ระยะความลึกของเสาเข็มที่ตอกลงดิน
- $d_{crit}$  คือ ระยะทางวิกฤตจากแหล่งกำเนิดซึ่งเริ่มมีการให้คลื่นแบบคลื่นเรย์ลี
- $\theta_{crit}$  คือ มุมวิกฤต พิจารณาจากอัตราส่วนปัวซองของดิน

ตารางที่ 2-8 ระยะทางวิกฤติตามความลึกการตอกเสาเข็ม

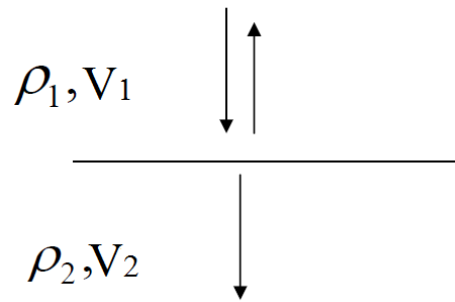
อัตราส่วนบิวของ ( $\nu$ )	มุมวิกฤติ ( $\theta_{crit}$ )	$\frac{r_{crit}}{D}$
0.20	28	0.53
0.25	25	0.46
0.30	21	0.39
0.35	18	0.32
0.40	14	0.25
0.49	4	0.07

### 2.6.3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และการสะท้อนกลับของคลื่น (transmission and reflection of waves)

การแบ่งส่วนของพลังงานระหว่างการหักเห (refraction) และสะท้อนกลับ (reflection) เมื่อคลื่นต้นกำเนิดตกกระทบบนที่ขอบเขตของแต่ละชั้นดินมีความซับซ้อนอย่างมาก เช่น เมื่อคลื่นต้นกำเนิดปฐมภูมิ (primary wave หรือ p-wave) ตกกระทบบนที่ขอบเขตของชั้นดิน คลื่นดังกล่าวอาจจะสะท้อนกลับเพียงบางส่วน และหักเหเพียงบางส่วน หรืออาจจะสะท้อนกลับทั้งหมดก็ได้ โดยขึ้นกับมุมตกกระทบบนของคลื่นต้นกำเนิดนั้น (Lowrie, 2007)



รูปที่ 2-8 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นกรณีมุมตกกระทบบนใดๆ



รูปที่ 2-9 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นกรณีมุมตกกระทบปกติ

ในทางปฏิบัติการเกิดคลื่นไหวสะเทือนจะมีมุมตกกระทบของคลื่นต้นกำเนิดที่น้อยมาก โดยที่มุมตกกระทบปกติ(มุมตกกระทบทำมุม 0 องศาจากเส้นปกติ)การแบ่งส่วนของพลังงานระหว่างการสะท้อน และการหักเหของคลื่นปฐมภูมิสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น โดยขึ้นกับคุณสมบัติของดินแต่ละชั้นในรูปของความต้านทานเชิงซ้อนของเสียง(acoustic impedance;  $Z$ ) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วจลื่นตามสมการที่(2.20)

$$Z = \rho v_p \quad (2.20)$$

เมื่อ  $Z$  คือ ความต้านทานเชิงซ้อนของเสียง  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของดิน  
 $v_p$  คือ ความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ

โดย

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (2.21)$$

และ

$$E = 2G(1+\nu) \quad (2.22)$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 Z &= \rho \sqrt{\frac{2G(1+\nu)(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \\
 Z &= \rho \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \\
 Z &= \sqrt{\rho G} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

### 2.6.3.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน ( reflection coefficient, $R$ )

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient,  $R$ ) เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูด  $A_1$  ของคลื่นสะท้อนต่อแอมพลิจูด  $A_0$  ของคลื่นตกกระทบเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R = \frac{A_1}{A_0} \tag{2.24}$$

ในกรณีที่คลื่นตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อของชั้นหินค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถคำนวณได้จาก Zoeppritz's equation ดังนี้

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{\sqrt{\rho_2 G_2} - \sqrt{\rho_1 G_1}}{\sqrt{\rho_2 G_2} + \sqrt{\rho_1 G_1}} \tag{2.25}$$

เมื่อ  $\rho_1, V_1, Z_1, G_1$  คือความหนาแน่นความเร็วคลื่นปฐมภูมิความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของดินและโมดูลัสของแรงเฉือน ดินชั้นแรก

และ  $\rho_2, V_2, Z_2, G_2$  คือ ความหนาแน่นความเร็วคลื่นปฐมภูมิความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของและโมดูลัสแรงเฉือน ดินชั้นที่สอง

โดยค่า  $R$  มีค่าอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ค่าลบบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสไป 180 องศา

### 2.6.3.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( transmission coefficient, $T$ )

สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient,  $T$ ) เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูด  $A_2$  ของคลื่นส่งผ่านต่อแอมพลิจูด  $A_0$  ของคลื่นตกกระทบเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$T = \frac{A_2}{A_0} \tag{2.26}$$

ในกรณีนี้ที่คลื่นตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างชั้นหินค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสามารถคำนวณได้จาก Zoeppritz's equation

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2(\rho_1 V_1)}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)} = \frac{2\sqrt{\rho_1 G_1}}{\sqrt{\rho_2 G_2} + \sqrt{\rho_1 G_1}} \quad (2.27)$$

## 2.6.4 คุณสมบัติทางอีลาสติกของดิน (elastic properties of soil)

### 2.6.4.1 โมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus, G)

โมดูลัสแรงเฉือนเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางอีลาสติกสำหรับแรงเฉือน ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือน โดยค่าโมดูลัสแรงเฉือนหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบแรงดิ่งกับวัสดุต่างๆ

เมื่อพิจารณาการส่งผ่านของคลื่นอัด และคลื่นเฉือนในวัสดุที่เป็นเนื้อเดียว และเป็นวัตถุไอโซโทรปิก (isotropic) โมดูลัสแรงเฉือนจะเป็นตัวควบคุมความเร็วของคลื่นเฉือนตามความสัมพันธ์ในสมการ(2.28)

$$V_s = \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (2.28)$$

หรือ

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ  $G$  คือ โมดูลัสแรงเฉือน

และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่น

ในขณะที่ความเร็วคลื่นเฉือนนั้นสามารถหาได้โดยตรงจากการทดสอบในสนาม ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางเศรษฐศาสตร์ที่จะทำการทดสอบในทุกโครงการทดสอบ จึงได้มีการศึกษาเพื่อสร้างสหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับแรงต้านทานการตอก(ตารางที่ 2-9)(Hasancebi, N., & Ulusay, R., 2007) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้จำนวนครั้งการตอกต่อฟุตหรือ N-SPT ที่ยังไม่ปรับค่าเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์แทบทั้งสิ้น และจากการศึกษาของ Sykora & Stokoe (1982) ได้อธิบายว่าปัจจัยหลักในการคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนคือค่า N-SPT ส่วนอายุของชั้นดิน และชนิดดินนั้นมีอิทธิพลไม่มากนักในการคำนวณความเร็วคลื่นเฉือน อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับแรงต้านทานการตอกโดยคำนึงถึงชนิดของดินไว้ด้วย

ตารางที่ 2-9 สหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่น  $V_s$  เทียบกับค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT)

ผู้วิจัย	ความเร็วคลื่นเฉือน $V_s$ (เมตร/วินาที)		
	สำหรับดินทุกชนิด	ดินทราย	ดินเหนียว
Ohba and Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.31}$	-	-
Imai and Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0.33}$	-	-
Fujiwara(1972)	$V_s=92.1N^{0.337}$	-	-
Ohsaki and Iwasaki (1973)	$V_s=82N^{0.39}$	-	-
Imai(1977)	$V_s=91N^{0.337}$	$V_s=80.6N^{0.331}$	$V_s=80.2N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	$V_s=85.35N^{0.348}$	-	-
Seed and Idriss (1981)	$V_s=61N^{0.5}$	-	-
Imai and Tonouchi (1982)	$V_s=97N^{0.314}$	-	-
Sykora and Stokoe (1983)	-	$V_s=100.5N^{0.2}$	-
Jinan(1987)	$V_s=116.1(N+0.3185)^{0.202}$	-	-
Lee(1990)	-	$V_s=57.4N^{0.49}$	$V_s=114.43N^{0.31}$
Sisman(1995)	$V_s=32.8N^{0.51}$	-	-
Iyisan(1996)	$V_s=51.5N^{0.516}$	-	-
Jafari et al.(1997)	$V_s=22N^{0.85}$	-	-
Pitilakis et al.(1999)	-	$V_s=145(N_{60})^{0.178}$	$V_s=132(N_{60})^{0.271}$
Kiku et al.(2001)	$V_s=68.3N^{0.292}$	-	-
Jafari et al.(2002)	-	-	$V_s=27N^{0.73}$

### 2.6.4.2 อัตราส่วนปัวซอง(Poisson ratio; $\nu$ )

เมื่อวัสดุได้รับแรงกดในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะทำให้วัสดุเกิดการขยายตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงกระทำในอีกสองทิศทาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Poisson effect โดยอัตราส่วนปัวซองคือ อัตราส่วนของความเครียดของการขยายของวัสดุตัวกับความเครียดของการหดตัวของวัสดุ ดังสมการ

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง  
 $\varepsilon_{trans}$  คือ ความเครียดในแนวตั้งฉากกับแรงกระทำ  
 $\varepsilon_{axial}$  คือ ความเครียดในแนวแรงกระทำ

ตารางที่ 2-10 อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) ของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ )
ดินเหนียว(อิ่มตัวด้วยน้ำ) (Bowles, 1996)	0.4 – 0.5
ดินเหนียว(ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ) (Bowles, 1996)	0.1 – 0.3
ดินเหนียว(อิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน) (Gulhati&Datta, 2005)	0.3 - 0.4
ดินทราย(Bowles, 1996)	0.2 – 0.3



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 การตรวจวัดความไหวสะเทือนที่ผิวดินจากการตอกเสาเข็ม

##### 3.1.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และเก็บข้อมูล

- geophone วัดแรงสั่นสะเทือนในแนวตั้ง
- triaxial geophone วัดแรงสั่นสะเทือนสามแกน (แนวตั้ง, แนวตั้งฉาก, แนวรัศมี)
- สายสัญญาณ
- data logger
- คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมใช้งานในภาคสนาม(Lab View)

##### 3.1.1.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม

- สำรวจพื้นที่หน้างาน ตำแหน่งของการตอกเสาเข็ม อุปสรรคหน้างาน รวมถึงสัญญาณรบกวนต่างๆ และวางแผนแนวการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด
- วางแนวสายสัญญาณโดยต้องวางสายจำนวนสองสาย คือ
  - สายสัญญาณสำหรับ geophone วัดแรงสั่นสะเทือนในแนวตั้ง
  - สายสัญญาณสำหรับ geophone วัดแรงสั่นสะเทือนสามแกน (แนวตั้ง, แนวฉาก, แนวรัศมี)
- ติดตั้ง geophone โดยพิจารณาถึงระยะใกล้สุดและไกลสุดจากจุดตอกเสาเข็มในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและต้องคำนึงการวางแนวของ geophone จัดทิศทางให้เหมาะสมโดยให้เป็นแนวรัศมีออกจากแหล่งกำเนิด (จุดตอกเสาเข็ม)
- ต่อสายสัญญาณหลักเข้ากับเครื่องแปลงสัญญาณ และมีการต่อสายดินจากเครื่องแปลงสัญญาณลงดินเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากกระแสไฟฟ้า
- ต่อสายจากเครื่องแปลงสัญญาณเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลต่อไป
- ทำการเก็บข้อมูลขณะตอกเสาเข็ม และบันทึกภาพเคลื่อนไหวขณะบันทึกข้อมูล เพื่อใช้อ้างอิงระดับของปลายเสาเข็มขณะตอกกับแรงสั่นสะเทือน ณ ขณะนั้น



รูปที่ 3-1 ข้างอิงระดับของปลายเสาเข็มขณะตอก

### 3.1.1.3 ข้อมูลจากการตรวจวัด

ข้อมูลภาคสนามประกอบด้วยข้อมูลของแรงสั่นสะเทือน และเวลา ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแรงสั่นสะเทือน (mm/s) กับ เวลา(s) ที่ระยะห่างจากเสาเข็มถึง geophone ในแต่ละตำแหน่งที่ระดับความลึกใดๆของการตอกเสาเข็ม



รูปที่ 3-2 การตรวจวัดความไหวสะเทือนจากการตอกเสาเข็มที่ผิวดิน

### 3.1.2 ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มขณะตอกโดย PDA

#### 3.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และเก็บข้อมูล

อุปกรณ์ Pile Driving Analyzer (PDA) ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบวัดสัญญาณมาตรวัดสัญญาณ(มาตรวัดความเครียด (strain gauge) และมาตรวัดความเร่ง (accelerometer)) และระบบบันทึกผล

#### 3.1.2.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม

- ชีตเส้นแสดงระยะที่เสาเข็มทุกๆ 30 เซนติเมตรตลอดความยาวที่ต้องการตรวจวัด เพื่ออ้างอิงความลึกของเสาเข็มขณะทำการตรวจวัด
- ติดตั้งมาตรวัดสัญญาณที่บริเวณหัวเสาเข็มตามมาตรฐานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มแบบพลศาสตร์
- ดำเนินการเก็บข้อมูล ประมวลผล และบันทึกผล

#### 3.1.2.3 ข้อมูลจากการตรวจวัด

ข้อมูลภาคสนามที่เลือกใช้ประกอบด้วยข้อมูลความเร็วสูงสุดที่หัวเสาเข็มขณะตอก(mm/s) ในแต่ละความลึกการตอก



รูปที่ 3-3 มาตรวัดสัญญาณการทดสอบ PDA ชนิดไร้สาย



รูปที่ 3-4 การทดสอบด้วยPile Driving Analyzer (PDA)

### 3.1.3 ข้อมูลของระบบการตอกเสาเข็ม และการเจาะสำรวจดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วย GRLWEAP

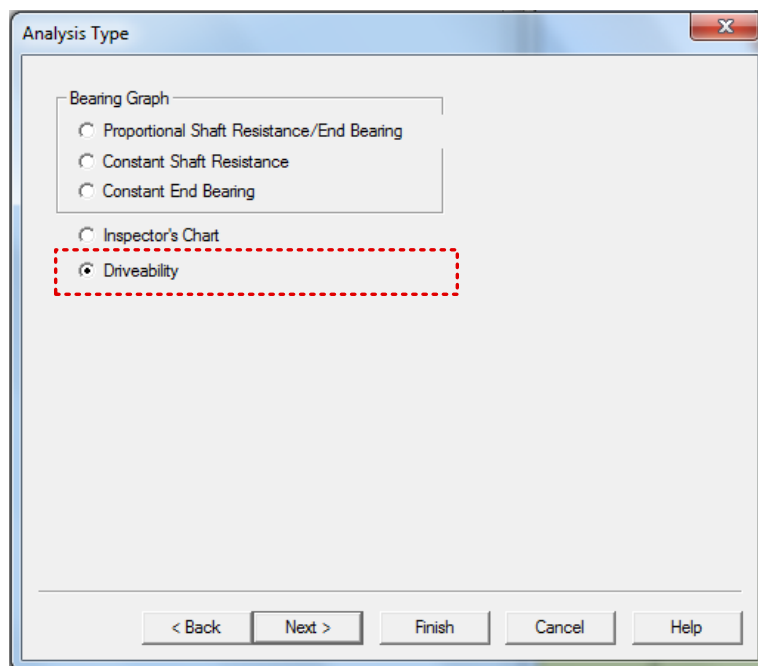
#### 3.1.3.1 การบันทึกข้อมูลภาคสนาม

บันทึกข้อมูลที่จำเป็นจากโครงการที่ตรวจวัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วย GRLWEAP ดังนี้

- ชนิดเสาเข็ม, ความยาวเสาเข็ม, ขนาดของเสาเข็ม
- ชนิดเครื่องตอกเสาเข็ม, น้ำหนักตุ้มตอก, ระยะยก, น้ำหนักหมวกครอบเสาเข็ม
- รายละเอียดหมอนรองเสาเข็ม: วัสดุ ขนาด ความหนา จำนวนครั้งใช้งาน
- รายละเอียดหมอนรองเสาเข็ม: วัสดุ ขนาด ความหนา จำนวนครั้งใช้งาน
- รายงานการเจาะสำรวจดิน

#### 3.1.3.2 ข้อกำหนดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม GRLWEAP

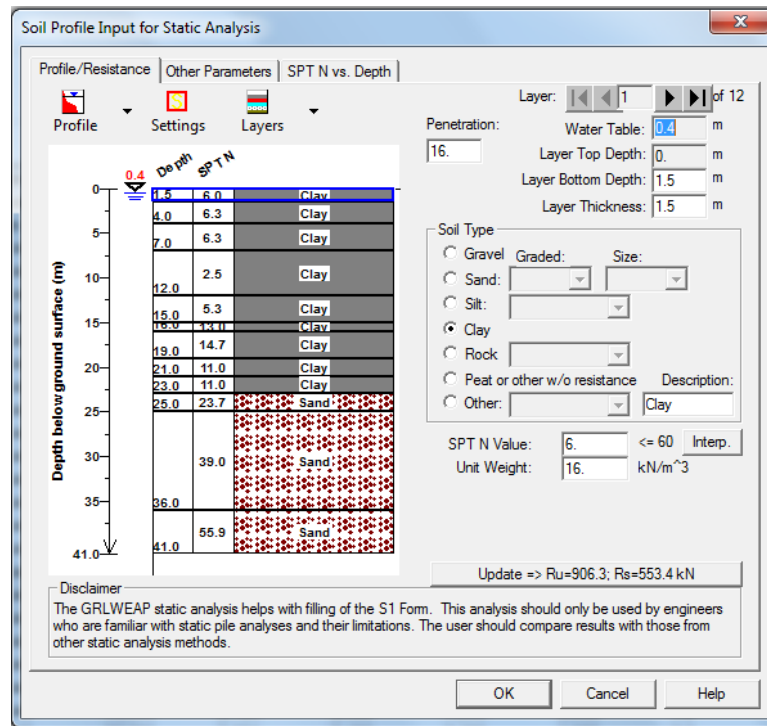
1. กำหนดประเภทการวิเคราะห์เชิงพลวัตของโปรแกรม GRLWEAPเป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการตอก (drivability analysis) เนื่องจากต้องการผลวิเคราะห์เกี่ยวกับแรง และความเค้นต่างๆ



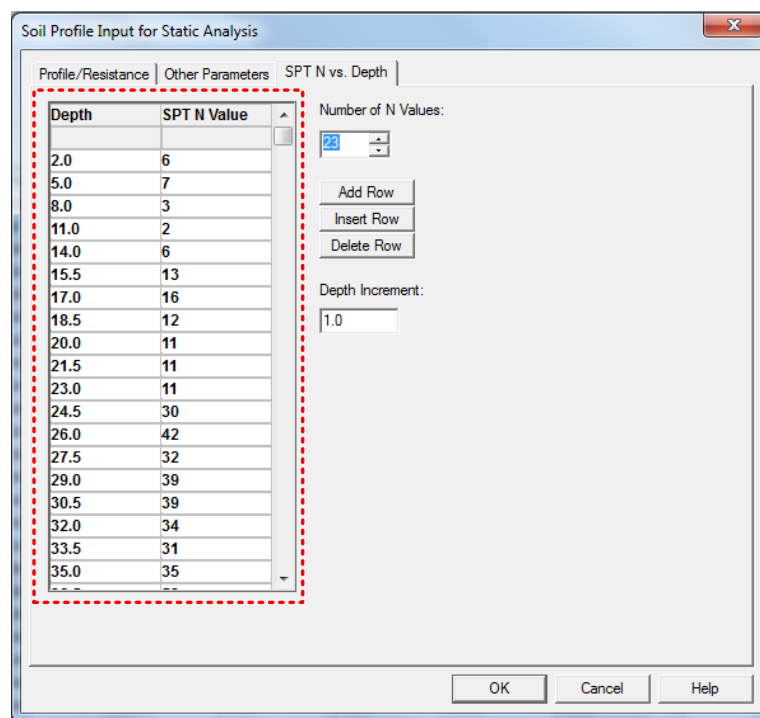
รูปที่ 3-5 หน้าต่างการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์แบบพลวัตประเภทต่างๆของโปรแกรม

#### GRLWEAP

2. ข้อมูลการคำนวณแรงต้านทานเชิงสถิติของดินเป็นข้อมูลตั้งต้นที่จำเป็นสำหรับโปรแกรม GRLWEAP จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป เมื่อต้องการผลวิเคราะห์เกี่ยวกับแรง และความเค้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ระดับความลึกที่เข็มจมไปในดินจะต้องมีความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้น จึงกำหนดให้ใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย GRLWEAP โดยการพิจารณาชนิดดิน และค่าแรงต้านทานการตอก หรือ N-SPT(SA)ซึ่งถือว่ามีผลละเยียด และถูกต้องมากกว่าการวิเคราะห์พิจารณาตามชนิดของดิน(ST)

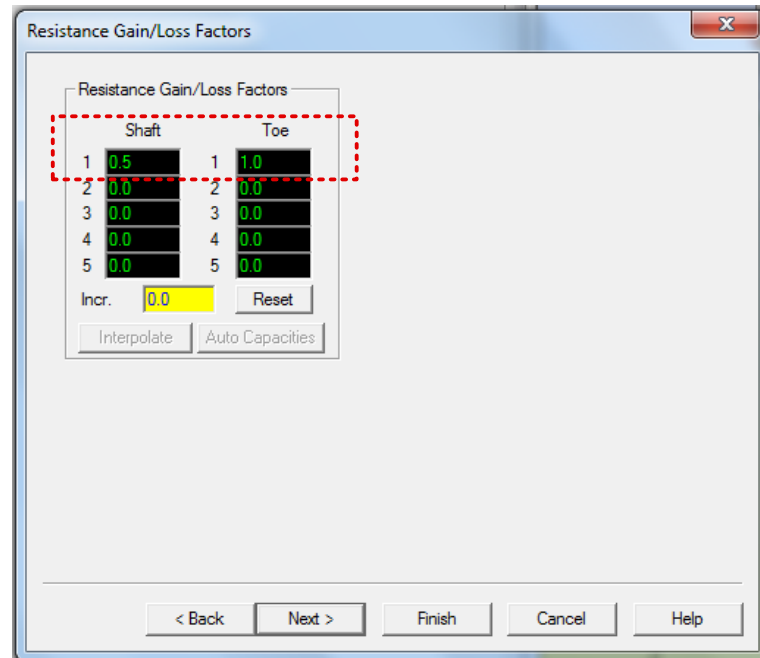


รูปที่ 3-6 หน้าต่างการป้อนชนิดดินสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิตด้วยGRLWEAP โดยการพิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก(SA)



รูปที่ 3-7 หน้าต่างการป้อนค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT) ตามความลึกสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิตด้วยGRLWEAP โดยการพิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก(SA)

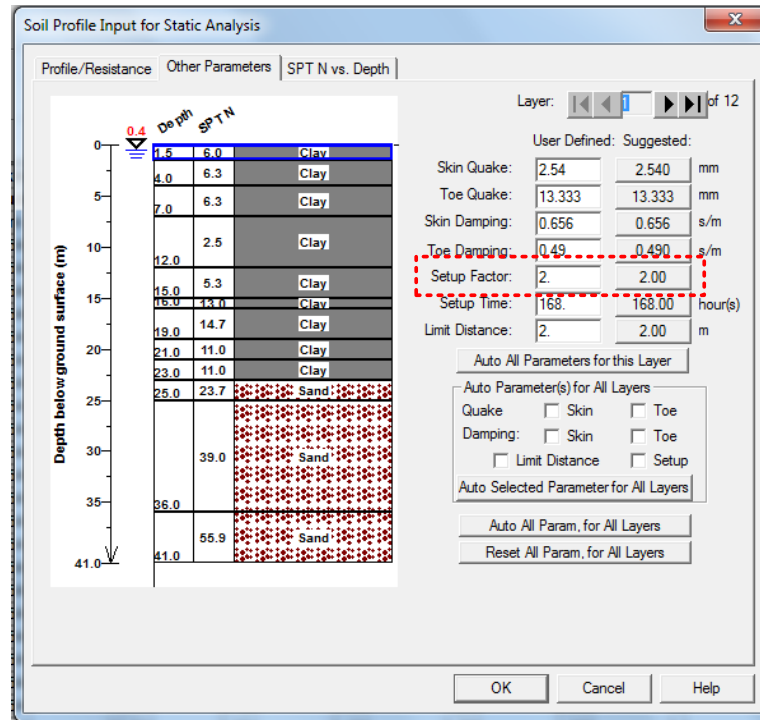
3. กำหนดตัวประกอบพัฒนากำลัง (gain/loss factor) สำหรับแรงต้านทานที่ผิวดินเท่ากับ 0.5 และแรงต้านทานที่ปลายเท่ากับ 1.0



รูปที่ 3-8 หน้าต่างการกำหนดตัวประกอบพัฒนากำลังสัมบูรณ์ของโปรแกรม GRLWEAP

- กำหนดตัวประกอบพัฒนากำลังสัมบูรณ์ ( $f_{GL}$ ) ของแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มเท่ากับ 0.5 เนื่องจากบริเวณที่ผิวเสาเข็มดินจะถูกรบกวนอย่างมากขณะตอก ทำให้แรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มเชิงสถิติขณะตอกลดลง ค่าดังกล่าวกำหนดจากส่วนกลับของตัวประกอบการพัฒนากำลังสำหรับดินสัมพัทธ์ (setup factor,  $f_s$ ) ของชั้นดินที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดของชั้นดินทั้งหมดซึ่งในการศึกษานี้คือดินเหนียว ( $f_s = 2.0$ ) (Pile Dynamic Inc., 2005)
- กำหนดตัวประกอบพัฒนากำลังสัมบูรณ์ ( $f_{GL}$ ) ของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเท่ากับ 1.0 คือแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเชิงสถิติขณะตอกไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากดินด้านล่างที่ปลายเสาเข็มยังจมลงไม่ถึงจะมีกำลังเท่ากับแรงต้านทานในระยะยาวของดิน (LTSR) และด้วยเหตุผลดังกล่าวกำลังของดินบริเวณปลายเสาเข็มจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังในระยะยาวเสมอเมื่อใช้การวิเคราะห์ความสามารถในการตอก (กรมทางหลวง, 2555)





รูปที่ 3-9 หน้าต่างการกำหนดค่าตัวประกอบพัฒนากำลังสัมพัทธ์ของดินแต่ละชนิดของโปรแกรม GRLWEAP

- กำหนดความหนาของหมอนรองเสาเข็มเท่ากับ  $2/3$  เท่าของความหนาปกติ และโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2 เท่าของค่าเดิม เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้อัดจาก 210 MPa เป็น 300 MPa เป็นต้น โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Rausche et al. (2004) เพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของหมอนรองเสาเข็มในการทดสอบจริงในแต่ละครั้ง
- ค่า elastic modulus และค่า C.O.R. สำหรับวัสดุต่างๆในการใช้เป็นหมอนรองหัวเสาเข็ม และหมอนรองค้อนตอก(ตารางที่ 3-1)



ตารางที่ 3-1 ค่า elastic modulus และค่า C.O.R. สำหรับวัสดุต่างๆ

วัสดุ	elastic modulus(MPa)	COR
micarta	1552	0.8
nom-impr polymer	1379	0.9
Mc 904 (P) blu nylon	1207	0.92
oak (parallel)	5173	0.5
oak	414	0.5
cast nylon	1428	0.91
conbest	1931	0.8
bongossi wood	2000	0.75
duracuch	241	0.82
forbon	2759	0.85
plywood	210	Varies
wire rope	1035	0.8

### 3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย

ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ขั้นตอนหลักของการศึกษาได้เป็น 3 ส่วนคือ การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดินแสดงดังรูปที่ 3-13

#### 3.2.1 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน

ประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินด้วยข้อมูลความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆจากแหล่งกำเนิด โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินในแต่ละแนวแกนที่ระยะทางต่างๆจากจุดตอก เพื่อศึกษาพฤติกรรมรวมการลดทอนของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม แล้วนำมาสร้างแบบจำลองการลดทอนและหาความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้จุดตอก เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์กับระดับความสั่นสะเทือนที่เสาเข็มต่อไป

#### ขั้นตอนการวิเคราะห์ระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินจากข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ผิวดินจากการตอกเสาเข็ม(รูปที่ 3-14) โดยละเอียด

1. กำหนดช่วงความถี่ของข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์การลดทอนของแรงสั่นสะเทือนตามระยะทางโดยพิจารณาจากหัวข้อหลักดังนี้
  - พิจารณาขนาดความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินที่มากที่สุดตามความถี่การตอกในทวนแนวแกน เพื่อครอบคลุมในด้านความปลอดภัย
  - ชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่
  - ช่วงความถี่ที่มีรูปแบบการลดทอนตามระยะทางที่แต่ละความถี่ใกล้เคียงกัน
2. กำหนดแนวแกนควบคุมของความเร็วอนุภาคสูงสุด โดยพิจารณาเปรียบเทียบความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินในแนวแกนตั้ง แนวแกนรัศมี และแนวแกนตั้งฉากที่มากที่สุดเพื่อใช้วิเคราะห์ให้ครอบคลุมในด้านความปลอดภัย ตลอดจนความถี่ที่พิจารณา
3. กำหนดสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต( $n$ ) เท่ากับ 1.0 สำหรับแหล่งกำเนิดแบบจุดที่อยู่ใต้ดินดังแสดงในตารางที่ 3-2 โดยอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Jin Sun Kim & Dong Soo Kim(1999)และช้อธรรม และพีรพงษ์(2553)

ตารางที่ 3-2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตตามลักษณะของแหล่งกำเนิด และชนิดคลื่น

Vibration sources used in this study	Location/Type of source	Induced wave type	$n$
Short length and high speed train	Surface/Combination of point and infinite line	Body wave	1.5
Hydraulic compaction	Surface/Point	Surface wave	0.5
Long length and slow speed train	Surface/Infinite line	Body wave	1.0
In-depth blasting friction pile driving	In-depth/Point	Body wave	1.0

4. ตัดข้อมูลการสั่นสะเทือนบางส่วนในช่วงที่ระยะตรวจวัดอยู่ใกล้กับจุดตอก(near field) ออก โดยอ้างอิงจากระยะทางวิกฤตจากแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือนที่ไม่พบคลื่นเรย์ลีตามสมการที่(3.1)

$$r_{crit} = 0.39D \quad (3.1)$$

เมื่อ  $D$  คือ ระยะความถี่ของเสาเข็มที่ตอกลงดิน

$d_{crit}$  คือ ระยะทางวิกฤตจากแหล่งกำเนิดซึ่งเริ่มมีการให้คลื่นแบบคลื่นเรย์ลี

หมายเหตุ: เมื่อกำหนด  $U$  เท่ากับ 0.3 (พิจารณากรณีเป็นดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน)

อ้างอิงตาม Gulhati, S.K. and Datta, M (2008)

5. วิเคราะห์ข้อมูลการสันสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจากข้อมูลภาคสนามในแต่ละโครงการก่อสร้าง โดยอ้างอิงสมการการลดทอนที่เสนอโดย Massarsch(1992) ตามสมการที่(2.18) ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่(3.2) โดยกำหนดเงื่อนไขพารามิเตอร์ตามข้อที่ 1, 2, 3 และ 4 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คือค่าคงที่ ( $K$ ) และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) เพื่อสร้างสมการการลดทอนในรูปแบบอย่างง่ายต่อไป

$$V = KR^{-n}e^{-\alpha R} \quad (3.2)$$

เมื่อ	$V$	คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดิน (mm/s)
	$K$	คือ ค่าคงที่ (หน่วย $L^2/T$ หรือ(mm-m)/s)
	$R$	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเสาเข็มถึงจุดตรวจวัดในแนวราบ(m)
	$n$	คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต
	$\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ( $m^{-1}$ )

6. คำนวณหาขนาดความเร็วอนุภาคสูงสุดจากสมการการลดทอนจากข้อ 5 ที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร ( $V_{ref}$ ) จากสมการที่(3.3) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการสันสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดินต่อไป

$$V_{ref} = Ke^{-\alpha} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 การประเมินระดับการสันสะเทือนที่เสาเข็ม

เนื่องจากการประเมินระดับการสันสะเทือนที่เสาเข็มในงานวิจัยนี้แนวความคิดที่จะเชื่อมโยงเงื่อนไขสภาพชั้นดินในแต่ละพื้นที่เข้ากับคุณสมบัติของตุ้มตอก และคุณสมบัติของเสาเข็มโปรแกรมGRLWEAPซึ่งเป็นโปรแกรมทางพาณิชย์ที่สามารถคำนวณได้ตามแนวทางข้างต้นจึงถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์หาแรงต้านทานเชิงพลวัต เพื่อใช้ในการศึกษาหาความสัมพันธ์กับระดับการสันสะเทือนที่ผิวดินต่อไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากGRLWEAPเป็นการประเมินก่อนตอกซึ่งผลที่ได้อาจไม่ตรงกับความเป็นจริงขณะตอกจึงต้องมีการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดสอบPDAเพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของผลวิเคราะห์GRLWEAP โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าจากการคาดการณ์ด้วยGRLWEAPและค่าตรวจวัดจริงด้วยPDAโดยภาพรวมในทุกโครงการทดสอบ(ดูรูปที่ 3-15)

### ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.2.2.1 ยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาะเข็มที่หัวจากการคาดการณ์ของGRLWEAP ด้วยความเร็วเสาะเข็มจากการตรวจวัด PDA

1. คาดการณ์ความเร็วเสาะเข็มที่หัวจากโปรแกรม GRLWEAP ตามความลึกการตอกเสาะเข็มจากข้อมูลของแต่ละโครงการที่บันทึกไว้
2. วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์จากGRLWEAPกับค่าตรวจวัดPDA
3. พิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์จากGRLWEAP กับค่าตรวจวัดPDAโดยภาพรวมในทุกโครงการว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในแต่ละโครงการอยู่ในช่วงใด คงที่หรือไม่

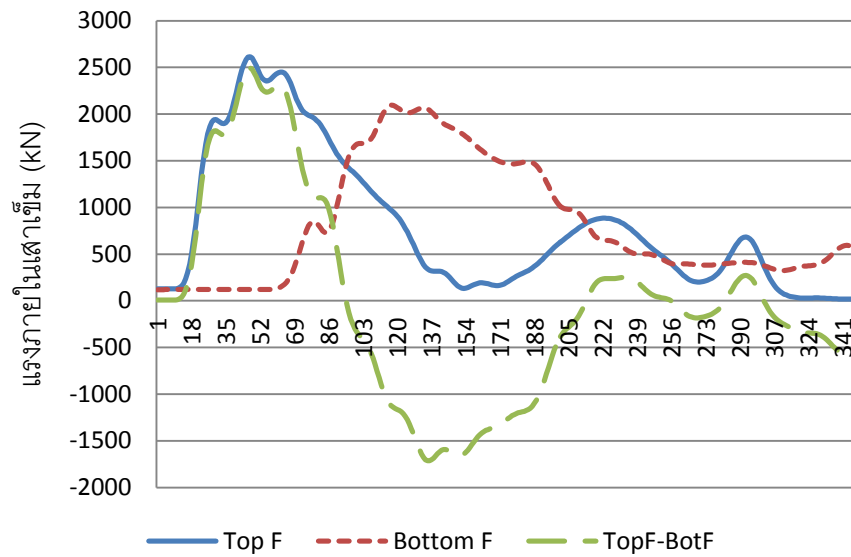
#### 3.2.2.2 วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP

1. กำหนดช่วงความลึกการตอกเสาะเข็มสำหรับการวิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP โดยแบ่งตามลักษณะชั้นดิน และให้สอดคล้องกับการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน
  2. วิเคราะห์พารามิเตอร์แรงภายในเสาะเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาะเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาะเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาะเข็ม ( $F_{bot}$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงภายในเสาะเข็มกับเวลาด้วยโปรแกรมGRLWEAP
  3. วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตขณะตอกเสาะเข็มจากแรงภายในเสาะเข็มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาะเข็มต่อไป
- แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลายเสาะเข็ม ( $Q_b^*$ ) มีค่าเท่ากับแรงภายในเสาะเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาะเข็ม ( $F_{bot}$ ) สูงสุดที่เวลาใดๆดังสมการที่(3.4)

$$Q_b^* = \max(F_{bot}(t)) \quad (3.4)$$

- แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาะเข็ม ( $Q_f^*$ ) มีค่าเท่ากับผลต่างสูงสุดของแรงภายในเสาะเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาะเข็มกับแรงภายในเสาะเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาะเข็มที่เวลาใดๆดังสมการที่(3.5)

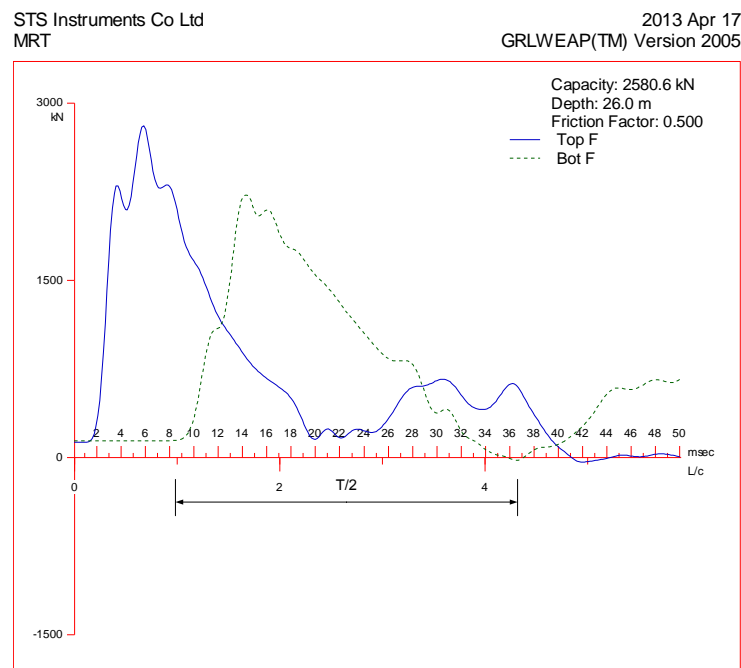
$$Q_f^* = \max(F_{top}(t) - F_{bot}(t)) \quad (3.5)$$



รูปที่ 3-10 วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตขณะตอกเสาเข็ม

### 3.2.2.3 วิเคราะห์ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม

วิเคราะห์หาความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) ที่เวลาใดๆ

จากรูปที่ 3-11 จะสามารถหาความถี่ได้จากสมการที่(3.6)

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม(เฮิรตซ์)  
 $T$  คือ คาบ(วินาที)

#### 3.2.2.4 วิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด

1. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิดมีดังตารางที่ 3-3
2. แทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในข้อ 1 ลงในสมการที่(2.16) และสมการที่(2.17) เพื่อคำนวณหาความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม และความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณปลายเสาเข็มตามลำดับ
3. พิจารณาความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่มีค่ามากที่สุดระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม และความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณปลายเสาเข็ม สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ต่อไปเพื่อให้ครอบคลุมด้านความปลอดภัย ทั้งนี้ไม่ควรนำความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินจากผิวเสาเข็ม และปลายเสาเข็มมารวมกันเนื่องจากขณะตอกเสาเข็มจะเกิดการทรุดตัวไปด้วยกัน

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ที่มาของข้อมูล
ความลึกการตอก เสาเข็ม	$(L)$	เมตร	ภาคสนาม
ค่าแรงต้านทานการ ตอก หรือ N-SPT	$(N)$	ครั้ง/ฟุต	ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน
ความหนาแน่น	$(\rho)$	$\frac{\text{ตัน/ลูกบาศก์เมตร}}{\text{เมตร/วินาที}^2}$	GRLWEAP
ความเร็วคลื่นเฉือน	$(V_s)$	เมตร/วินาที	คำนวณจากค่า N จากสูตร Imai and Tonouchi(1982) $V_s=97N^{0.314}$
โมดูลัสของแรงเฉือน	$(G_s)$	ตัน/ตารางเมตร	คำนวณจากสูตร $G_s = \rho V_s^2$
แรงต้านทานเชิงพลวัต ที่ผิวเสาเข็ม	$(Q_s^*)$	ตัน	GRLWEAP
แรงต้านทานเชิงพลวัต ที่ปลายเสาเข็ม	$(Q_b^*)$	ตัน	GRLWEAP
ความถี่	$(f)$	เฮิรตซ์	GRLWEAP
รัศมีเสาเข็ม	$(r_0)$	เมตร	ภาคสนาม
อัตราส่วนปัวซอง	$(\nu)$	-	อ้างอิงจาก Gulhati, S.K. and Datta, M (2005)
เส้นรอบรูปเสาเข็ม	$(P_L)$	เมตร	ภาคสนาม

### 3.2.2.5 วิเคราะห์การส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน

เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบความเร็วการสั่นสะเทือนจากการคำนวณด้วยสมการรูปแบบปิด กับความเร็วอนุภาคสูงสุดจากการตรวจวัดจึงต้องมีการปรับแก้ความเร็วการสั่นสะเทือนจากการคำนวณด้วยสมการรูปแบบปิดในหัวข้อ 3.2.2.4 (หัวข้อย่อยที่ 3) ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient,  $T$ ) ตามสมการที่ (2.27) เนื่องจากคุณสมบัติของชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าปลายเสาเข็ม และระดับสูงกว่าปลายเสาเข็มมีความแตกต่างกัน เมื่อความเร็วการสั่นสะเทือนที่

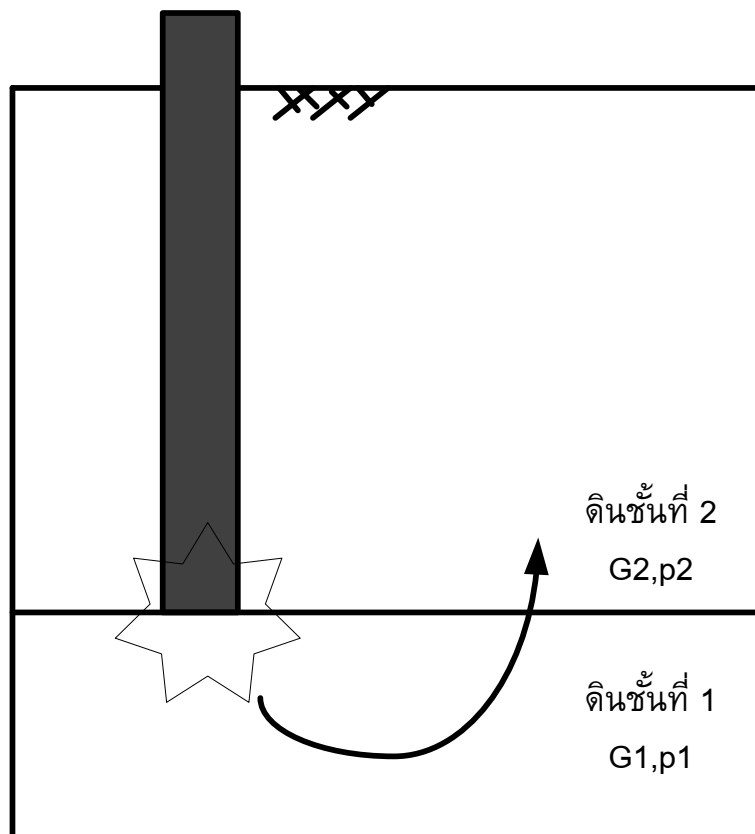
เกิดขึ้นที่บริเวณดินชั้นล่างและส่งผ่านไปยังดินชั้นบนจะได้รับอิทธิพลเนื่องจากชั้นดินดังกล่าวตามสมการ

$$V_{cal} = V_{\max(V_f, V_b)} T \quad (3.7)$$

เมื่อ  $V_{cal}$  คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนจากการคำนวณจากสมการรูปแบบปิดที่ปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

$V_{\max(V_f, V_b)}$  คือ ค่าสูงสุดระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่ผิวเสาเข็มกับความเร็วการสั่นสะเทือนที่ปลายเสาเข็มจากการคำนวณจากสมการรูปแบบปิด

$T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน



รูปที่ 3-12 การส่งผ่านความเร็วการสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน

### 3.2.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน

สร้างความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุด (ข้อ 3.2.2) กับความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนควมคุมที่ตำแหน่งห่างจากจุดตอก 1 เมตรใน (ข้อ 3.2.1) ใน



ภาพรวมทุกโครงการทดสอบ การศึกษานี้จะสามารถพัฒนาวิธีการที่สามารถประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มโดยคำนึงถึงอิทธิพลของคุณสมบัติดัมตอก คุณสมบัติของเสาเข็ม และสภาพชั้นดินได้

### ขั้นตอนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดินจากข้อมูลความเร็วอนุภาคสูงสุดจากสมการการลดทอนที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร และความเร็วเสาเข็มจากการคาดการณ์ด้วยGRLWEAP โดยละเอียด

#### 3.2.3.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยGRLWEAPและสมการรูปแบบปิด กับความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินที่ตำแหน่งใกล้จุดตอก

1. คำนวณอัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุดกับความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนควบคุมที่ระยะอ้างอิงตามสมการที่(3.8)ในแต่ละโครงการก่อสร้าง

$$\psi = \frac{V_{cal}}{V_{ref}} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\psi$  คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุด กับ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$V_{cal}$  คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนจากการคำนวณจากสมการรูปแบบปิด และปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

$V_{ref}$  คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรจากศูนย์กลางเสาเข็ม

2. เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุด กับ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรจากศูนย์กลางเสาเข็มจากข้อ 1 ในภาพรวมทุกโครงการทดสอบ
3. กำหนดช่วงใช้งานของอัตราส่วนในข้อ 1 เพื่อประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆ โดยคำนึงถึงอิทธิพลของคุณสมบัติดัมตอก คุณสมบัติของเสาเข็ม และสภาพชั้นดินต่อไป

### 3.2.4 การประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆ

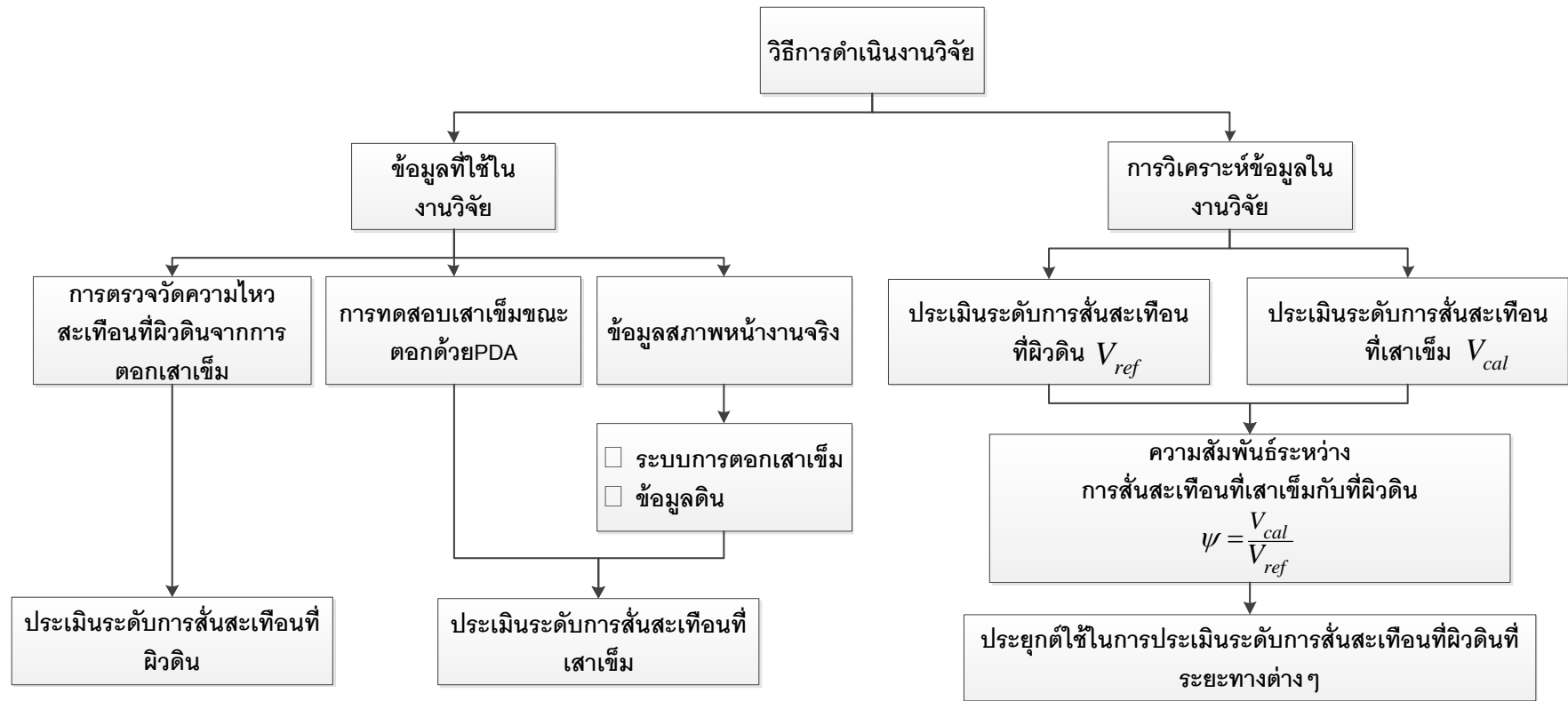
1. คำนวณความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร โดยใช้อัตราส่วนในข้อ 3.2.3.1 (ข้อย่อยที่ 1) โดยเลือกใช้อัตราส่วนที่มีค่าน้อยที่สุดของภาพรวมทุกโครงการ ในช่วงใช้งานเพื่อให้ครอบคลุมในด้านความปลอดภัย และความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาะเข้มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วย GRLWEAP และสมการรูปแบบปิดในแต่ละโครงการทดสอบตามสมการที่(3.9)

$$V_{ref} = \frac{V_{cal}}{\psi} \quad (3.9)$$

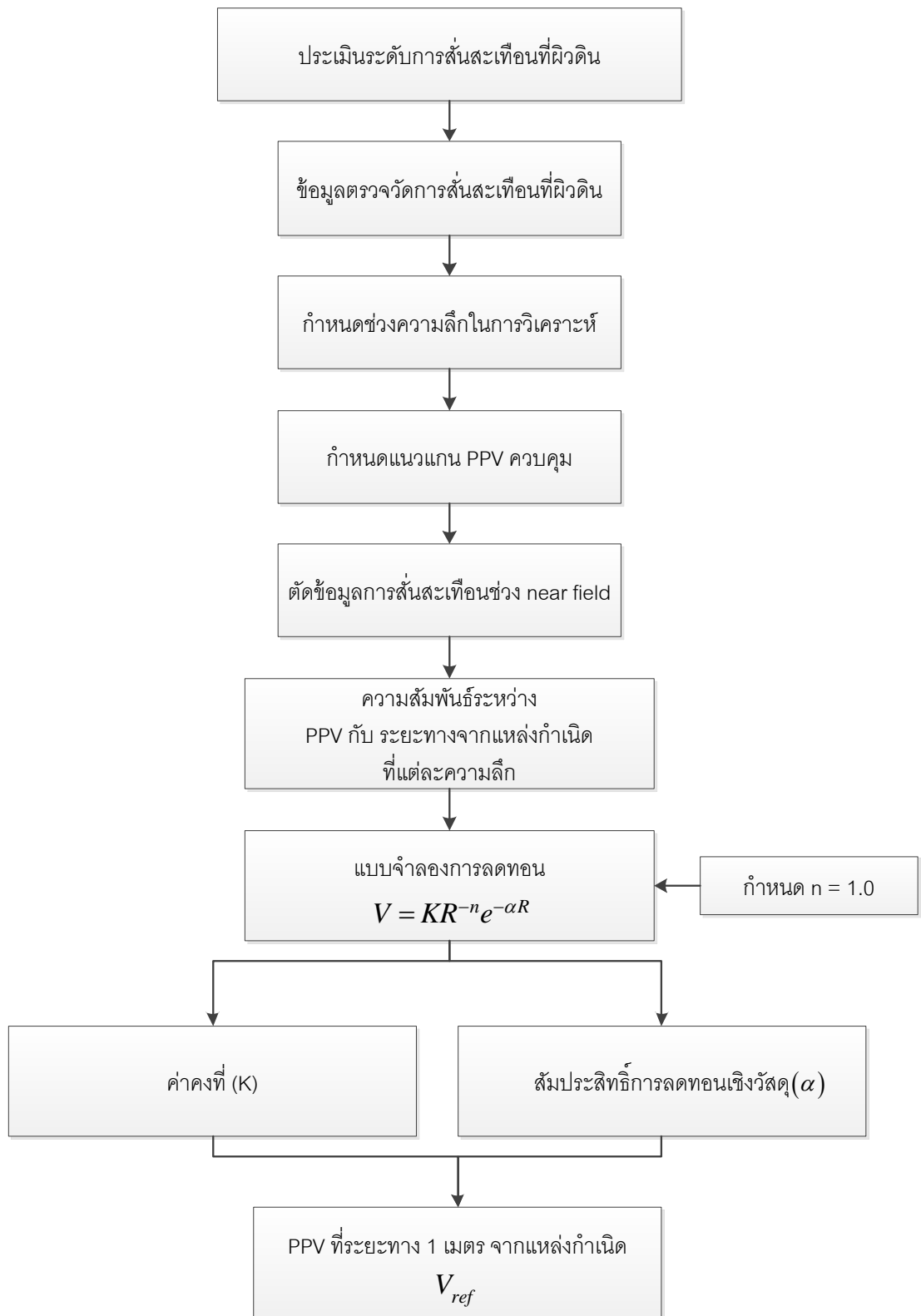
2. คำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าคงที่ ( $K$ ) ที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรจากศูนย์กลางเสาะเข้มในแต่ละโครงการทดสอบตามสมการที่(3.10)

$$K = \frac{V_{ref}}{e^{-\alpha}} \quad (3.10)$$

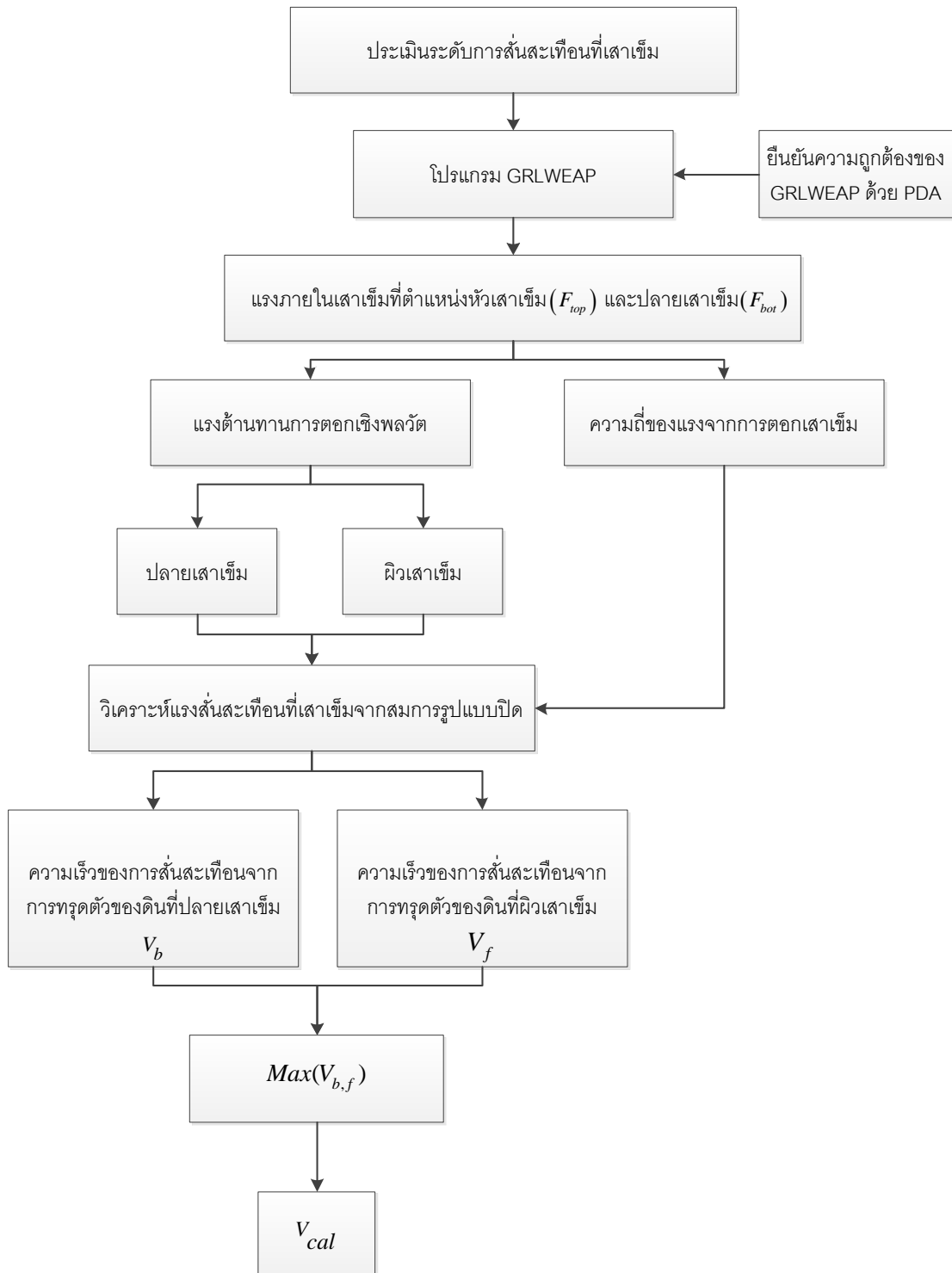
3. คำนวณความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนควบคุม ( $V$ ) ที่ระยะทางใดๆด้วยสมการการลดทอน โดยแทนค่าคงที่ ( $K$ ) ของแต่ละโครงการจากข้อที่ 2 และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) ในภาพรวมทุกโครงการ ที่ระยะทาง ( $R$ ) ใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตเท่ากับ 1.0 ในสมการที่(3.2)



รูปที่ 3-13 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3-14 แผนผังการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน



รูปที่ 3-15 แผนผังการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม

### 3.3 ตัวอย่างรายการคำนวณ

#### 3.3.1 ตัวอย่างการคำนวณความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิด

ตัวอย่างรายการคำนวณในการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มจากสมการรูปแบบปิดที่ระดับความลึกการตอก 25.00 เมตร ของโครงการที่ 1 เป็นดังต่อไปนี้

- ระดับความลึกการตอกเสาเข็ม(Depth,  $L$ ) 25.00 เมตร
- ค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT)ที่ระดับปลายเสาเข็ม 24 ครั้ง/ฟุต
- ความหนาแน่น(density,  $\rho_l$ )ที่ระดับปลายเสาเข็ม 0.21 ( $t/m^3$ )/( $m/s^2$ )
- ความหนาแน่น(density,  $\rho_l$ )ที่ผิวเสาเข็ม 0.17 ( $t/m^3$ )/( $m/s^2$ )
- ความเร็วคลื่นเฉือน( $V_s$ )ที่ระดับปลายเสาเข็ม

คำนวณจากแรงต้านทานการตอก(N-SPT)ที่ระดับปลายเสาเข็ม อ้างอิงจาก Imai and Tonouchi(1982)ดังนี้

$$V_s = 97N^{0.314} = 97(24)^{0.314} = 262.09 \text{ เมตร/วินาที}$$

- ความเร็วคลื่นเฉือน( $V_s$ )ที่ผิวเสาเข็ม

คำนวณจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก(weight average)ของความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับปลายเสาเข็มตลอดความลึกการตอก มีค่าเท่ากับ 183.44 เมตร/วินาที

- โมดูลัสของแรงเฉือนที่ปลายเสาเข็ม( $G_l$ )

คำนวณจากความหนาแน่น และความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับปลายเสาเข็มจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$G = \rho V_s^2 = 0.21(262.09)^2 = 14513.44 \text{ ตัน/ตารางเมตร}$$

- โมดูลัสของแรงเฉือนที่ผิวเสาเข็มเสาเข็ม  $\left(G_l \frac{1}{2}\right)$

คำนวณจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก(weight average)ของโมดูลัสของแรงเฉือนที่ปลายเสาเข็มตลอดความลึกการตอก มีค่าเท่ากับ 6433.90 ตัน/ตารางเมตร

- แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม( $Q_s^*$ )

ผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.8.3 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP มีค่าเท่ากับ 2499.10 กิโลนิวตัน หรือ 254.75 ตัน

- แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b^*$ )

ผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.8.3 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP มีค่าเท่ากับ 1644.10 กิโลนิวตัน หรือ 167.59 ตัน

- ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม ( $f$ )

ผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.8.4 คำนวณจากคาบ ( $T$ ) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP มีค่าเท่ากับ 21 เฮิรตซ์

- รัศมีของเสาเข็ม ( $r_0$ )

ค่ารัศมีของเสาเข็ม หรือรัศมีเทียบเท่ากรณีเป็นเสาเข็มหน้าตัดใด ๆ มีค่าเท่ากับ 0.4 เมตร

- อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ )

อ้างอิงจาก Gulhati, S.K. and Datta, M (2005) กรณีเป็นดินเหนียวแบบอิมิตัวด้วยน้ำบางส่วนมีค่าเท่ากับ 0.3

- เส้นรอบรูปเสาเข็ม ( $P_L$ )

คำนวณจากสูตรเส้นรอบวงของวงกลม  $2\pi r_0 = 2\pi(0.4) = 2.51$  เมตร

- การเปลี่ยนแปลงแบบลอการิทึมของการทรุดตัวกับรัศมีที่ผิวเสาเข็ม ( $\zeta$ )

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) = \ln\left(\frac{2.5mL(1-\nu)}{r_0}\right) = \ln\left(\frac{2.5(0.443)(25)(1-0.3)}{0.4}\right) = 3.88$$

$$\text{เมื่อ } m = \frac{G_l}{G_l} = \frac{6433.90}{14513.44} = 0.443$$

- ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวของดินที่บริเวณผิวเสาเข็ม ( $V_f$ )

คำนวณได้จากการสมการ  $V_f = 2\pi f W_f^*$

เมื่อการทรุดตัวที่ผิวเสาเข็ม ( $W_f^*$ ) มีค่าเท่ากับ

$$W_f^* = \frac{\zeta r_0 Q_f^*}{G_l P_L L} = \frac{(3.88)(0.4)(254.75)(1000)}{(14513.44)(2.51)(25)} = 0.434 \text{ มิลลิเมตร}$$

จะได้ว่า

$$V_f = 2\pi f W_f^* = 2\pi(21)(0.434) = 57.26 \text{ มิลลิเมตร/วินาที}$$

- ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหลุดตัวของดินที่ปลายเสาเข็ม ( $V_b$ )

คำนวณได้จากการสมการ  $V_b = 2\pi fW_b^*$

เมื่อการหลุดตัวของดินที่ปลายเสาเข็ม ( $W_b^*$ ) มีค่าเท่ากับ

$$W_b^* = \frac{Q_b^*(1-\nu)}{4r_0G_t} = \frac{167.59(1-0.3)(1000)}{4(0.4)(14513.44)} = 5.05 \text{ มิลลิเมตร}$$

จะได้ว่า

$$V_b = 2\pi fW_b^* = 2\pi(21)(5.05) = 666.60 \text{ มิลลิเมตร/วินาที}$$

**สรุปได้ว่า** ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหลุดตัวของดินที่มีค่ามากที่สุด ( $V_{\max}$ ) คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหลุดตัวของดินที่ปลายเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 666.60 มิลลิเมตร/วินาที

### 3.3.2 ตัวอย่างรายการคำนวณการวิเคราะห์การส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน

ตัวอย่างการรายการคำนวณปรับแก้ความเร็วการสั่นสะเทือนจากการคำนวณสมการรูปแบบปิดด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับความลึกการตอก 25.00 เมตร ของโครงการที่ 1 อ้างอิงค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างรายการคำนวณในหัวข้อ 3.3.1 เป็นดังต่อไปนี้

$$T = \frac{2\sqrt{\rho_l G_l}}{\sqrt{\rho_l G_l} + \sqrt{\rho_l G_l}} = \frac{2\sqrt{(0.21)(14513.44)}}{\sqrt{(0.17)(6433.90)} + \sqrt{(0.21)(14513.44)}} = 1.25$$

จะได้ว่าแรงสั่นสะเทือนจากการคำนวณจากสมการรูปแบบปิดการปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าเท่ากับ  $V_{cal} = V_{\max(V_f, V_b)} T = (666.60)(1.25) = 833.25$  มิลลิเมตร/วินาที



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 โครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย

โครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้จากการตรวจวัดในสนามจำนวน 9 โครงการ ข้อมูลตำแหน่งโครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัยของแต่ละโครงการแสดงดังรูปที่ 4-1 และตารางที่ 4-1 โดยข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยแต่ละโครงการก่อสร้างประกอบด้วย การตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนที่ผิวดิน(1) การทดสอบเสาเข็มขณะตอกโดยPDA(2) และข้อมูลเจาะสำรวจดิน คุณสมบัติของระบบตอกเสาเข็ม และคุณสมบัติของเสาเข็ม(3) แสดงในตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-1 ตำแหน่งโครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย

ตารางที่ 4-1 โครงการก่อสร้างที่ทำการเก็บข้อมูลในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อโครงการ	ที่ตั้ง	พิกัดตำแหน่ง	วันที่ทดสอบ
1	บริษัท สก็อตอินดัสเตรียล จำกัด	ถนนบางบัวทอง-สุพรรณบุรี อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี	N 13° 58.569' E 100° 23.316'	27/06/55
2	โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง	ถนนมอเตอร์เวย์ กม.65 หมวดการทางพานทอง จ.ชลบุรี	N 13° 24' 36.50" E 101°02' 47.23"	22/07/54
3	อาคารพักอาศัย The idol condo	ถนนบางแสนสาย 4 อ.เมืองชลบุรี จ. ชลบุรี	N 13° 17' 41.36" E 100° 55' 35.46"	27/07/54
4	AAL New warehouse	ถนนคลองส่งน้ำสุวรรณภูมิ ถนนบางนา-ตราด กม.19 อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ	N 13° 35' 22.17" E 100° 45' 42.85"	06/12/55
5	โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง	ถนนมอเตอร์เวย์ กรุงเทพ-ชลบุรี(สายใหม่) กม.20	N 13° 42' 16.61" E 100° 49' 21.46"	06/09/54
6	อาคารสินค้าKing Power	ซอยวัดศรีวารีน้อย ถนนบางนา-ตราด กม.18 อ.บางพลี จ. สมุทรปราการ	N 13° 39' 46.17" E 100° 47' 28.06"	10/01/56

ลำดับ	ชื่อโครงการ	ที่ตั้ง	พิกัดตำแหน่ง	วันที่ทดสอบ
7	อาคารจอดรถMRTถนนกัลปพฤกษ์	ถนนกัลปพฤกษ์ แขวงบางขุนเทียน เขตจอมทอง จ.กรุงเทพมหานคร	N 13° 42' 16.54" E 100° 26' 46.19"	30/06/56
8	อาคารจอดรถMRTสายสีม่วงบางใหญ่ - ราษฎร์บูรณะ ช่วงบางใหญ่ - บางซื่อ	ถนนกาญจนาภิเษก ต.บางมั่ง อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี	N 13° 50' 40.19" E 100° 24' 48.27"	02/10/53
9	บ้านเดี่ยว เดอะซิตี พระราม5-ราชพฤกษ์2	ถนนนครอินทร์ อ.บางกรวย จ.นนทบุรี	N 13° 49' 39.48" E 100° 27' 23.90"	11/12/53

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยของแต่ละโครงการ

ลำดับ ที่	ชื่อโครงการ	(1)	(2)	(3)
1	บริษัท สก็อต อินด์สเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด	✓	✓	✓
2	โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนัก บรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง (กม.65)	✓	✓	✓
3	โครงการอาคารพักอาศัย The idol condo	✓	✓	✓
4	AAL New warehouse	✓	✗	✓
5	โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนัก บรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง(กม.20)	✗	✓	✓
6	อาคารสินค้าKing Power	✓	✓	✓
7	โครงการอาคารจอดรถMRTถนนกัลปพฤกษ์	✓	✓	✓
8	โครงการอาคารจอดรถMRTสายสีม่วงบางใหญ่-ราษฎร์ บูรณะ ช่วงบางใหญ่ - บางซื่อ	✓	✗	✓
9	โครงการบ้านเดี่ยว เดอะซิตี พระราม5-ราชพฤกษ์2	✓	✗	✓

หมายเหตุ: ✓ หมายถึง มีข้อมูล ✗ หมายถึง ไม่มีข้อมูล

#### 4.2 ข้อมูลเสาเข็ม และระบบตอกเสาเข็ม

รายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม และระบบตอกเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม และระบบตอกเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ

No.	Pile Type	Dimension (m)	wall thickness (m)	Perimeter (m)	Length (m)	Pile tip (m)	Ram weight(t)	Helmet weight(t)	Hammer type	Cushion type	Thickness (cm)		Drop height(m)	Measured efficiency(%)
											Pile cushion	Hammer cushion		
1	spun pile	0.8	0.11	2.51	26	-27.00	12.0	0.500	Hydraulics	plywood	8.0	8.0	0.5	35
2	squared pile	0.4x0.4	-	1.60	15	-6.50	8.7	0.220	Drop	plywood	20.0	20.0	0.3,0.6,0.8	89,65,48
3	squared pile	0.35x0.35	-	1.40	16	-16.00	7.0	0.084	Drop	plywood,sag	2.5	2.5	0.3	82
4	I-pile	I-26	-	1.31	27	-24.10	4.6	0.040	Drop	plywood,sag	2.5	2.5	0.3	60
5	squared pile	0.4x0.4	-	1.60	23	-22.30	8.7	0.220	Drop	plywood	20.0	25.0	0.6	27
6	I-pile	I-35	-	1.73	24	-22.00	4.5	0.105	Drop	plywood,sag	8.0	8.0	0.6	60
7	spun pile	0.8	0.11	2.51	32	-26.75	12.0	0.500	Drop	plywood,bong ossi wood	4.5	15.0	0.6	28
8	spun pile	0.6	0.10	1.88	21	-21.00	9.0	0.740	Hydraulics	plywood	15.0	15.0	0.5	35
9	I-pile	I-22	-	1.05	21	-20.50	3.5	0.040	Drop	sag	5.0	5.0	0.3	60



รูปที่ 4-2 เสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมตัน



รูปที่ 4-3 เสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวไอ



รูปที่ 4-4 เสาค้ำสปัน



รูปที่ 4-5 เครื่องตอกแบบลูกตุ้มปล่อยตก(drop hammer)



รูปที่ 4-6 เครื่องตอกเสาเข็มไฮดรอลิก(single action hydraulic hammer)



รูปที่ 4-7 หมอนรองค้อนเสาเข็ม และหมอนรองหัวเสาเข็มแบบต่างๆ



#### 4.3 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน

แนบรายละเอียดข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการทดสอบที่ 1 ถึงโครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังรูปที่ ก-1 ถึงรูปที่ ก-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ก

#### 4.4 ข้อมูลการดำเนินงานตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มที่ผิวดิน

ผู้ศึกษาได้ตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม โดยตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนแนวตั้งที่ผิวดินด้วย vertical geophone จำนวนสูงสุด 16 ตัว ติดตั้งห่างกันช่วงละเท่าๆกัน และตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนแบบสามแกนที่ผิวดินด้วย triaxial geophone จำนวนสูงสุด 4 ตำแหน่ง โดยระยะห่างจากเสาเข็มซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนของโครงการทดสอบที่ 1 ถึงโครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังรูปที่ ข-1 ถึง รูปที่ ข-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดได้แก่ ขนาดของการสั่นสะเทือนในรูปของความเร็วอนุภาคสูงสุด (mm/s) ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด ความลึกที่เสาเข็มจมลงในพื้นดินขณะที่ตรวจวัด และระยะห่างจากเสาเข็มถึงมาตรวัดตำแหน่งต่างๆ ค่าที่ตรวจวัดได้จะนำไปคำนวณหาผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อหาความถี่หลักของการสั่นสะเทือน และค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) ต่อไป



รูปที่ 4-8 การติดตั้ง geophone ที่ระยะทางต่างๆ



#### 4.5 ข้อมูลการดำเนินงานทดสอบเสาเข็มขณะตอกด้วยวิธีPDA

บันทึกข้อมูลความเร็วที่หัวเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มขณะตอกด้วยวิธีPDA เมื่อปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆจากระดับผิวดิน แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 การดำเนินงานทดสอบเสาเข็มขณะตอกด้วยวิธีPDA

ลำดับที่โครงการ	ระดับปลายเสาเข็มนับจากผิวดินในการทดสอบ PDA (เมตร)	
	เริ่มทดสอบ	สิ้นสุดการทดสอบ
1	16.00	26.00
2	0.50	6.50
3	10.00	16.00
4	ไม่มีข้อมูลทดสอบ PDA	
5	18.50	21.50
6	19.50	22.00
7	23.00	26.75
8	ไม่มีข้อมูลทดสอบ PDA	
9	ไม่มีข้อมูลทดสอบ PDA	



รูปที่ 4-9 มาตรฐานสัญญาณการทดสอบ PDA ชนิดสายเคเบิล



รูปที่ 4-10 การติดตั้งมาตรวัดสัญญาณการทดสอบ PDA บริเวณหัวเสาเข็ม

#### 4.6 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP

##### 4.6.1 ป้อนข้อมูลสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP

ป้อนข้อมูลรายละเอียดของเสาเข็มทดสอบในหัวข้อบนหน้าต่างการป้อนข้อมูลของ GRLWEAPตามข้อมูลรายละเอียดของแต่ละโครงการในหัวข้อที่ 4.2 โดยอาศัยข้อแนะนำการวิเคราะห์จากหัวข้อ 3.1.3 ดังต่อไปนี้

- hammer parameters
- pile material
- cushion information
- pile information
- resistance gain/loss factors

และใช้ค่าที่กำหนดไว้ให้ของโปรแกรมในหัวข้อบนหน้าต่างการป้อนข้อมูลของ GRLWEAP ดังต่อไปนี้

- soil parameters
- shaft resistance

แสดงหน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรม GRLWEAP ของโครงการทดสอบที่ 1 ถึงโครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังรูปที่ ค-1 ถึง รูปที่ ค-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ค

#### 4.6.2 ป้อนข้อมูลชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรมGRLWEAP

ใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยGRLWEAP โดยการพิจารณาค่าแรงต้านทานการตอก หรือ N-SPT (SA) โดยใช้ค่า N-SPT จากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 1 ถึง โครงการที่ 9 (แสดงในหัวข้อที่4.3) ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมค่าแรงต้านทานการตอก(N-SPT)จากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 1 ถึง โครงการที่ 9 แสดงดังตารางที่ ง-1 ถึง ง-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ง โดยโปรแกรมGRLWEAPจะทำการเฉลี่ยค่า N-SPT ตามลักษณะชั้นดินที่กำหนด เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วนแล้วโปรแกรมGRLWEAPจะแสดงข้อมูลชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโครงการที่ 1 ถึงโครงการที่ 9 แสดงดังรูปที่ ง-1 ถึง รูปที่ ง-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ง

ในกรณีที่ข้อมูลการเจาะสำรวจดินระบุค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(undrained shear strength;  $S_u$ ) ให้เปลี่ยนเป็นค่า N-SPT

#### 4.7 การวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าPPVในแต่ละแนวแกนเมื่อตรวจวัดด้วยtriaxial geophone ในแต่ละโครงการแสดงดังรูปที่ ง-1 ถึง ง-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ง พบว่ามีขนาดที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบขนาดของความเร็วอนุภาคสูงสุด(PPV)ในแนวแกนดิ่ง แนวแกนรัศมี และแนวแกนตั้งฉาก ในแต่ละโครงการทดสอบ

ลำดับที่โครงการ	เปรียบเทียบขนาดของPPV ในแต่ละแนวแกน
1	ดิ่ง>ฉาก>รัศมี
2	ดิ่ง≥รัศมี>ฉาก
3	ดิ่ง≥รัศมี>ฉาก
4	ดิ่ง>รัศมี≥ฉาก
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน
6	รัศมี≥ดิ่ง>ฉาก
7	ดิ่ง≥รัศมี>ฉาก
8	รัศมี≥ดิ่ง>ฉาก
9	ดิ่ง>รัศมี≥ฉาก

ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ครอบคลุมในแง่ของความปลอดภัยแล้ว จำนวนข้อมูลชุดนี้ยังมีจำนวนมากเพียงพอสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การลดทอนของแรงสั่นสะเทือนต่อไป

#### 4.7.1 พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะห่างจากเสาเข็มพบว่าเมื่อระยะห่างจากเสาเข็มเพิ่มขึ้น ค่า PPV จะมีค่าลดลงแบบเลขชี้กำลัง (exponential) แสดงความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) แนวตั้งกับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึกใดๆ ในแต่ละโครงการทดสอบดังรูปที่ ๑ - 10 ถึงรูปที่ ๑ - 18 ในภาคผนวก ๑

#### 4.7.2 พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามความลึกของการตอก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความลึกของปลายเสาเข็มขณะตอก และค่าแรงต้านทานการตอก (N-SPT) ที่ความลึกต่างๆ ในแต่ละโครงการทดสอบ (แสดงดังรูปที่ ๑ - 19 ถึง รูปที่ ๑ - 26 ในภาคผนวก ๑) พบว่าค่า PPV แนวแกนตั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หรือ ลดลงตามลักษณะความแข็งของชั้นดินที่ระดับปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ สังเกตได้จากค่า N-SPT จากข้อมูลชั้นดินเทียบตามความลึก เมื่อ N มีค่ามาก จะพบว่า PPV มีค่ามากกว่าช่วงชั้นดินที่ N มีค่าน้อย ซึ่งช่วงความลึกที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้เด่นชัดในแต่ละโครงการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ช่วงความลึกที่สามารถสังเกตอิทธิพลของค่า N ที่มีต่อ PPV ได้เด่นชัด

ลำดับที่โครงการ	ช่วงความลึกที่สามารถสังเกตได้เด่นชัด(เมตร)	ลำดับรูปในภาคผนวก ๑
1	21.00 – 25.00	รูปที่ ๑ - 19
2	ทุกระดับการตอก	รูปที่ ๑ - 20
3	1.00 – 5.00	รูปที่ ๑ - 21
4	ไม่สามารถสรุปได้ตามแนวโน้มข้างต้น	รูปที่ ๑ - 22
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน	
6	16.00 – 20.00	รูปที่ ๑ - 23
7	21.00 – 27.00	รูปที่ ๑ - 24
8	17.00 – 21.00	รูปที่ ๑ - 25
9	14.00 – 19.00	รูปที่ ๑ - 26

อย่างไรก็ตามพบว่าในบางโครงการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลง PPV บางส่วนที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มข้างต้น ยกตัวอย่างในกรณีของโครงการที่ 1 (ดูรูปที่ ๑ – 19) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ที่ระดับความลึก 15 เมตรถึง 17 เมตร จะพบว่า N มีค่าน้อย แต่ PPV มีค่ามากเมื่อเทียบกับตำแหน่งข้างเคียง เนื่องจากเป็นช่วงของการเริ่มต้นการตอกเสาเข็มต้นที่สองซึ่งมีการทิ้งช่วงหลังจากการตอกต้นแรกเป็นเวลานาน ซึ่งดินอาจคืนตัวมาจับที่เสาเข็มเพิ่มมากขึ้นทำให้ขณะตอกอาจต้องใช้แรงที่มากขึ้นเพื่อตอกเสาเข็มต่อทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนมาก และเมื่อเสาเข็มเคลื่อนตัวได้แล้วพลังงานที่ส่งผ่านไปยังดินก็จะน้อยลงและเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อตอกต่อเนื่องในความลึกที่เพิ่มขึ้น
- ที่ระดับความลึก 18.5 ถึง 20 เมตรจะพบว่า N ลดลง แต่ PPV เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นดินที่ตำแหน่งดังกล่าวอาจแตกต่างกับข้อมูลการเจาะสำรวจดินเนื่องจากความแปรปรวนของชั้นดินในตำแหน่งที่ตอก

นอกจากนี้ยังพบว่า ความแข็งของชั้นดินที่ระดับปลายเสาเข็มมีอิทธิพลต่อ PPV ลดลงตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดทอนเป็นแบบเลขชี้กำลังแล้ว ค่า PPV ที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมากจะลดทอน และลู่อเข้ามาใกล้เคียงกันไม่ว่าที่ระยะใกล้จะมีค่า PPV แตกต่างกันมากเท่าไร เช่น โครงการที่ 1 (ดูรูปที่ ๑ – 19) สามารถอธิบายโดยยกตัวอย่างที่ระดับความลึก 22.5 เมตร ถึง 24.5 เมตร ที่ระยะตรวจวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 5 เมตร ถึง 9 เมตร (ระยะใกล้แหล่งกำเนิด) PPV จะเพิ่มขึ้นตาม N ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ระยะตรวจวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 25 ถึง 33 เมตร (ระยะไกลแหล่งกำเนิด) PPV ยังมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตาม N แต่ไม่เด่นชัด เป็นต้น (ระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ PPV ได้รับอิทธิพลจากค่า N ที่แตกต่างกันของแต่ละโครงการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-7)

ตารางที่ 4-7 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ PPV ได้รับอิทธิพลจากค่า N ที่แตกต่างกันของแต่ละโครงการทดสอบ

ลำดับที่โครงการ	ระดับความลึก	ระยะใกล้แหล่งกำเนิด	ระยะไกลแหล่งกำเนิด	ลำดับรูปในภาคผนวก
1	22.50-24.50	5.00	33.00	รูปที่ จ - 19
2	5.00 – 6.50	10.00	32.00	รูปที่ จ - 20
3	1.00 – 5.00	12.00	42.00	รูปที่ จ - 21
4	ไม่สามารถสรุปได้ตามแนวโน้มข้างต้น			รูปที่ จ - 22
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน			
6	20.00-22.00	15.00	32.00	รูปที่ จ - 23
7	23.00-27.00	5.00	17.00	รูปที่ จ - 24
8	16.50-19.50	10.00	22.00	รูปที่ จ - 25
9	14.00-20.00	7.20	24.80	รูปที่ จ - 26

#### 4.7.3 วิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม

##### 1) ช่วงความลึกของข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.7.2 ว่า PPV ในแนวแกนดิ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลักษณะความแข็งของชั้นดินที่ระดับปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ที่ทุกระดับความลึกการตอกเพื่อให้ครอบคลุมทางด้านความปลอดภัย เมื่อพิจารณาชนิดของดิน และรูปแบบการลดทอนตามระยะทางจากจุดตอกที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถกำหนดระดับความลึกการตอกเสาเข็มในการวิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็มในแต่ละโครงการ พิจารณาจากระดับผิวดินดังตารางที่ 4-8

##### 2) กำหนดระยะทางวิกฤติเพื่อตัดข้อมูลการสั่นสะเทือนบางส่วนในช่วงที่ระยะตรวจวัดอยู่ใกล้กับจุดตอก

จากช่วงความลึกของข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์ที่กำหนดในข้อ 1 สามารถกำหนดระยะทางวิกฤติในแต่ละช่วงความลึกของแต่ละการทดสอบดังตารางที่ 4-8

##### 3) วิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจากข้อมูลภาคสนาม

จากการสร้างเส้นโค้งแบบจำลองการลดทอนตามสมการที่(3.2) โดยพิจารณาระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด เมื่อแทนค่า  $n$  เท่ากับ 1.0 กำหนดเป็นค่าคงที่ในสมการที่(3.2) ผลจากการวิเคราะห์ในแต่ช่วงความลึกในแต่ละโครงการทดสอบ แสดงดังรูปที่ ๓-1 ถึง ๓-32 ในภาคผนวก ๓ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) ค่าคงที่  $K$  และสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น(R-square) ในแต่ช่วงความลึกดังตารางที่ 4-9

จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2-6 พบว่าค่ามีค่าบางส่วนไม่อยู่ในช่วงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุของ soft Bangkok clay ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.026 – 0.44  $m^{-1}$  สาเหตุที่ค่าจากการวิเคราะห์ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวแม้ว่าเป็นดินที่ศึกษาในเขตพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑลเหมือนกันอาจเนื่องจากชนิดของดินและชั้นดินที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของตำแหน่งพื้นที่ตรวจวัด

- 4) คำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเร็วอนุภาคสูงสุดจากสมการการลดทอนที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร

จากสมการที่(3.3) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) และ ค่าคงที่  $K$  มีค่าดังตารางที่ 4-9 จะสามารถคำนวณความเร็วอนุภาคสูงสุดจากสมการการลดทอนที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร ( $V_{ref}$ ) ของแต่ละโครงการทดสอบที่ระดับความลึกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-8 ช่วงความลึกในการวิเคราะห์ และระยะทางวิกฤติในแต่ละโครงการทดสอบ

โครงการที่	ช่วงความลึก(เมตร)		ระยะทางวิกฤติ(เมตร)
1	16.00	19.00	7.50
	20.00	23.00	9.00
	24.50	25.20	10.00
2	4.00	4.50	1.75
	5.00	5.50	2.15
	6.00	6.50	2.50
3	7.40	8.40	3.30
	9.00	10.00	3.90
	10.20	11.00	4.30
	12.00	13.00	5.00
	14.00	16.00	6.25
4	20.00	21.50	8.40
	22.00	23.50	9.20
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน		
6	13.50	14.50	5.65
	15.00	16.00	6.24
	17.00	19.00	7.41
	21.00	22.00	8.58
7	17.00	18.00	7.02
	19.00	20.00	7.80
	21.00	22.00	8.58
	23.00	24.00	9.36
	25.00	26.00	10.14
8	16.00	17.00	6.63
	18.00	19.00	7.41
	20.50	21.00	8.19
9	12.00	13.50	5.26
	14.00	15.00	5.85
	16.50	18.00	7.02
	18.50	20.50	8.00



ตารางที่ 4-9 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ( $\alpha$ ) และค่าคงที่(K)จากการวิเคราะห์ในแต่ละโครงการทดสอบ

ลำดับที่โครงการทดสอบ	ช่วงความลึก(m)		$\alpha$ (m <sup>-1</sup> )	K(mm×m/s)	R-Square
1	16.0	19.0	-0.023	118.26	0.57
	20.0	23.0	-0.016	134.12	0.63
	24.5	25.2	-0.016	131.48	0.59
2	5.0	5.5	0.054	92.07	0.94
	6.0	6.5	0.043	99.75	0.93
3	7.4	8.4	-0.005	56.11	0.85
	9.0	10.0	0.001	61.37	0.91
	10.2	11.0	0.000	58.91	0.9
	12.0	13.0	-0.005	44.29	0.88
	14.0	16.0	-0.001	51.61	0.75
4	20.0	21.5	-0.017	14.39	0.57
	22.0	23.5	-0.013	15.31	0.58
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน				
6	13.5	14.5	0.012	58.92	0.7
	15.0	16.0	0.015	57.49	0.9
	17.0	19.0	0.031	93.85	0.86
	21.0	22.0	0.037	92.56	0.83
7	17.0	18.0	-0.014	95.64	0.49
	19.0	20.0	-0.016	76.57	0.44
	21.0	22.0	0.005	93.1	0.82
	23.0	24.0	-0.005	90.75	0.63
	25.0	26.0	-0.007	91.11	0.68
8	16.0	17.0	0.004	60.66	0.59
	18.0	19.0	0.035	92.33	0.74
	20.5	21.0	0.030	81.39	0.72
9(p1)	12.0	13.5	-0.014	26.4	0.57
	14.0	15.0	-0.012	28.12	0.57
	16.5	18.0	0.002	55.75	0.69
	18.5	20.5	-0.002	40.96	0.59
9(p2)	12.0	13.5	-0.021	27.66	0.53
	14.0	15.0	-0.021	38.29	0.58
	16.5	18.0	-0.004	49.91	0.69
	18.5	20.5	-0.004	37.39	0.56

ตารางที่ 4-10 ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะอ้างอิง 1 เมตรในแต่ละช่วงความลึกของแต่ละโครงการทดสอบ

ลำดับที่โครงการทดสอบ	ช่วงความลึก		$V_{ref}$ (mm/s)
1	16.00	19.00	120.97
	20.00	23.00	136.25
	24.50	25.20	133.53
2	5.00	5.50	87.22
	6.00	6.50	95.59
3	7.40	8.40	56.38
	9.00	10.00	61.32
	10.20	11.00	58.89
	12.00	13.00	44.52
	14.00	16.00	51.64
4	20.00	21.50	14.65
	22.00	23.50	15.51
5	ไม่มีข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน		
6	13.50	14.50	58.19
	15.00	16.00	56.64
	17.00	19.00	90.96
	21.00	22.00	89.21
7	17.00	18.00	97.00
	19.00	20.00	77.78
	21.00	22.00	92.66
	23.00	24.00	91.19
	25.00	26.00	91.75
8	16.00	17.00	60.44
	18.00	19.00	89.12
	20.50	21.00	79.00
9(P1)	12.00	13.50	26.77
	14.00	15.00	28.46
	16.50	18.00	55.66
	18.50	20.50	41.04
9(P2)	12.00	13.50	28.25
	14.00	15.00	39.12
	16.50	18.00	50.13
	18.50	20.50	37.53

#### 4.8 ผลการศึกษาการประเมินระดับการสัมผัสที่เสาเข็ม

##### 4.8.1 กำหนดระดับความลึกการตอกเสาเข็มสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP

ระดับความลึกการตอกเสาเข็มในการวิเคราะห์ด้วย GRLWEAP เป็นดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ระดับความลึกการตอกเสาเข็มในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP

โครงการที่	ช่วงความลึก(เมตร)		ช่วงย่อยความลึกการวิเคราะห์
1	16.00	19.00	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	20.00	23.00	
	24.50	25.20	
2	4.00	4.50	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.1 เมตร
	5.00	5.50	
	6.00	6.50	
3	7.40	8.40	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.2 เมตร
	9.00	10.00	
	10.20	11.00	
	12.00	13.00	
	14.00	16.00	
4	20.00	21.50	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	22.00	23.50	
5	ทำการวิเคราะห์ที่ทุกระดับความลึกสำหรับการยืนยัน GRLWEAP เท่านั้น		
6	13.50	14.50	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	15.00	16.00	
	17.00	19.00	
	21.00	22.00	
7	17.00	18.00	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	19.00	20.00	
	21.00	22.00	
	23.00	24.00	
	25.00	26.00	
8	16.00	17.00	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	18.00	19.00	
	20.50	21.00	
9	12.00	13.50	วิเคราะห์ที่ทุกๆระดับความลึก 0.5 เมตร
	14.00	15.00	
	16.50	18.00	
	18.50	20.50	

#### 4.8.2 ยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาเข็มจากการคาดการณ์ของGRLWEAP ด้วยความเร็วเสาเข็มจากการตรวจวัด PDA

- 1) คาดการณ์ความเร็วที่หัวเสาเข็มจากโปรแกรม GRLWEAP ตลอดระดับความลึกที่มีการตรวจวัด PDA

เมื่อป้อนพารามิเตอร์ต่างๆตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.6 แล้ว ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของความเร็วที่หัวเสาเข็มตามเวลาที่คลื่นความเค้นเคลื่อนที่ไปในเสาเข็มที่แต่ละความลึกการตอก(แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเร็วที่หัวเสาเข็มของแต่ละโครงการทดสอบดังรูปที่ ข-1 ถึงรูปที่ ข-6 ในภาคผนวก ข) โดยในการศึกษานี้กำหนดใช้ค่าความเร็วที่หัวเสาเข็มสูงสุดในการยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาเข็มจากการคาดการณ์ของGRLWEAPด้วยความเร็วเสาเข็มจากการตรวจวัด PDA

- 2) ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์จากGRLWEAPกับค่าตรวจวัดPDA

จากรูปที่ ข-7 ถึงรูปที่ ข-16 ในภาคผนวก ข เป็นการยืนยันความเที่ยงตรงของโปรแกรม GRLWEAP พบว่าความเร็วที่หัวเสาเข็ม จากการคาดการณ์มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น และลดลง เป็นไปในทางเดียวกันกับค่าตรวจวัด โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์กับค่าตรวจวัดโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับค่าตรวจวัดในแต่ละโครงการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์กับค่าตรวจวัดโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับค่าตรวจวัดในแต่ละโครงการทดสอบ

ลำดับที่โครงการ	ลำดับที่เสาเข็ม	% ความแตกต่าง
1	1	7.65
2	1	17.32
	2	15.52
3	1	19.22
	2	16.30
หมายเหตุ: พบความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์กับค่าตรวจวัดอย่างชัดเจนของเสาเข็มต้นที่ 1 ในช่วงระดับความลึกการตอก 10.50 เมตร ถึง 11.50 เมตร		
4	ไม่มีข้อมูลตรวจวัด PDA	
5	1	13.51
	2	9.46
6	1	10.28
	2	11.05

ลำดับที่โครงการ	ลำดับที่เสาเข็ม	% ความแตกต่าง
7	1	24.63
8		ไม่มีข้อมูลตรวจวัด PDA
9		ไม่มีข้อมูลตรวจวัด PDA

#### 4.8.3 วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP

- 1) วิเคราะห์พารามิเตอร์แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงภายในเสาเข็มกับเวลาด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ทุกระดับความลึกที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.8.1 โดยตัวแทนผลการวิเคราะห์ของแต่ละช่วงความลึกในแต่ละโครงการทดสอบแสดงดังรูปที่ ๗-1 ถึงรูปที่ ๗-28 ในภาคผนวก ๗
- 2) วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัต ขณะตอกเสาเข็มจากแรงภายในเสาเข็มตามสมการที่(3.4) และ(3.5) ที่ทุกระดับความลึกที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.8.1 ผลการวิเคราะห์ในแต่ละช่วงความลึก ของแต่ละโครงการทดสอบ แสดงดังตาราง ๗-1 ถึงตารางที่ ๗-8 ในภาคผนวก ๗

#### 4.8.4 วิเคราะห์ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็ม

ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็มวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาผลการวิเคราะห์ที่แต่ละช่วงความลึกของแต่ละโครงการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ความถี่ของแรงจากการตอกเสาเข็มที่แต่ละช่วงความลึกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ในแต่ละโครงการ

ลำดับที่โครงการ	ช่วงความลึก(เมตร)		T(msec)	f(Hz)
1	16.00	19.00	18	56
	20.00	23.00	18	56
	24.50	25.20	48	21
2	5.00	5.50	28	35
	6.00	6.50	50	20
3	7.40	8.40	14	71
	9.00	10.00	66	15
	10.20	11.00	54	18.5
	12.00	13.00	20	50
	14.00	16.00	50	20
4	20.00	21.50	62	16
	22.00	23.50	62	16
6	13.50	14.50	22	45
	15.00	16.00	22	45
	17.00	19.00	28	35
	21.00	22.00	58	17
7	17.00	18.00	24	42
	19.00	20.00	24	42
	21.00	22.00	24	42
	23.00	24.00	54	18.5
	25.00	26.00	54	18.5
8	16.00	17.00	58	17.2
	18.00	19.00	58	17.2
	20.50	21.00	56	17.8
9	12.00	13.50	26	38.5
	14.00	15.00	26	38.5
	16.50	18.00	74	13.5
	18.50	20.50	70	14.3

#### 4.8.5 วิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิด

วิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิดที่ทุกระดับความลึกที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.8.1 ตามระเบียบวิธีวิจัยที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2.4 จะสังเกตได้ว่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มจะมีค่ามากกว่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทรุดตัวที่ผิวเสาเข็มในทุกความลึกที่พิจารณา ผลการวิเคราะห์ที่แต่ละระดับความลึกการตอกของโครงการทดสอบที่ 1 ถึง โครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังตาราง ณ-1 ถึง ณ-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ณ

#### 4.8.6 วิเคราะห์การส่งผ่านความเร็วการสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน

ปรับแก้ความเร็วการสั่นสะเทือนที่คำนวณจากสมการรูปแบบปิดด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient,  $T$ ) ที่ทุกระดับความลึกที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.8.1 ตามระเบียบวิธีวิจัยที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2.5 ผลการวิเคราะห์ที่แต่ละระดับความลึกการตอกของโครงการทดสอบที่ 1 ถึง โครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังตาราง ณ-1 ถึง ณ-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ณ

#### 4.8.7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน

คำนวณอัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดิน สูงสุดกับความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนควบคุมที่ระยะอ้างอิง ( $\psi$ ) ในแต่ละช่วงความลึกที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.8.1 ผลการวิเคราะห์ที่แต่ละช่วงความลึกการตอกของโครงการทดสอบที่ 1 ถึง โครงการทดสอบที่ 9 แสดงดังตาราง ณ-1 ถึง ณ-9 ตามลำดับ ในภาคผนวก ณ

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลในภาพรวมทุกโครงการทดสอบ

#### 5.1 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนตั้ง แนวแกนรัศมี และแนวแกนตั้งฉากจากการตรวจวัดที่ระดับความลึกการตอกใดๆ พบว่า โดยส่วนใหญ่ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแต่ละแนวแกนมีความแตกต่างกันโดยเรียงลำดับดังนี้คือ แนวแกนตั้ง  $\approx$  รัศมี  $>$  ตั้งฉาก

ในการศึกษานี้กำหนดใช้ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนตั้งเป็นหลักในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินเนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ครอบคลุมในแง่ของความปลอดภัย และมีจำนวนชุดข้อมูลชุดมากเพียงพอสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การลดทอนของแรงสั่นสะเทือน

##### 5.1.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

###### 1) พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) กับระยะห่างจากเสาเข็มพบว่า เมื่อระยะห่างจากเสาเข็มเพิ่มขึ้น ค่า PPV จะมีค่าลดลงแบบเลขชี้กำลัง (exponential)

###### 2) พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนตามความลึกของการตอก

PPV แนวแกนตั้งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลักษณะความแข็งของชั้นดินที่ระดับปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ โดยความแข็งของชั้นดินที่ระดับปลายเสาเข็มมีอิทธิพลต่อ PPV ลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดทอนของแรงสั่นสะเทือนเป็นแบบเลขชี้กำลัง ดังนั้นค่า PPV ที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมากจะลดทอน และลู่เข้ามาใกล้เคียงกันไม่ว่าที่ระยะใกล้จะมีค่า PPV แตกต่างกันมากเท่าไรก็ตาม อย่างไรก็ตาม พบ PPV บางส่วนที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มอาจมาจากสาเหตุดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงระยะยกตุ้มตอกเสาเข็มขณะตอก
- ชั้นดินที่ตำแหน่งดังกล่าวอาจแตกต่างจากข้อมูลการเจาะสำรวจดิน เนื่องจากความแปรปรวนของชั้นดินในตำแหน่งที่ตอก
- อิทธิพลจากการตอกในช่วงแรกที่ระดับใกล้ผิวดิน



- อิทธิพลจากการทิ้งช่วงหลังจากการตอกเสาเข็มต้นแรกเป็นเวลานาน ทำให้ดินคืนตัวมาจับที่ผิวเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นขณะตอกอาจต้องใช้แรงที่มากขึ้นเพื่อตอกเสาเข็มต่อ และเมื่อเสาเข็มเคลื่อนตัวได้แล้วพลังงานที่ส่งผ่านไปยังดินก็จะน้อยลงและเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อตอกต่อเนื่องในความลึกที่เพิ่มขึ้น

### 5.1.2 วิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม

จากการวิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็มในโครงการทดสอบทั้งหมด 8 โครงการ ซึ่งมีจำนวนเสาเข็มรวม 9 ต้น ในแต่ละช่วงความลึกที่พิจารณา เมื่อสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิต( $n$ )เท่ากับ 1.0 แล้ว พบว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) มีค่าอยู่ในช่วง -0.023 ถึง 0.054 (มีหน่วยเป็น  $m^{-1}$ ) (แสดงดังรูปที่ 5-1) และค่าคงที่  $K$  มีค่าอยู่ในช่วง 14.39 ถึง 134.12 (มีหน่วยเป็น  $mm-m/s$ ) (แสดงดังรูปที่ 5-2) โดยในการวิเคราะห์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นอยู่ในช่วง 0.44 ถึง 0.94 ซึ่งถือว่าสามารถยอมรับได้

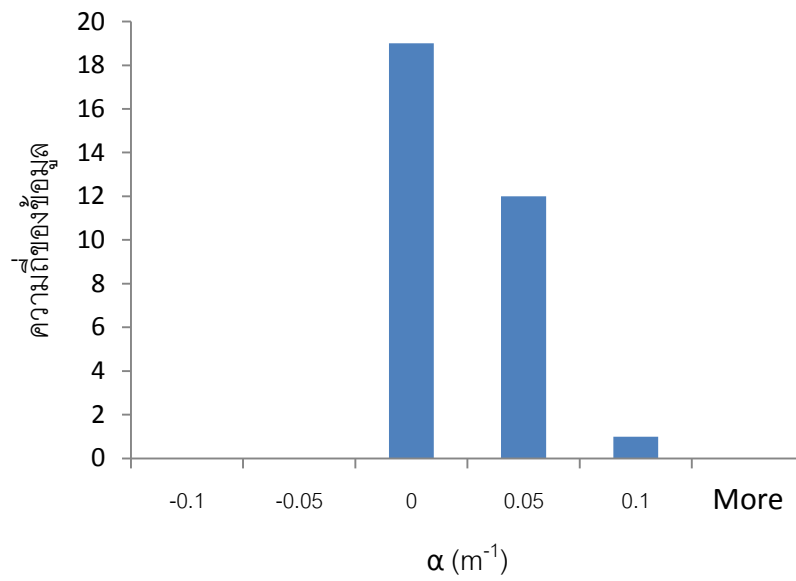
เมื่อพิจารณาภาพรวมในทุกโครงการทดสอบ พบว่า

- สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จึงถือว่าไม่พิจารณาผลของการลดทอนเชิงวัสดุเนื่องจากมีค่าน้อยมาก และให้กำหนดเป็นค่าคงที่สำหรับการวิเคราะห์การลดทอนของการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มด้วยสมการอย่างง่ายในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร และพื้นที่ใกล้เคียงในงานวิจัยนี้
- ค่าคงที่  $K$  มีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนตามสภาพเงื่อนไขจริงของแต่ละโครงการทดสอบ

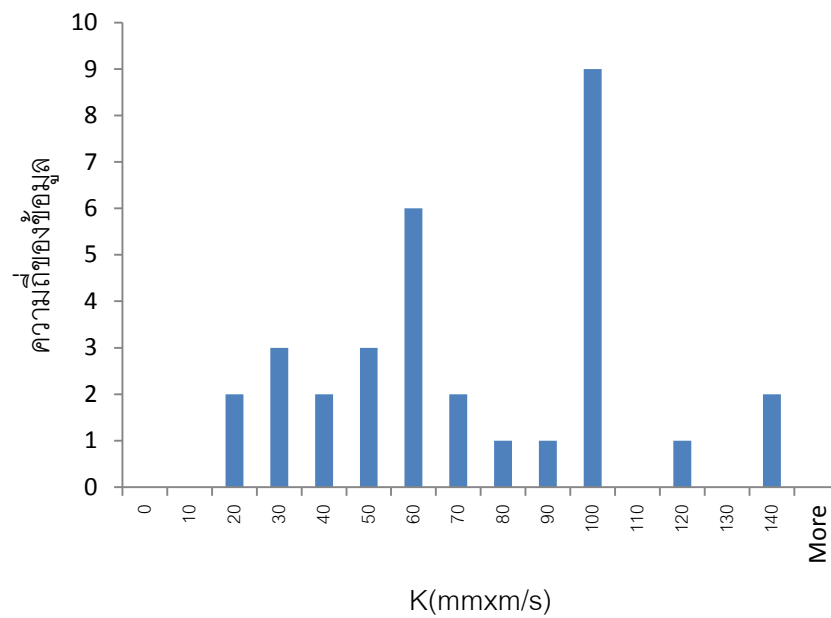
จากบทสรุปข้างต้นสามารถจัดรูปสมการที่(3.2) ให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายเมื่อ  $n = 1.0$  และ  $\alpha = 0.0 m^{-1}$  ดังนี้

$$V = \frac{K}{R} \quad (5.1)$$

เมื่อ	$V$	คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะทางจากแหล่งกำเนิด $R$ เมตร
	$K$	คือ ค่าคงที่ (มีค่าแปรผันตามเงื่อนไขสภาพการทำงานจริงในแต่ละโครงการทดสอบ) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร-เมตร/วินาที
	$R$	คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิด(เมตร)



รูปที่ 5-1 แผนภูมิฮิสโตแกรมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุ ( $\alpha$ ) แต่ละโครงการทดสอบ

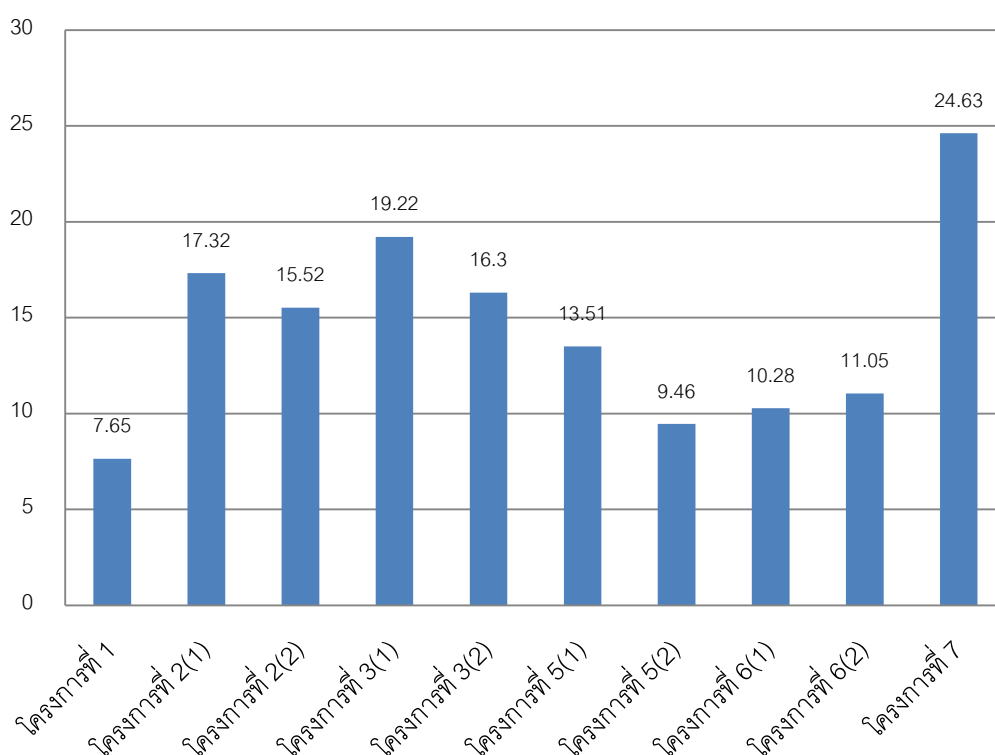


รูปที่ 5-2 แผนภูมิฮิสโตแกรมของค่าคงที่ K แต่ละโครงการทดสอบ

## 5.2 การประเมินระดับการสันสะท้อนที่เสาะเข้ม

### 5.2.1 ยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาะเข้มจากการคาดการณ์ของGRLWEAP ด้วยความเร็วเสาะเข้มจากการตรวจวัด PDA

รูปที่ 5-3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วที่หัวเสาะเข้มระหว่างการคาดการณ์ด้วย GRLWEAP กับผลตรวจวัดจากการทดสอบPDA โดยเฉลี่ยของแต่ละโครงการทดสอบ โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละโครงการ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 7% ถึง 24% ของค่าตรวจวัดจริง ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.5% และมีสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนเท่ากับ 5.16% จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมGRLWEAPมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาะเข้มขณะตอก และสามารถที่จะประยุกต์ใช้โปรแกรมดังกล่าวในการประเมินระดับการสันสะท้อนที่เสาะเข้มได้



รูปที่ 5-3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าคาดการณ์ด้วยGRLWEAP กับผลตรวจวัดจากการทดสอบPDAโดยเฉลี่ยของแต่ละโครงการทดสอบ

## 5.2.2 ความถี่ของแรงที่กระทำ

จากผลการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิด พบว่าความถี่ของแรงกระทำมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนมาก ซึ่งส่งผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาชิมกับที่ผิวดินมีผลการวิเคราะห์อยู่ในช่วงที่กว้าง และไม่เหมาะสมในการสรุปเพื่อการใช้งาน เนื่องจากค่าแรงสั่นสะเทือนที่คาดการณ์จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงมากเมื่อพิจารณาในแง่ของความปลอดภัย

จากการพิจารณาแบ่งช่วงความถี่ของแรงกระทำซึ่งวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในเสาชิมที่ตำแหน่งปลายเสาชิม ( $F_{bot}$ ) กับเวลา โดยพิจารณาแรงภายในเสาชิมที่ตำแหน่งหัวเสาชิม ( $F_{top}$ ) กับเวลาร่วมด้วย สามารถแบ่งช่วงความถี่ของแรงที่กระทำได้ออกเป็น 2 ช่วง ใหญ่ๆคือ ช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ(อยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์) และช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง(อยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์) จากลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนของความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_{bot}(t)$  กับ  $F_{top}(t)$

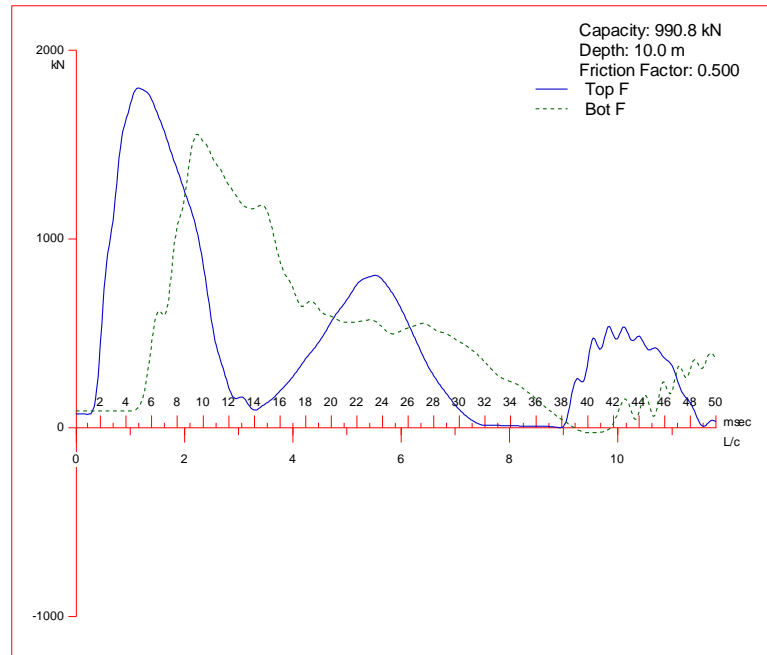
### 5.2.2.1 กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ(อยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์)

ในกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำต่ำมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_{bot}(t)$  กับ  $F_{top}(t)$  ดังรูปที่ 5-4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อเสาชิมได้รับพลังงานจากภายนอกจะเกิดคลื่นความเค้นเคลื่อนที่ไปในเสาชิม โดยแรงภายในที่หัวเสาชิม  $F_{top}$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับแรงในตอนแรก(ขณะที่ค้อนเสาชิมตกกระทบกับเสาชิม) หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป  $\frac{1L}{c}$  (เวลาที่คลื่นความเค้นเคลื่อนที่ไปถึงปลายเสาชิม) ดินที่ปลายเสาชิมจะเริ่มรับแรงที่ส่งผ่านมาจาก  $F_{top}$  เมื่อดินที่ปลายเสาชิมมีแรงต้านทานเพียงพอจะต้านเสาชิมทำให้เกิด  $F_{bot}$  ค่าหนึ่งซึ่งน้อยกว่า  $F_{top}$  (ลดลงเนื่องจากแรงต้านทานที่ผิวเสาชิม และวัสดุภายในเสาชิม) โดยคลื่นความเค้นยังไม่สูญเสียออกไปจากเสาชิมหมดโดยจะเดินทางกลับมาที่หัวเสาชิมอีกครั้ง และเคลื่อนที่กลับไปกลับมาจนพลังงานหมด

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



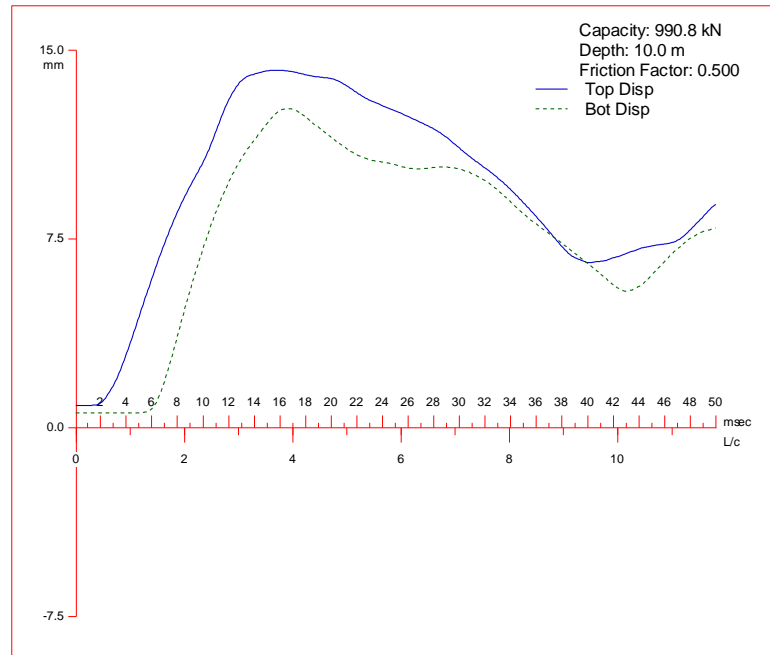
รูปที่ 5-4 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม พบว่าเมื่อแรงที่กระทำอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิในทุกกรณี โดยเปอร์เซ็นต์ของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ แสดงในภาคผนวก ญ ตาราง ญ-4

จากคำอธิบายข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเสาเข็มขณะตอกที่มีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_{bot}(t)$  กับ  $F_{top}(t)$  ดังกล่าว มีช่วงความถี่ของแรงกระทำต่ำ และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มน้อยกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ เป็นเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง โดยสามารถยืนยันข้อสรุปข้างต้นจากการพิจารณาการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลาจากการวิเคราะห์ของโปรแกรม GRLWEAP ดังรูปที่ 5-5 จากรูปจะเห็นได้ว่าเสาเข็มในแต่ละส่วนย่อย (segment) มีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือที่ปลายเสาเข็มมีการเคลื่อนที่น้อยกว่าที่หัวเสาเข็มขณะตอก (ที่สถานะพลวัต) เนื่องจากที่ปลายเสาเข็มมีแรงต้านทานที่มากกว่า และเพียงพอที่จะต้านกับพลังงานที่ส่งมาจากการตอกเสาเข็ม โดยเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อเสาเข็มหยุดนิ่งค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจะเท่ากัน (ที่สถานะสถิต) โดยการเคลื่อนตัวจะลดลงเพราะเสาเข็มจะดึงตัวกลับมาเนื่องจากแรงต้านทานของดินที่เพียงพอ

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ 5-5 การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลา  
กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ

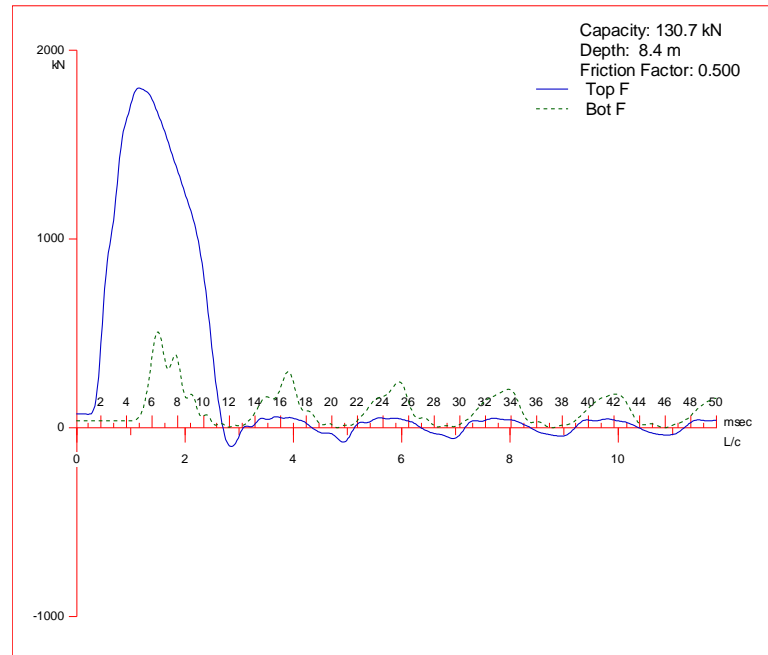
#### 5.2.2.2 กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง (อยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์)

ในกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำสูงมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_{bot}(t)$  กับ  $F_{top}(t)$  ดังรูปที่ 5-6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีนี้แตกต่างกับกรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำต่ำ จะเห็นว่าเมื่อเสาเข็มได้รับพลังงานจากภายนอก  $F_{top}$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับแรงในตอนแรกขณะที่ค้อนเสาเข็มตกกระทบกับเสาเข็ม หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป  $\frac{1L}{c}$  (เวลาที่คลื่นความเค้นเคลื่อนที่ไปถึงปลายเสาเข็ม) ดินที่ปลายเสาเข็มจะเริ่มรับแรงที่ส่งผ่านมาจาก  $F_{top}$  ทำให้  $F_{bot}$  ซึ่งเกิดจากแรงต้านทานดินที่ปลายเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแรงที่ส่งมาจากด้านบนมากขึ้นจนเกินแรงต้านทานดินที่ปลายเสาเข็มขณะนั้นจะรับได้ จะทำให้เสาเข็มทะลุชั้นดินลงไปทำให้  $F_{bot}$  ลดลงทันทีเนื่องแรงต้านทานที่ปลายที่ไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับแรงที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม นอกจากนี้จากกราฟจะสังเกตได้ว่าแรง  $F_{top}$  จะหายไปเลย แสดงว่าไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นความเค้น โดยพลังงานที่สูญเสียออกไปจากเสาเข็มลงไปยังดิน เนื่องจากไม่มีแรงต้านทานกลับที่เพียงพอทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่ทะลุชั้นดินตามกันไปทั้งหมด

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

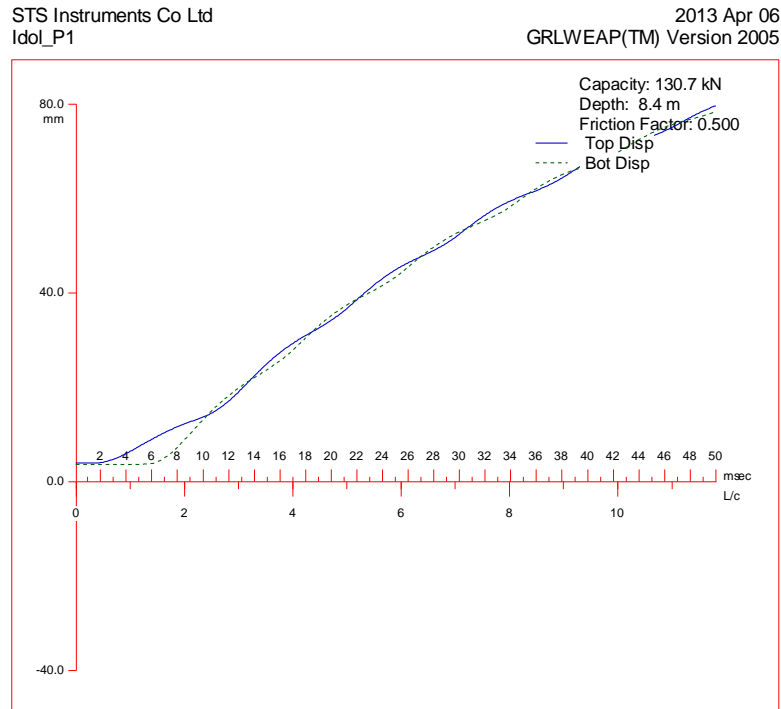
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ 5-6 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลา กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม พบว่าเมื่อแรงที่กระทำอยู่ในช่วงความถี่สูง แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มจะมีค่ามากกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิในทุกกรณี เปอร์เซ็นต์ของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ แสดงในภาคผนวก ญ ตาราง ญ-4

จากคำอธิบายข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเสาเข็มขณะตอกที่มีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_{bot}(t)$  กับ  $F_{top}(t)$  ดังกล่าว มีช่วงความถี่ของแรงกระทำสูง และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มมากกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ เป็นเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง โดยสามารถยืนยันข้อสรุปที่ตั้งไว้ข้างต้นโดยการสังเกตการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) กับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลาจากการวิเคราะห์ของโปรแกรม GRLWEAP ดัง จากรูปที่ 5-7 จะเห็นได้ว่าเสาเข็มในแต่ละส่วนย่อย (segment) มีการเคลื่อนที่ไปใกล้เคียงกันมาก (ที่สถานะพลวัต) เนื่องจากแรงต้านทานที่ปลายน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ใส่ไปในเสาเข็มขณะตอก ทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกันทั้งการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) โดยค่าการเคลื่อนตัวจะเพิ่มขึ้นและคงที่อยู่นั่นโดยส่วนใหญ่ คือ ไม่มีการดั่งกลับของเสาเข็มเนื่องจากดินที่ปลายเสาเข็มไม่มีแรงต้านทานเพียงพอ



รูปที่ 5-7 การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) กับเวลา  
กรณีช่วงความถี่ของแรงที่กระทำสูง

หมายเหตุ: ความสัมพันธ์ของแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) กับแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) ที่เวลาใดๆ และการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม ( $\delta_{top}$ ) และการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ( $\delta_{bot}$ ) ที่เวลาใดๆ จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม GRLWEAP สำหรับการวิเคราะห์เพื่อแบ่งประเภทของเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบแสดงในภาคผนวก ญ โดยกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงกรณีดินทราย และดินเหนียวแสดงดังตาราง ญ -1 และตาราง ญ-2 ตามลำดับ กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง ดังตาราง ญ-3

### 5.2.3 ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิด และการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนผ่านชั้นดิน

ในการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิด เนื่องจากขณะทุบตัวเสาเข็มจะทุบตัวไปด้วยกันจึงกำหนดให้ความเร็วการสั่นสะเทือนที่มีค่ามากกว่าเป็นตัวคุมความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากผลการวิเคราะห์ในทุกโครงการทดสอบ โดยภาพรวมความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทุบตัวที่ปลายเสาเข็ม ( $V_b$ ) เป็นค่าที่ควบคุมความเร็วการสั่นสะเทือนที่ปล่อยออกมาจากเสาเข็ม และเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มซึ่งเป็นชั้นดินด้านล่าง ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนดังกล่าวกับความเร็วนุภาคสูงสุดที่ผิวดิน



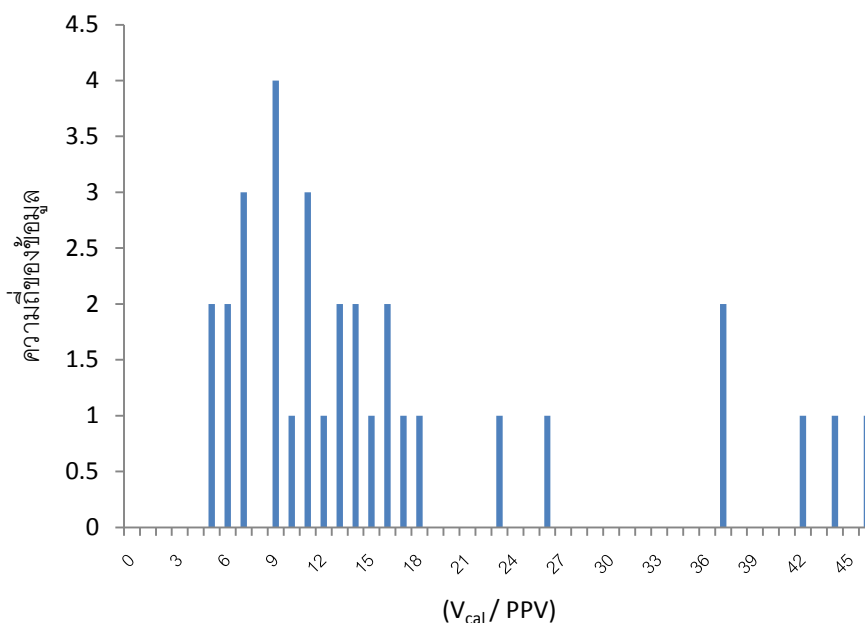
ต้องปรับค่าด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการสั้นสะเทือนที่เสาชิมกับที่ผิวดินในกรณีพิจารณาปรับค่าด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับแก้ดังตารางที่ 5-1 ตารางที่ 5-1 อัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการสั้นสะเทือนที่เสาชิมกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) กับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $T$ )

รายการ	อัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการสั้นสะเทือนที่เสาชิมกับที่ผิวดิน ( $\psi$ )		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ความแปรผัน
เมื่อพิจารณาในทุกโครงการทดสอบ			
กรณีปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน	16.73	14.61	0.87
กรณีไม่ปรับแก้ด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน	14.95	15.56	1.04

### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั้นสะเทือนที่เสาชิมกับที่ผิวดิน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการสั้นสะเทือนซึ่งเกิดจากการหลุดตัวของดินสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยGRLWEAPและสมการรูปแบบปิด กับความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินที่ตำแหน่งใกล้จุดตอก  $\left( \psi = \frac{V_{cal}}{V_{ref}} \right)$  ในแต่ละโครงการเป็นดังตารางที่ 5-5

จากผลการวิเคราะห์โดยภาพรวมในทุกโครงการพบว่า เมื่อความถี่ของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์ ค่า  $\psi$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 3.4 ถึง 71.4 ซึ่งถือว่ามี การกระจายตัวที่มากเมื่อพิจารณาจากการวัดการกระจายตัวสัมพัทธ์ของข้อมูล แสดงดังตารางที่ 5-2



รูปที่ 5-8 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ  $V_{cal} / PPV$  ในแต่ละโครงการทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์  $\psi$  ตามช่วงความถี่ของแรงที่กระทำ และลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม โดยแบ่งเป็น กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง และกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูงแล้ว จะทำให้การกระจายตัวสัมพัทธ์ของข้อมูลมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์รวมในทุกโครงการทดสอบ อธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 5-2 การวัดการกระจายสัมพัทธ์ของข้อมูลอัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ )

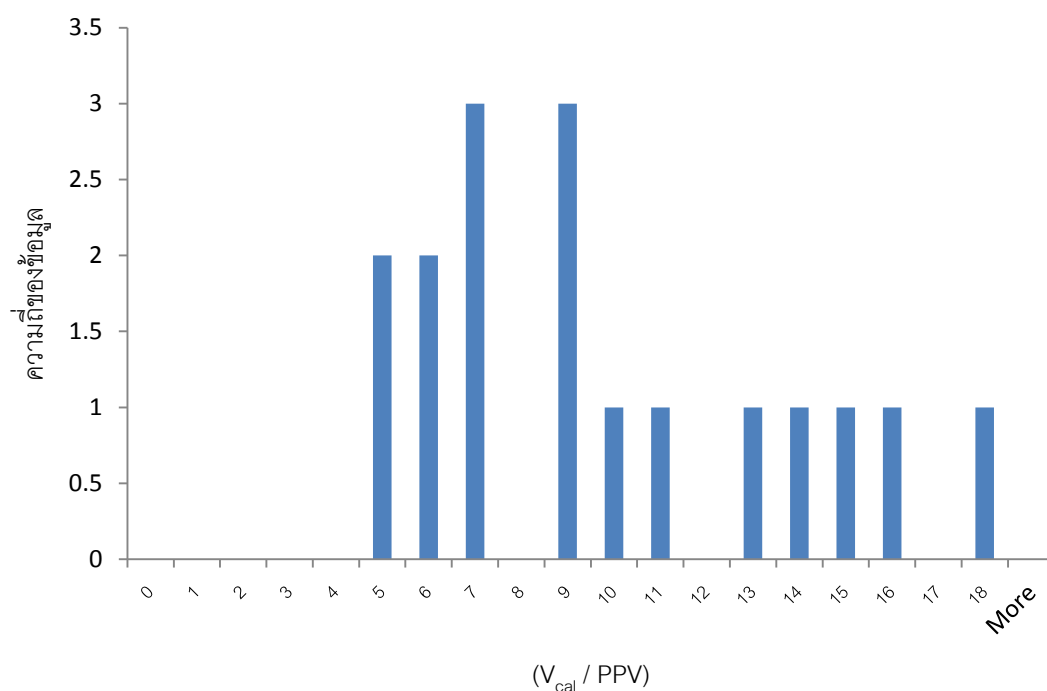
รายการ	อัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ )		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ความแปรผัน
ทุกโครงการทดสอบ	16.73	14.61	0.87
เสาเข็มรับแรงต้านทานที่ปลาย	9.37	4.03	0.43
เสาเข็มรับแรงเสียดทาน	25.08	17.70	0.71

### 5.3.1 กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง

เมื่อพิจารณากรณีที่เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง จะพบว่ามีค่าของความถี่ของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์ และ  $\psi$  มีค่าอยู่ในช่วง 3.4 ถึง 17.5 เมื่อดินที่ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ในดินเหนียว และดินทราย แสดงดังตารางที่ 5-6

จากแผนภูมิฮิสโตแกรมของ  $\psi$  สำหรับกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงดังรูปที่ 5-9 ยังสามารถแบ่งกลุ่ม  $\psi$  ได้สองกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 เมื่อ  $\psi$  อยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 11
- กลุ่มที่ 2 เมื่อ  $\psi$  อยู่ในช่วงประมาณ 13 ถึง 17

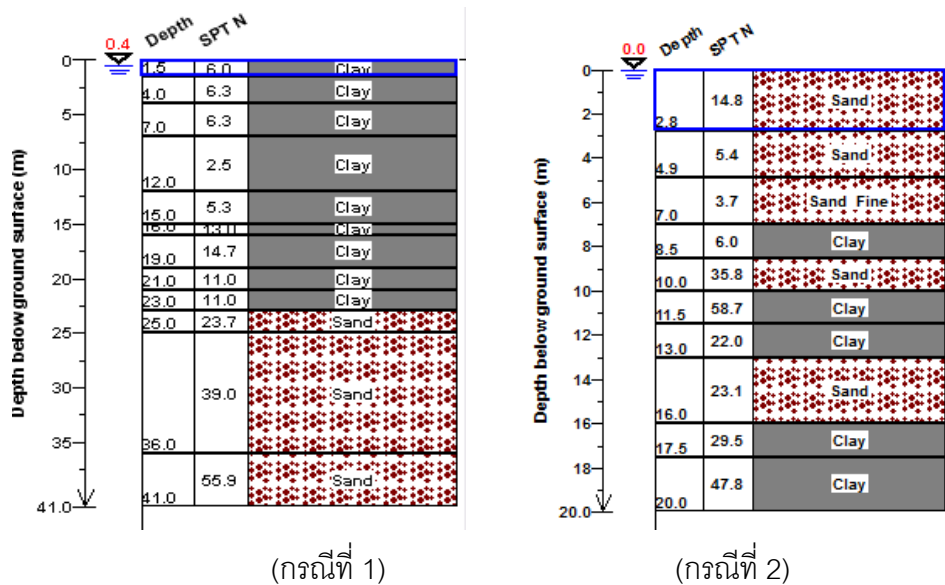


รูปที่ 5-9 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ  $V_{cal} / PPV$  ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำต่ำ

ความแตกต่างของ  $\psi$  สองกลุ่มนี้ที่เด่นชัดคือ ข้อมูลลักษณะเฉพาะของชั้นดินที่พิจารณาซึ่งสามารถแบ่งได้สองประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

- กรณีที่ 1 ชั้นดินด้านบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งหมด และมีชั้นดินทรายแข็งวางตัวอยู่ที่ระดับปลายเสาเข็ม

- กรณีที่ 2 มีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินทรายแข็ง และปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ชั้นดินเหนียวอ่อน หรือระดับดินทรายแข็งชั้นล่าง โดยความหนาของชั้นดินทรายจากระดับผิวดินถึงระดับปลายเสาเข็มรวมต้องมีค่ามากกว่า 50% แต่ไม่เกิน 85% ของความลึกการตอกแสดงดังรูปที่ 5-10



รูปที่ 5-10 ลักษณะเฉพาะของชั้นดินในกรณี 1 และ กรณีที่ 2

ในกรณี  $\psi$  อยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 11 ลักษณะชั้นดินจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี 1 ซึ่งพบในโครงการทดสอบที่ 1, 6, 7, 8 และ 9 โดยพบว่า  $\psi$  มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับค่าต้านทานการตอกหรือ N-SPT เมื่อระดับความลึกปลายเสาเข็มมีความใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 5-3 ซึ่งถือว่ากรณีนี้มี  $\psi$  ต่ำซึ่งเหมาะสมใช้ในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินเพื่อให้ครอบคลุมทางด้านความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 5-3 แนวโน้มของ  $\psi$  กับ ค่าต้านทานการตอก N-SPT

ระดับปลายเสาเข็ม (เมตร)	N-SPT(ครั้ง/ฟุต)	$\psi$
18.00	16	4
24.5	24	6
17.00, 19.00, 21.00	26	7,7,11
24.00, 26.00	33	9,9
22.00	38	9

ในกรณี  $\psi$  อยู่ในช่วงประมาณ 13 ถึง 17 ลักษณะชั้นดินจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 ซึ่งพบในโครงการที่ 2 และ 3 ซึ่ง  $\psi$  มีค่าที่สูงมากแตกต่างกับข้อมูลส่วนใหญ่ในกลุ่มที่ 1 เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่มาของ  $\psi$  พบว่า สาเหตุที่ค่า  $\psi$  ในกลุ่มนี้มีค่าสูงนั้นปัจจัยหลักน่าจะมาจากความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดินจากการตรวจวัด เพราะมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับโครงการในกลุ่มที่ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก N และระยะทางจากแหล่งกำเนิดแล้วค่า PPV ที่ตรวจวัดได้ควรมีค่ามากกว่าที่เป็นอยู่ ทั้งนี้เป็นอาจเป็นผลของการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อคลื่นเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยไปหาตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์มาก(ตรงกับการส่งผ่านของคลื่นในลักษณะชั้นดินกรณีที่ 2) คลื่นส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับทำให้มีขนาดของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินลดลง แม้ว่าจะมีการพิจารณาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไปในการวิเคราะห์ความเร็วการสั่นสะเทือนจากสมการรูปแบบปิดแล้ว แต่ค่าดังกล่าวคำนวณจากโมดูลัสแรงเฉือนที่เฉลี่ยตลอดความลึกเสาเข็มซึ่งโดยรวมแล้วก็จะเข้าลักษณะดินกรณีที่ 1 เช่นเดิม

(หมายเหตุ: พบข้อผิดพลาดในโครงการที่ 4 ที่ทุกระดับความลึกการวิเคราะห์ โดยในโครงการนี้มีความถี่ของแรงที่กระทำเท่ากับ 16 เฮิร์ตซ์ มีลักษณะการส่งผ่านคลื่นความเค้นขณะตอกและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในเสาเข็มประเภทเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง และมีลักษณะเฉพาะของชั้นดินเป็นไปตามกรณีที่ 1 แต่พบว่า  $\psi$  มีค่าอยู่ในช่วง 13 ถึง 16 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับลักษณะเฉพาะชั้นดินเป็นไปตามกรณีที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่โครงการทดสอบดังกล่าว ซึ่งสภาพหน้างานในวันที่ทำการทดสอบมีฝนตกในช่วงก่อน และขณะทำการทดสอบ อีกทั้งลักษณะผิวดินเป็นดินปนทรายเม็ดละเอียด และหลวมมาก ซึ่งอาจทำให้ผิวสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดกับดินไม่ดีพอ การส่งผ่านพลังงานจากดินมายังอุปกรณ์ตรวจวัดไม่ดี เนื่องจากสังเกตเห็นว่าค่า PPV ของโครงการนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงการที่ 9 ซึ่งมีพลังงานที่ให้แก่เสาเข็มขณะตอกชนิดเสาเข็ม และชนิดดินใกล้เคียงกัน)

ในการประยุกต์ใช้งานของ  $\psi$  ที่ได้จากการศึกษานี้กรณีเป็นเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงจะแบ่งประเภทของการนำไปใช้งาน โดยพิจารณาเรื่องลักษณะเฉพาะของดินที่แตกต่างในกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 รายละเอียดดังที่แสดงไว้ข้างต้น และตัดข้อมูลจากโครงการที่ 4 ออกจากการวิเคราะห์ ทำให้สามารถสรุปค่าแนะนำในการใช้งานได้ดังตารางที่ 5-4

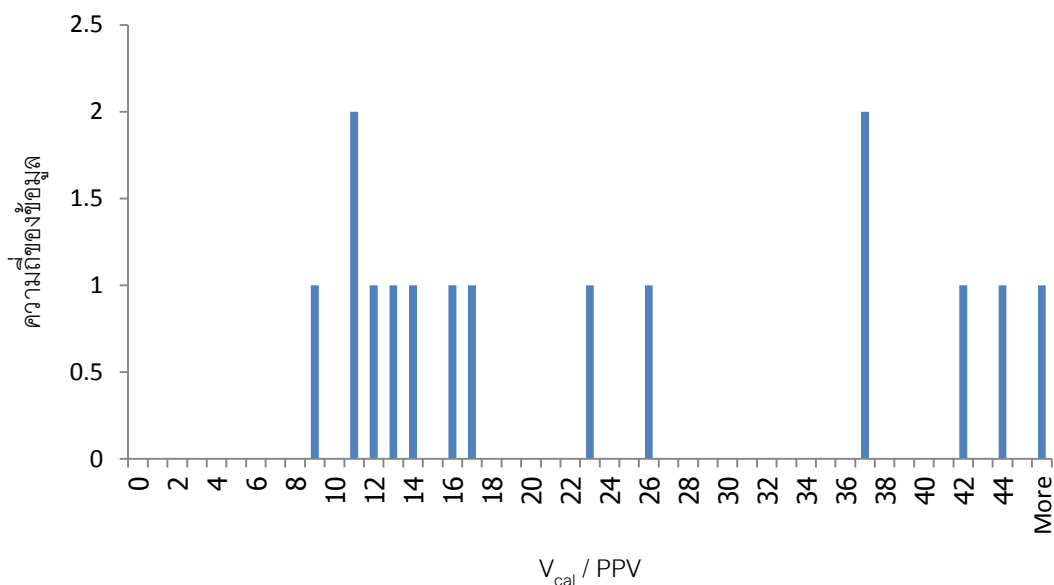
### 5.3.2 กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง

เมื่อพิจารณากรณีที่เสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง จะพบว่ามีความถี่ของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์ และ  $\psi$  มีค่าอยู่ในช่วง 9.26 ถึง 71.36 เมื่อดินที่ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ในดินเหนียว และดินทราย แสดงดังตารางที่ 5-7

จากแผนภูมิฮิสโตแกรมของ  $\psi$  สำหรับกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูงดังรูปที่ 5-9 พบว่า  $\psi$  ของโครงการทดสอบที่ 3 ระดับความลึกปลายเสาเข็ม 8.40 เมตร มีค่าเท่ากับ 71.36 เมื่อความถี่ของแรงกระทำเท่ากับ 71 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากค่าโดยส่วนใหญ่ในกลุ่มอย่างมากซึ่งลักษณะเฉพาะของข้อมูลสำหรับกรณีดังกล่าวในการวิเคราะห์มีดังนี้

- มีค่าการหลุดตัวที่เท่ากันทั้งเสาเข็ม
- มีค่าการหลุดตัวมากเมื่อเทียบกับกรณีอื่น เนื่องจากแรงต้านทานดินน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ให้กับเสาเข็มขณะตอก
- การหลุดตัวของเสาเข็มมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาและไม่มีแนวโน้มคงที่ หรือ ดั้งกลับ

ซึ่งจากลักษณะเฉพาะดังกล่าวทำให้กรณีดังกล่าวมีความถี่ของแรงที่กระทำสูงกว่ากรณีอื่นๆ ดังนั้นเมื่อไม่พิจารณาค่าดังกล่าวจะพบว่าค่า  $\psi$  ในกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูงจะมีค่าอยู่ในช่วง 9.26 ถึง 43.98



รูปที่ 5-11 แผนภูมิฮิสโตแกรมของ  $V_{cal} / PPV$  ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำสูง

อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานของ  $\psi$  ที่ได้จากการศึกษานี้จะเลือกใช้กรณีศึกษาทั้งหมดของกรณีเสาะเข็มรับแรงเสียดทานที่ผิวเป็นหลัก ทำให้สามารถสรุปค่าแนะนำในการใช้งานได้ดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ค่าแนะนำ  $\psi$  ในการใช้งาน

ชนิดเสาะเข็ม	$\psi$	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด(ความปลอดภัย)
รับแรงต้านทานที่ปลายเป็นหลัก(กรณีที่ 1)	7	5
รับแรงต้านทานที่ปลายเป็นหลัก(กรณีที่ 2)	14	13
รับแรงเสียดทานที่ผิวเป็นหลัก	25	9

หมายเหตุ: กรณีที่ 1 คือ ชั้นดินด้านบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนโดยมีชั้นดินทรายแข็งวางตัวอยู่ที่ระดับปลายเสาะเข็ม และกรณีที่ 2 คือ มีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินทรายแข็ง และปลายเสาะเข็มวางตัวอยู่ที่ชั้นดินเหนียวอ่อน หรือระดับดินทรายแข็งชั้นล่าง โดยความหนาของชั้นดินทรายจากระดับผิวดินถึงระดับปลายเสาะเข็มรวมต้องมีค่ามากกว่า 50% แต่ไม่เกิน 85% ของความลึกการตอก

### 5.3.3 แบ่งกลุ่มข้อมูลตามชนิดดินที่ระดับปลายเสาะเข็ม

เมื่อพิจารณาชนิดของดินที่ระดับปลายเสาะเข็มที่ส่งผลต่อการแบ่งประเภทของเสาะเข็มตามลักษณะการถ่ายแรงของเสาะเข็มไปสู่ดิน ในการศึกษานี้พบว่า เมื่อปลายเสาะเข็มวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวเสาะเข็มสามารถมีโอกาสที่จะเป็นเสาะเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง และเสาะเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง ในขณะที่เมื่อปลายเสาะเข็มวางตัวอยู่บนชั้นดินทรายจะเป็นเสาะเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง อย่างไรก็ตามกรณีดังกล่าวอาจมีโอกาสที่จะเป็นเสาะเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูงได้ถ้าที่ระดับความลึกดังกล่าวเป็นดินทรายหลวมมาก ดังนั้นสรุปได้ว่าเสาะเข็มขณะตอกมีโอกาสที่จะมีความถี่ของแรงกระทำอยู่ในช่วงสูง และช่วงต่ำได้ โดยไม่ขึ้นกับชนิดของดินที่ระดับปลายเสาะเข็ม แต่ปัจจัยหลักคือพลังงานที่ใส่เข้าไปในขณะตอกเสาะเข็มเทียบกับแรงต้านทานดินที่ตำแหน่งนั้นจะรับได้

ตารางที่ 5-5 อัตราส่วนของ  $V_{cal} / V_{ref}$  ในแต่ละโครงการทดสอบ

Site no.	Depth (m)	Soil type	N-SPT (bl./ft)	f (Hz)	$V_b$ (mm/s)	$V_{cal}$ (mm/s)	PPV (mm/s)	Ratio $\left(\frac{V_b}{V_{ref}}\right)$	Ratio $\left(\frac{V_{cal}}{V_{ref}}\right)$
1	16.0	clay	13	56	1120	1381	121	9	11
	20.0	clay	11	21	1084	1226	136	8	9
	24.5	sand	24	21	647	827	134	5	6
2	5.5	clay	25	35	797	898	87	9	10
	6.5	sand	58	20	992	1248	96	10	13
3	8.4	clay	6	71	4319	4023	56	77	71
	10.0	sand	36	15	673	866	61	11	14
	11.0	clay	59	19	393	519	59	7	9
	13.0	clay	22	50	1043	1130	45	23	25
	16.0	sand	23	20	837	902	52	16	17
4	21.0	clay	24	16	184	232	15	13	16
	23.5	clay	43	16	153	201	16	10	13
6	14.5	clay	9	45	1736	2106	58	30	36
	16.0	clay	9	45	1743	2069	57	31	37
	19.0	clay	25	35	857	1151	91	9	13
	22.0	sand	38	17	593	777	89	7	9
7	18.0	clay	14	42	1386	1490	97	14	15
	20.0	clay	14	42	858	1022	78	11	13
	22.0	clay	16	42	778	932	93	8	10
	24.0	sand	33	19	645	841	91	7	9
	26.0	sand	33	19	632	802	92	7	9
8	17.0	sand	27	17	522	642	60	9	11
	19.0	sand	27	17	487	583	89	5	7
	21.0	sand	27	18	471	551	79	6	7
9(P1)	12.0	clay	4	39	1237	1177	27	46	44
	15.0	clay	14	39	500	646	28	18	23
	18.0	sand	16	14	217	267	56	4	5
	20.0	clay	41	14	146	192	41	4	5
9(P2)	12.0	clay	4	39	1237	1177	28	44	42
	15.0	clay	14	39	500	646	39	13	17
	18.0	sand	16	14	217	267	50	4	5
	20.0	clay	41	14	146	192	38	4	5



ตารางที่ 5-6 อัตราส่วนของ  $V_{cal} / V_{ref}$  ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำต่ำ

Site no.	Depth (m)	Soil type	N-SPT (bl./ft)	f (Hz)	$V_b$ (mm/s)	$V_{cal}$ (mm/s)	$V_{ref}$ (mm/s)	Ratio $\left( \frac{V_{cal}}{V_{ref}} \right)$
9(P1)	20.0	clay	41	14	146	192	41	5
9(P2)	20.0	clay	41	14	146	192	38	5
3	11.0	clay	59	19	393	519	59	9
4	23.5	clay	43	16	153	201	16	13
4	21.0	clay	24	16	184	232	15	16
9(P1)	18.0	sand	16	14	217	267	56	5
9(P2)	18.0	sand	16	14	217	267	50	5
1	24.5	sand	24	21	647	827	134	6
8	19.0	sand	27	17	487	583	89	7
8	21.0	sand	27	18	471	551	79	7
6	22.0	sand	38	17	593	777	89	9
7	26.0	sand	33	19	632	802	92	9
7	24.0	sand	33	19	645	841	91	9
8	17.0	sand	27	17	522	642	60	11
2	6.5	sand	58	20	992	1248	96	13
3	10.0	sand	36	15	673	866	61	14
3	16.0	sand	23	20	837	902	52	17

ตารางที่ 5-7 อัตราส่วนของ  $V_{cal} / V_{ref}$  ในแต่ละโครงการทดสอบกรณีช่วงความถี่ของแรงกระทำสูง

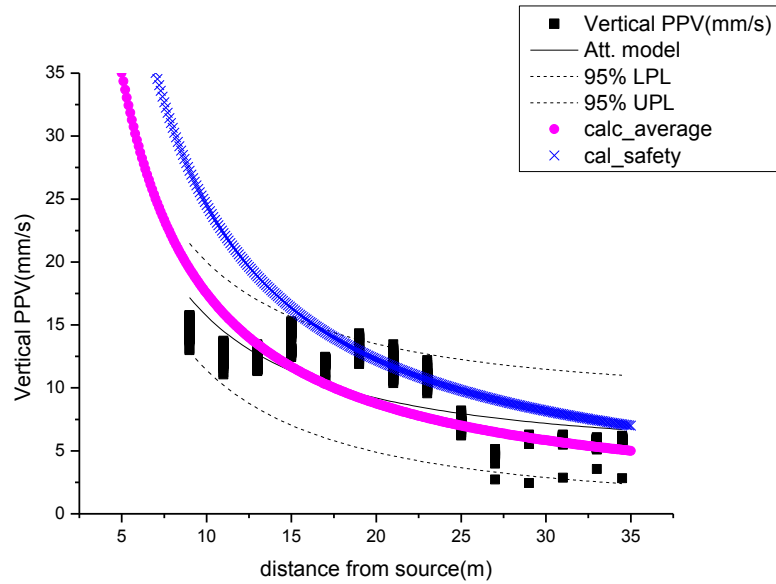
Site no.	Depth (m)	Soil type	N-SPT (bl./ft)	f (Hz)	$V_b$ (mm/s)	$V_{cal}$ (mm/s)	$V_{ref}$ (mm/s)	Ratio $\left( \frac{V_{cal}}{V_{ref}} \right)$
1	20.0	clay	11	56	1084	1226	136	9
2	5.5	clay	25	35	797	898	87	10
7	22.0	clay	16	42	778	932	93	10
1	16.0	clay	13	56	1120	1381	121	11
6	19.0	clay	25	35	857	1151	91	13
9(P2)	15.0	clay	14	39	500	646	39	17
7	20.0	clay	14	42	858	1022	78	13
7	18.0	clay	14	42	1386	1490	97	15
9(P1)	15.0	clay	14	39	500	646	28	23
3	13.0	clay	22	50	1043	1130	45	25
9(P2)	12.0	clay	4	39	1237	1177	28	42
9(P1)	12.0	clay	4	39	1237	1177	27	44
6	14.5	clay	9	45	1736	2106	58	36
6	16.0	clay	9	45	1743	2069	57	37
3	8.4	clay	6	71	4319	4023	56	71

### 5.3.1 การประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆ

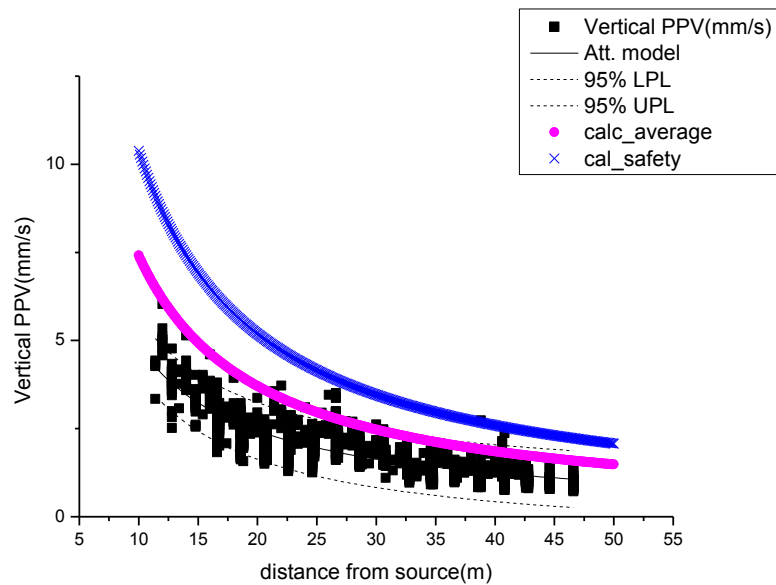
เมื่อดำเนินการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อ 3.2.4 ทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆ จากซึ่งคำนวณจากโปรแกรม GRLWEAP และสมการรูปแบบปิดโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) กับข้อมูลตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนที่ผิวดินในแต่ละโครงการดังนี้

- กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง (กรณีที่ 1) ดังรูปที่ 5-12 ถึง รูปที่ 5-17
- กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง (กรณีที่ 2) ดังรูปที่ 5-18 ถึง รูปที่ 5-20
- กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง ดังรูปที่ 5-21 ถึง รูปที่ 5-26

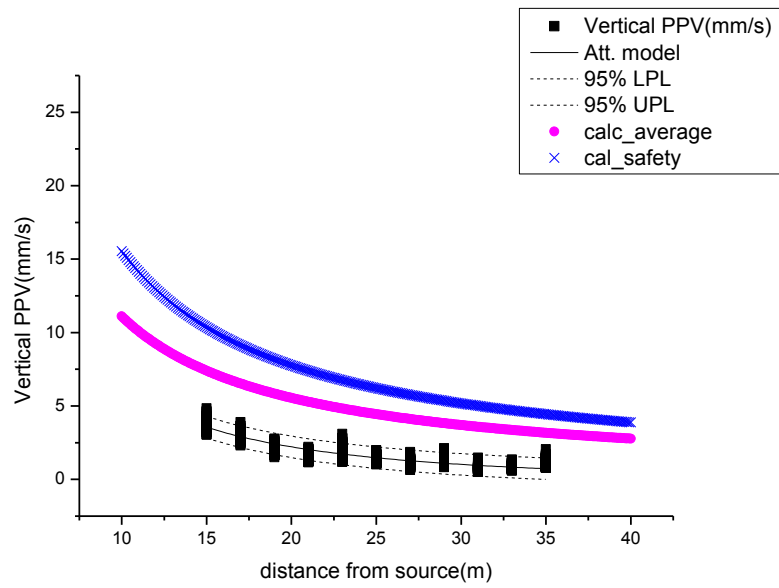
กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง(กรณีที่1)



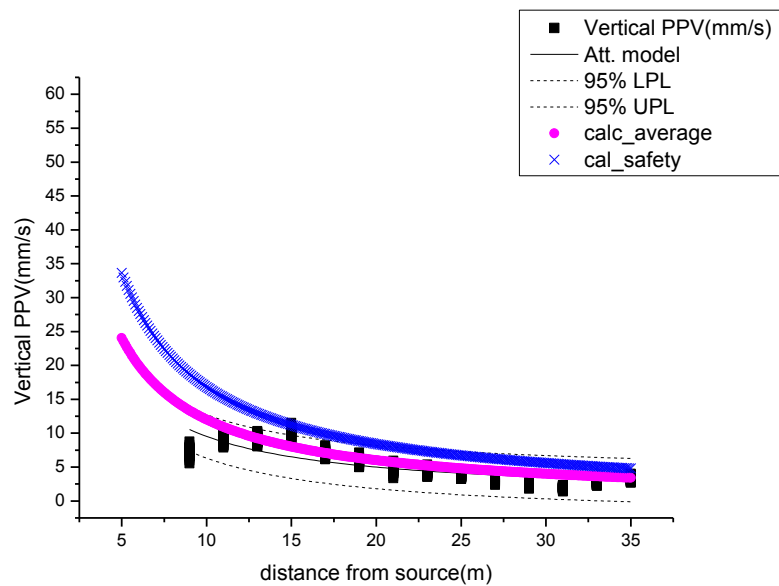
รูปที่ 5-12 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 19.00 เมตร ถึง 23.00 เมตร โครงการที่ 1



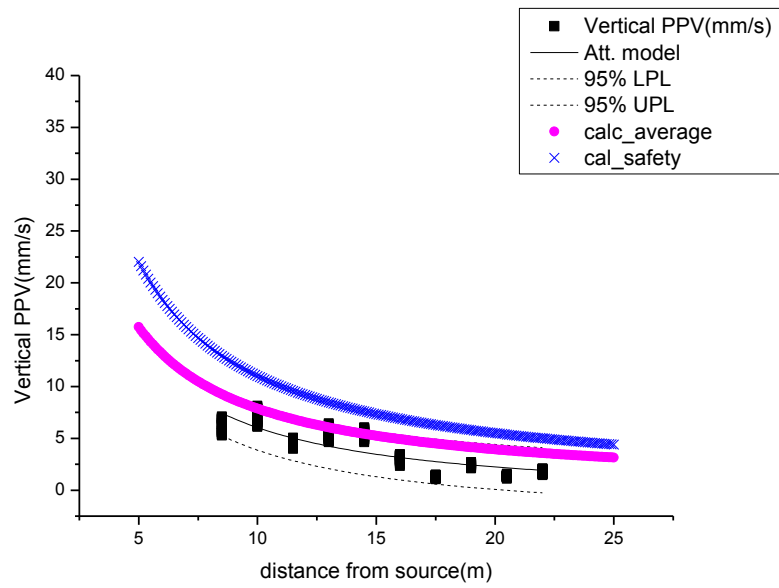
รูปที่ 5-13 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 10.20 เมตร ถึง 11.00 เมตร โครงการที่ 3



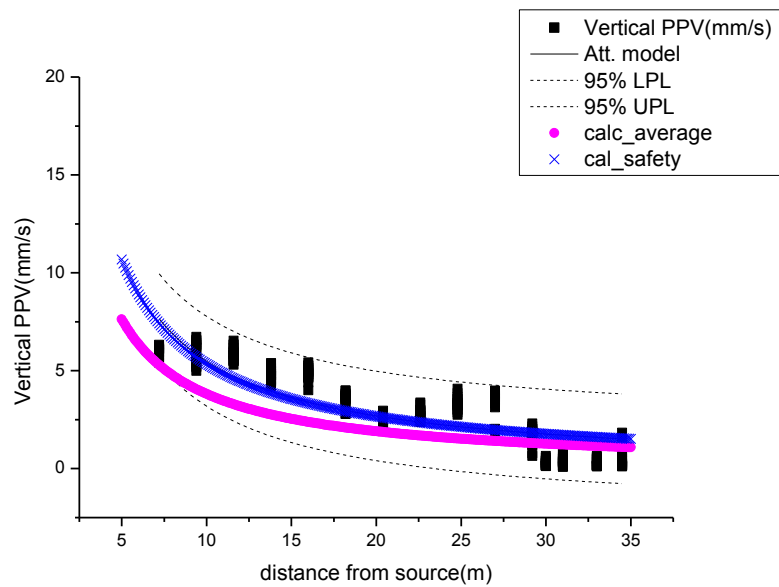
รูปที่ 5-14 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 21.00 เมตร ถึง 22.00 เมตร โครงการที่ 6



รูปที่ 5-15 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 23.00 เมตร ถึง 24.00 เมตร โครงการที่ 7

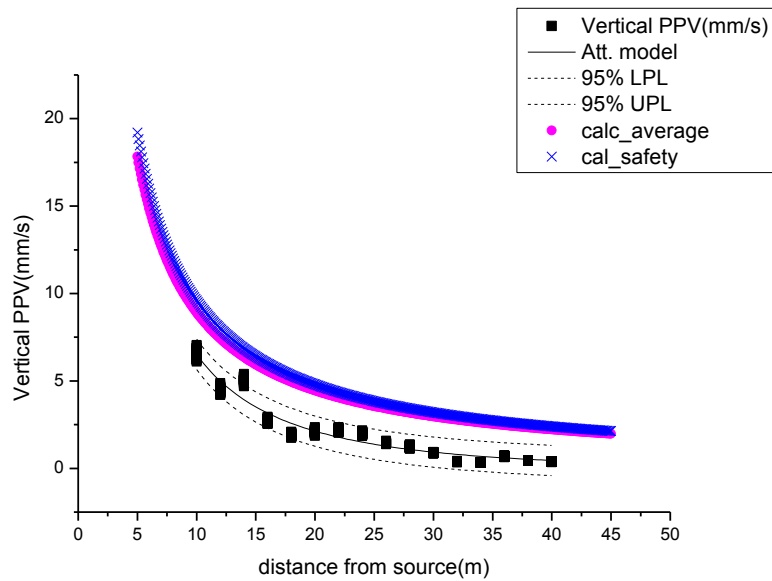


รูปที่ 5-16 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 20.50 เมตร ถึง 21.00 เมตร โครงการที่ 8

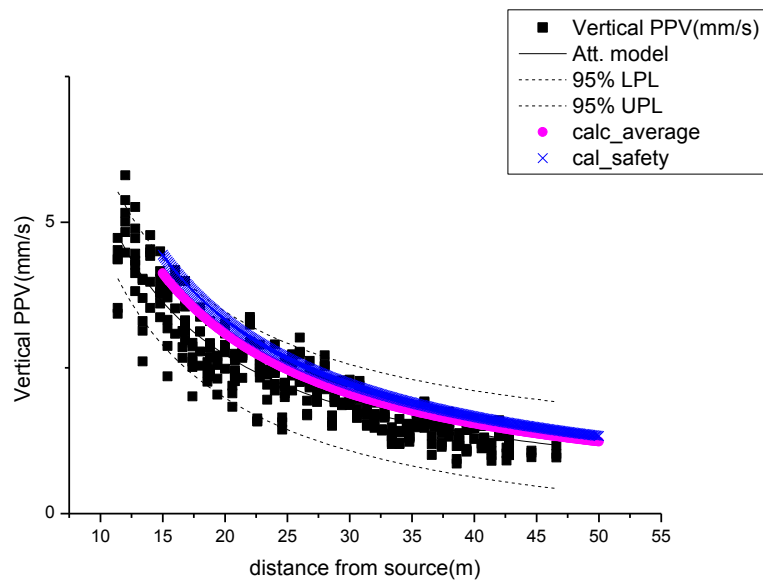


รูปที่ 5-17 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 16.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร โครงการที่ 9

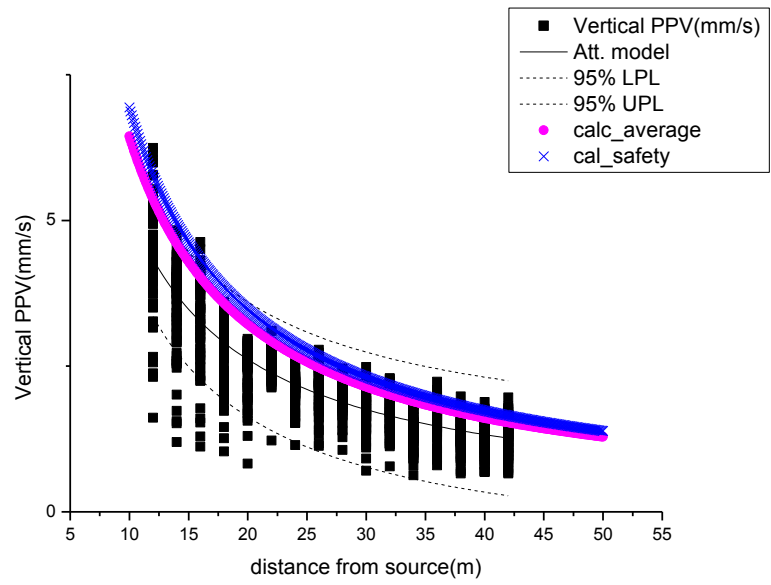
กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง(กรณีที่2)



รูปที่ 5-18 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 6.00 เมตร ถึง 6.50 เมตร โครงการที่ 2

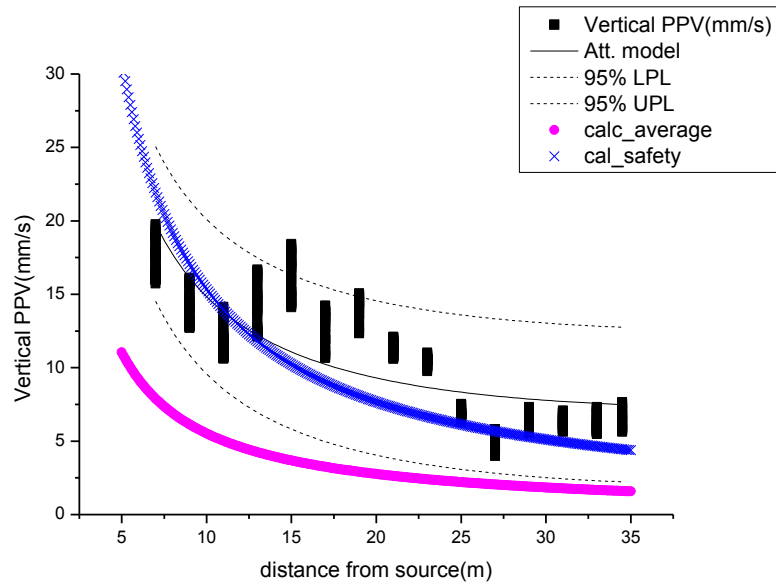


รูปที่ 5-19 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 9.00 เมตร ถึง 10.00 เมตร โครงการที่ 3

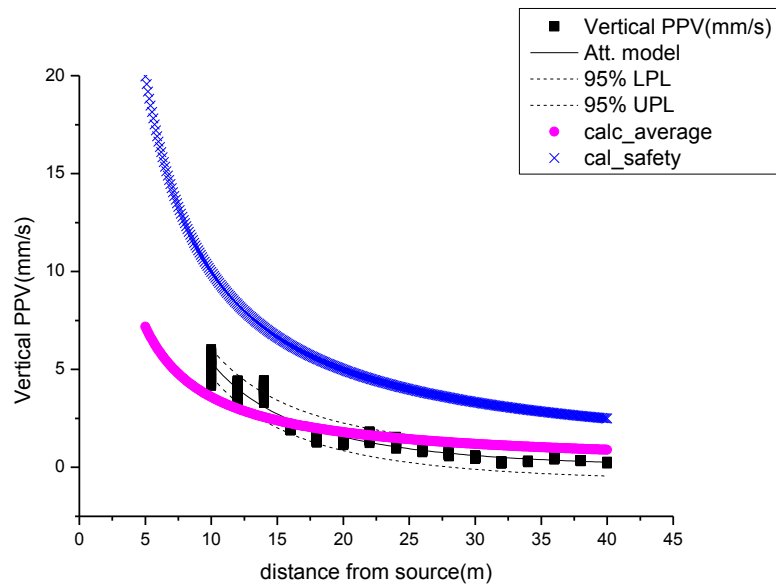


รูปที่ 5-20 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 14.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร โครงการที่ 3

กรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามพิกัดข้างขณะตอกสูง

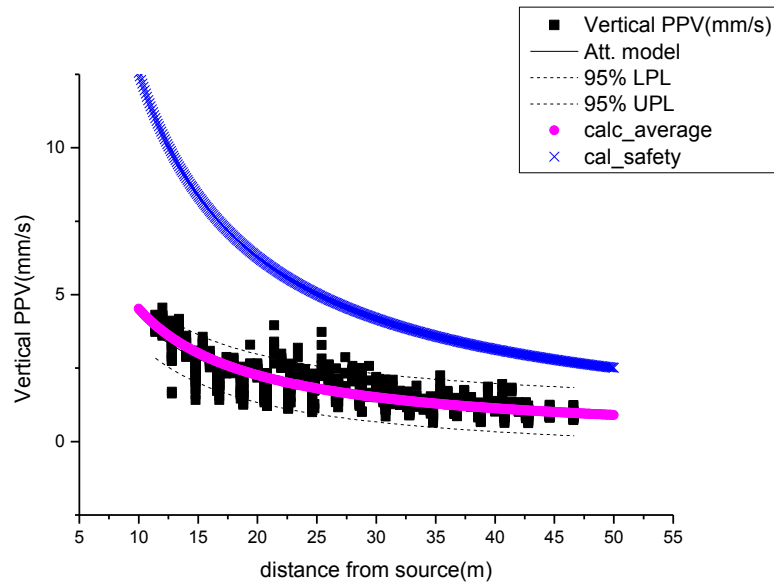


รูปที่ 5-21 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 16.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร โครงการที่ 1

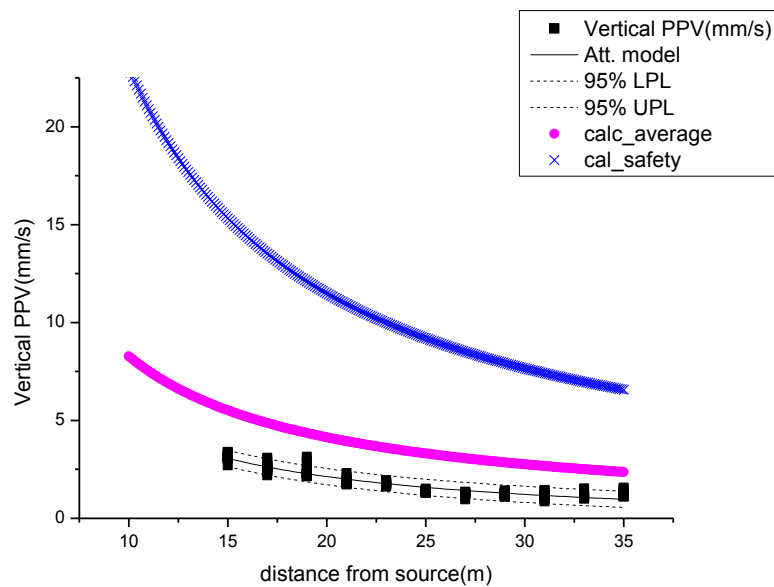


รูปที่ 5-22 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 5.00 เมตร ถึง 5.50 เมตร โครงการที่ 2

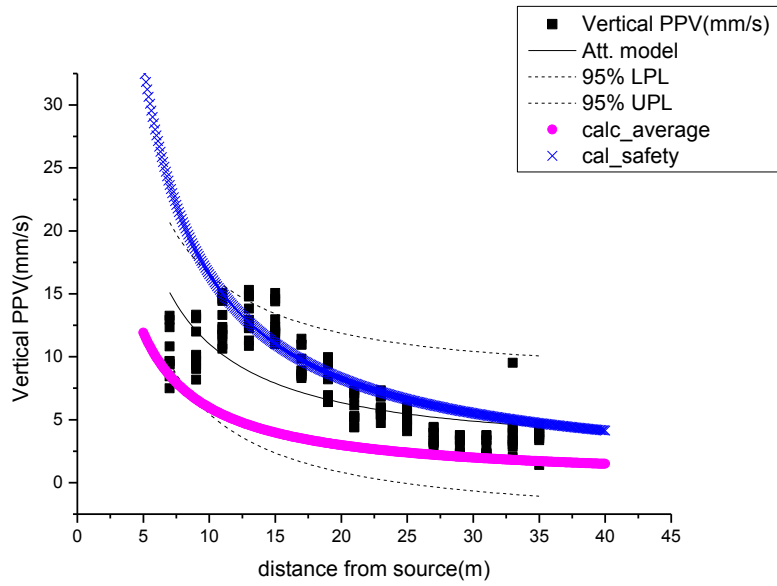




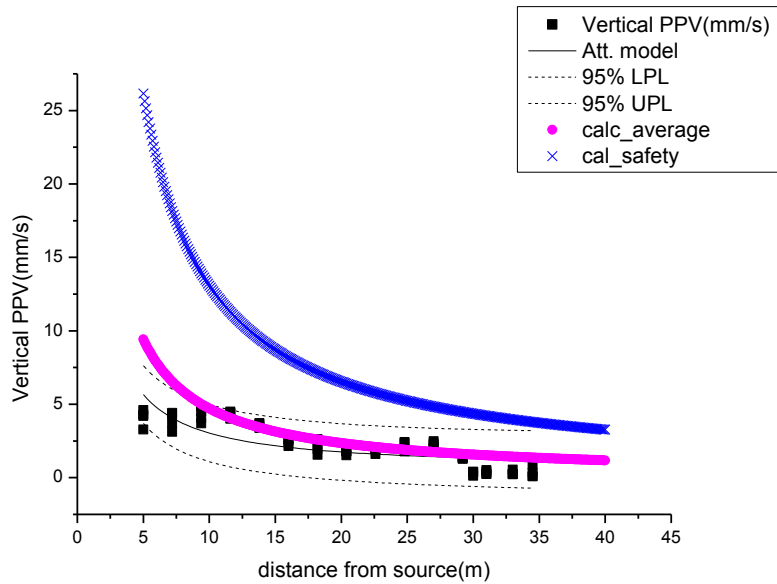
รูปที่ 5-23 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร โครงการที่ 3



รูปที่ 5-24 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของ  
ข้อมูลในช่วงความลึก 15.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร โครงการที่ 6



รูปที่ 5-25 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 17.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร โครงการที่ 7



รูปที่ 5-26 การประเมินความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร โครงการที่ 9

## บทที่ 6

### สรุปผลงานวิจัย

#### 6.1 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน

งานวิจัยนี้กำหนดใช้ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนตั้งเป็นหลักในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินเนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ครอบคลุมในแง่ของความปลอดภัย และมีจำนวนชุดข้อมูลชุดมากเพียงพอสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การลดทอนของแรงสั่นสะเทือน ในการวิเคราะห์เมื่อกำหนดสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเรขาคณิตเท่ากับ 1.0 จะสามารถวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงวัสดุที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์จึงสามารถกำหนดแบบจำลองการลดทอนในรูปอย่างง่ายแสดงดังสมการ(6.1)

$$V = \frac{K}{R} \quad (6.1)$$

เมื่อ	$V$	คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะทางใดๆจากจุดตอกเสาเข็ม
	$K$	คือ ค่าคงที่
	$R$	คือ ระยะทางใดๆจากจุดตอกเสาเข็ม

#### 6.2 การประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็ม

โปรแกรมGRLWEAPมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มขณะตอกเนื่องจากเมื่อพิจารณาความเร็วที่หัวเสาเข็มซึ่งคาดการณ์ด้วยGRLWEAP เทียบกับผลตรวจวัดจากการทดสอบPDA พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และค่าจากการคาดการณ์แตกต่างจากผลตรวจวัดด้วยPDAในทุกโครงการโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7% ถึง 24% จึงสามารถที่จะประยุกต์ใช้โปรแกรมดังกล่าวในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มได้

จากการศึกษาพบว่าสามารถคาดการณ์ความเร็วการสั่นสะเทือน ( $V_{cal}$ ) ได้จากการคำนวณความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหลุดตัวของเสาเข็มจากสมการรูปแบบปิดซึ่งมีปัจจัยสำคัญคือ แรงต้านทานเชิงพลวัต และความถี่ของแรงที่กระทำซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมGRLWEAP

โดยสามารถแบ่งประเภทของเสาเข็มจากการส่งผ่านคลื่นความเค้นขณะตอก สัดส่วนของแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการวิเคราะห์ของโปรแกรมGRLWEAPได้ 2 ประเภทคือ เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง และเสาเข็มมีแรงต้านทาน

ตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง ลักษณะของเสาเข็มแต่ละประเภททำให้เกิดความถี่ของแรงที่กระทำแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการคาดการณ์ความเร็วการสั่นสะเทือนเป็นอย่างมาก

- เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง

เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นความเค้นขณะตอก โดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม และปลายเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง พบว่าดินที่ปลายเสาเข็มมีแรงต้านทานมากกว่าพลังงานที่ให้กับเสาเข็มขณะตอก และเกิดแรงต้านที่ปลายเสาเข็มกลับมา ทำให้ในแต่ละส่วนของเสาเข็มมีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกันโดยที่ปลายเสาเข็มจะเคลื่อนที่น้อยกว่าที่หัวเสาเข็ม และจะมีการคืนตัวกลับของดินที่บริเวณปลายเสาเข็ม ในกรณีนี้จะทำให้เกิดความถี่ของแรงกระทำต่ำอยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์ และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มน้อยกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ

- เสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง

เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นความเค้นขณะตอกโดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม และที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง พบว่าพลังงานที่ให้กับเสาเข็มขณะตอกมีค่ามากกว่าแรงต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็มจะรับได้ ทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวผ่านระดับชั้นดินดังกล่าวไปพร้อมๆกัน (rigid body) โดยไม่มีการคืนตัวกลับของดิน ในกรณีนี้จะทำให้เกิดความถี่ของแรงกระทำสูงอยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์ และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มมากกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ

### 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) ในงานวิจัยนี้คือการพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความเร็วการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุด ( $V_{cal}$ ) กับความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนควบคุมที่ตำแหน่งห่างจากจุดตอก 1 เมตร ( $V_{ref}$ ) ดังสมการ

$$\psi = \frac{V_{cal}}{V_{ref}} \quad (6.2)$$

จากผลการวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนที่เสาเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) จากโครงการตรวจวัดทั้งหมดจำนวน 8 โครงการพบว่า  $\psi$  อยู่ในช่วง 5 ถึง 71 ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่กว้างมาก แต่เมื่อจัดกลุ่มของอัตราส่วนดังกล่าวตามแบ่งประเภทการรับแรงของเสาเข็มที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว จะสามารถกำหนด  $\psi$  ของเสาเข็มในแต่ละประเภทโดยพิจารณาให้ครอบคลุมทางด้านความปลอดภัยดังนี้

- เส้าเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูงมี  $\psi$  เท่ากับ 9 เมื่อความถี่ของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 35 เฮิรตซ์ ถึง 71 เฮิรตซ์ และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเส้าเข็มมากกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ
- เส้าเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูงเมื่อความถี่ของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 14 เฮิรตซ์ ถึง 21 เฮิรตซ์ และมีแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเส้าเข็มน้อยกว่า 70% ของแรงต้านทานสุทธิ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีตามลักษณะเฉพาะของชั้นดิน ดังนี้
  - $\psi$  เท่ากับ 5 เมื่อชั้นดินด้านบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งหมด และมีชั้นดินทรายแข็งวางตัวอยู่ที่ระดับปลายเส้าเข็ม(กรณีที่ 1)
  - $\psi$  เท่ากับ 13 เมื่อมีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินทรายแข็ง และปลายเส้าเข็มวางตัวอยู่ที่ชั้นดินอ่อน หรือระดับดินทรายแข็งชั้นล่าง โดยความหนาของชั้นดินทรายจากระดับผิวดินถึงระดับปลายเส้าเข็มรวมต้องมีค่ามากกว่า 50% แต่ไม่เกิน 85% ของความลึกการตอก

#### 6.4 การประยุกต์ใช้งานประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่าง ๆ

สำหรับการใช้งานความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนที่เส้าเข็มกับที่ผิวดิน ( $\psi$ ) ในการประเมินระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆสามารถทำได้ดังนี้

- 1) คำนวณความเร็วการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินสูงสุด ( $V_{cal}$ ) โดยใช้โปรแกรมGRLWEAP และสมการรูปแบบปิด
- 2) พิจารณาการส่งผ่านคลื่นความเค้นขณะตอก การเคลื่อนตัวของเส้าเข็ม และความถี่ของแรงที่กระทำจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP แล้วเลือกใช้  $\psi$  ที่เหมาะสมกับกรณีนั้นๆตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น
- 3) คำนวณค่า  $V_{ref}$  จากสมการที่(6.2) แล้วคำนวณหาค่าคงที่  $K$  เมื่อตำแหน่งห่างจากจุดตอก 1 เมตร หรือ  $R = 1$  เมตร
- 4) ประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่ระยะทางต่างๆตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.1) โดยอ้างอิงค่าคงที่  $K$  จากการคำนวณตามเงื่อนไขของเส้าเข็ม คุณสมบัติของระบบตอก และข้อมูลชั้นดินในแต่ละโครงการทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินระดับความรุนแรงของการสัมผัสที่ผิวหนังที่ระยะทางต่างๆจากซึ่งคำนวณจากโปรแกรมGRLWEAP และสมการรูปแบบปิดโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสที่เสาคือเพิ่มกับที่ผิวหนัง( $\psi$ ) พบว่า

- กรณีใช้ค่า  $\psi$  เฉลี่ย ผลการประเมินระดับความรุนแรงของการสัมผัสที่ผิวหนังที่ระยะทางต่างๆโดยส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการตรวจวัดแรงสัมผัสที่ผิวหนังในแต่ละโครงการ แต่พบสำหรับบางโครงการจะทำให้เกิดการคาดการณ์ที่ต่ำกว่าค่าจริงซึ่งอาจทำให้ไม่ปลอดภัยในการนำไปใช้งาน
- กรณีใช้ค่า  $\psi$  ต่ำสุด ผลการประเมินระดับความรุนแรงของการสัมผัสที่ผิวหนังที่ระยะทางต่างๆโดยส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียง หรือมากกว่าข้อมูลจากการตรวจวัดแรงสัมผัสที่ผิวหนังในแต่ละโครงการ แต่สามารถใช้ในการควบคุม และวางแผนทางด้านความปลอดภัยขณะตอกเสาคือเพิ่มเมื่อนำไปใช้งานจริงได้

## 6.5 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประเมินระดับการสัมผัสที่ผิวหนังจากการตอกเสาคือเพิ่มโดยอาศัยโปรแกรมวิเคราะห์คลื่นหน่วยแรง(GRLWEAP) ซึ่งในการวิเคราะห์ดังกล่าวมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ทั้งส่วนที่เป็นตัวแปรที่สามารถเก็บข้อมูลจริงได้จากพนักงาน และข้อมูลที่กำหนดขึ้นโดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า

พารามิเตอร์ตัวหลักที่มีอิทธิพลมากต่อผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมGRLWEAPมีดังนี้

- ประสิทธิภาพการตอก และพลังงานการตอก

พารามิเตอร์นี้เป็นพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลทดสอบจริงในภาคสนามด้วยการทดสอบPDA ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละโครงการทดสอบขึ้นกับระบบการตอกเสาคือเพิ่ม และสภาพการทำงาน

นอกจากนี้กรณีโครงการทดสอบที่ไม่มีการตรวจวัด PDA ข้อมูลดังกล่าวจะอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งศึกษาประสิทธิภาพการตอกเสาคือเพิ่มจำนวน 35 ต้น พบว่าประสิทธิภาพการตอกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามโครงการต่างๆ โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์(กรมทางหลวง, 2555)

เนื่องจากค่าประสิทธิภาพการตอกมีความเปลี่ยนแปลงในแต่ละโครงการทดสอบ ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีข้อมูลจากการทดสอบจริง ผู้วิจัยแนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการตอกจากงานวิจัยของกรมทางหลวง(2555) อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการ

ใช้งานผู้วิเคราะห์ควรพิจารณาประสิทธิภาพการตอกสูงสุด และต่ำสุดในการวิเคราะห์ร่วมด้วย โดยเลือกกรณีที่ทำให้เกิดความเร็วกการสิ้นสະเพ็อนมากที่สุดในการควบคุม

- ค่าโมดูลัสของหมอนรองเสาะเข้ม

พารามิเตอร์นี้เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในโปรแกรมGRLWEAP สำหรับวัสดุต่างๆ เช่น ไม้อัด ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในประเทศไทย อย่างไรก็ตามสำหรับการทำงานในประเทศไทยวัสดุหมอนรองเสาะเข้มบางประเภทไม่มีระบุไว้ในค่าตั้งต้นของโปรแกรม เช่น กระสอบ และไม้มะขาม เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. 2552. มาตรฐานความ  
สั่นสะเทือนโดยทั่วไปเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร.
- คมนาคม, กระทรวง. กรมทางหลวง. 2555. โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับ  
น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง.
- บรรเจิด กาญจนเจตน์. 2532. การศึกษาผลกระทบของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม  
คอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.35m. x 0.35m. ในการก่อสร้างอาคารส่วนที่ผลิตน้ำ  
ธ โรงกรองน้ำบางเขน การประปานครหลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.  
ภาควิชาโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ช่อธรรม ศรีนิล และ พีรพงษ์ สมบูรณ์. 2553. พฤติกรรมของการไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอก  
เสาเข็มในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล. โครงการวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพจน์ เตชวรสินสกุล. 2549. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Attwell, P.B. and Farmer, I.W. 1973. Attenuation of ground vibrations from piles. Ground  
Engineering, Vol. 6(4), pp. 26-29.
- Bowles, J.E. 1996. Foundation analysis and design. 5<sup>th</sup> edition. The McGraw-Hill  
Companies.
- B. V. Gincharov and V. F. Kovalev. 1995. Prediction of soil vibration during pile driving  
from penetration data. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.32,  
No.1, 7-9.
- Gulhati, S. K., &Datta, S. K. G. M. 2005. Geotechnical engineering. Tata McGraw-Hill  
Education.
- Hajduk, E.L., Paikowsky, S.G., Holsher, P. and Barends, F.B.J. 2000. Accelerations of a  
driven pile and the surround soil. Proceedings of the Sixth International  
Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Sao Paulo, Brazil.



- Hal Amick and Michael Gendreau. 2000. Construction Vibrations and Their Impact on Vibration-Sensitive Facilities. Presented at ASCE Construction Congress 6 Orlando, Florida, February 22<sup>nd</sup> 2000.
- Hannigan, p.J., Gobel, G.G., Thendean, G., and Likins, G.E., and Rausche, F. 1998. Design and Construction of Driven Pile Foundation – Volume 1. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Hasancebi, N., & Ulusay, R. 2007. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(2), 203-213
- Jin Sun Kim and Dong Soo Kim. 1999. Propagation and Attenuation Characteristics of Various ground Vibrations. Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, 305-701, South Korea.
- Lowrie, W. 2007. Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press.
- Massarsch, R.R. 1992. Static and Dynamic Soil Displacements Caused by Pile Driving, Keynote Lecture, Proceedings 4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, the Hague, pp. 77-84.
- Massarsch & Beng H. Fellenius. 2008. Ground Vibration Induced by Impact Pile Driving. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008
- Pile Dynamic Inc. 2005. GRLWEAP Wave Equation Analysis of Pile Driving Procedures and Models version 2005.
- Ramshaw et al. 2000. Computation of Ground Waves due to Piling.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. 1979. An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique, 29(4), 423-439.
- Rausche, Liang, Allin and Rancman. 2004. Applications and Correlations of the Wave Equation Analysis Program GRLWEAP.
- Robinson, B. 2006. Models for Prediction of Surface Vibrations from Pile Driving Records. Master's Thesis, North Carolina State University. Accessed January 12, 2010.

Trevor Smith, Andrew Banas, Max Gummer and Jaesup Jin. 2011. RECALIBRATION OF THE GRLWEAP LRFD RESISTANCE FACTOR FOR OREGON DOT.

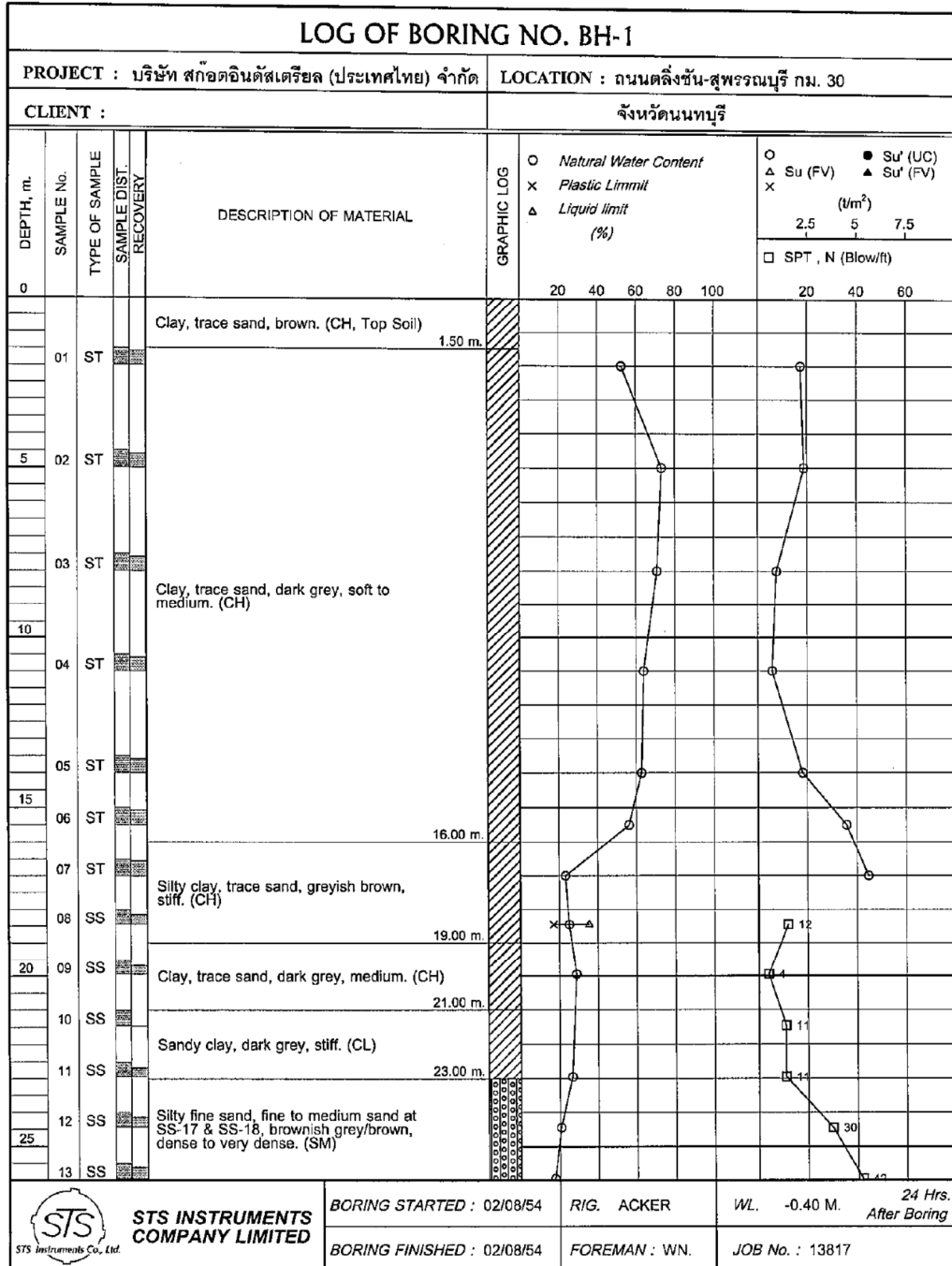
Wiss, J.F. 1981. Construction vibrations: State-of-the-Art. American Society of Civil Engineers, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 107, No. GT2, pp. 167-181.

Woods R.D. and Jedele, L.P. 1985. Energy attenuation relationships from construction vibrations. Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division in conjunction with the American Society of Civil Engineering, Convention in Detroit, Michigan. October 22, 1985, pp. 229-246.

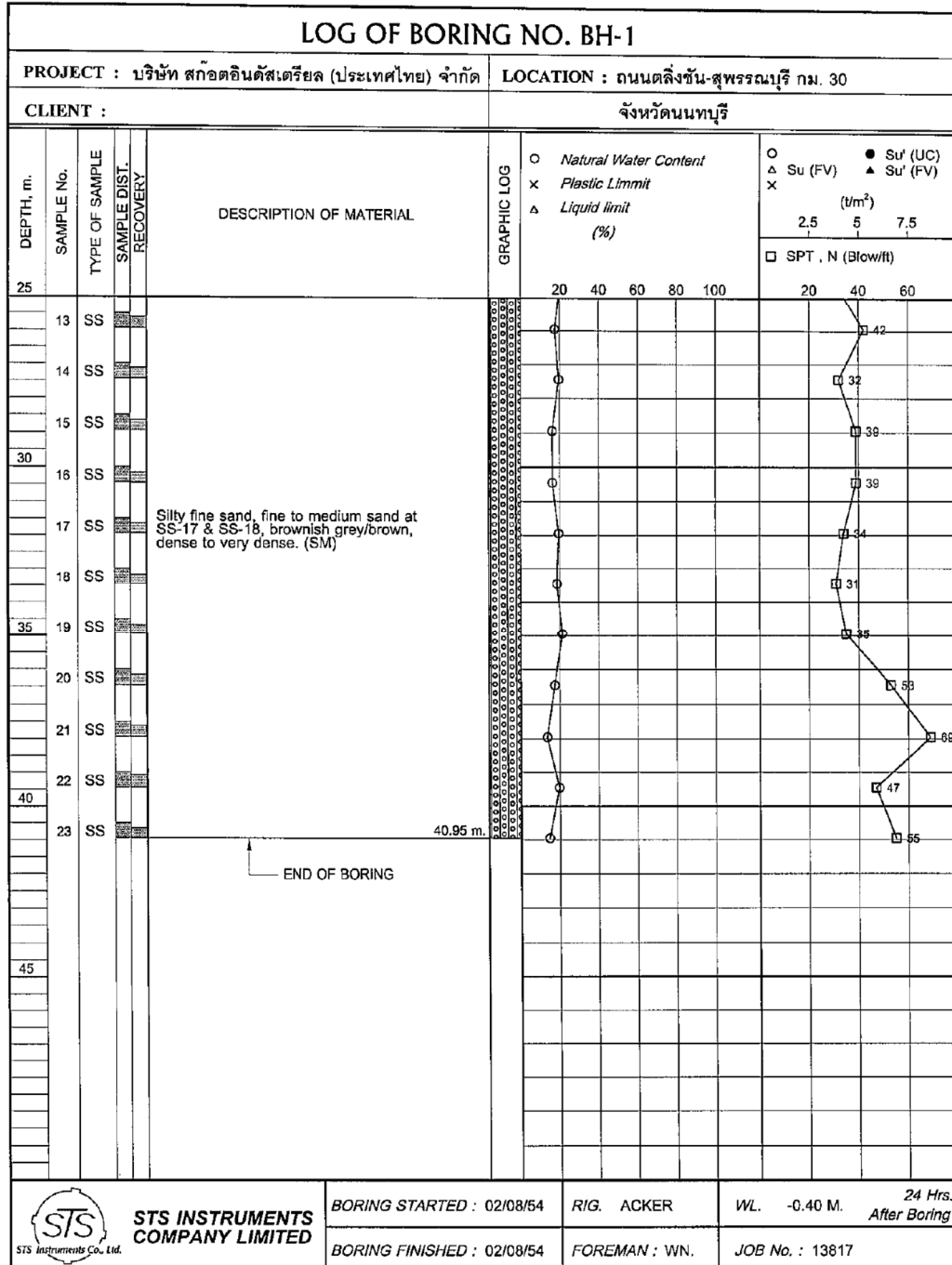
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

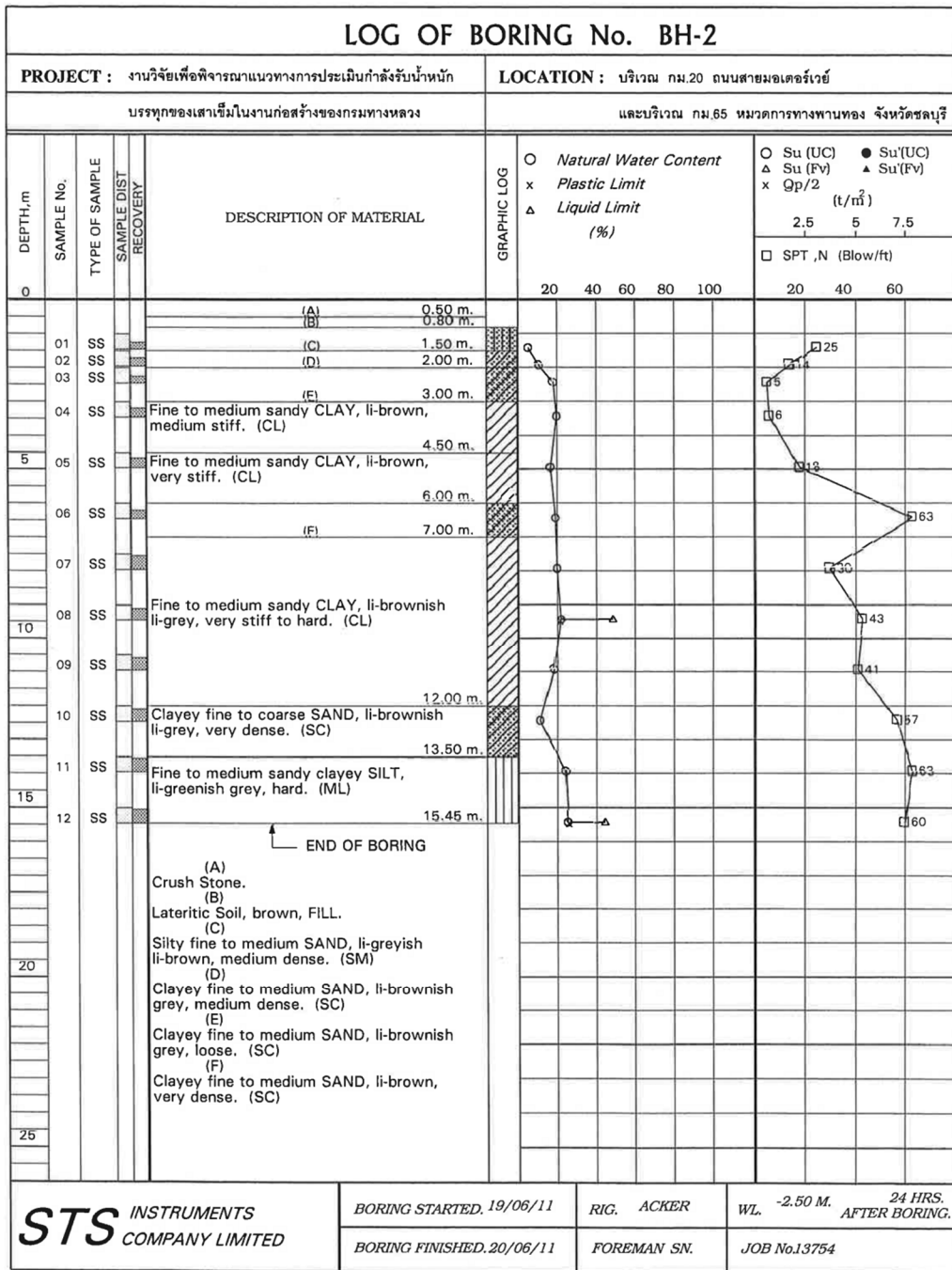
ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน



รูปที่ ก - 1 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 1



รูปที่ ก - 1 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 1(ต่อ)

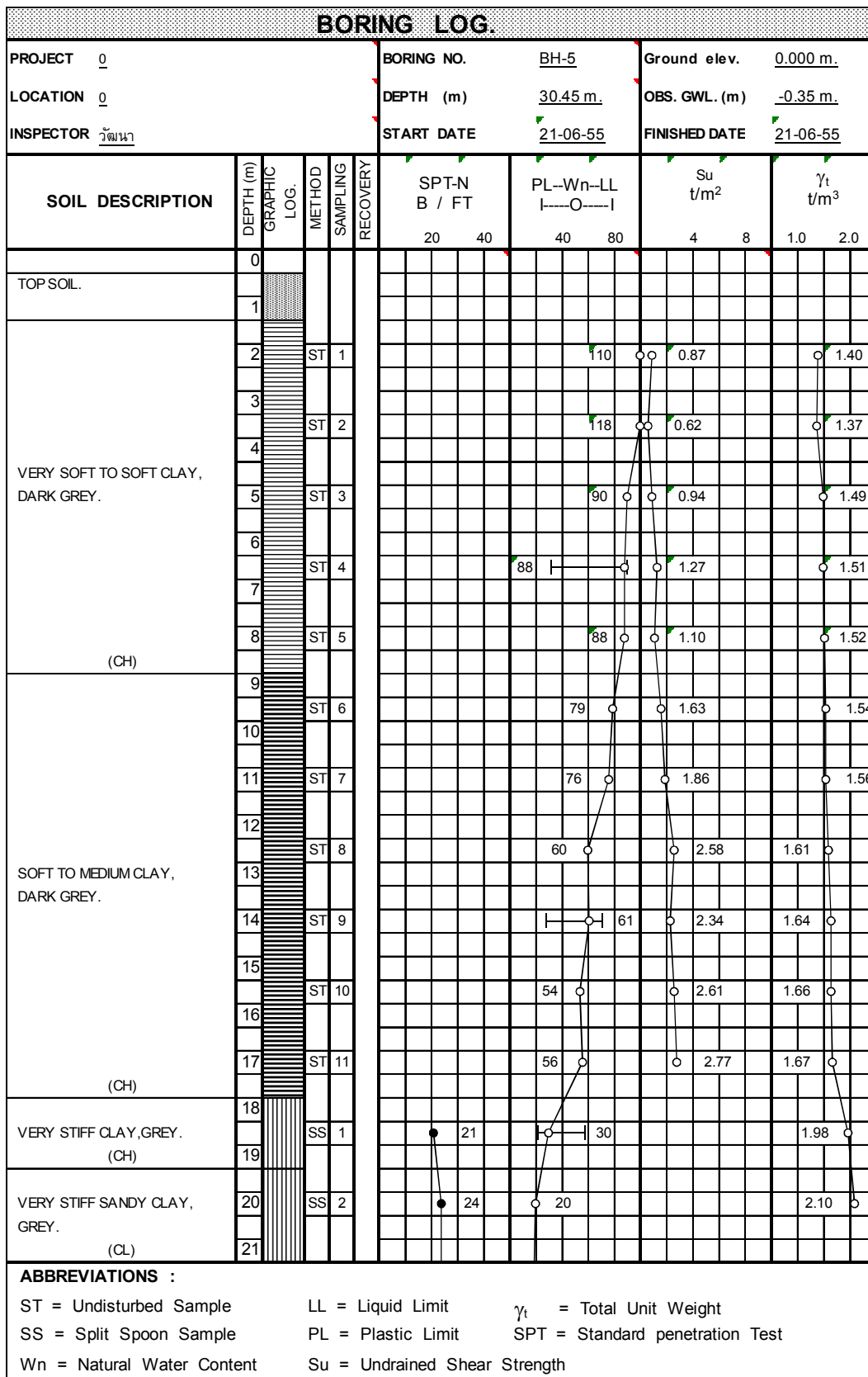


รูปที่ ก - 2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 2

Project : ดี ไอ คอลคอน โคมินีเยม															
Location : ตำบลแสนสูง อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี										Boring : BH - 1					
Sample No.	DEPTH, m.		PHYSICAL PROPERTIES				ATTERBERG LIMITS			Soil Class	ENGINEERING PROPERTIES				
	FROM	TO	W <sub>n</sub> %	γ g/cc	% passing		LL %	PL %	PI %		S <sub>u</sub> ton/m <sup>2</sup>	S <sub>ur</sub> ton/m <sup>2</sup>	Q <sub>p</sub> ton/m <sup>2</sup>	N blows/ft.	V <sub>s</sub> ton/m <sup>2</sup>
					#4	#200									
ST 1	1.00	1.45	15.20		68.50	22.87			NP	SM			15		
ST 2	2.00	2.45	20.97		93.05	25.84			NP	SM			14		
ST 3	3.00	3.45	21.06		98.65	32.48			NP	SM			8		
ST 4	4.50	4.95	23.80		98.14	36.92			NP	SM			2		
ST 5	6.00	6.45	23.22		100.00	32.72			NP	SM			4		
ST 6	7.50	7.95	23.42				38.00	21.67	16.33	CL			5		
ST 7	9.00	9.45	26.96		87.58	25.47			NP	SM			35		
ST 8	10.50	10.95	13.29	2.11			42.10	18.20	23.90	CL	9.40		62		
ST 9	12.00	12.45	22.20				42.20	18.33	23.87	CL			22		
SS 10	13.50	13.95	24.81		98.11	24.60			NP	SM			21		
SS 11	15.00	15.45	22.89		100.00	37.50			NP	SM			25		
SS 12	16.50	16.95	15.42				31.35	20.10	11.25	CL			29		
SS 13	18.00	18.45	20.51	1.37			28.90	18.57	10.33	CL	15.13		43		
SS 14	19.50	19.95	14.64				35.75	20.50	15.25	CL			56		
PHYSICAL PROPERTIES				ATTERBERG LIMITS				ENGINEERING PROPERTIES							
W <sub>n</sub> =	Natural Water Content			LL =	Liquid Limit			S <sub>u</sub> =	Undrained Shear Strength						
γ <sub>s</sub> =	Bulk Unit Weight			PL =	Plastic Limit			S <sub>ur</sub> =	Remolded Shear Strength						
G =	Specific Gravity			PI =	Plasticity Index			V <sub>s</sub> =	Vane Shear Strength						
				SL =	Shrinkage Limit			N =	Standard Penetration Number						

รูปที่ ก - 3 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 3





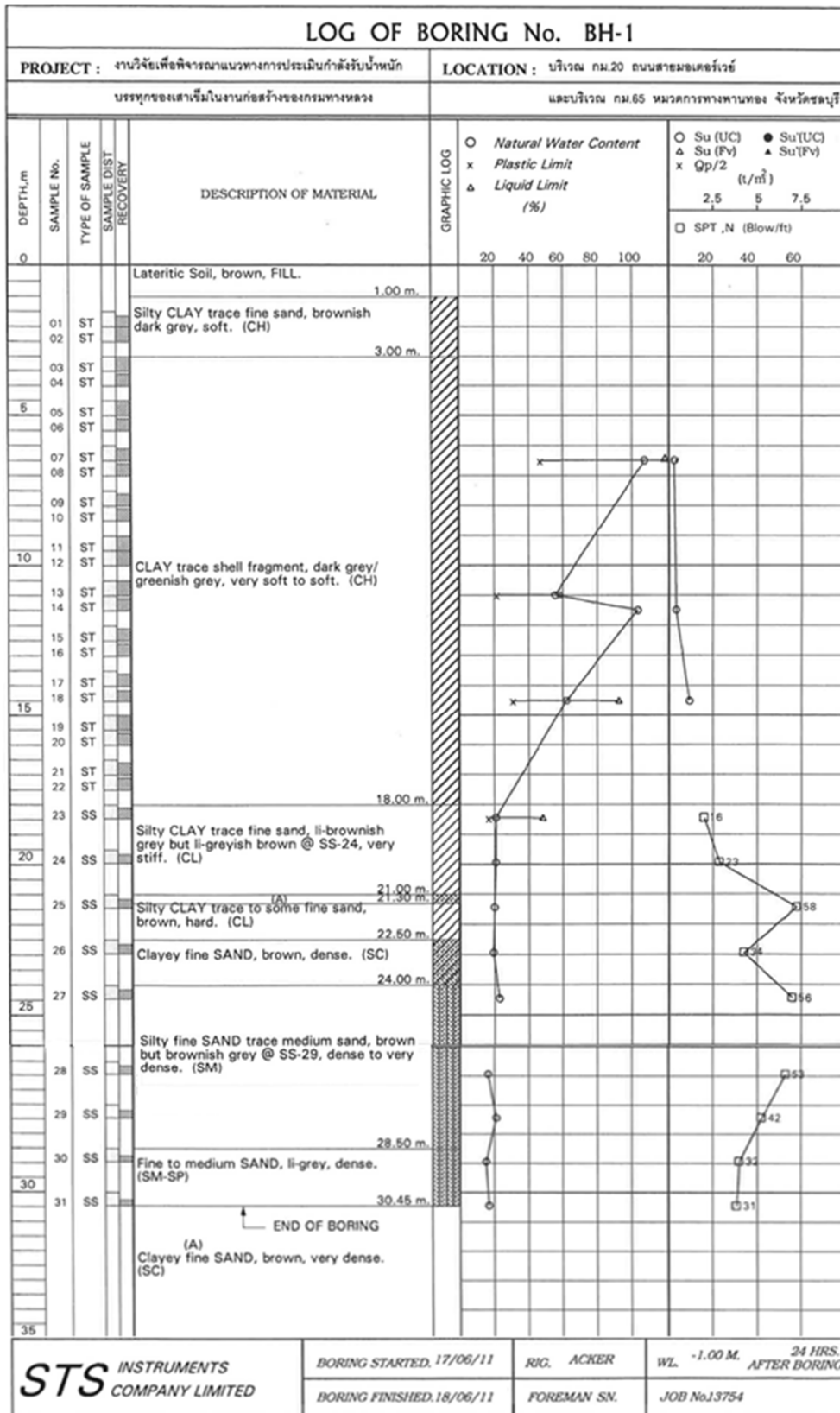
รูปที่ ก - 4 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 4

BORING LOG.									
PROJECT 0				BORING NO. BH-5		Ground elev. 0.000 m.			
LOCATION 0				DEPTH (m) 30.45 m.		OBS. GWL. (m) -0.35 m.			
INSPECTOR วัณนา				START DATE 21-06-55		FINISHED DATE 21-06-55			
SOIL DESCRIPTION	DEPTH (m)	GRAPHIC LOG.	METHOD	SAMPLING	RECOVERY	SPT-N B / FT	PL-Wn-LL  —○—	Su t/m <sup>2</sup>	γ <sub>t</sub> t/m <sup>3</sup>
						20 40	40 80	4 8	1.0 2.0
VERY STIFF SANDY CLAY, GREYISH BROWN. (CL)	21		SS	3		24	19		
	22								
HARD SANDY CLAY, GREYISH BROWN. (CL)	23		SS	4		38	15		2.09 ○
	24								
	25		SS	5		48	16		
VERY DENSE SILTY SAND, GREY. (SM)	26		SS	6		51	13		
	27								
HARD CLAY, BROWNISH GREY. (CH)	28		SS	7		56	25		2.11 ○
	29								
DENSE SILTY SAND, BROWN. (SM)	30		SS	8		42	14		
VERY STIFF CLAY, GREY. (CH)	31		SS	9		25	32		2.06 ○
END OF BORING 30.45 m.	31								
	32								
	33								
	34								
	35								
	36								
	37								
	38								
	39								
	40								
	41								
	42								

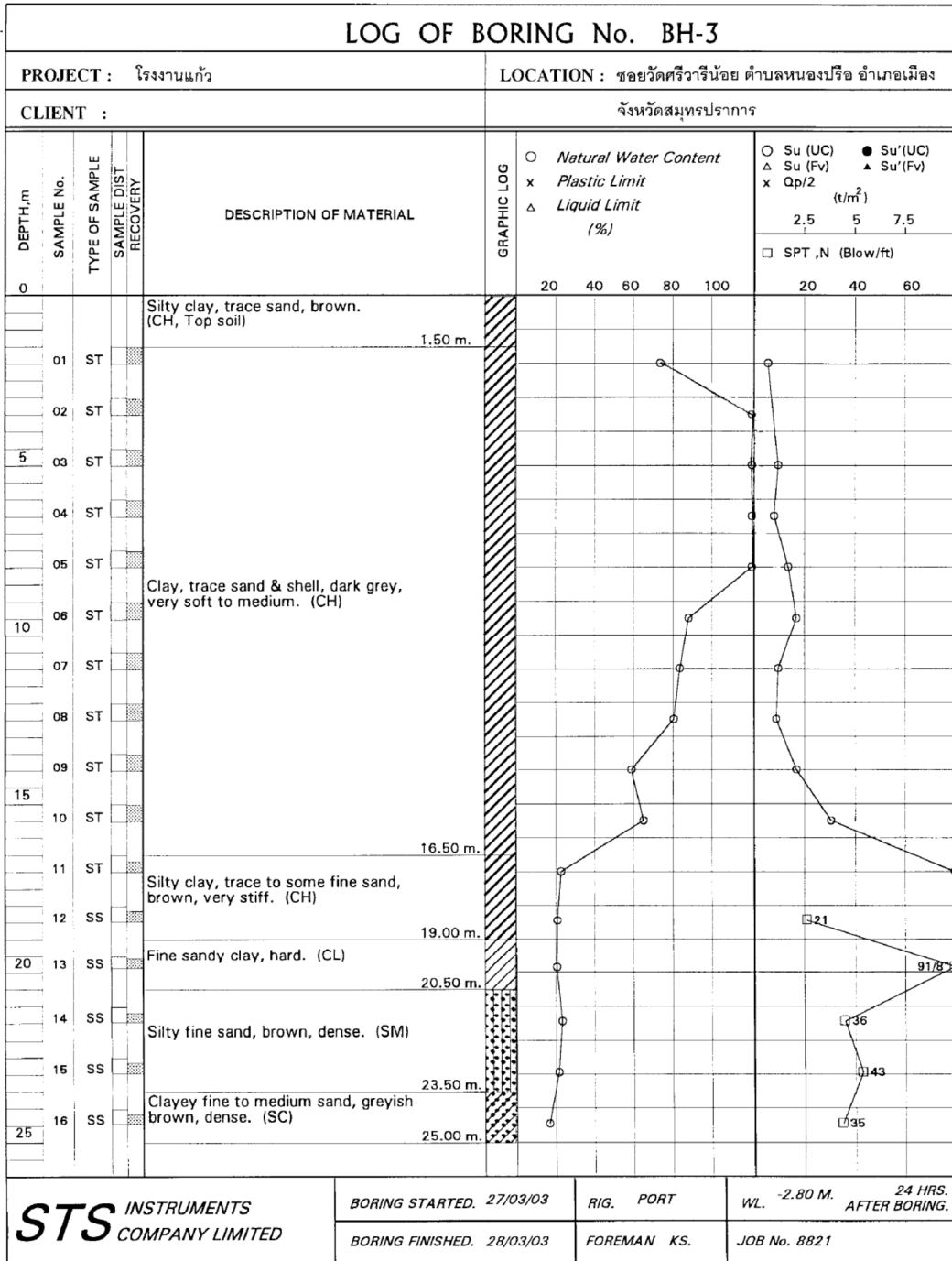
**ABBREVIATIONS :**

ST = Undisturbed Sample      LL = Liquid Limit      γ<sub>t</sub> = Total Unit Weight  
SS = Split Spoon Sample      PL = Plastic Limit      SPT = Standard penetration Test  
Wn = Natural Water Content      Su = Undrained Shear Strength

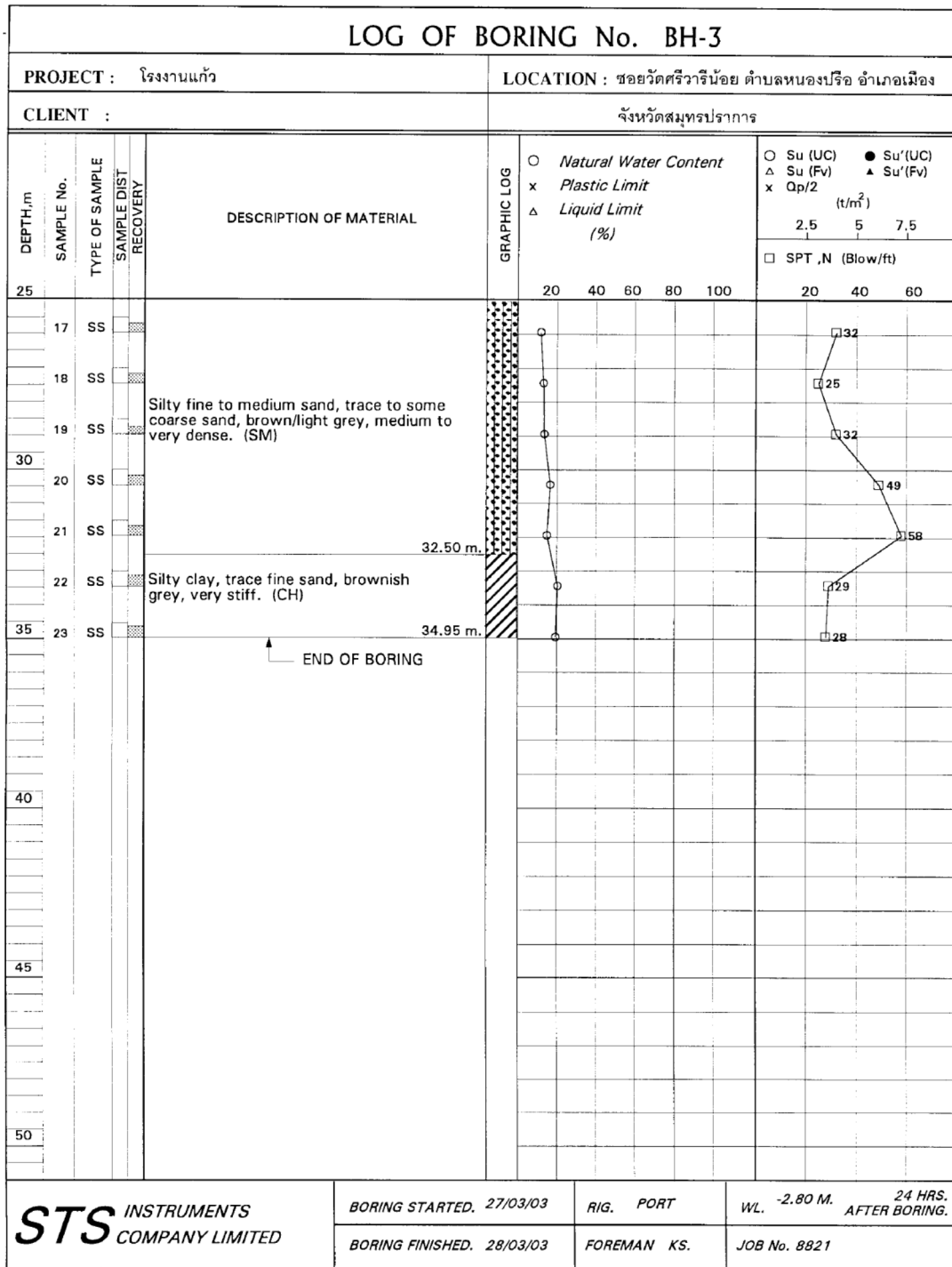
รูปที่ ก - 4 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 4 (ต่อ)



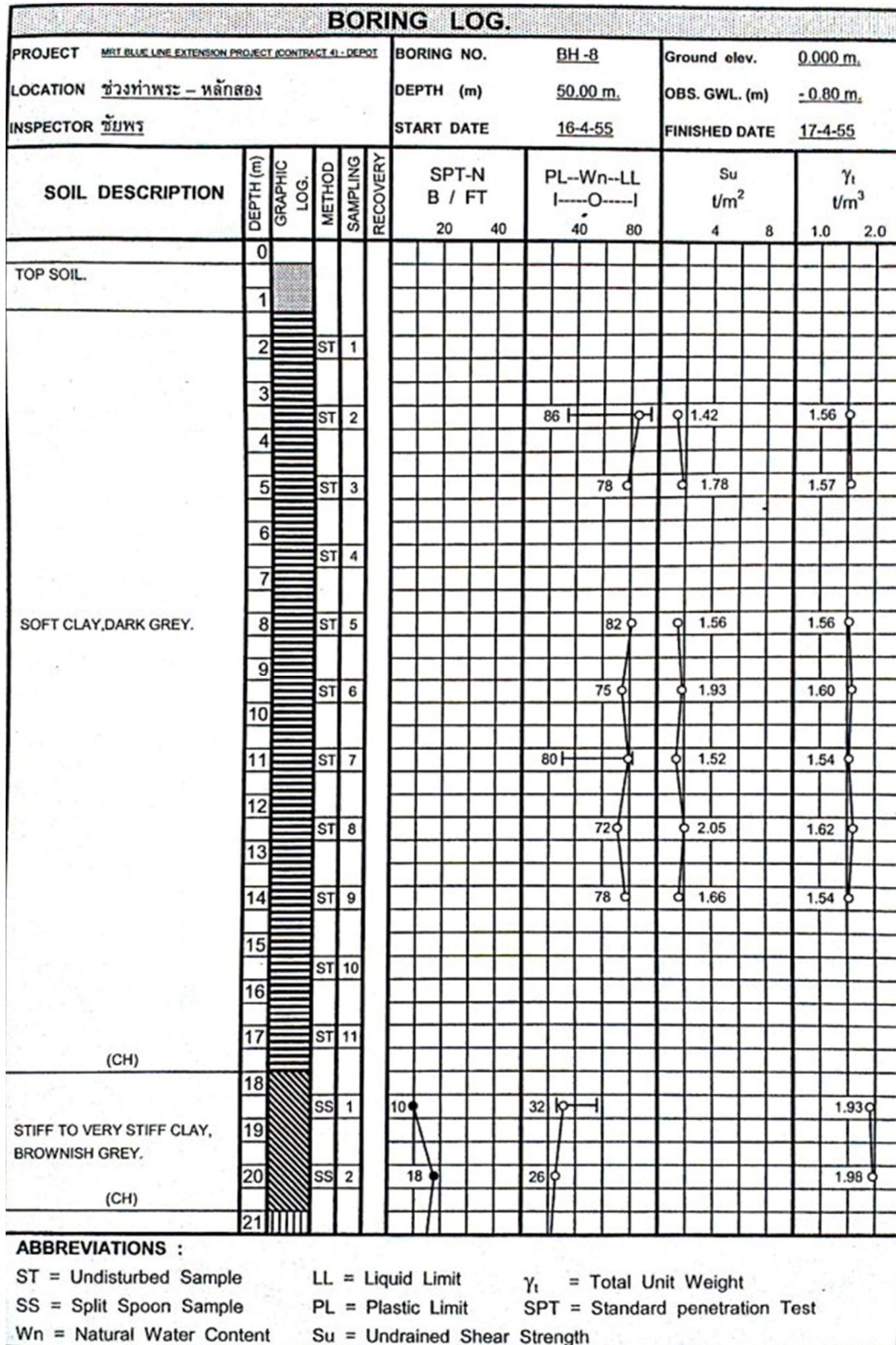
รูปที่ ก - 5 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 5



รูปที่ ก - 6 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 6



รูปที่ ก - 6 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 6 (ต่อ)



รูปที่ ก-7 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 7



BORING LOG.												
PROJECT <u>MRT BLUE LINE EXTENSION PROJECT (CONTRACT 4) - DEPOT</u>				BORING NO. <u>BH-8</u>		Ground elev. <u>0.000 m.</u>						
LOCATION <u>ช่วงท่าพระ - หลักสอง</u>				DEPTH (m) <u>50.00 m.</u>		OBS. GWL. (m) <u>-0.80 m.</u>						
INSPECTOR <u>ชัยพร</u>				START DATE <u>16-4-55</u>		FINISHED DATE <u>17-4-55</u>						
SOIL DESCRIPTION	DEPTH (m)	GRAPHIC LOG.	METHOD SAMPLING	RECOVERY	SPT-N B / FT		PL--Wn--LL  ----O-----		Su t/m <sup>2</sup>		γ <sub>t</sub> t/m <sup>3</sup>	
					20	40	40	80	4	8	1.0	2.0
VERY STIFF CLAY WITH SAND, GREYISH BROWN. (CL)	21		SS 3		16			22				
	22											
	23		SS 4		28			19				
MEDIUM DENSE TO DENSE SILTY SAND, BROWN.  (SM)	24		SS 5		38			23				
	25											
	26		SS 6		27			15				
	27											
	28		SS 7		19			24				
	29		SS 8		74/9			13				
	30											
VERY DENSE SILTY SAND, BROWN.  (SM)	31		SS 9					78				
	32		SS 10					62				
	33											
	34		SS 11					58				
	35		SS 12					54				
	36											
	37		SS 13		45							
	38		SS 14		39			14				
DENSE TO VERY DENSE SAND WITH SILT, BROWN.  (SP-SM)	39		SS 15		45			15				
	40											
	41		SS 16		62			14				
	42											

**ABBREVIATIONS :**  
 ST = Undisturbed Sample      LL = Liquid Limit      γ<sub>t</sub> = Total Unit Weight  
 SS = Split Spoon Sample      PL = Plastic Limit      SPT = Standard penetration Test  
 Wn = Natural Water Content      Su = Undrained Shear Strength

รูปที่ ก - 7 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 7(ต่อ)

BOREHOLE # C3-BH6						Page 1 of 1						
Project No: 9145C Project: MRT PURPLE LINE ( CONTRACT 3 ) Site Location: DEPOT (BANG YAI)			Ground Elev.(m): 100.968 G.W.L (m): 3.50 Total Depth (m): 50.00		Date Started: 11 April 2010 Date Finished: 13 April 2010 Co-ordinate(N): 1536148 Co-ordinate(E): 0652670							
Depth (m)	Sample Type	Symbols Type Number	Symbols	SOIL DESCRIPTION	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> ) 15 20	Atterberg Limits (%)			Suc (kN/m <sup>2</sup> )		SPT (N)	
						PL	Wn	LL	15	30	45	60
0				Ground Surface								
1	ST	1	■	Soft to medium stiff CLAY, dark grey to light grey, high plasticity. (CH)	0.00							
2	ST	2	■									
3	ST	3	■									
4	ST	4	■									
5	ST	5	■									
6	ST	6	■									
7	ST	7	■									
8	ST	8	■									
9	ST	9	■									
10	ST	10	■									
11	ST	11	■									
12	SS	12	■	Stiff CLAY, light greyish brown to yellowish brown, high plasticity. (CH)	11.50							
13	SS	13	■									
14	SS	14	■									
15	SS	15	■	Medium dense to dense silty SAND, brown to light brown, fine to medium grained. (SM)	14.50							
16	SS	16	■									
17	SS	17	■									
18	SS	18	■									
19	SS	19	■									
20	SS	20	■									
21	SS	21	■									
22	SS	22	■									
23	SS	23	■									
24	SS	24	■									
25	SS	25	■									
26	SS	26	■									
27	SS	27	■									
28	SS	28	■	Stiff CLAY, dark grey, high plasticity. (CH)	28.00							
29	SS	29	■									
30	SS	30	■	Dense silty SAND, brown, medium grained. (SM)	29.50							
31	SS	31	■									
32	SS	32	■									
33	SS	33	■									
34	SS	34	■	Hard CLAY, brown, high plasticity. (CH)	32.50							
35	SS	35	■									
36	SS	36	■									
37	SS	37	■									
38	SS	38	■	Dense to very dense silty SAND, light brown to brown, fine to medium grained. (SW-SM, SM, SP-SM)	37.00							
39	SS	39	■									
40	SS	40	■									
41	SS	41	■									
42	SS	42	■									
43	SS	43	■									
44	SS	44	■									
45	SS	45	■									
46	SS	46	■									
47	SS	47	■									
48	SS	48	■									
49	SS	49	■									
50	SS	50	■									
51				End of Borehole	50.00							
52												
53												
54												
55												

- Thin Wall Tube
- Split Spoon
- ▣ Rock Core
- ▢ Wash
- ▣ Auger

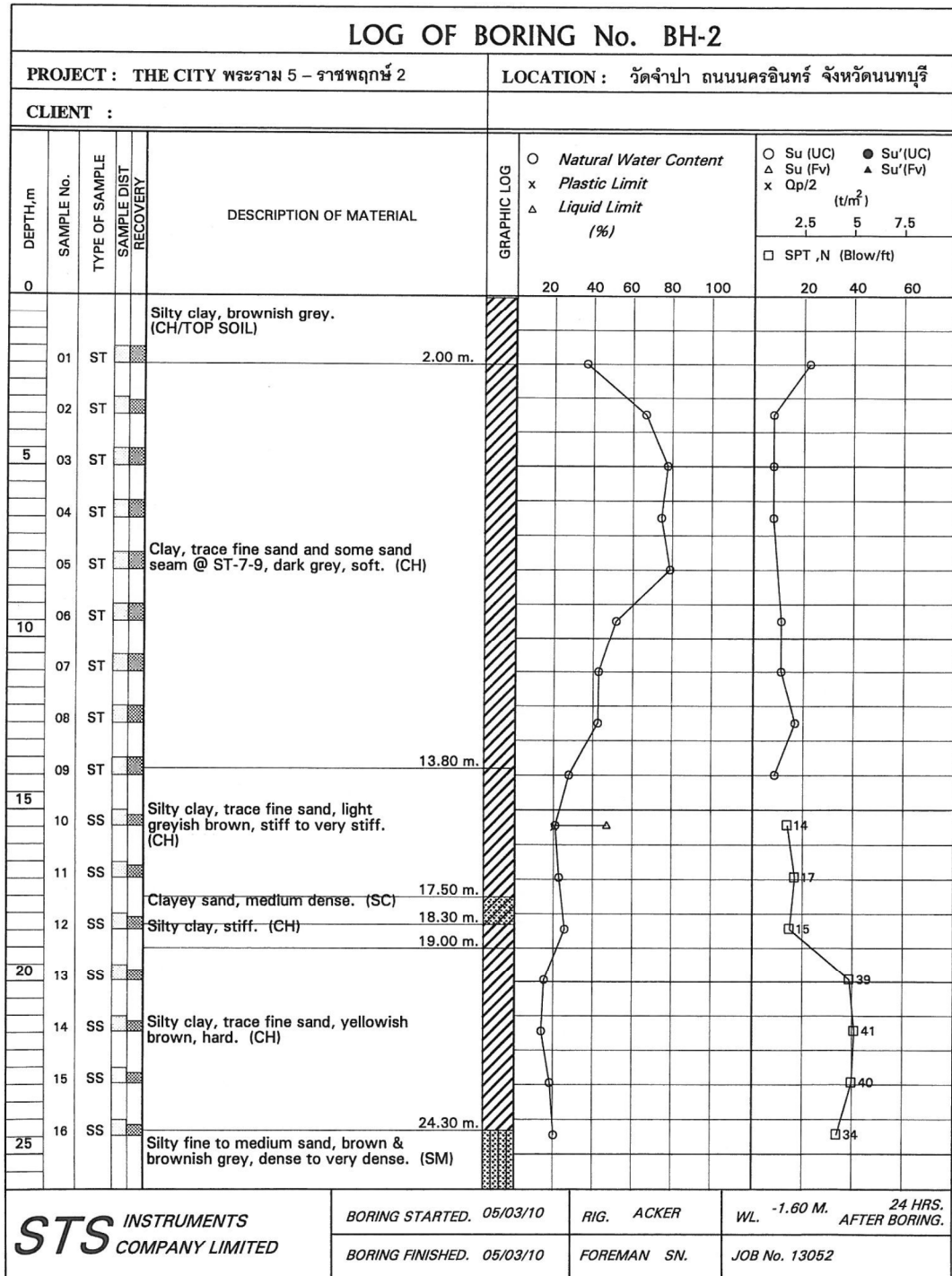
Suc = Undrained Shear Strength  
 SPT= Standard Penetration Test  
 PL = Plastic Limit  
 Wn = Water Content  
 LL = Liquid Limit



JLP Engineering Services Co., Ltd.  
 34/671 Moo Baan Ying Ruay Soi 5  
 Liab Klong Prapa Road, Pakkred  
 Nonthaburi 11120  
 Tel: 0-2575-2740 Fax: 0-2575-2741  
 www.jlp.co.th E-mail: jlp@jlp.co.th

รูปที่ ก - 8 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 8





รูปที่ ก - 9 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 9

LOG OF BORING No. BH-1							
PROJECT : THE CITY พระราม 5 - ราชพฤกษ์ 2				LOCATION : วัดจำปา ถนนนครินทร์ จังหวัดนนทบุรี			
CLIENT :							
DEPTH, m	SAMPLE No.	TYPE OF SAMPLE	SAMPLE DIST RECOVERY	DESCRIPTION OF MATERIAL	GRAPHIC LOG	○ Natural Water Content x Plastic Limit △ Liquid Limit (%)	
						○ Su (UC)    ● Su'(UC) △ Su (Fv)    ▲ Su'(Fv) x Qp/2 (t/m <sup>2</sup> ) □ SPT ,N (Blow/ft)	
25					20 40 60 80 100	2.5 5 7.5	
						20 40 60	
17	SS			Silty fine sand, brown, dense to very dense. (SM)			
18	SS						
19	SS						
20	SS						
30				30.45 m			
				END OF BORING			
35							
40							
45							
50							

**STS** INSTRUMENTS  
COMPANY LIMITED

BORING STARTED. 28/02/10

RIG. ACKER

WL. -0.80 M. 24 HRS. AFTER BORING.

BORING FINISHED. 28/02/10

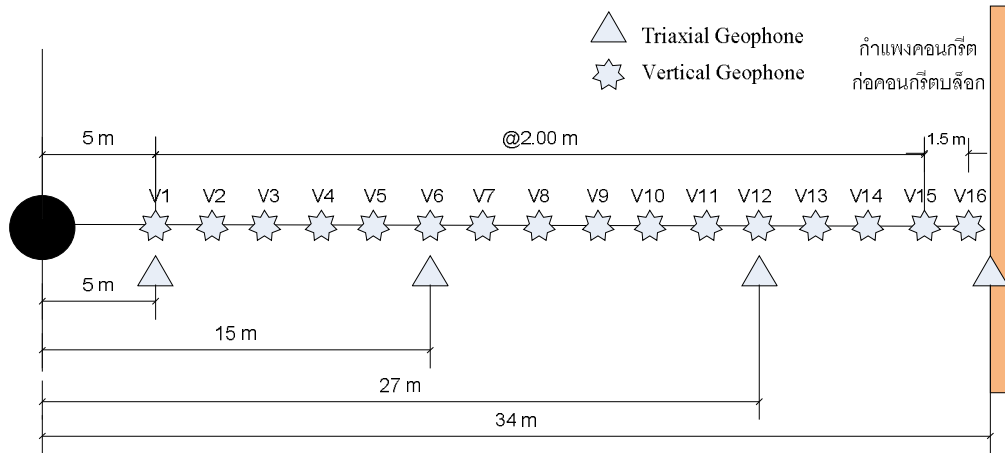
FOREMAN SN.

JOB No. 13052

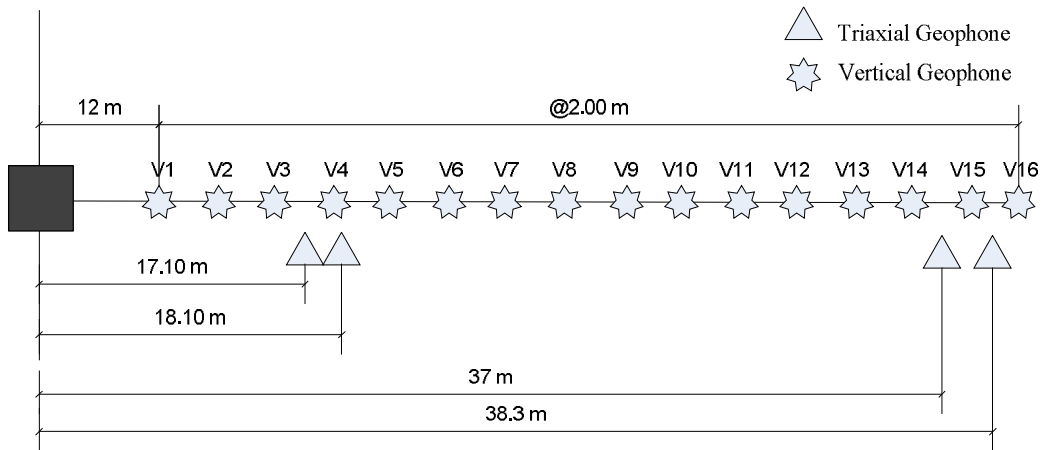
รูปที่ ก - 9 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโครงการที่ 9(ต่อ)

ภาคผนวก ข

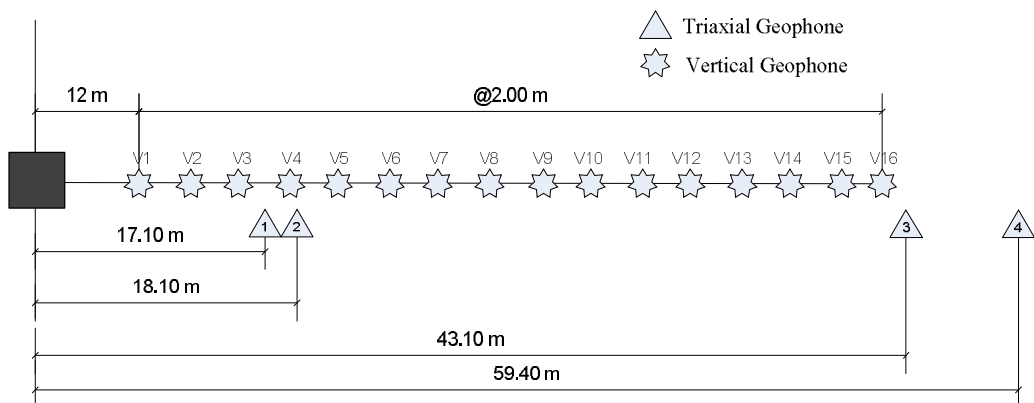
แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ผิวดิน



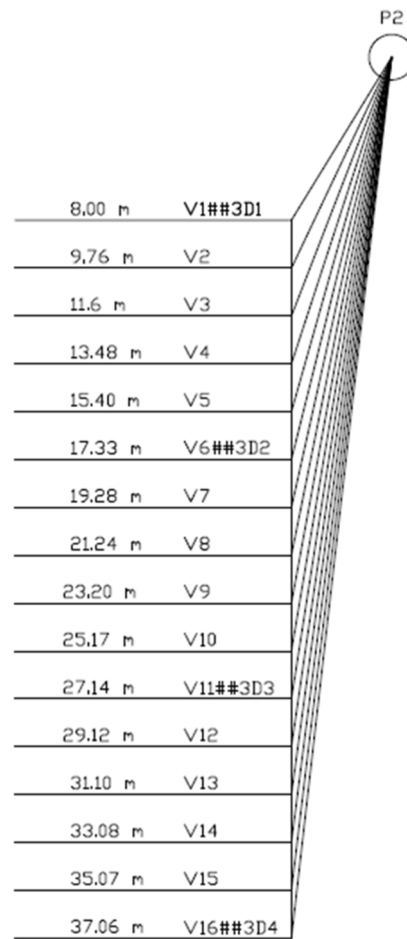
รูปที่ ข - 1 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 1



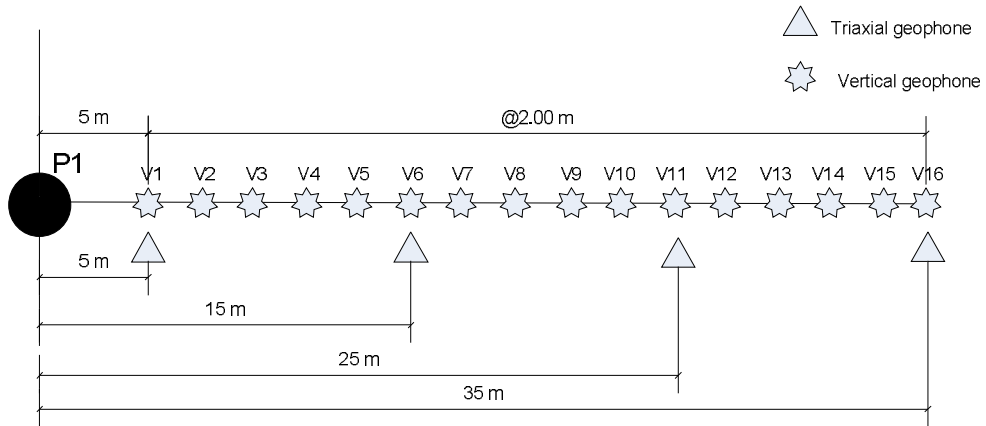
รูปที่ ข - 2 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 2



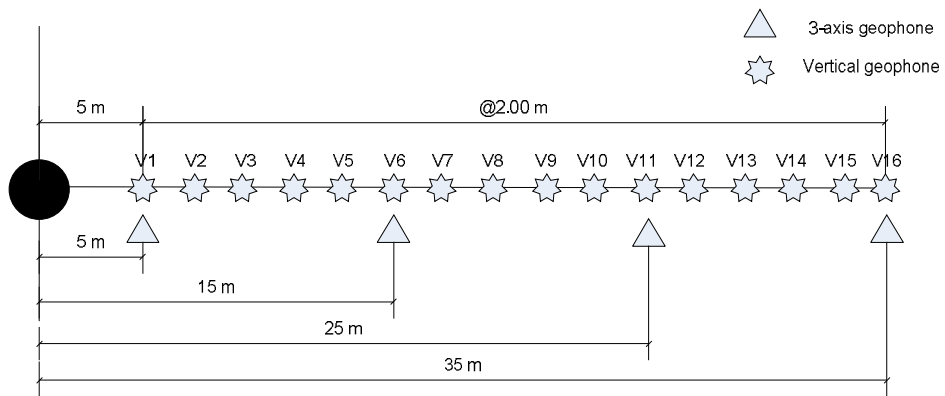
รูปที่ ข - 3 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 3



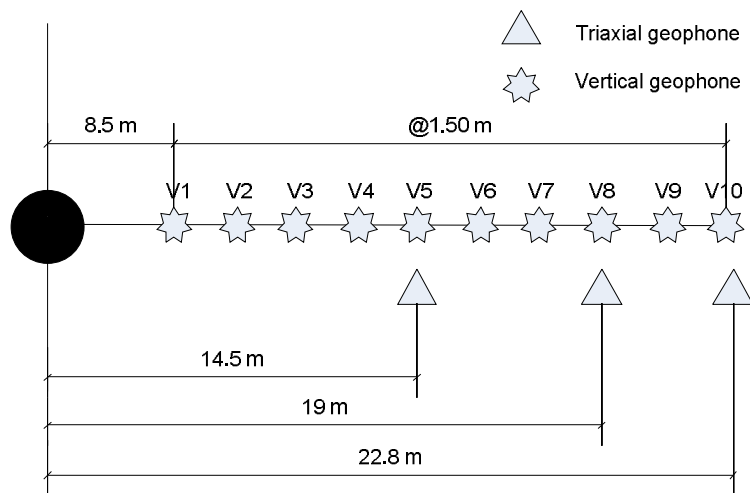
รูปที่ ข - 4 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 4



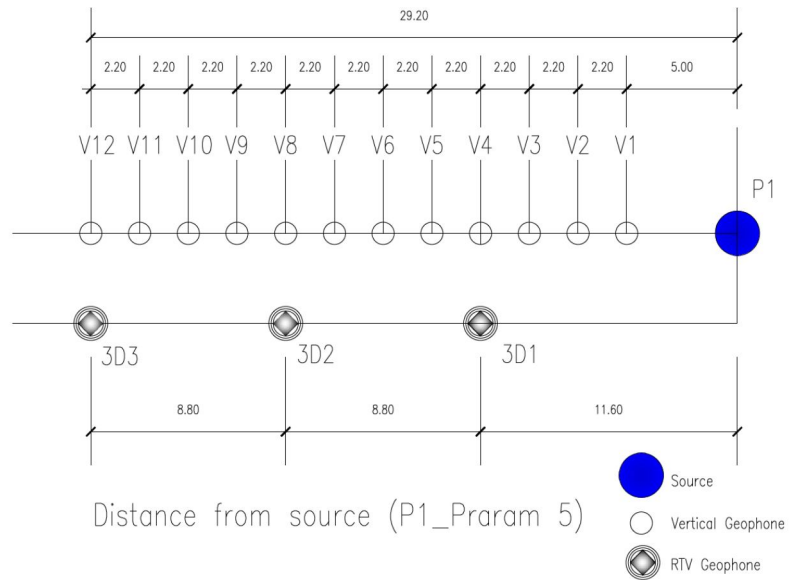
รูปที่ ข - 5 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 6



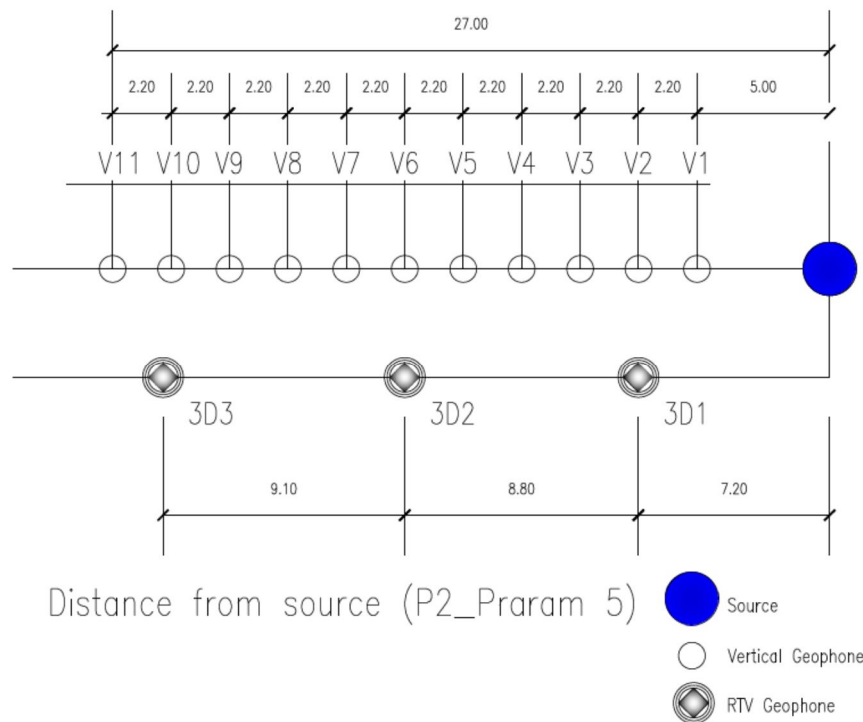
รูปที่ ข - 6 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 7



รูปที่ ข - 7 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือนโครงการที่ 8



รูปที่ ๗ - 8 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือน โครงการที่ 9  
เสาเข็มต้นที่ 1



รูปที่ ๗ - 9 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของการติดตั้งเครื่องวัดแรงสั่นสะเทือน โครงการที่ 9  
เสาเข็มต้นที่ 2

ภาคผนวก ค

การป้อนข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ในโปรแกรมGRLWEAP



scott

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: 492

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
491	JUNTTAN HHK SA	ECH	88.2900	105.948
492	JUNTTAN HHK 12A	ECH	117.7200	141.264
493	JUNTTAN HHK 14A	ECH	137.3400	164.808

Hammer parameters  
Efficiency: 0.95  
Stroke: 0.5 m  
Type: ECH Fixed

File material  
 Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	8026.55	2474.79	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	2000	210	MPa
Thickness	80	54	mm
C.O.R.	0.75	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	4.92		kN

Resistance Gain/Loss Factors

	Shaft	Toe
1	0.5	1.0
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 13.333 mm

Damping  
Shaft: 0.656 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance Percentage: 10 %

Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

File Information

	Value	Unit	Options
Length	26	m	26 Segments
Penetration	18	m	Auto S-Length
Section Area	2474.79	cm <sup>2</sup>	Auto S-St. Wt
Elast Modulus	34500	MPa	
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>	
Toe Area	8026.55	cm <sup>2</sup>	0 Splices
Perimeter	2.513	m	File Type:
Pile Size	800	mm	Pipe

รูปที่ ค - 1 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 1  
ระดับความลึกการตอก 18 เมตร

KM55

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: 509

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
508	HPSI 1605	ECH	73.8700	112.578
509	HPSI 2005	ECH	84.6390	128.990
510	HPSI 3005	ECH	137.3492	209.320

Hammer parameters  
Efficiency: 0.48  
Stroke: 0.8 m  
Type: ECH Fixed

File material  
 Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	1600	1600	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	300	MPa
Thickness	133	133	mm
C.O.R.	0.5	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	2.21		kN

Resistance Gain/Loss Factors

	Shaft	Toe
1	0.5	1.0
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 3.333 mm

Damping  
Shaft: 0.489 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance Percentage: 10 %

Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

File Information

	Value	Unit	Options
Length	15	m	Auto Segments
Penetration	6.5	m	Auto S-Length
Section Area	1600	cm <sup>2</sup>	Auto S-St. Wt
Elast Modulus	34500	MPa	
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>	
Toe Area	1600	cm <sup>2</sup>	0 Splices
Perimeter	1.6	m	File Type:
Pile Size	400	mm	Square

รูปที่ ค - 2 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 2  
ระดับความลึกการตอก 6.5 เมตร

Idol P1

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: B83

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
382	BSP HH5	ECH	43.0390	58.832
383	BSP HH7	ECH	68.6500	82.443
384	BSP HH6	ECH	78.4980	94.263

Hammer parameters  
Efficiency: 0.82  
Stroke: 0.3 m  
Type: ECH Fixed  
Pile material:  Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	1225	1225	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	300	MPa
Thickness	17	17	mm
C.O.R.	0.5	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	0.83		kN

Pile Information

Parameter	Value	Unit	Option
Length	16	m	Auto Segments
Penetration	15	m	Auto S-Length
Section Area	1225	cm <sup>2</sup>	Auto S-St, Wt
Elast Modulus	34500	MPa	
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>	
Toe Area	1225	cm <sup>2</sup>	0 Splices
Perimeter	1.4	m	Pile Type:
Pile Size	350	mm	Square

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 0.0	2: 0.0
3: 0.0	3: 0.0
4: 0.0	4: 0.0
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake: Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 5.833 mm

Damping: Shaft: 0.454 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance: Percentage: 10%  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

รูปที่ ค - 3 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 3  
ระดับความลึกการตอก 16.00 เมตร

Bangka

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: B24

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
523	DAWSON HPH2400	ECH	18.6400	23.486
524	DAWSON HPH6500	ECH	45.6125	63.721
525	DAWSON HPH4500	ECH	34.3362	44.163

Hammer parameters  
Efficiency: 0.6  
Stroke: 0.3 m  
Type: ECH Fixed  
Pile material:  Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	900	900	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	207	MPa
Thickness	17	17	mm
C.O.R.	0.5	0.2	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	0.4		kN

Pile Information

Parameter	Value	Unit	Option
Length	27	m	Auto Segments
Penetration	23	m	Auto S-Length
Section Area	489	cm <sup>2</sup>	Auto S-St, Wt
Elast Modulus	34500	MPa	
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>	
Toe Area	489	cm <sup>2</sup>	0 Splices
Perimeter	1.314	m	Pile Type:
Pile Size	260	mm	H Pile

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 0.0	2: 0.0
3: 0.0	3: 0.0
4: 0.0	4: 0.0
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake: Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 2.54 mm

Damping: Shaft: 0.656 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance: Percentage: 10%  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

รูปที่ ค - 4 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 4  
ระดับความลึกการตอก 23.00 เมตร

Km20\_TP3

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: 492

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
491	JUNTTAN HHK 9A	ECH	88.290	105.948
492	JUNTTAN HHK 12A	ECH	117.720	141.264
493	JUNTTAN HHK 14A	ECH	137.340	164.808

Hammer parameters  
Efficiency: 0.27  
Stroke: 0.6 m  
Type: ECH Fixed

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 1.0	2: 1.0
3: 0.0	3: 0.0
4: 0.0	4: 0.0
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 3.54 mm Const  
Toe: 6.667 mm

Damping  
Shaft: 0.656 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance Percentage: 10%  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	1600	1600	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	300	MPa
Thickness	166	133	mm
C.O.R.	0.5	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	2.2		kN

File Information

Parameter	Value	Unit	Option	Segment
Length	23	m	Auto	Segments
Penetration	18.2	m	Auto	S-Length
Section Area	1600	cm <sup>2</sup>	Auto	S-St. Wt
Elast Modulus	34500	MPa		
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	1600	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	1.6	m		Splices
Pile Size	400	mm		Pile Type: Square

รูปที่ ค - 5 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 5  
ระดับความลึกการตอก 18.20 เมตร

KPI\_135

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550-2003]: ID: 322

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
321	IHC S-70	ECH	34.339	69.513
322	IHC S-90	ECH	44.233	89.387
323	IHC S-120	ECH	59.986	121.221

Hammer parameters  
Efficiency: 0.6  
Stroke: 0.6 m  
Type: ECH Fixed

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 0.0	2: 0.0
3: 0.0	3: 0.0
4: 0.0	4: 0.0
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 3.54 mm Const  
Toe: 4.129 mm

Damping  
Shaft: 0.619 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance Percentage: 10%  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	1225	1225	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	300	MPa
Thickness	54	54	mm
C.O.R.	0.5	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	1.04		kN

File Information

Parameter	Value	Unit	Option	Segment
Length	24	m	Auto	Segments
Penetration	22	m	Auto	S-Length
Section Area	880	cm <sup>2</sup>	Auto	S-St. Wt
Elast Modulus	34500	MPa		
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	880	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	1.73	m		Splices
Pile Size	350	mm		Pile Type: Unknown

รูปที่ ค - 6 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 6  
ระดับความลึกการตอก 22.00 เมตร

MRT\_K

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550:2003]: ID: 492

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
491	JUNTTAN HHK 9A	ECH	88.2900	105.948
492	JUNTTAN HHK 12A	ECH	117.7200	141.264
493	JUNTTAN HHK 14A	ECH	137.3400	164.808

Hammer parameters  
Efficiency: 0.28  
Stroke: 0.6 m  
Type: ECH Fixed

Pile material  
 Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	9026.55	2474.79	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	2000	300	MPa
Thickness	150	45	mm
C.O.R.	0.75	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	4.92		kN

Pile Information

Length	32	m	Auto	Segments
Penetration	26	m	Auto	S-Length
Section Area	2474.79	cm <sup>2</sup>	Auto	S-St, Wt
Elast Modulus	34500	MPa		
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	2474.79	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	2.513	m		Pile Type:
Pile Size	800	mm		Pipe

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 1.0	2: 1.0
3: 0.0	3: 0.0
4: 0.0	4: 0.0
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 3.833 mm

Damping  
Shaft: 0.589 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance  
Percentage: 10 %  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

รูปที่ ค - 7 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 7  
ระดับความลึกการตอก 26.0 เมตร

Bangyai

Hammer Information  
Select from following list [11/1/2550:2003]: ID: 445

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
444	MENCK MHF5-8	ECH	78.4800	83.974
445	MENCK MHF5-9	ECH	88.2900	94.470
446	MENCK MHF5-10	ECH	98.1000	104.967

Hammer parameters  
Efficiency: 0.35  
Stroke: 0.5 m  
Type: ECH Fixed

Pile material  
 Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	2827.43	1570.8	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	300	300	MPa
Thickness	100	100	mm
C.O.R.	0.5	0.5	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	7.33		kN

Pile Information

Length	21	m	Auto	Segments
Penetration	21	m	Auto	S-Length
Section Area	1570.8	cm <sup>2</sup>	Auto	S-St, Wt
Elast Modulus	34500	MPa		
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	2827.43	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	1.685	m		Pile Type:
Pile Size	800	mm		Pipe

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft	Toe
1: 0.5	1: 1.0
2: 1.0	2: 1.0
3: 1.0	3: 0.5
4: 0.5	4: 0.5
5: 0.0	5: 0.0

Incr: 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 3.833 mm

Damping  
Shaft: 0.452 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance  
Percentage: 10 %  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

รูปที่ ค - 8 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 8  
ระดับความลึกการตอก 21.00 เมตร

Param5\_P1

Hammer Information  
Select from following list (11/1/2550-2003): ID: 525

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
524	DAWSON HPH6500	ECH	45.6125	63.721
525	DAWSON HPH4500	ECH	34.3362	44.163
526	DAWSON HPH9000	ECH	46.5959	89.930

Hammer parameters  
Efficiency: 0.6  
Stroke: 0.3 m  
Type: ECH  
Fixed

Resistance Gain/Loss Factors

Shaft		Toe	
1	0.5	1	1.0
2	1.0	2	1.0
3	0.0	3	0.0
4	0.0	4	0.0
5	0.0	5	0.0

Incr.: 0 Action >>

Pile material  
 Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	484	484	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	210	210	MPa
Thickness	50	50	mm
C.O.R.	0.2	0.2	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	0.428		kN

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.54 mm Const  
Toe: 2.888 mm

Damping  
Shaft: 0.656 s/m Const  
Toe: 0.49 s/m Smith

Shaft Resistance  
Percentage: 10 %  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

Pile Information

Length	21	m	Auto	Segments
Penetration	12	m	Auto.	S-Length
Section Area	363	cm <sup>2</sup>	Auto.	S-St. Wt
Elast Modulus	34500	MPa		
Spec Weight	23.6	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	363	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	1.05	m		Pile Type:
Pile Size	220	mm		Unknown

รูปที่ ค - 9 หน้าต่างป้อนพารามิเตอร์ต่างๆของโปรแกรมGRLWEAP สำหรับโครงการที่ 9  
ระดับความลึกการตอก 12.00 เมตร

## ภาคผนวก ง

การป้อนข้อมูลดินสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติของดินด้วยโปรแกรม GRLWEAP

ตาราง ง - 1 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 1

ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
2.0	2.19	6
5.0	2.30	7
8.0	0.94	3
11.0	0.63	2
14.0	2.19	6
15.5	4.38	13
17.0	5.63	16
18.5		12
20.0		4
21.5		11
23.0		11
24.5		30
26.0		42
27.5		32
29.0		39
30.5		39
32.0		34
33.5		31
35.0		35
36.5		53
38.0		69
39.5		47
41.0		55

ตาราง ง - 2 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 2

ความลึก (เมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
1.3	25
1.9	14
2.5	5
3.5	6
5.0	18
6.5	63
8.0	30
9.5	43
11.0	41
12.5	57
14.0	63
15.5	60

ตาราง ง - 3 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 3

ความลึก (เมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
1.2	15
2.2	14
3.2	8
4.7	2
6.2	4
7.7	5
9.2	35
10.7	60
12.2	22
13.7	21
15.2	25
16.7	29
18.2	43
19.7	56



ตาราง ง - 4 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 4

ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
1.8	0.87	3
3.3	0.62	2
4.8	0.94	3
6.3	1.27	4
7.8	1.10	3
9.3	1.63	5
10.8	1.86	5
12.3	2.58	8
13.8	2.34	7
15.3	2.61	8
16.8	2.77	8
18.2		21
19.7		24
21.2		24
22.7		38
24.2		48
25.7		51
27.2		56
28.7		42
30.2		25

ตาราง ง - 5 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 5

ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
6.5	0.31	1
11.5	0.63	2
14.5	1.25	4
18.5		16
20.0		23
21.5		58
23.0		34
24.5		56
27.0		53
28.5		42
30.0		32
31.5		31

ตาราง ง - 6 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 6

ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
2.0	0.63	2
5.0	1.25	4
6.5	0.94	3
8.0	1.90	6
9.5	2.30	7
11.0	1.25	4
12.5	1.20	3
14.0	2.30	7
15.5	3.75	11
17.0	10.00	29
18.5		21
20.0		60
21.5		36
23.0		43
24.5		35
26.0		32
27.5		25
29.0		32
30.5		49
32.0		58
33.5		29
35.0		28

ตาราง ง - 7 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 7

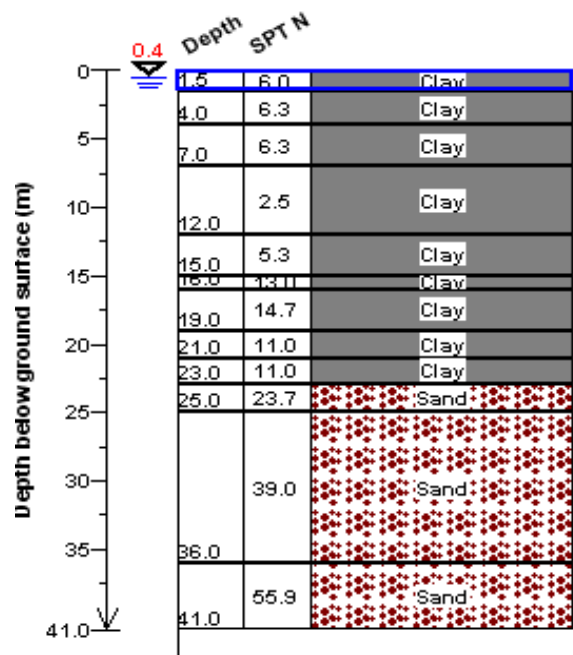
ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
3.3	1.42	4
4.8	1.78	5
7.8	1.56	5
9.3	1.93	6
10.8	1.52	4
12.3	2.05	6
13.8	1.66	5
18.3		10
19.8		18
21.3		16
22.8		28
24.3		38
25.8		27
27.3		19
28.8		60
30.3		60
31.8		60
33.3		58
34.8		54
36.3		45
37.8		39
39.3		45
40.8		62

ตาราง ง - 8 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 8

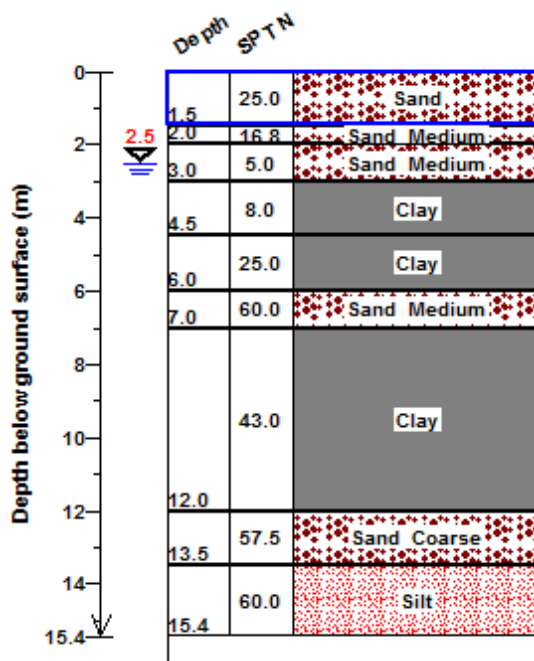
ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
3.5	3.06	9
6.0	2.29	7
7.5	1.94	6
9.5	2.45	7
11.0	3.47	10
13.0		11
14.0		14
15.5		16
17.0		21
18.5		26
20.5		31
21.5		25
23.0		28
24.5		22
26.0		17
27.0		34

ตาราง ง - 9 ค่า N-SPT ตามความลึกจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการที่ 9

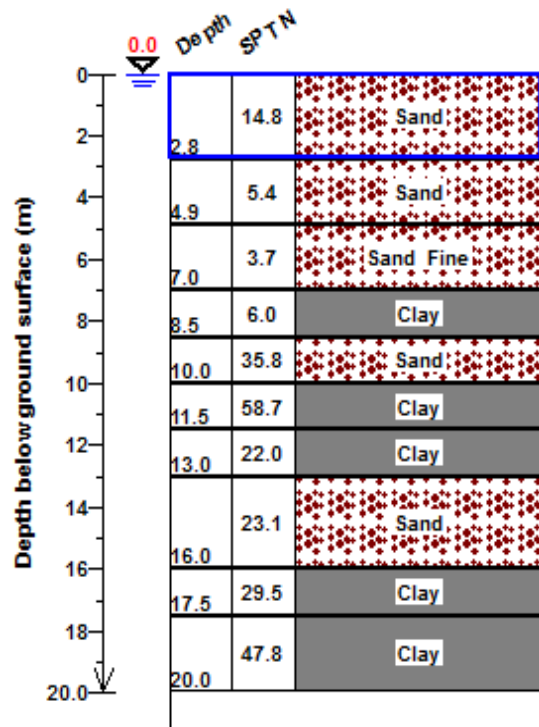
ความลึก (เมตร)	Su (ตัน/ตารางเมตร)	N (ครั้ง/ฟุต)
2.0	2.81	8
3.5	1.00	3
5.0	1.00	3
6.5	1.00	3
9.5	1.25	4
11.0	1.25	4
12.5	2.00	6
14.0	1.1	3
15.5		14
17.0		17
18.5		15
20.0		39
21.5		41
23.0		40
24.5		34
26.0		73
27.5		61
29.0		61
30.5		48



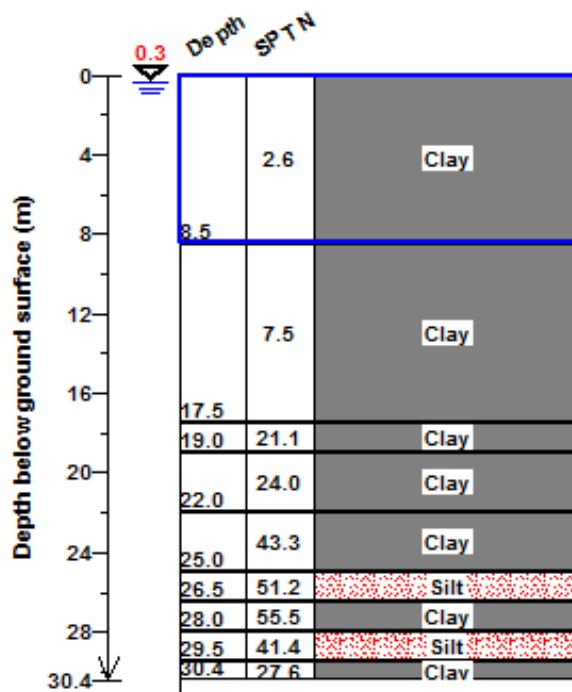
รูปที่ ง - 1 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 1



รูปที่ ง - 2 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 2

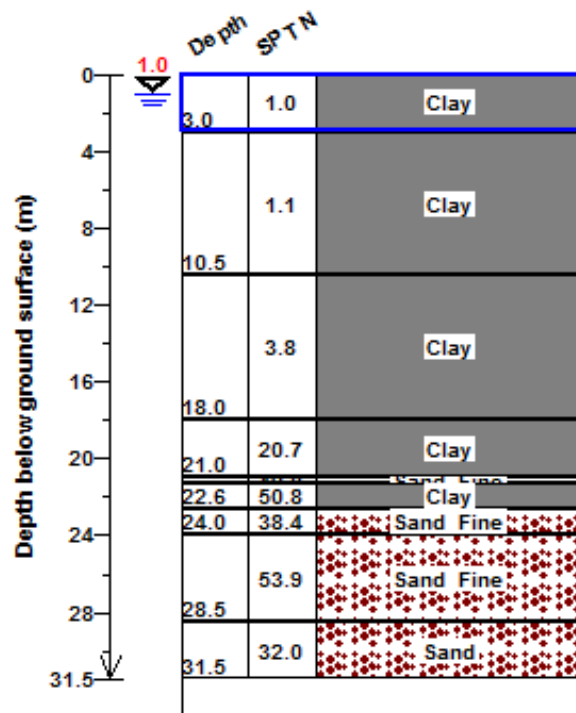


รูปที่ ง - 3 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 3

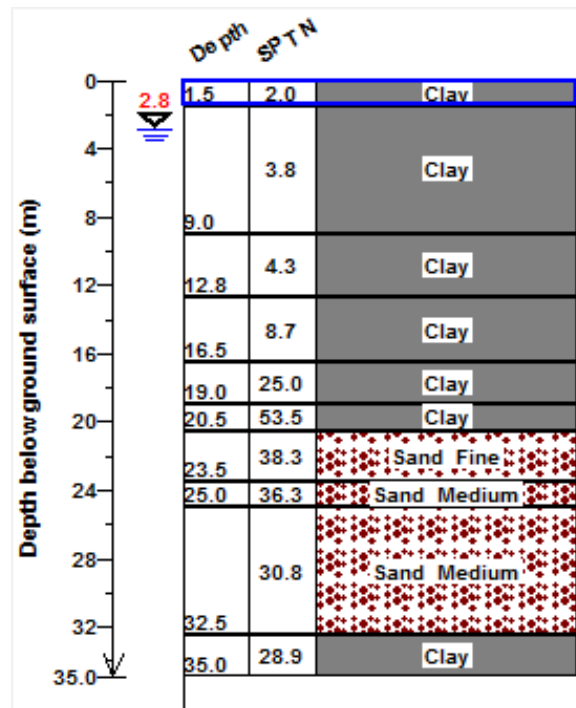


รูปที่ ง - 4 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 4

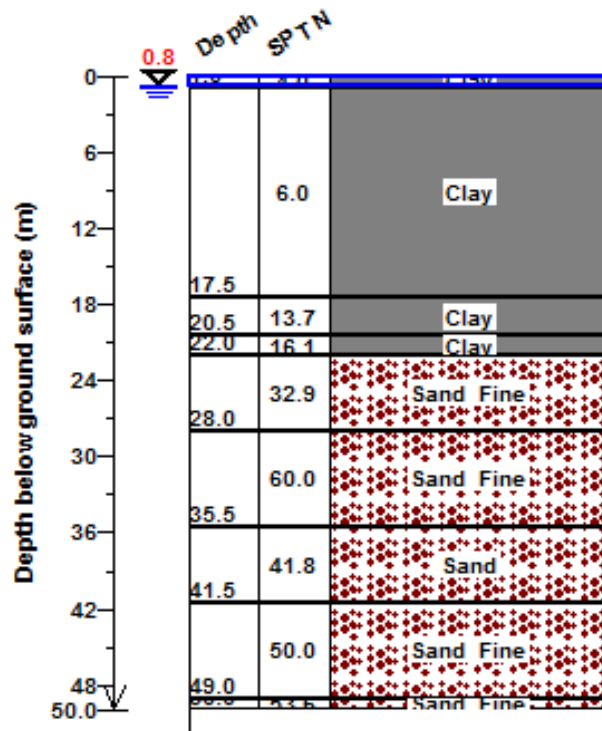




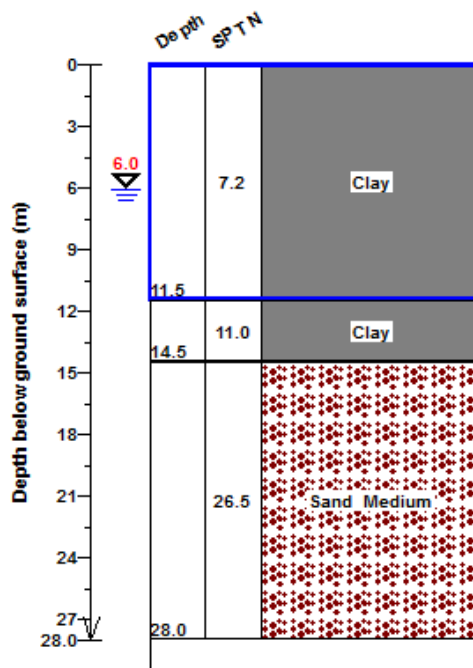
รูปที่ ง - 5 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่5



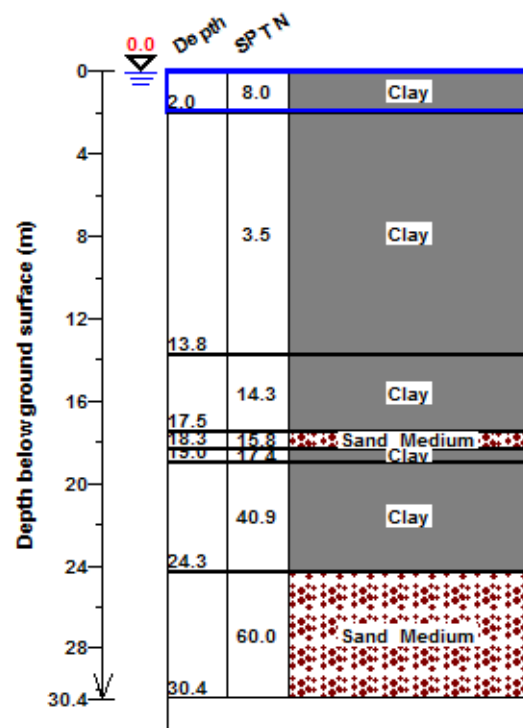
รูปที่ ง - 6 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่6



รูปที่ ง - 7 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 7



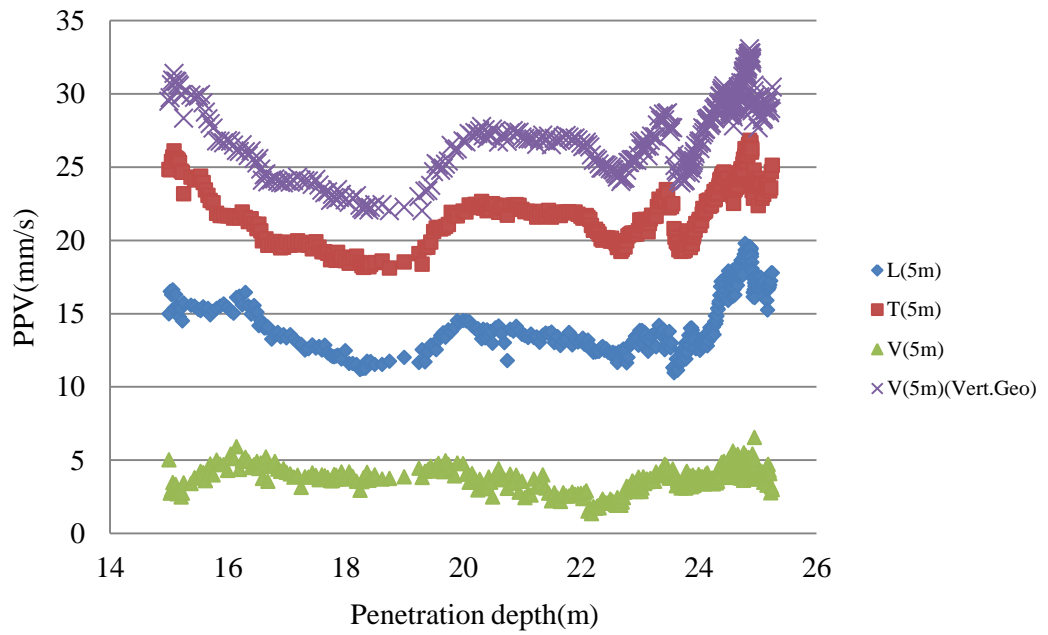
รูปที่ ง - 8 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรมGRLWEAPของโครงการที่ 8



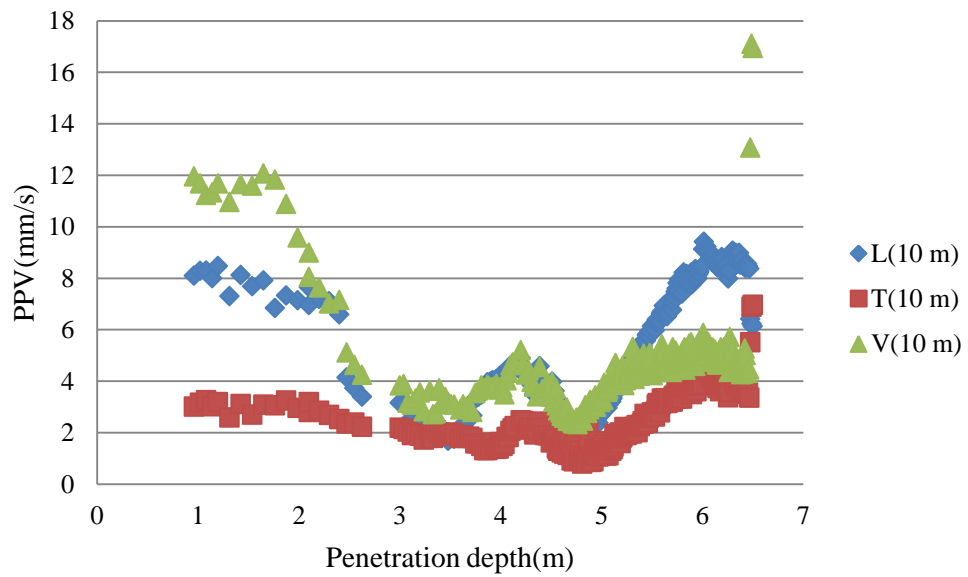
รูปที่ ง - 9 ลักษณะชั้นดินเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ในโปรแกรม GRLWEAP ของ  
โครงการที่ 9

ภาคผนวก จ

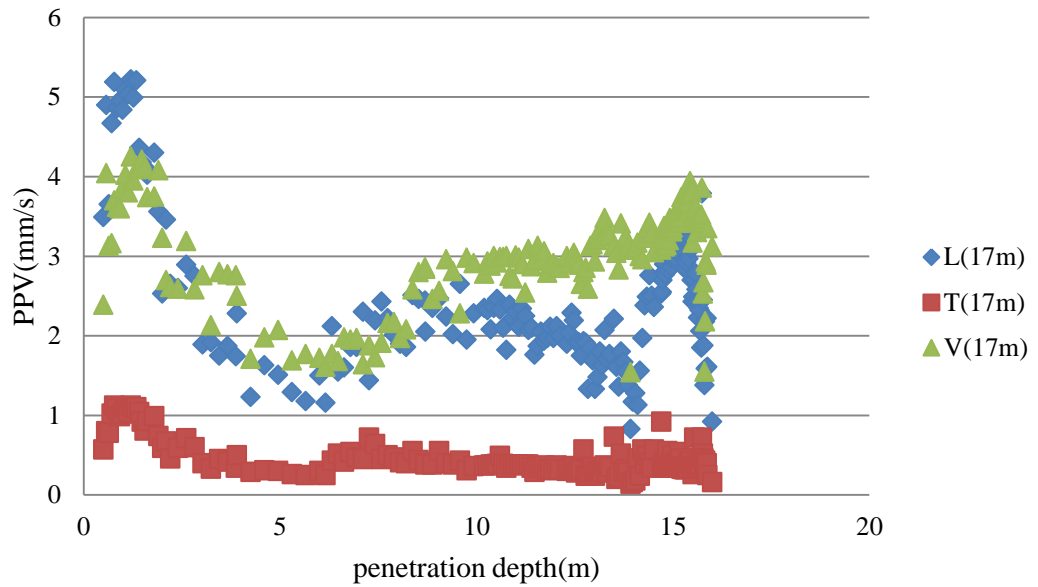
พฤติกรรมของคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม



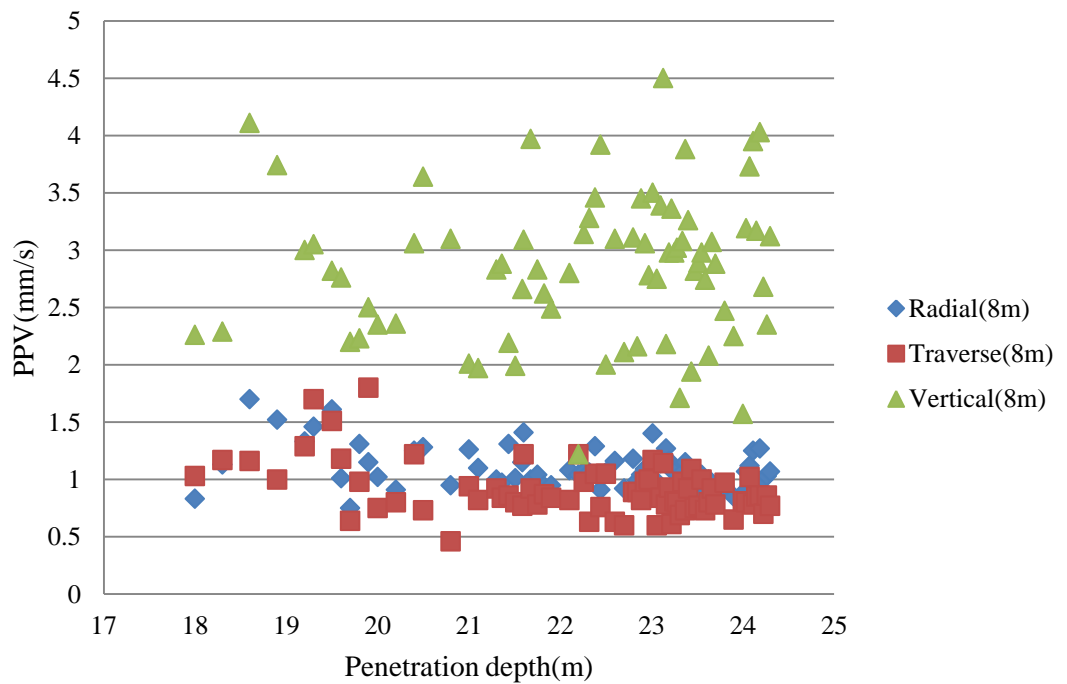
รูปที่ ๑ - 1 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของโครงการที่ 1



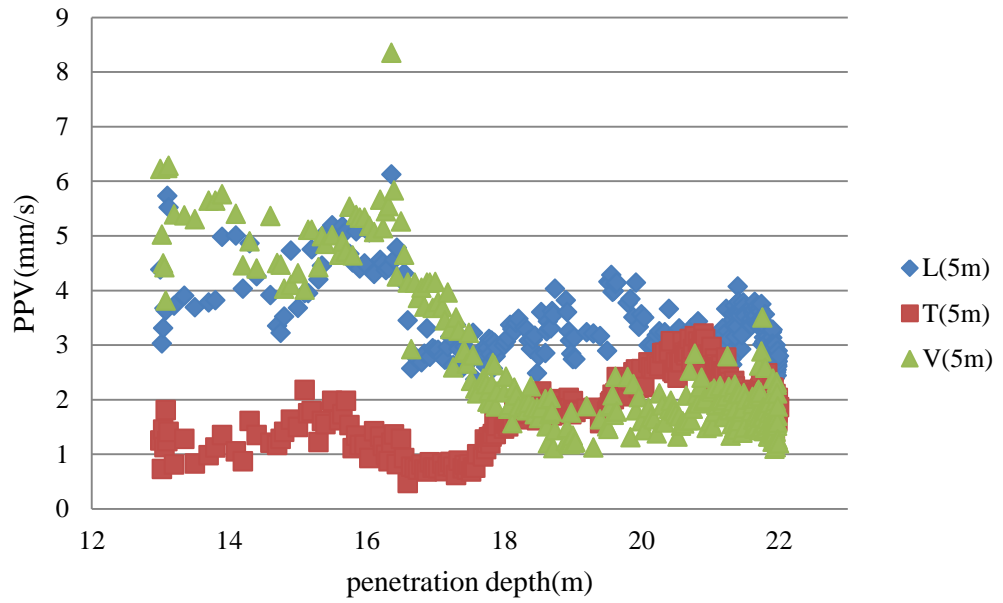
รูปที่ ๑ - 2 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของโครงการที่ 2



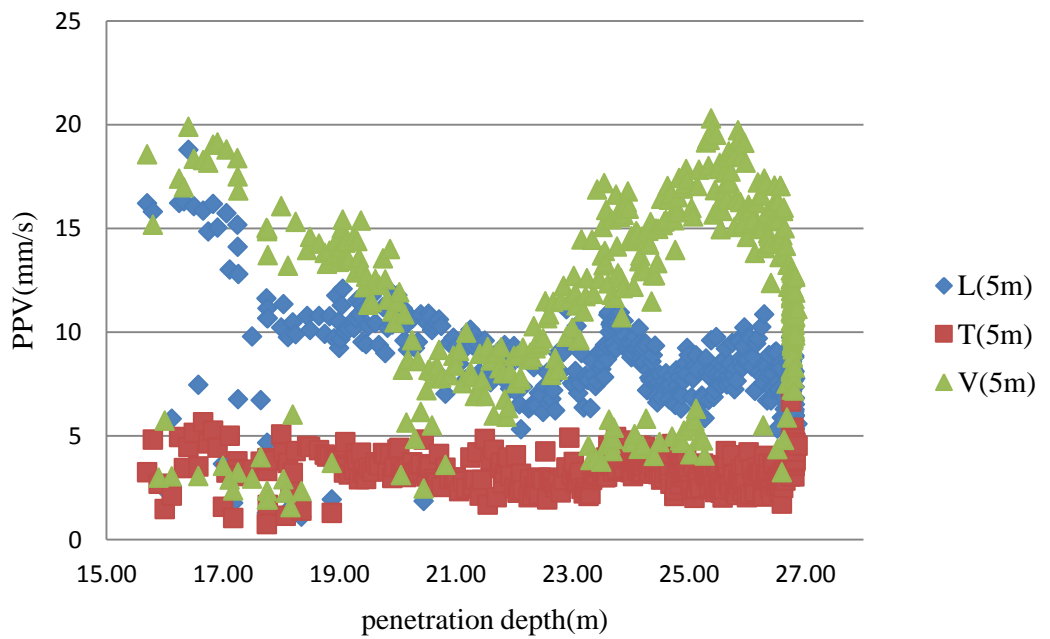
รูปที่ ๑ - 3 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากกับความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 3



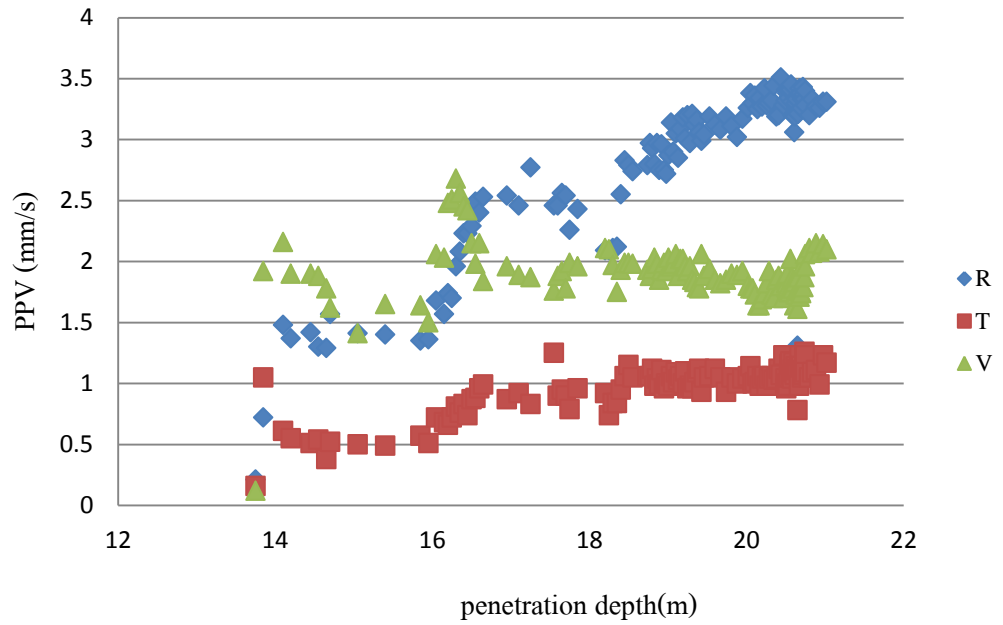
รูปที่ ๑ - 4 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากกับความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 4



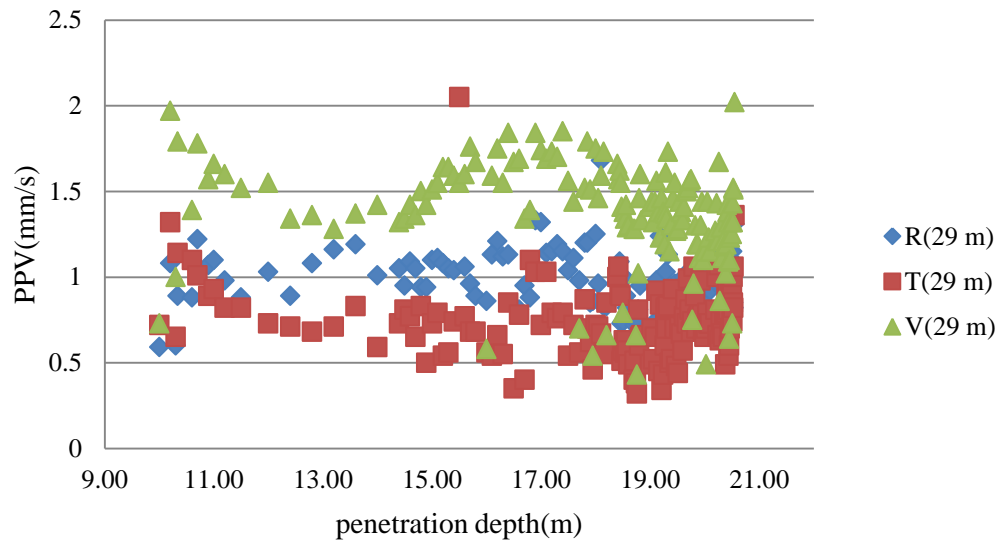
รูปที่ ๑ - 5 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 6



รูปที่ ๑ - 6 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 7

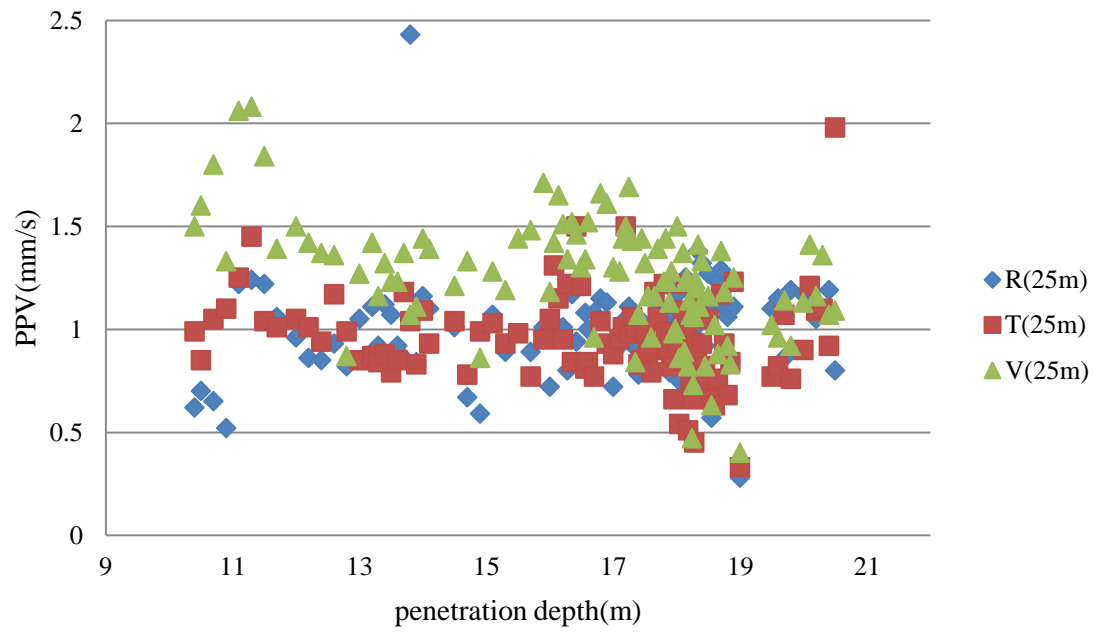


รูปที่ ๗ - ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 8

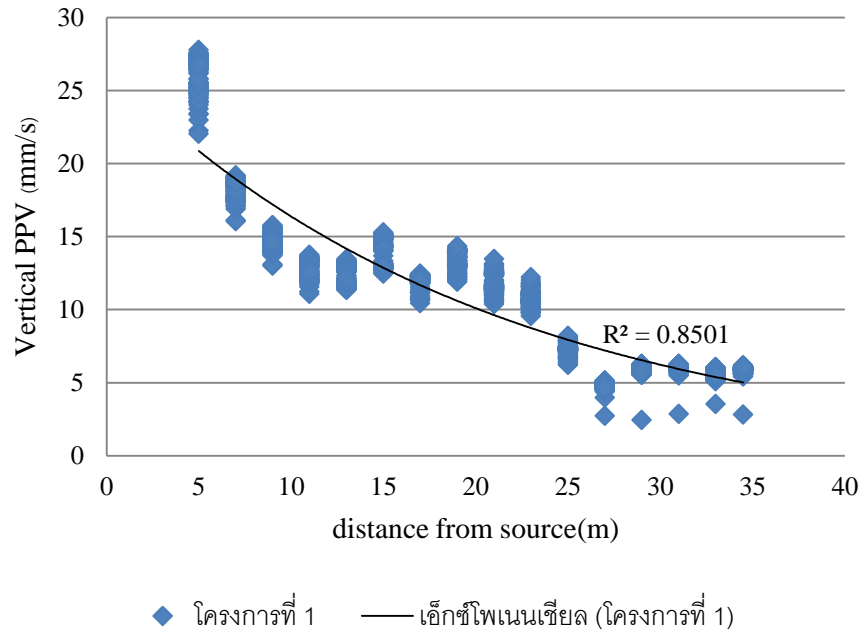


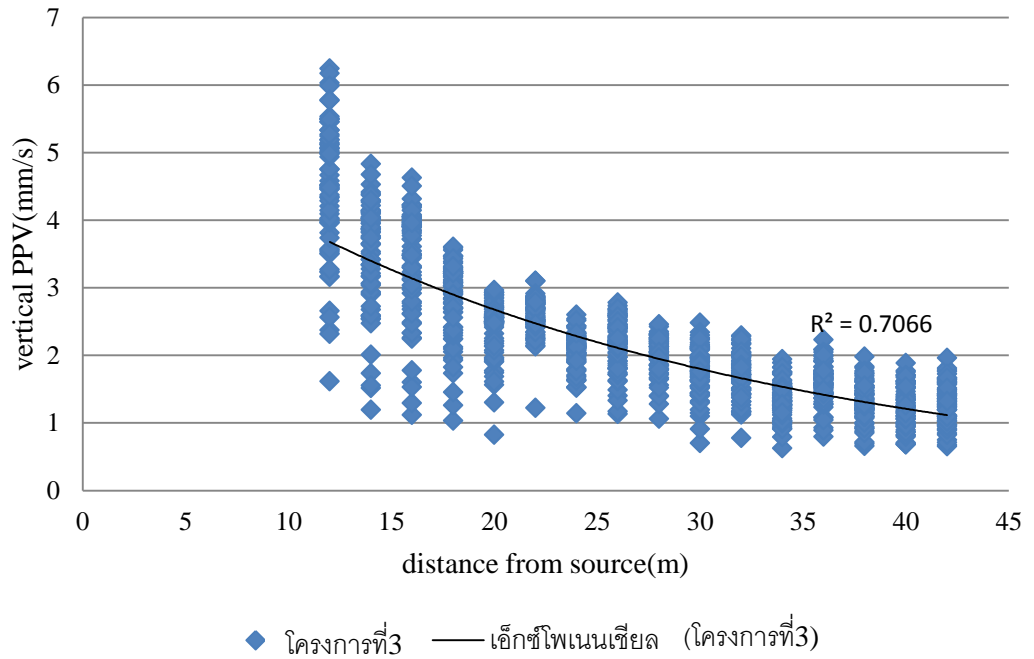
รูปที่ ๘ - ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 9 เสาเข็มต้นที่ 1



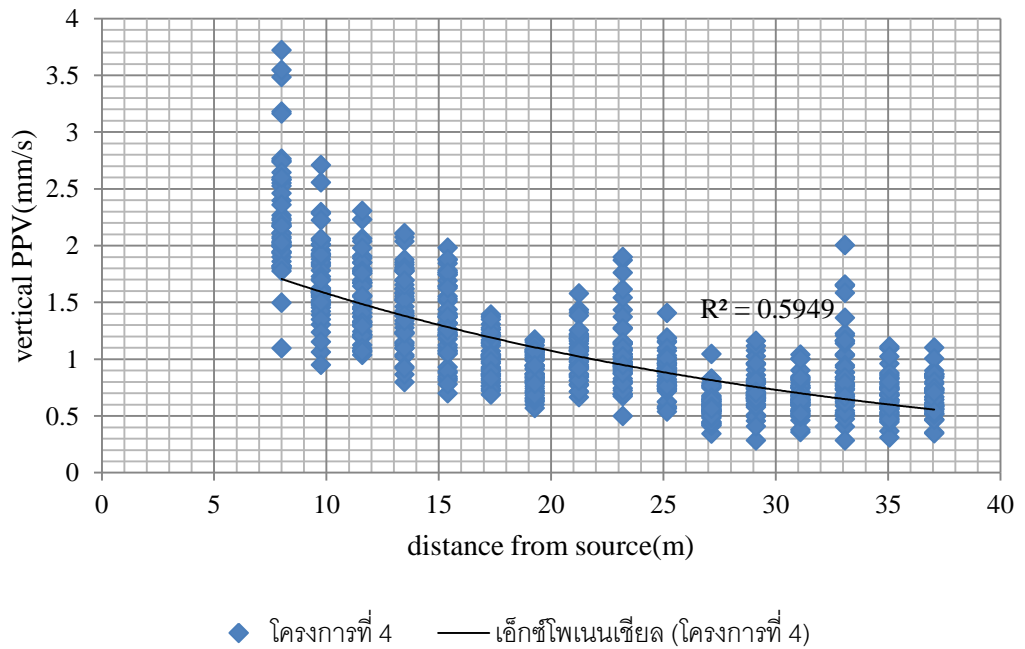


รูปที่ ๑ - 9 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวแกนรัศมี ดิ่ง และตั้งฉากที่ความลึกต่างๆของ  
โครงการที่ 9 เส้าเข็มต้นที่ 2

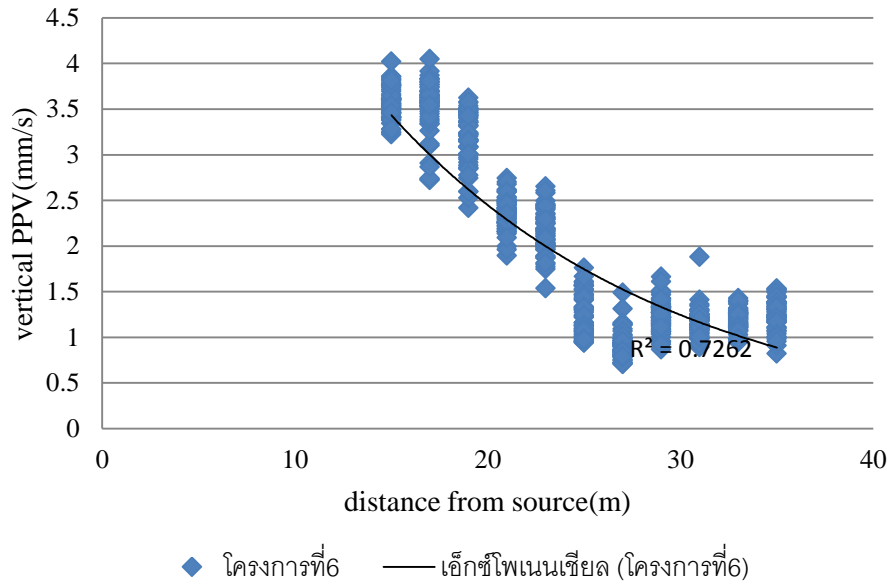




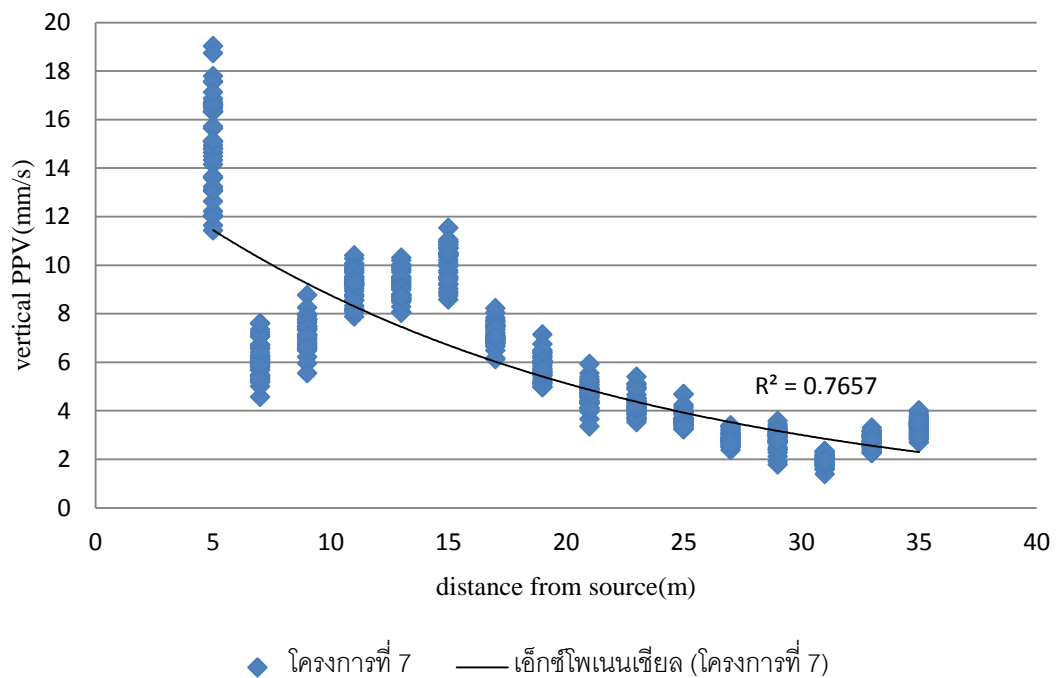
รูปที่ ๑ - 12 ความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 14.0 ถึง 16.0 เมตร ของโครงการที่ 3



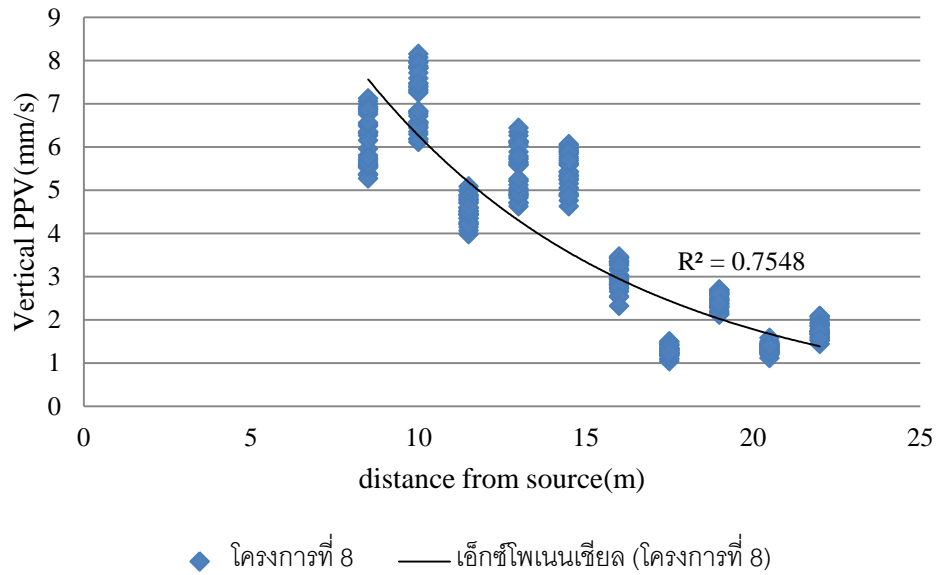
รูปที่ ๑ - 13 ความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 18.00 ถึง 24.00 เมตร ของโครงการที่ 4



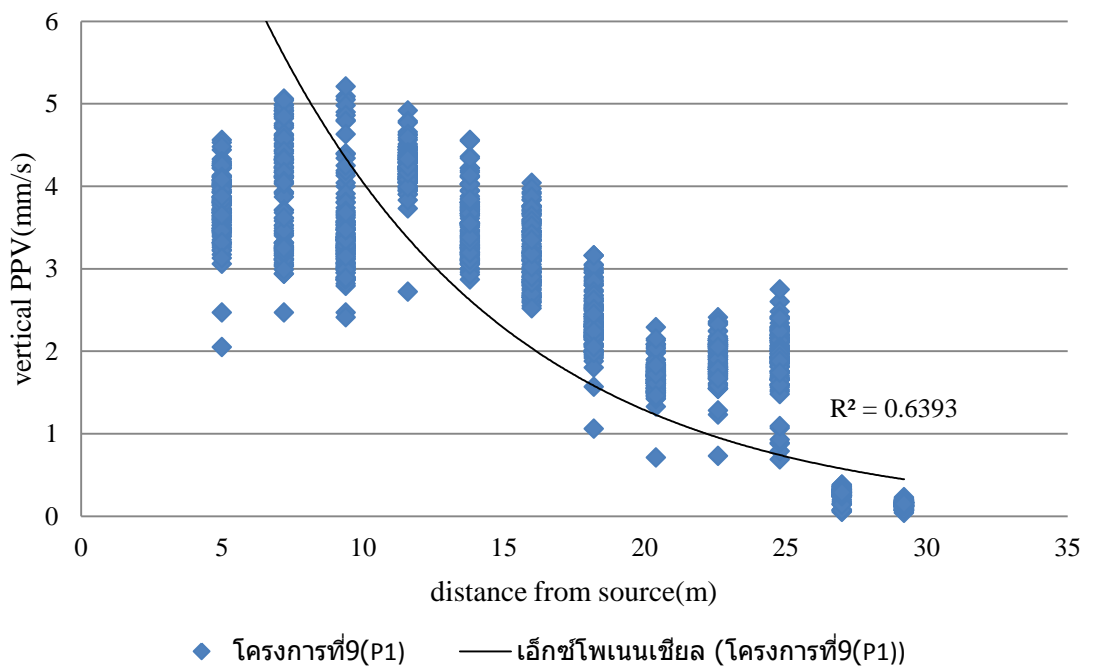
รูปที่ ๑ - 14 ความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 17.00 ถึง 19.00 เมตร ของโครงการที่ 6 (ตัดข้อมูลที่ระยะทาง 5 เมตร ถึง 13 เมตร)



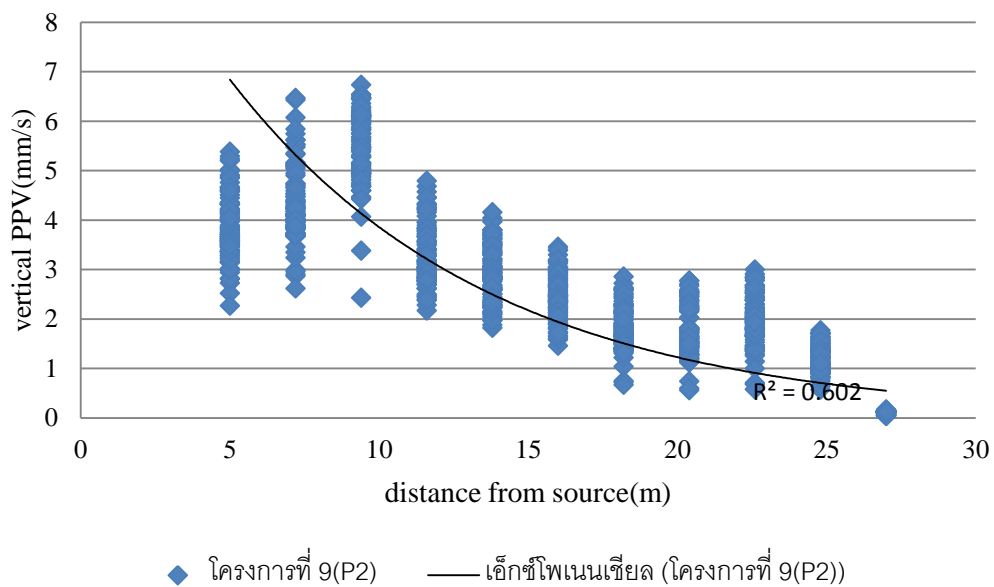
รูปที่ ๑ - 15 ความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 23.00 ถึง 24.00 เมตร ของโครงการที่ 7



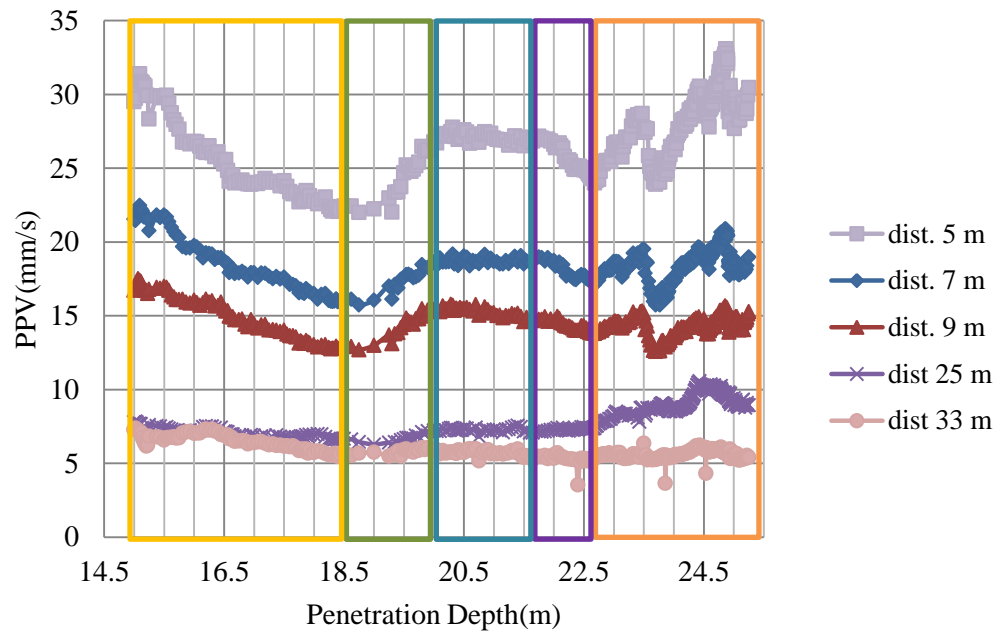
รูปที่ ๑ - 16 ความเร็วอนุภาคสูงสุด(PPV)แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 20.5 ถึง 21.0 เมตร ของโครงการที่ 8



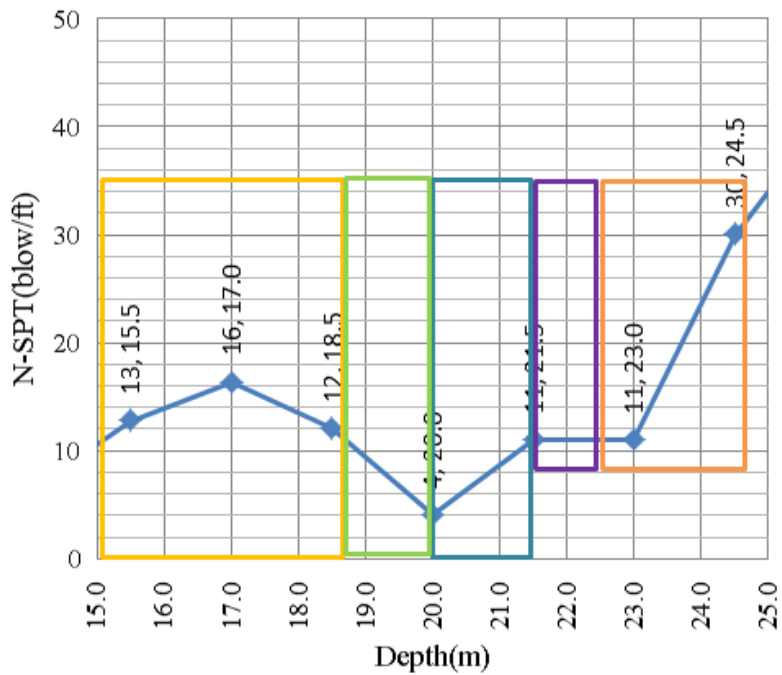
รูปที่ ๑ - 17 ความเร็วอนุภาคสูงสุด(PPV)แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 19.0 ถึง 20.0 เมตร ของโครงการที่ 9 เสาเข็มต้นที่ 1



รูปที่ ๑ - 18 ความเร็วอนุภาคสูงสุด(PPV)แนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่ระดับความลึก 19.0 ถึง 20.0 เมตร ของโครงการที่ 9 เสาเข็มต้นที่ 2

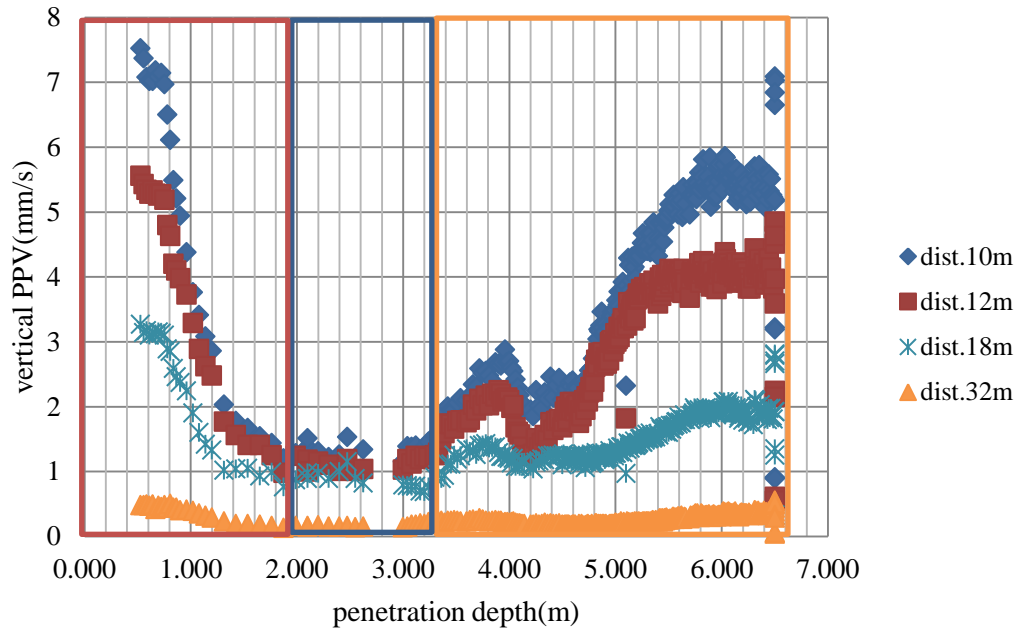


(1)

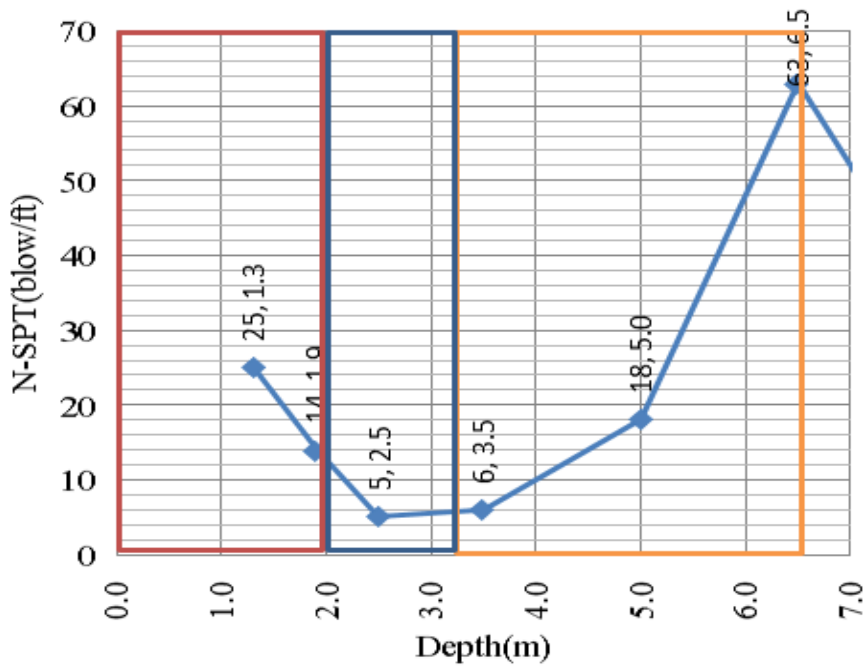


(2)

รูปที่ ๑ - 19 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 1 (แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT)



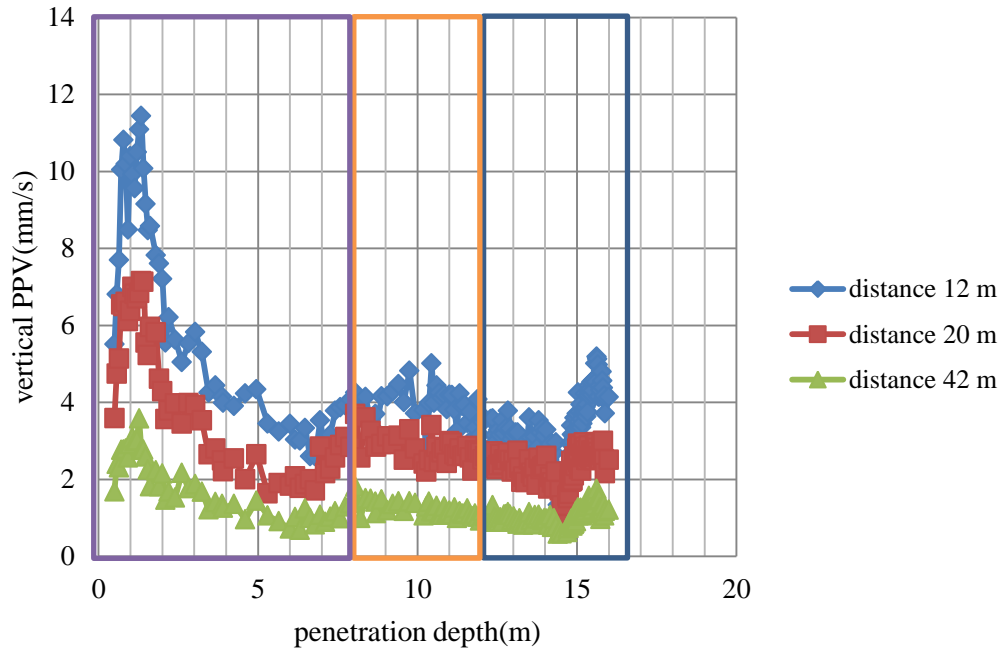
(1)



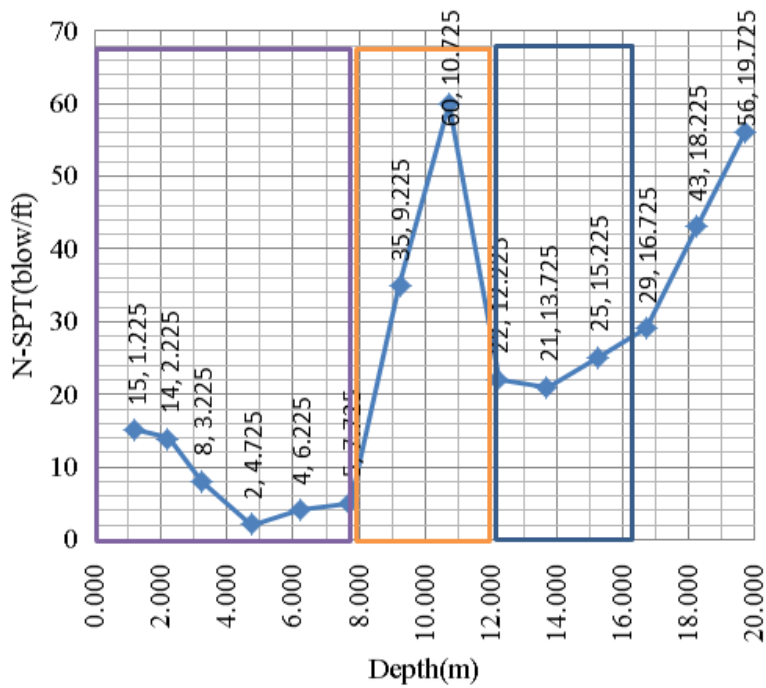
(2)

รูปที่ ๑ - 20 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ (1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก (2) ของโครงการที่ 2 (แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT)



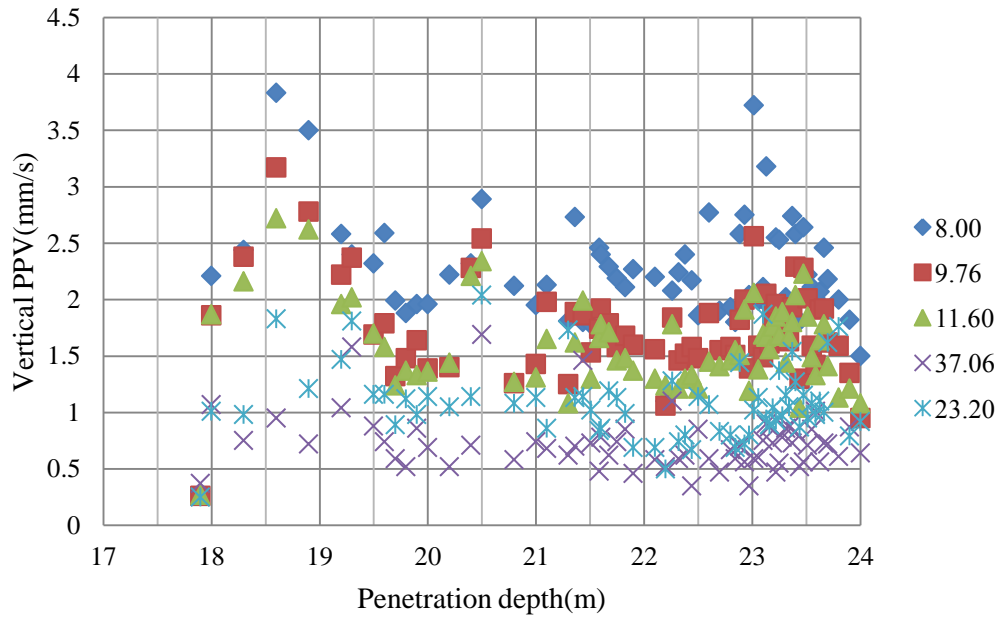


(1)

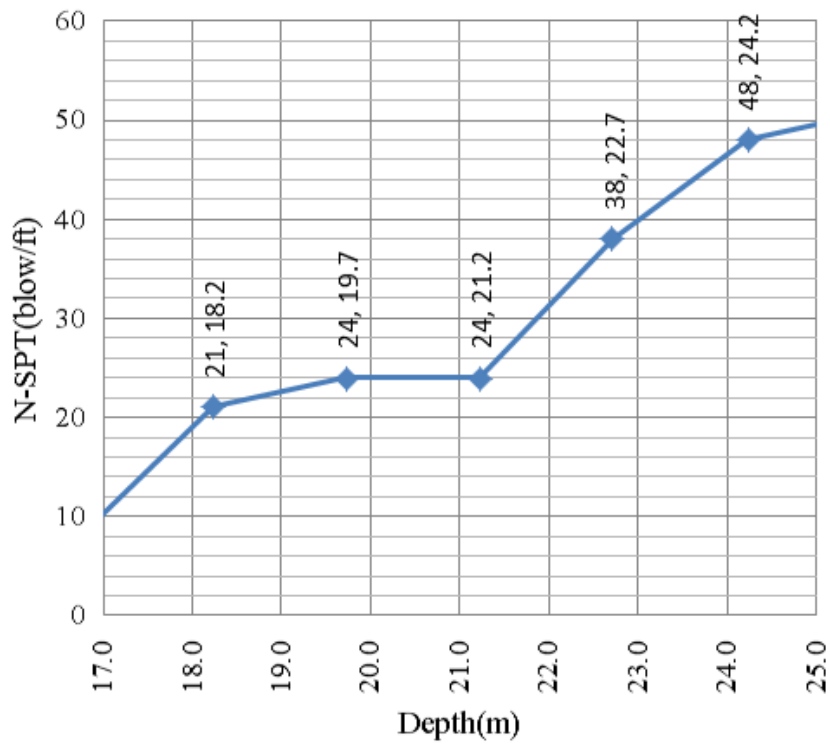


(2)

รูปที่ ๑ - 21 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2)ของโครงการที่ 3(แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT)

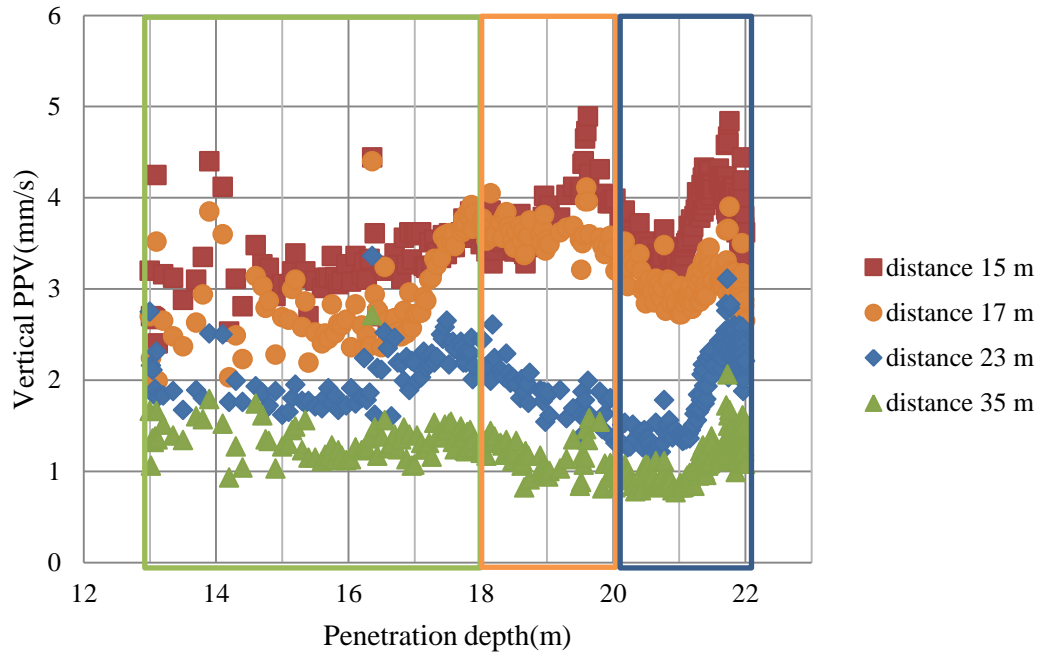


(1)

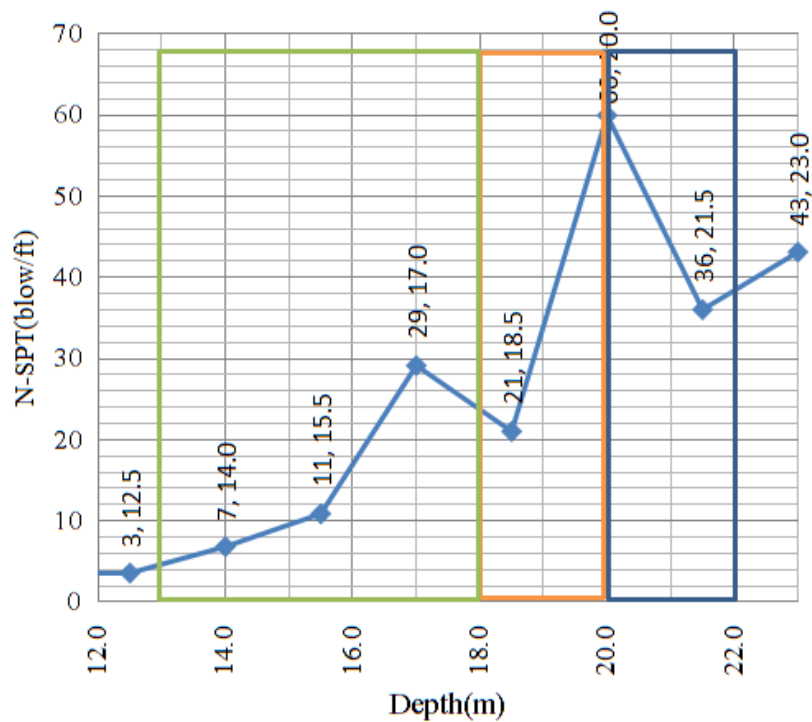


(2)

รูปที่ ๑ - 22 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 4 แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT

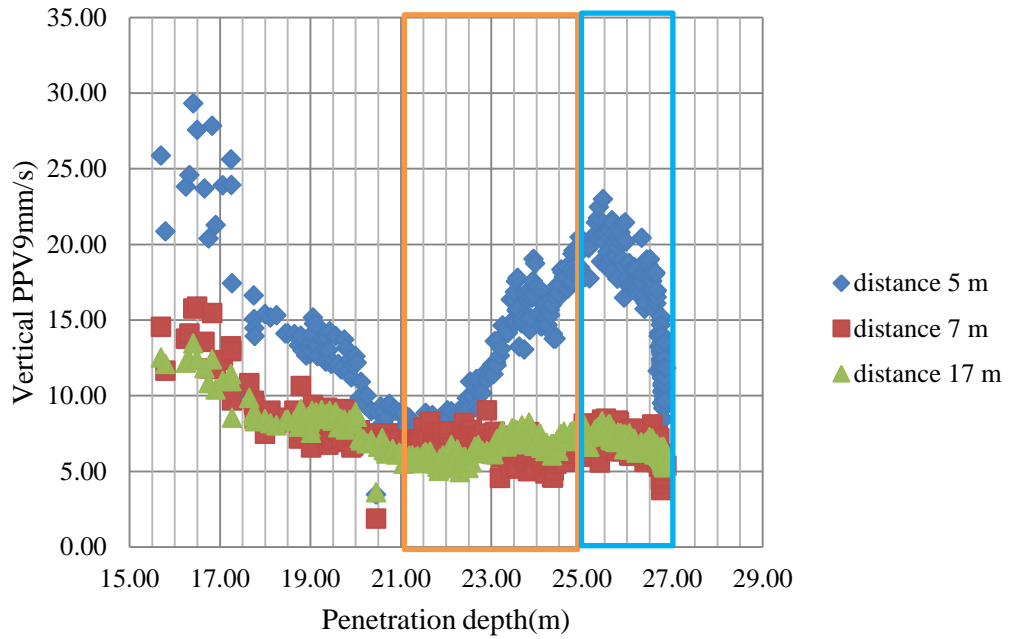


(1)

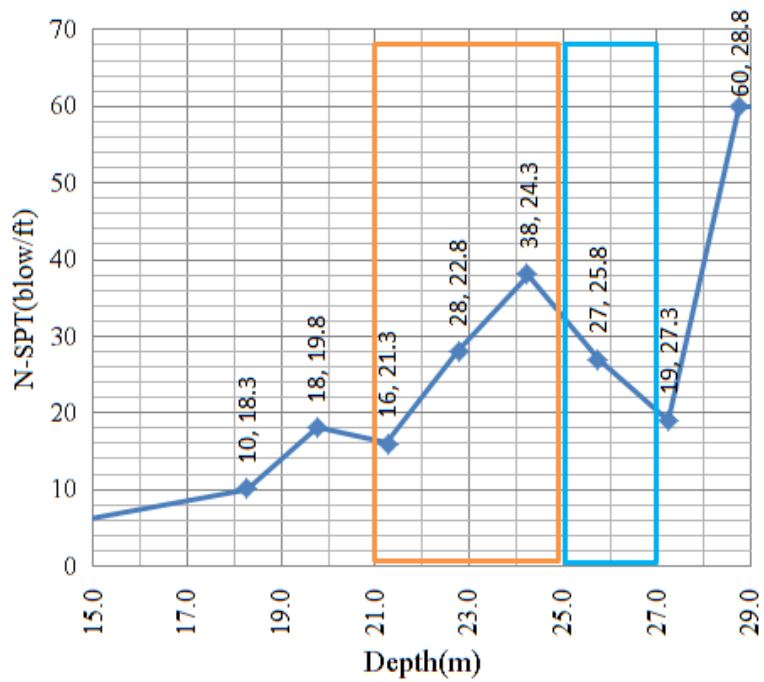


(2)

รูปที่ จ - 23 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 6 (แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT)

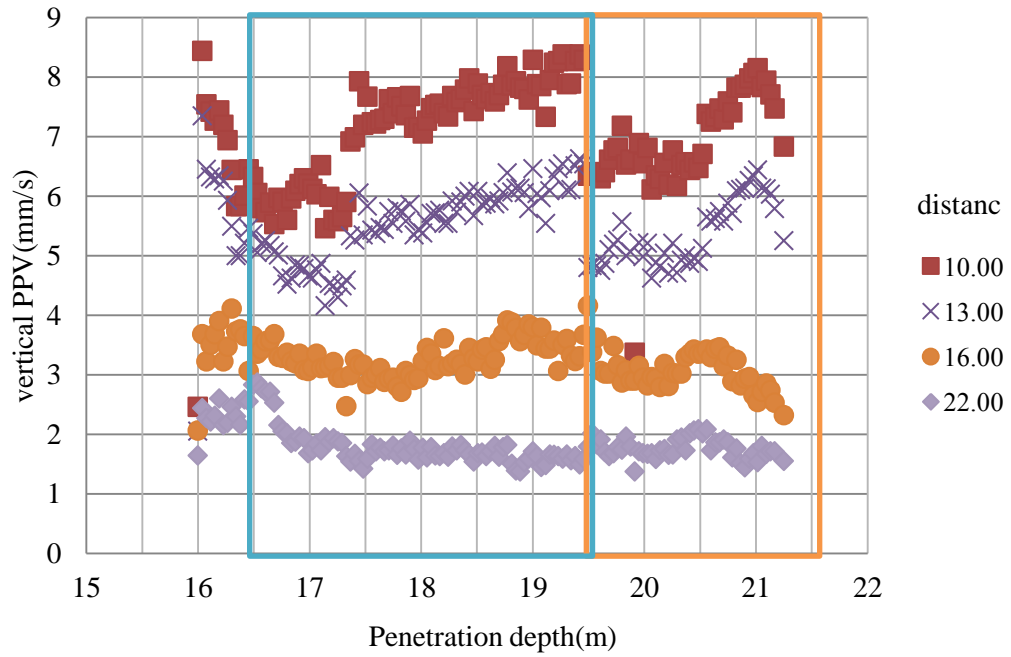


(1)

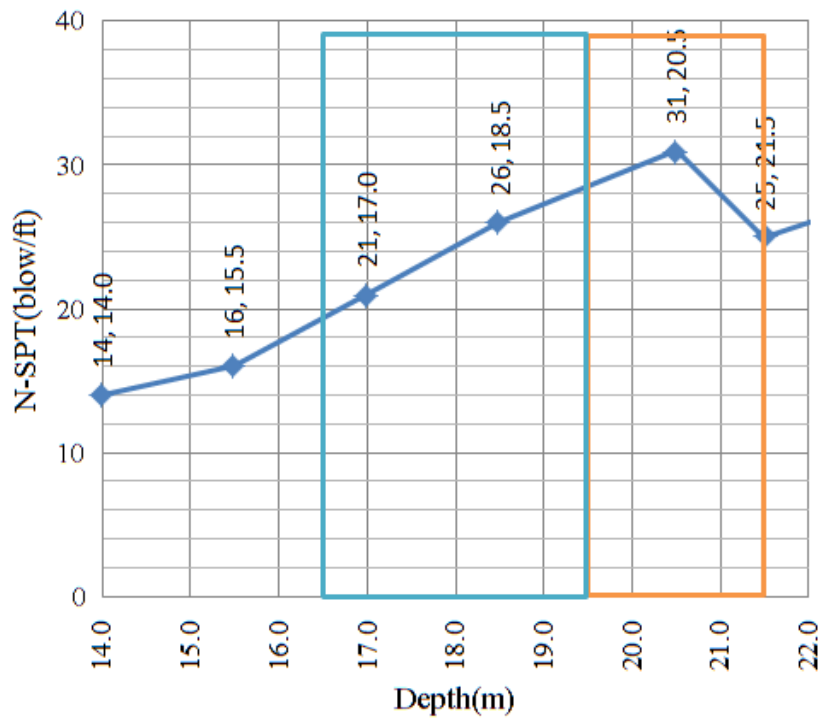


(2)

รูปที่ ๑ - 24 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 7 (แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT)

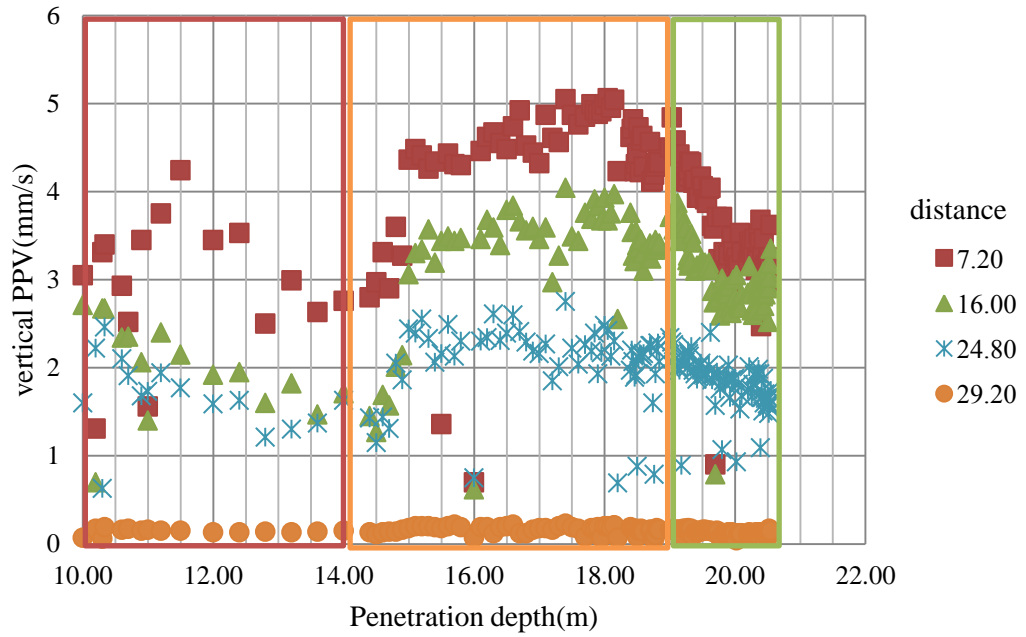


(1)

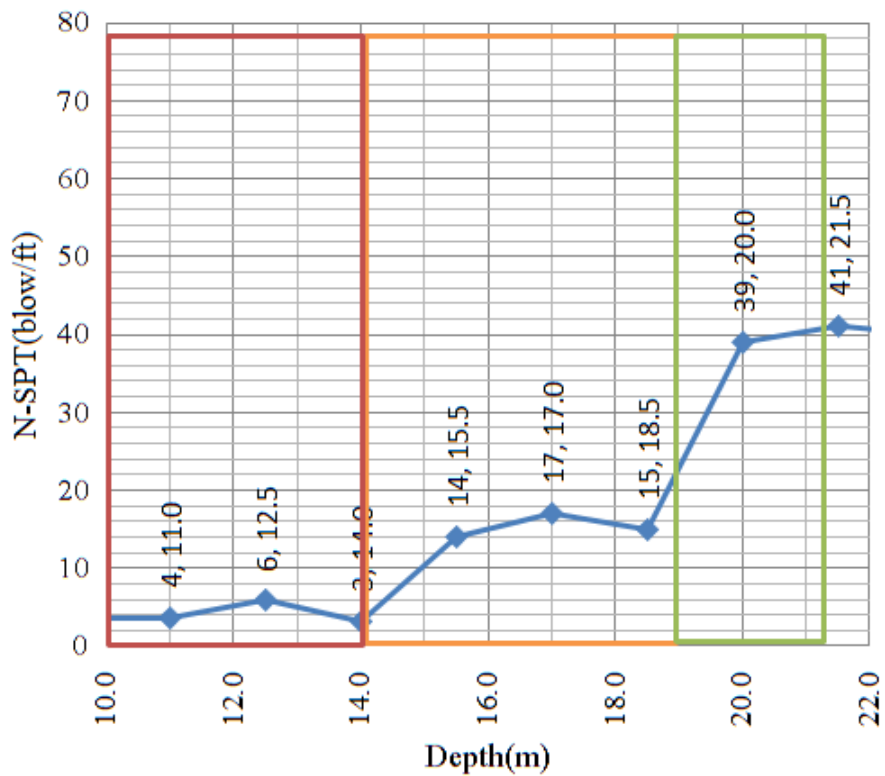


(2)

รูปที่ ๑ - 25 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 8 แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT



(1)

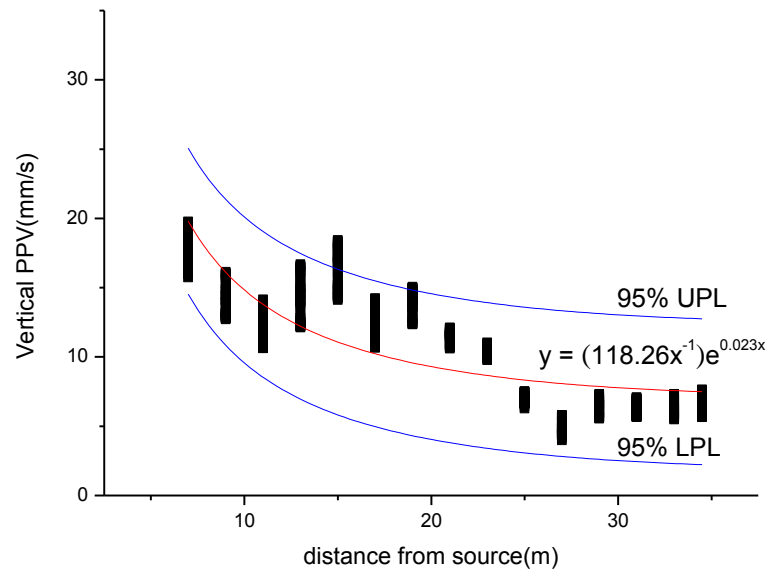


(2)

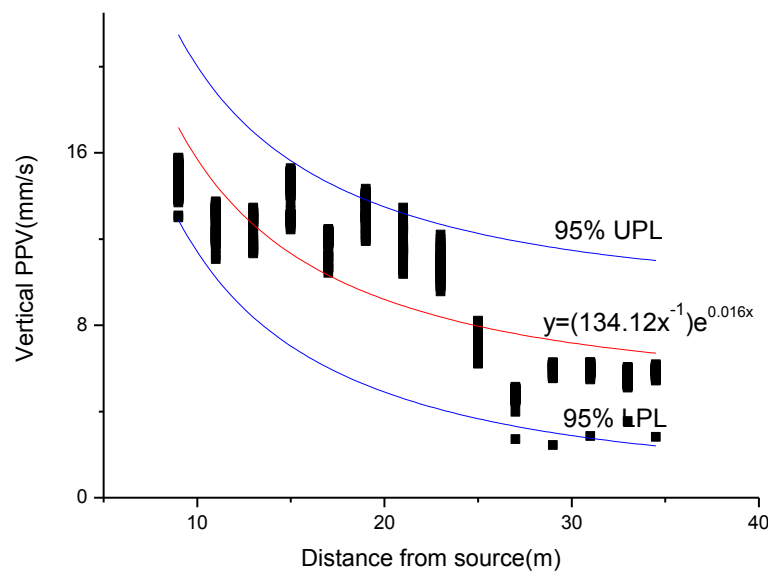
รูปที่ ๑ - 26 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับความลึกของการตอกเสาเข็มที่ระยะทางต่างๆ(1) และ N-SPT ที่แต่ละความลึก(2) ของโครงการที่ 9 แบ่งตามการเพิ่มลดของ PPV กับ N-SPT

ภาคผนวก จ

การลดทอนของการสิ้นสะท้อนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม

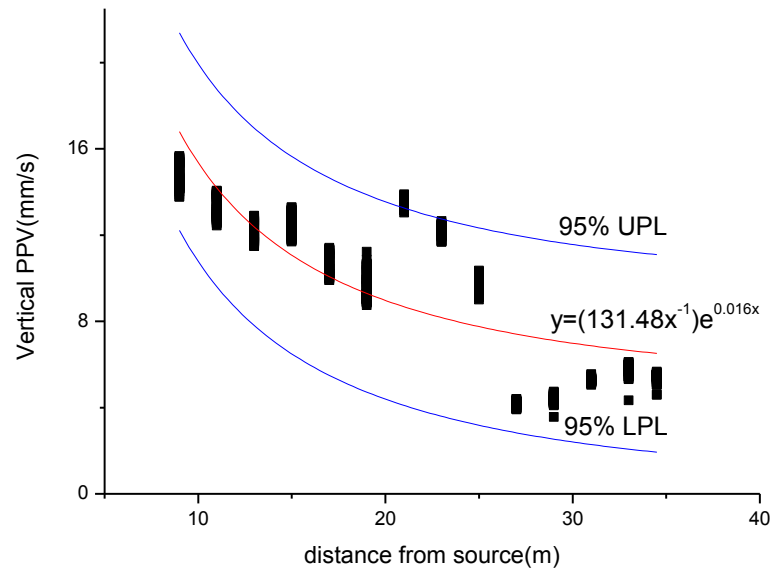


รูปที่ ๑ - 1 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 16.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร(โครงการที่ 1)

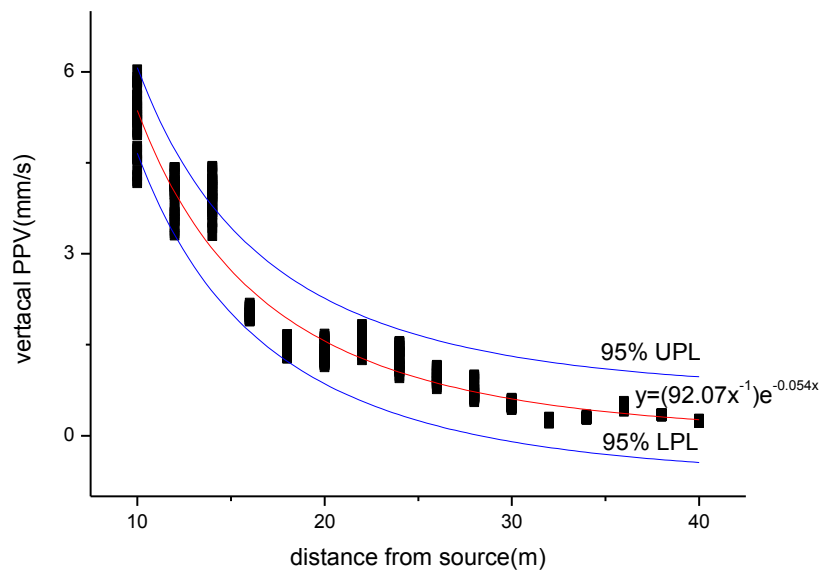


รูปที่ ๑ - 2 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 20.00 เมตร ถึง 23.00 เมตร(โครงการที่ 1)

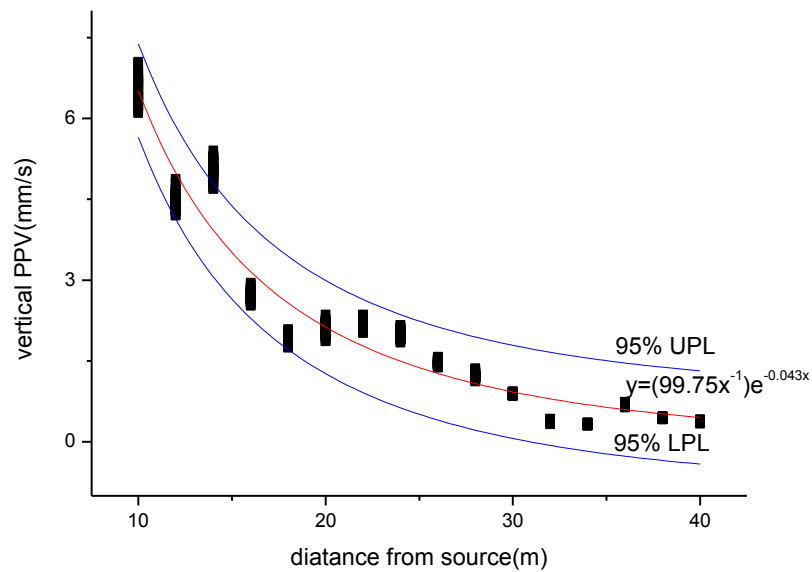




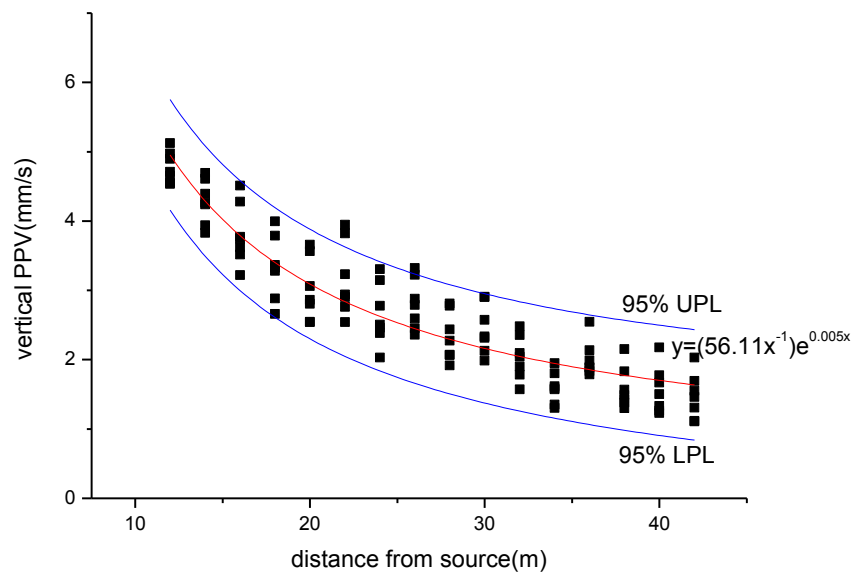
รูปที่ ๓ - 3 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 24.50 เมตร ถึง 25.20 เมตร(โครงการที่ 1)



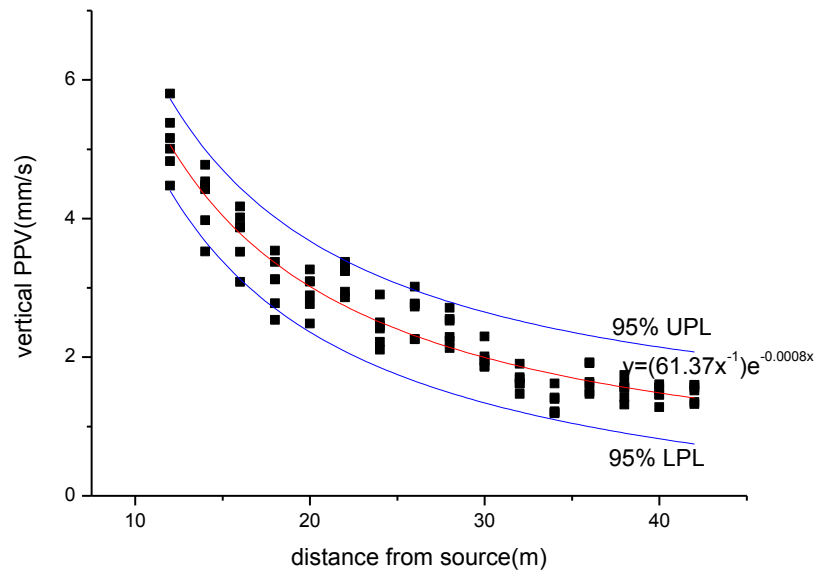
รูปที่ ๔ - 4 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 5.00 เมตร ถึง 5.50 เมตร(โครงการที่ 2)



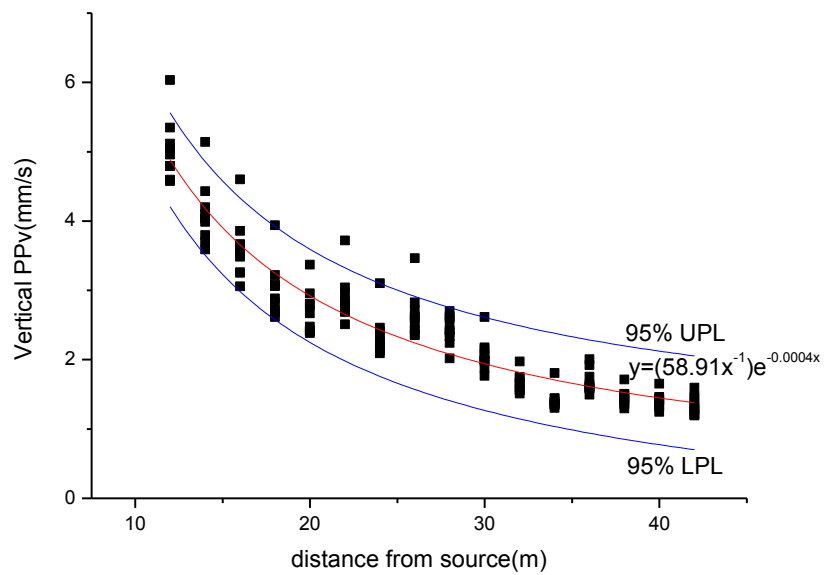
รูปที่ ๕ - 5 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 6.00 เมตร ถึง 6.50 เมตร (โครงการที่ 2)



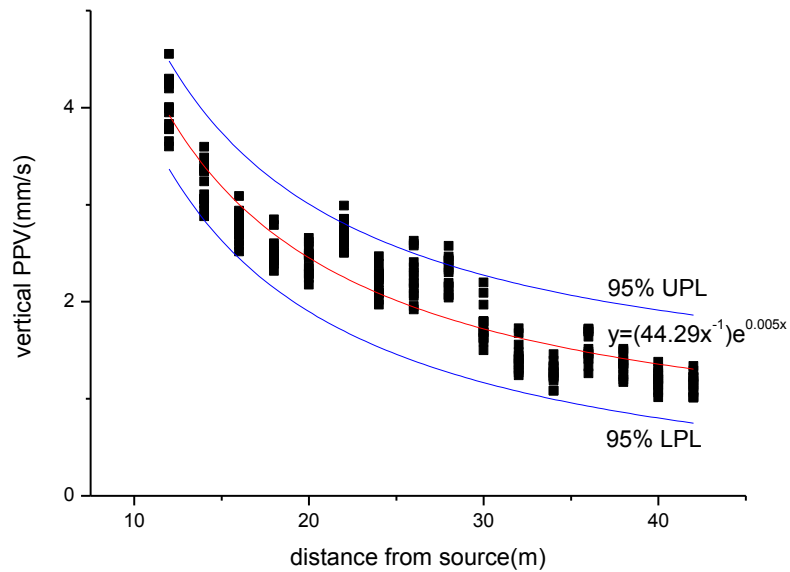
รูปที่ ๕ - 6 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วงความลึก 7.40 เมตร ถึง 8.40 เมตร (โครงการที่ 3)



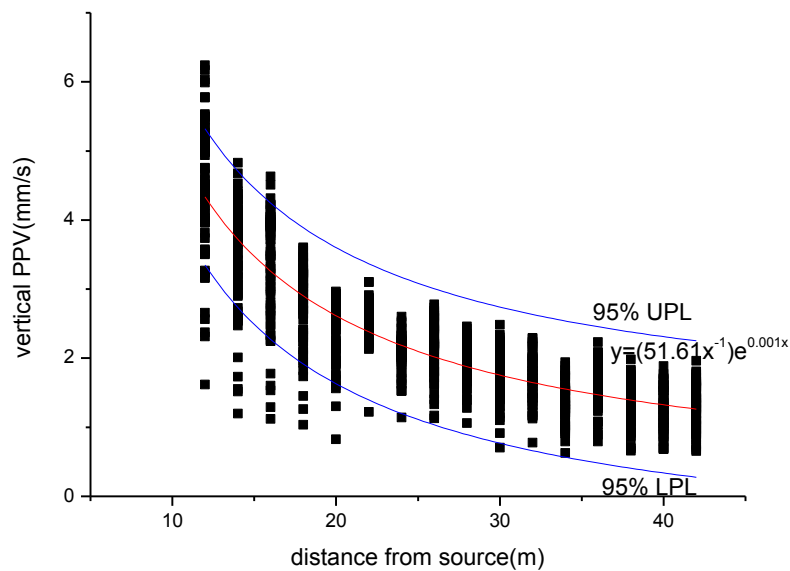
รูปที่ ๗ - 7 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 9.00 เมตร ถึง 10.00 เมตร(โครงการที่ 3)



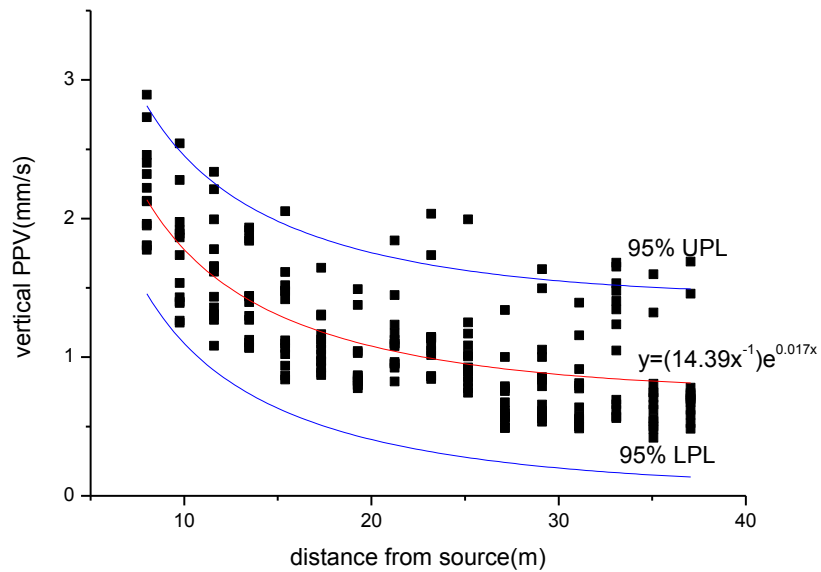
รูปที่ ๘ - 8 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 10.20 เมตร ถึง 11.00 เมตร(โครงการที่ 3)



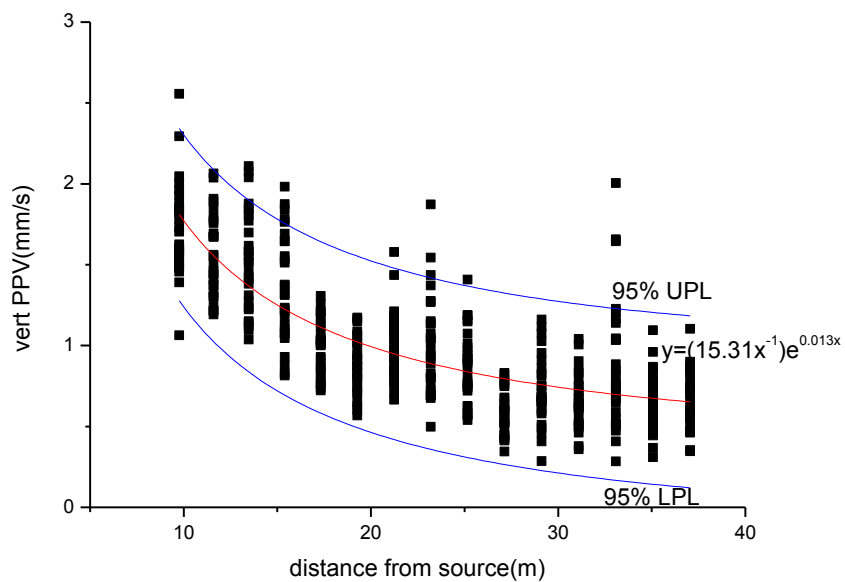
รูปที่ ๙ - ๑ ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร(โครงการที่ 3)



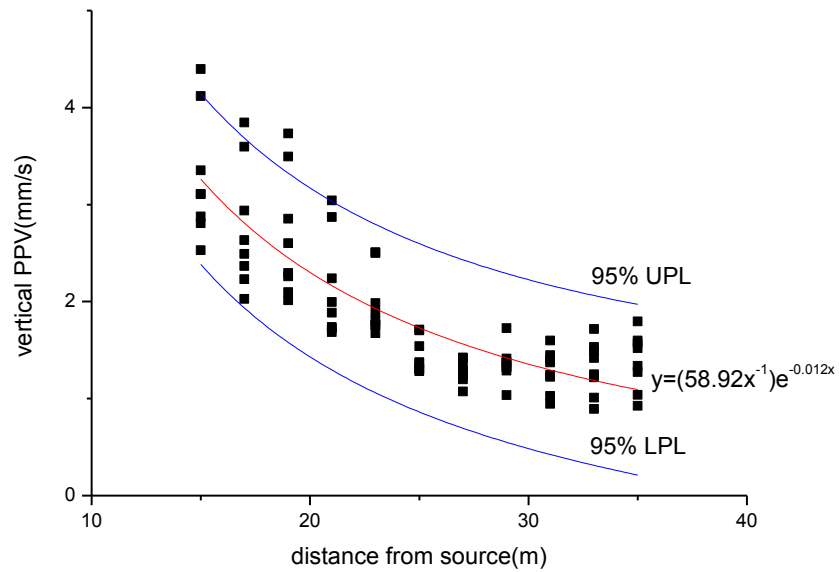
รูปที่ ๙ - 10 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 14.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร(โครงการที่ 3)



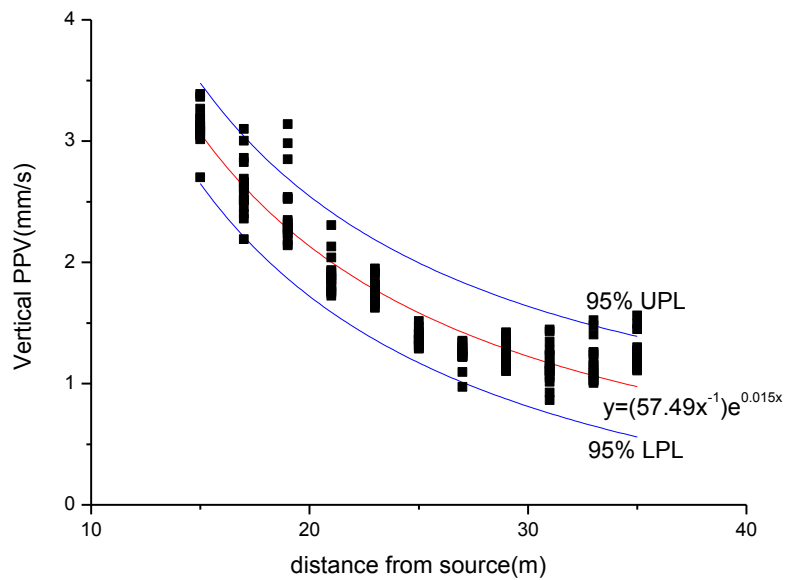
รูปที่ ๑ - 11 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 20.00 เมตร ถึง 21.50 เมตร(โครงการที่ 4)



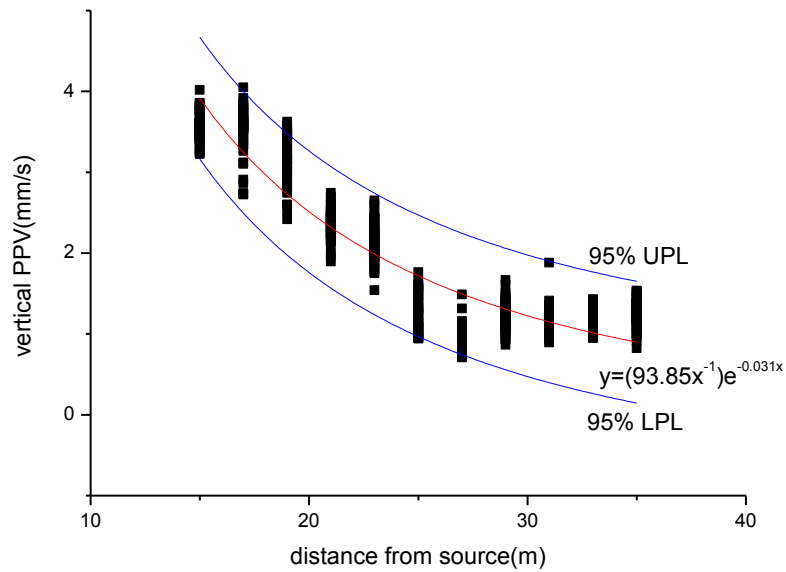
รูปที่ ๑ - 12 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 22.00 เมตร ถึง 23.50 เมตร(โครงการที่ 4)



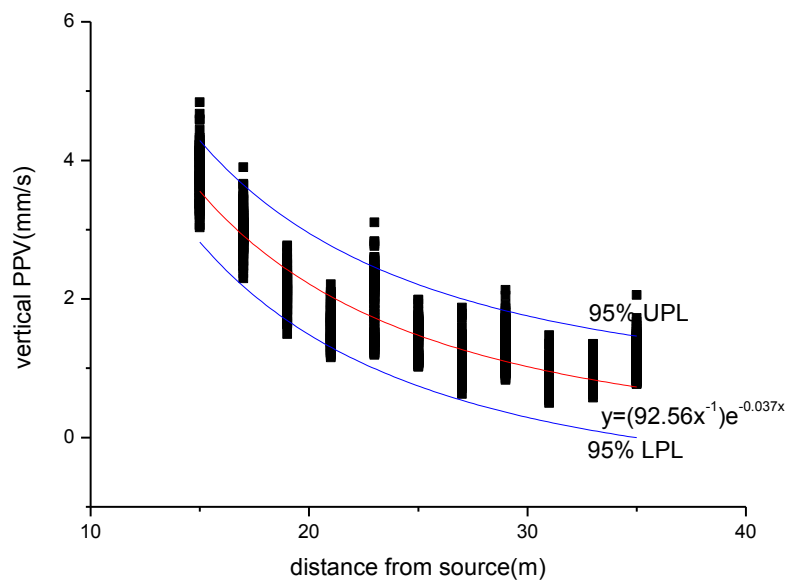
รูปที่ ๑ - 13 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 13.50 เมตร ถึง 14.50 เมตร(โครงการที่ 6)



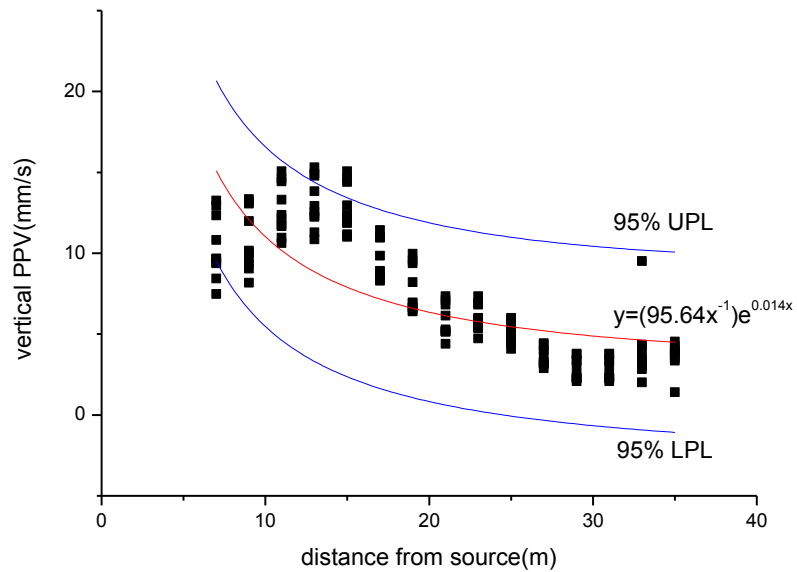
รูปที่ ๑ - 14 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 15.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร(โครงการที่ 6)



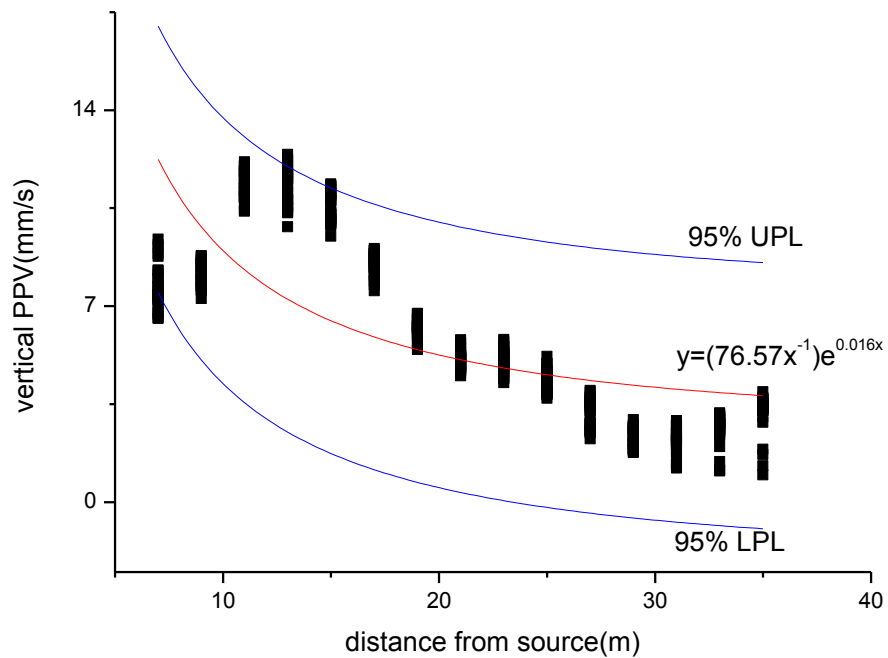
รูปที่ ๑ - 15 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 17.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร(โครงการที่ 6)



รูปที่ ๑ - 16 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 21.00 เมตร ถึง 22.00 เมตร(โครงการที่ 6)

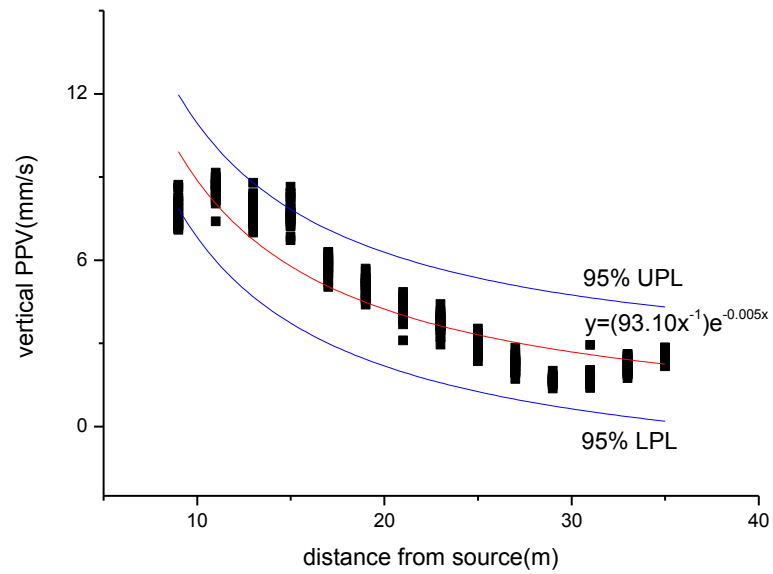


รูปที่ ๑ - 17 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 17.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร(โครงการที่7)

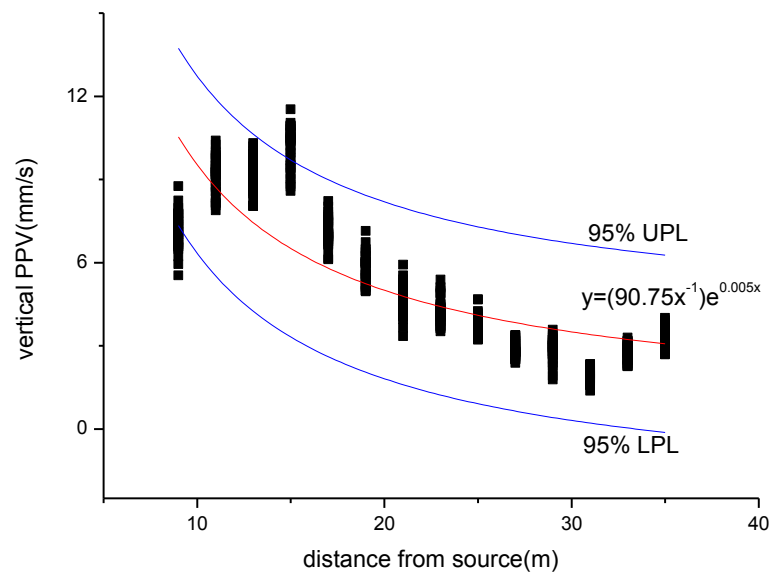


รูปที่ ๑ - 18 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 19.00 เมตร ถึง 20.00 เมตร(โครงการที่7)

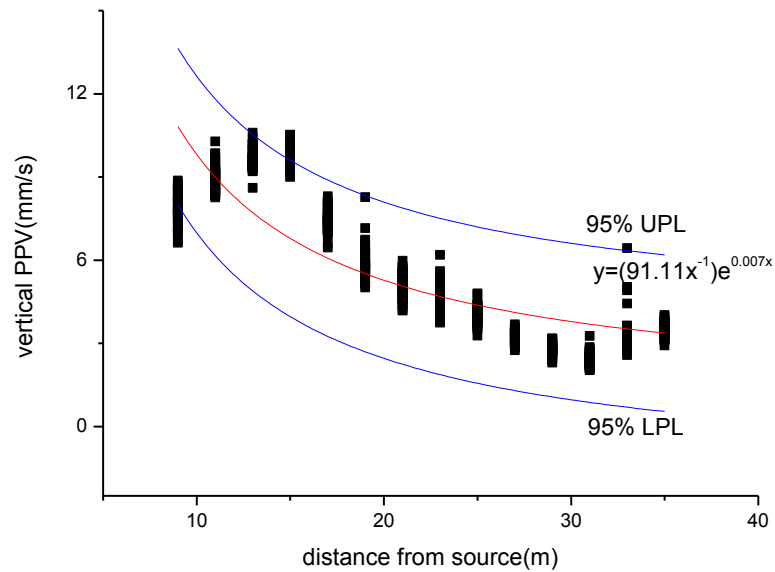




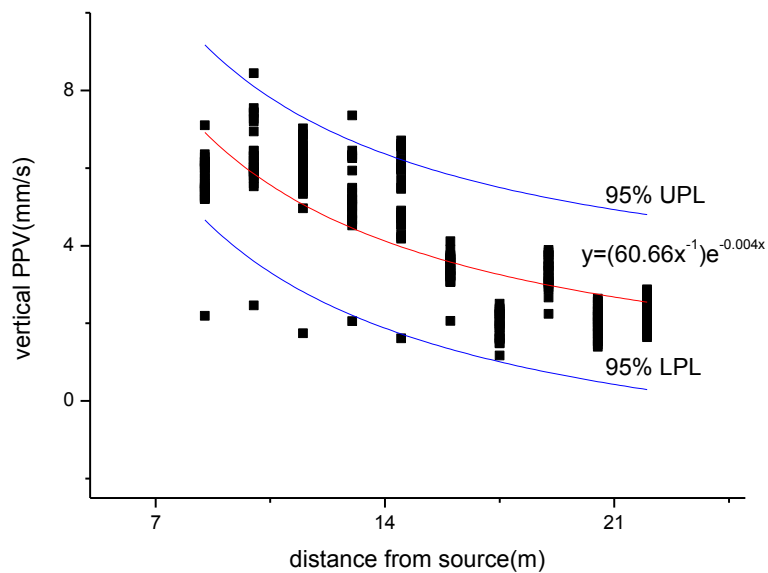
รูปที่ ๑ - 19 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 21.00 เมตร ถึง 22.00 เมตร(โครงการที่7)



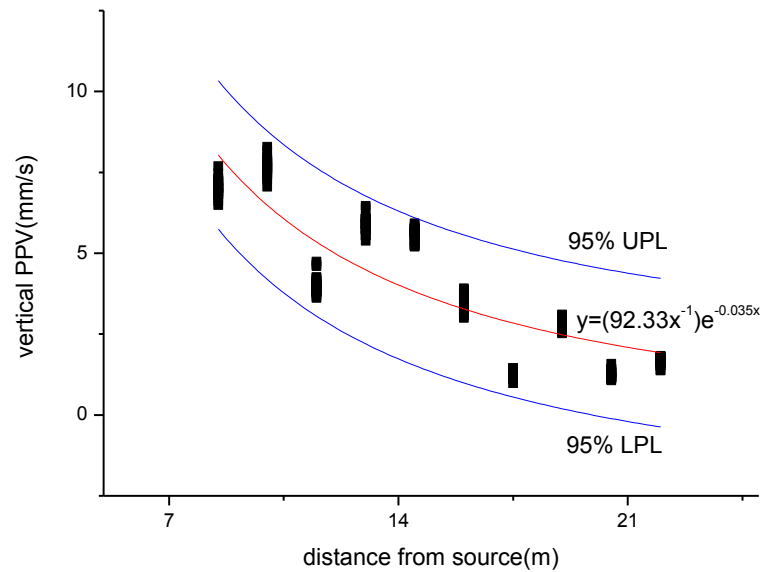
รูปที่ ๑ - 20 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 23.00 เมตร ถึง 24.00 เมตร(โครงการที่7)



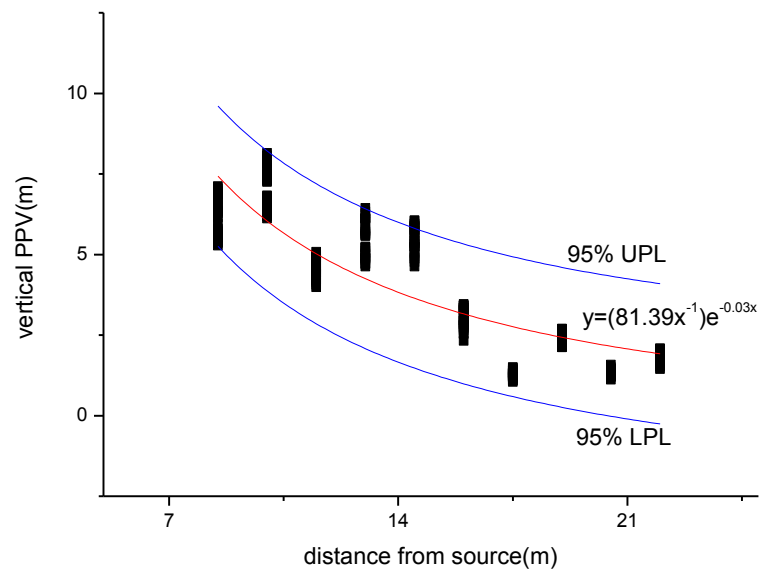
รูปที่ ๑๒ - 21 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง ความลึก 25.00 เมตร ถึง 26.00 เมตร(โครงการที่7)



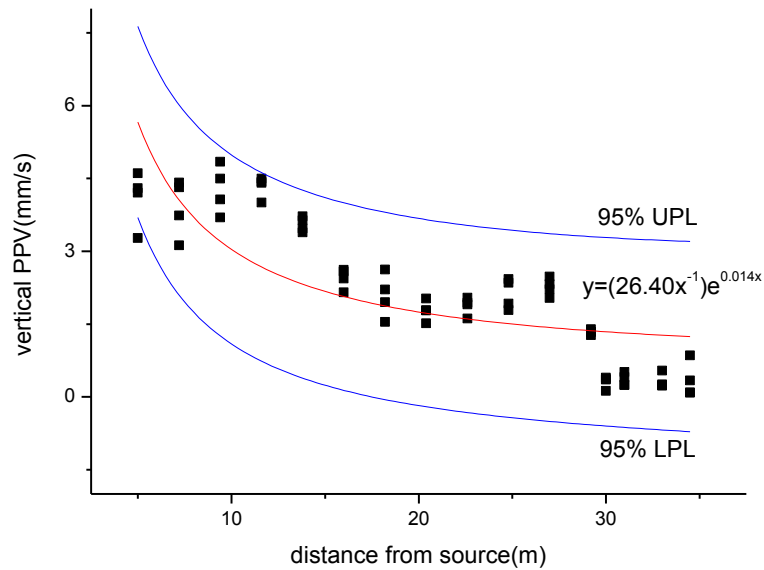
รูปที่ ๑๒ - 22 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง ความลึก 16.00 เมตร ถึง 17.00 เมตร(โครงการที่8)



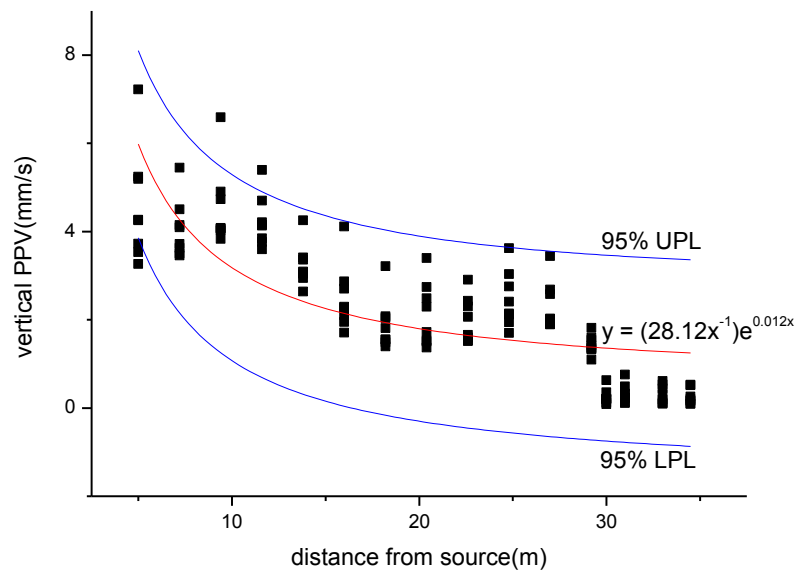
รูปที่ ๑ - 23 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 18.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร(โครงการที่8)



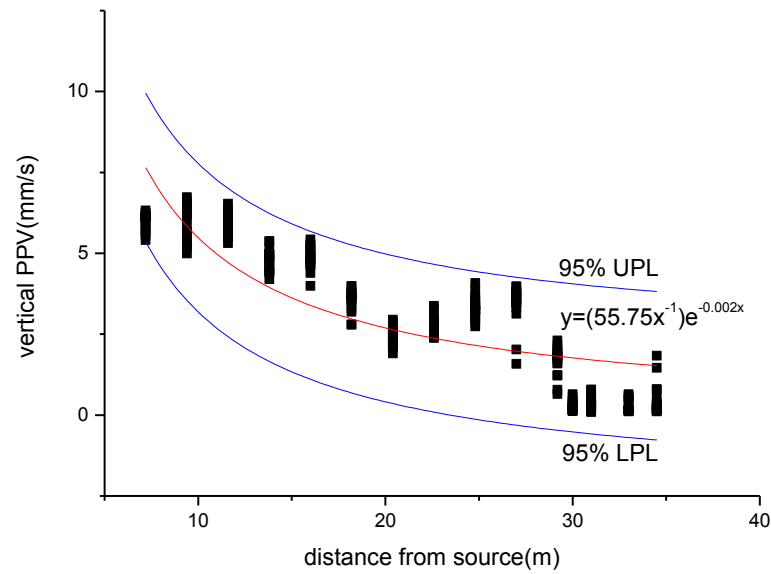
รูปที่ ๑ - 24 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 20.00 เมตร ถึง 21.25 เมตร(โครงการที่8)



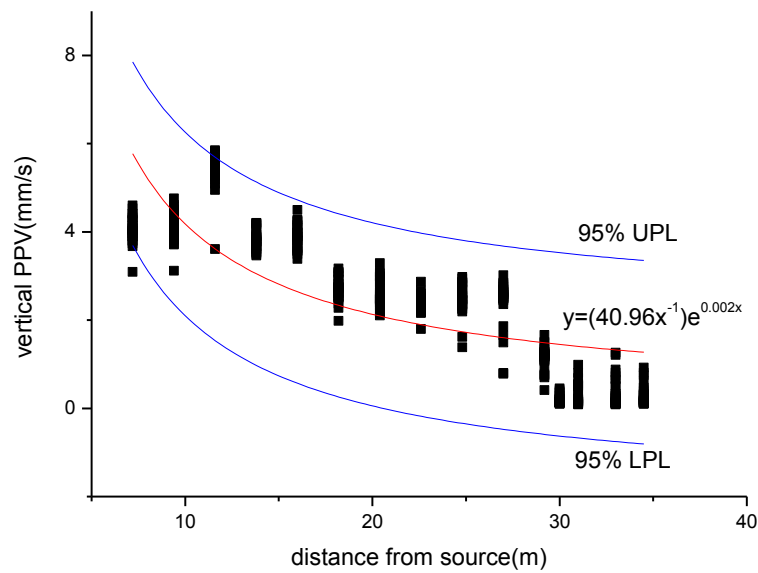
รูปที่ ๑๕ - 25 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.50 เมตร (P1) (โครงการที่ 9)



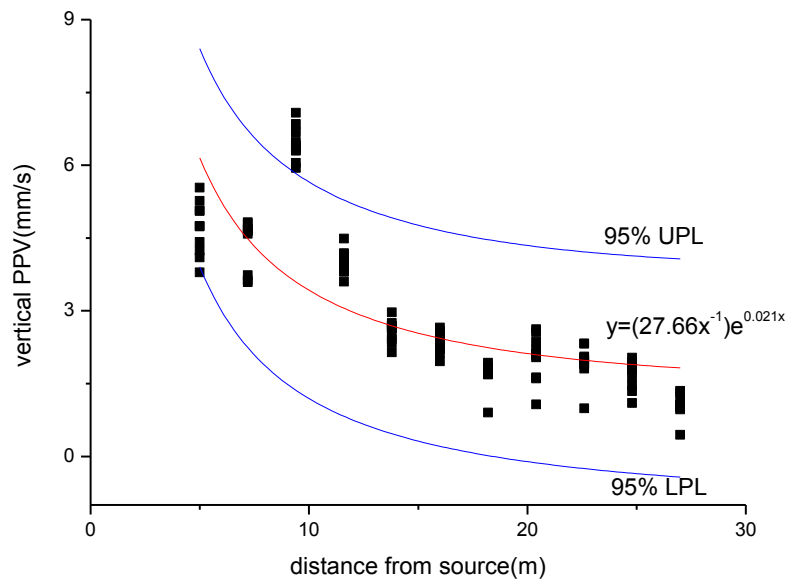
รูปที่ ๑๖ - 26 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 14.00 เมตร ถึง 15.00 เมตร (P1) (โครงการที่ 9)



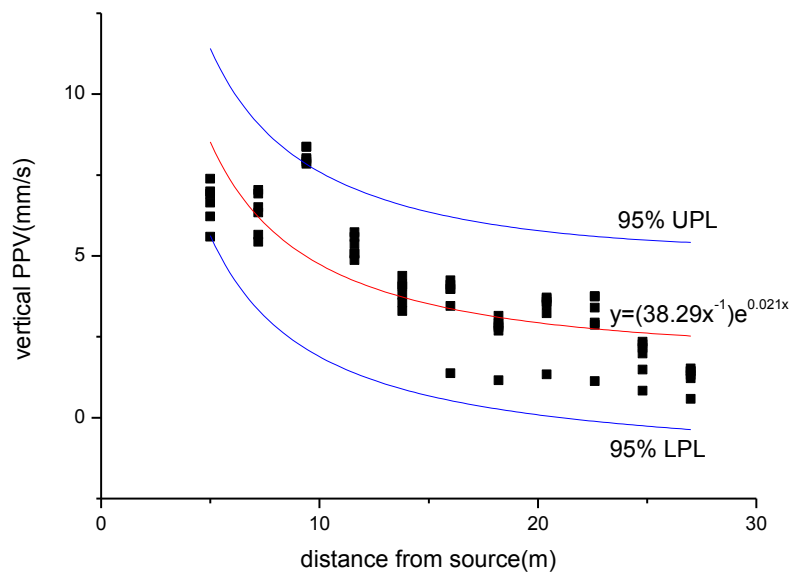
รูปที่ ๑ - 27 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 16.00 เมตร ถึง 18.00 เมตร (P1) (โครงการที่ 9)



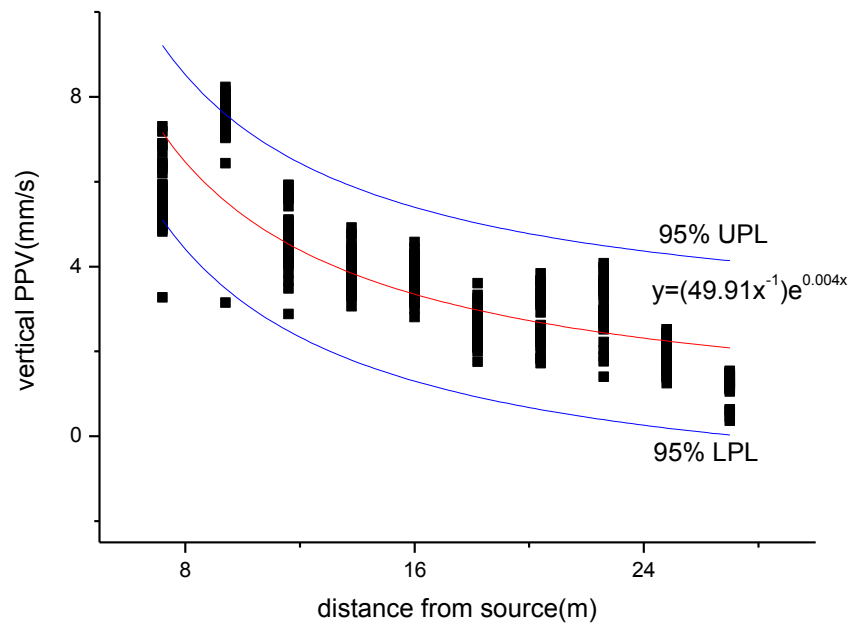
รูปที่ ๑ - 28 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 18.50 เมตร ถึง 20.50 เมตร (P1) (โครงการที่ 9)



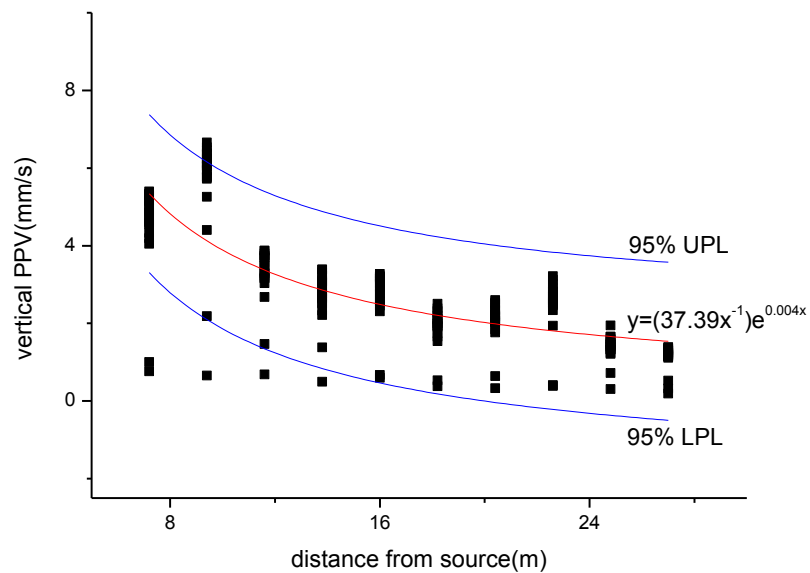
รูปที่ ๒๙ - ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 12.00 เมตร ถึง 13.50 เมตร (P2) (โครงการที่ 9)



รูปที่ ๓๐ - ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 14.00 เมตร ถึง 15.00 เมตร (P2) (โครงการที่ 9)



รูปที่ ๓ - 31 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 16.50 เมตร ถึง 18.00 เมตร(P2) (โครงการที่9)

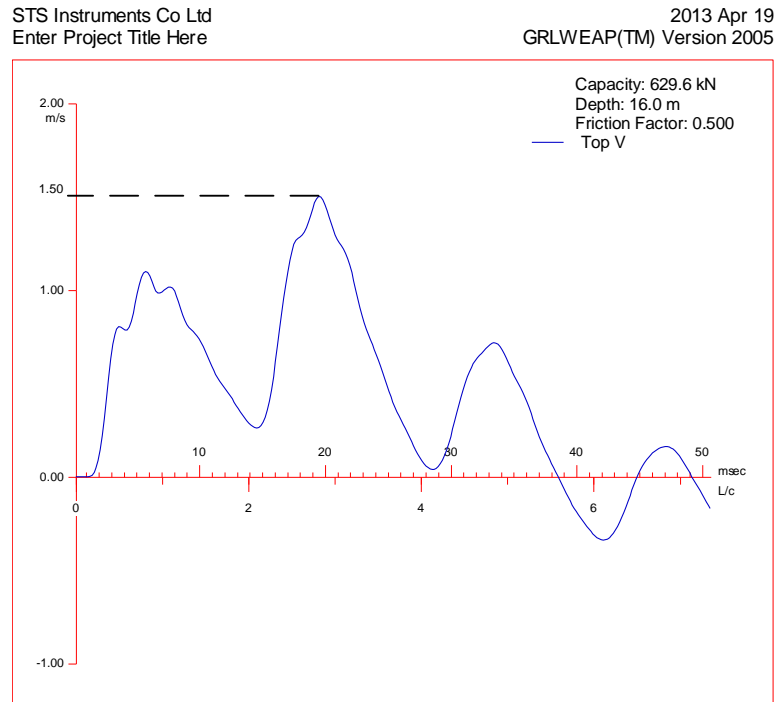


รูปที่ ๓ - 32 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแนวตั้งกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดของข้อมูลในช่วง  
ความลึก 18.50 เมตร ถึง 20.50 เมตร(P2) (โครงการที่9)

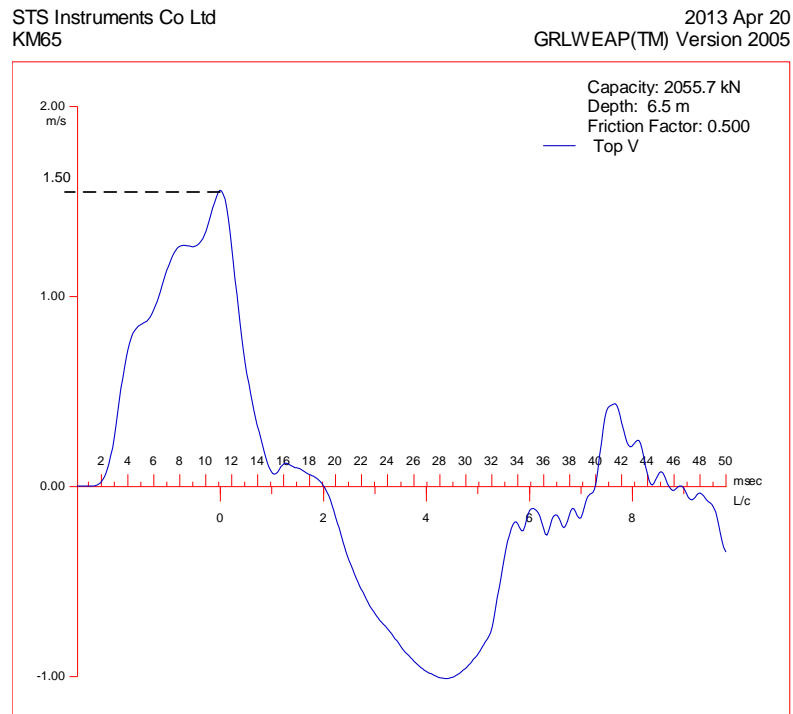
ภาคผนวก ช

ยืนยันความถูกต้องของความเร็วเสาเข็มจากการคาดการณ์ของGRLWEAP ด้วย  
ความเร็วเสาเข็มจากการตรวจวัด PDA





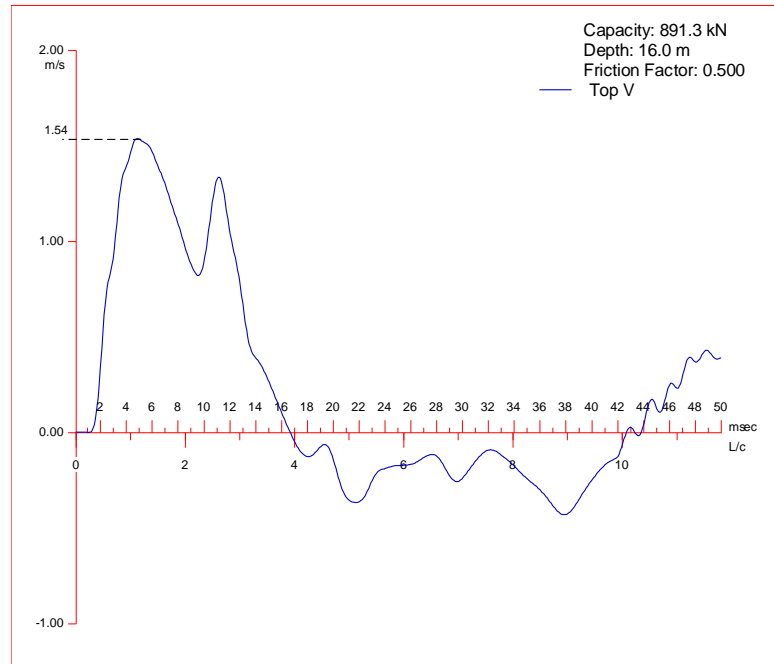
รูปที่ ข - 1 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก 16 เมตร(โครงการที่ 1)



รูปที่ ข - 2 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก 6.50 เมตร(โครงการที่ 2)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

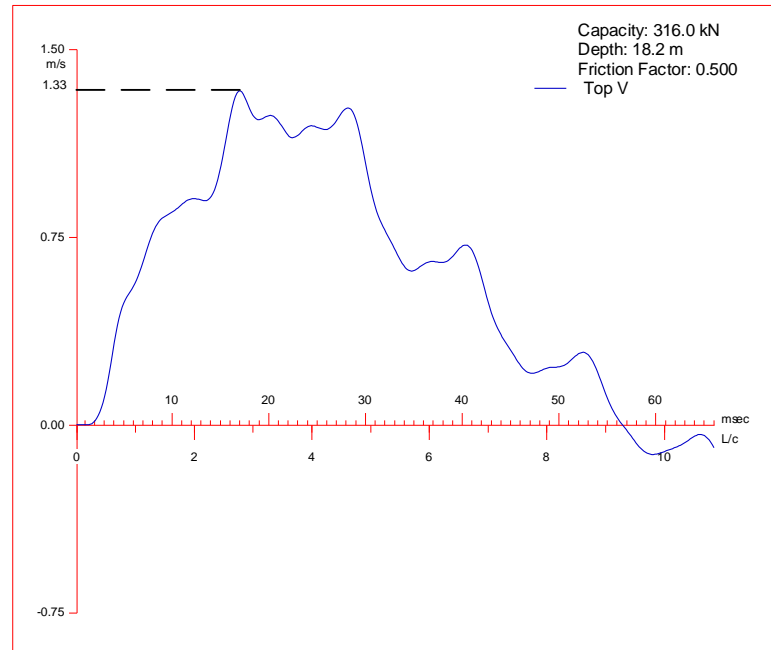
2013 Apr 20  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ช - 3 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก  
16.00 เมตร(โครงการที่3)

STS Instruments Co Ltd  
Km20\_TP3

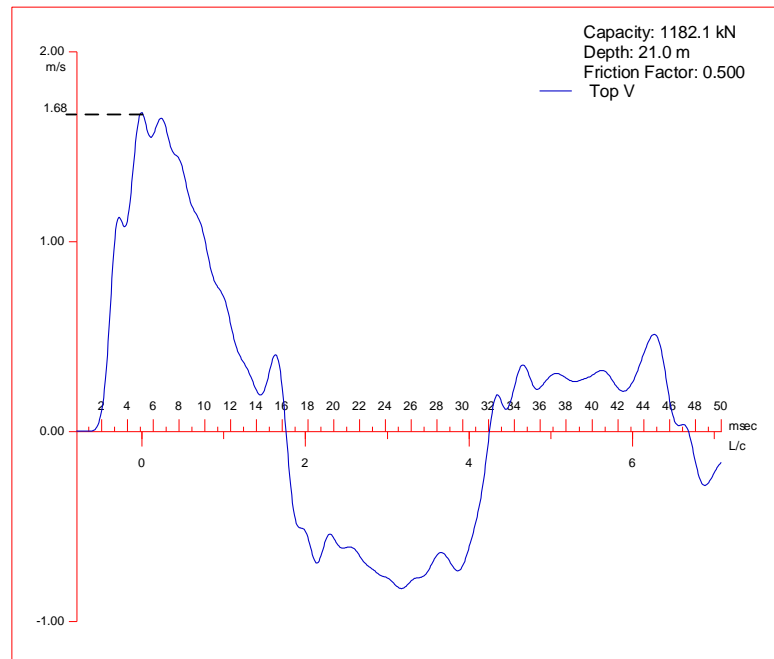
2013 Apr 21  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ช - 4 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก  
18.20 เมตร(โครงการที่ 5)

STS Instruments Co Ltd  
KPI\_I35

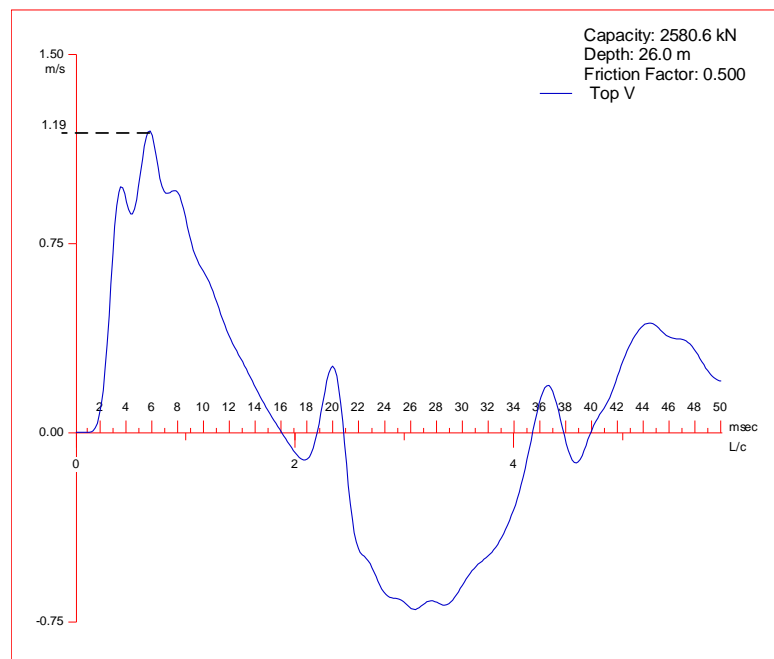
2013 Apr 21  
GRLWEAP(TM) Version 2005



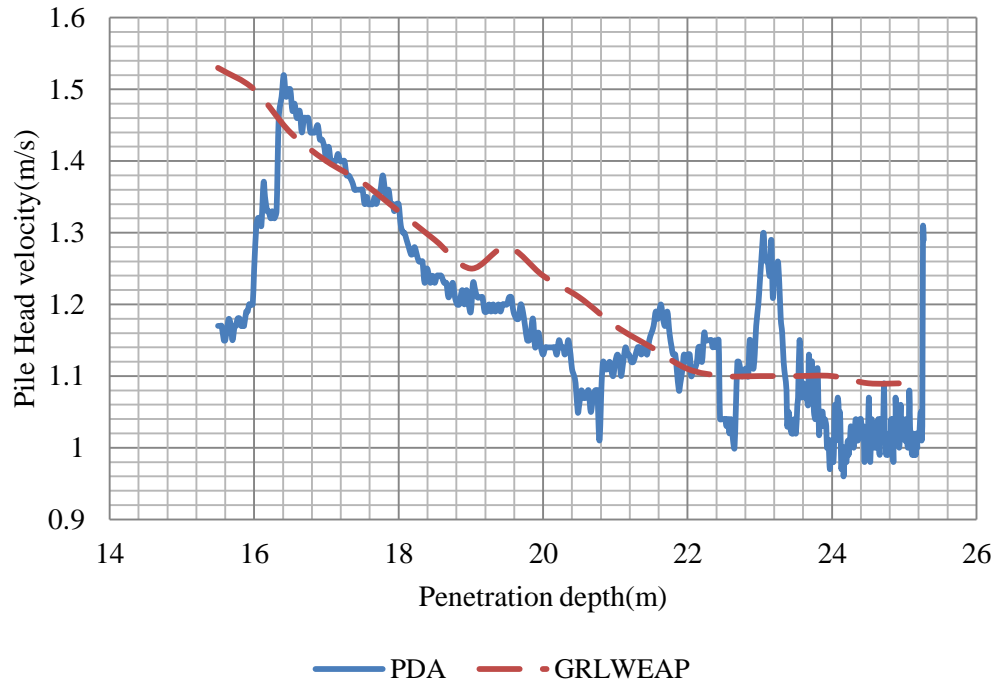
รูปที่ ช - 5 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก  
21.00 เมตร(โครงการที่ 6)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

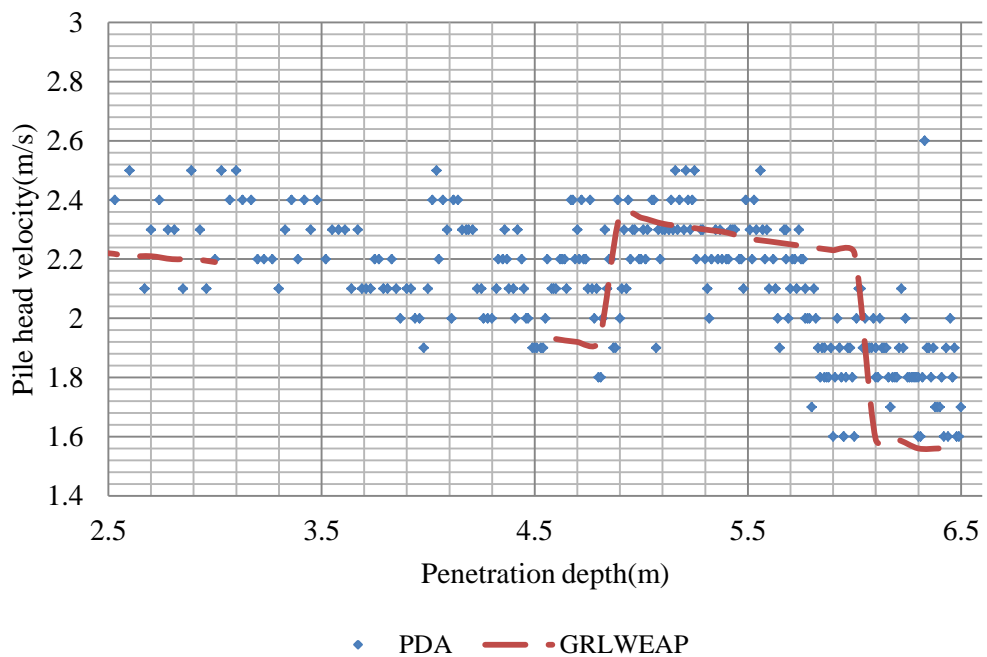
2013 Apr 22  
GRLWEAP(TM) Version 2005



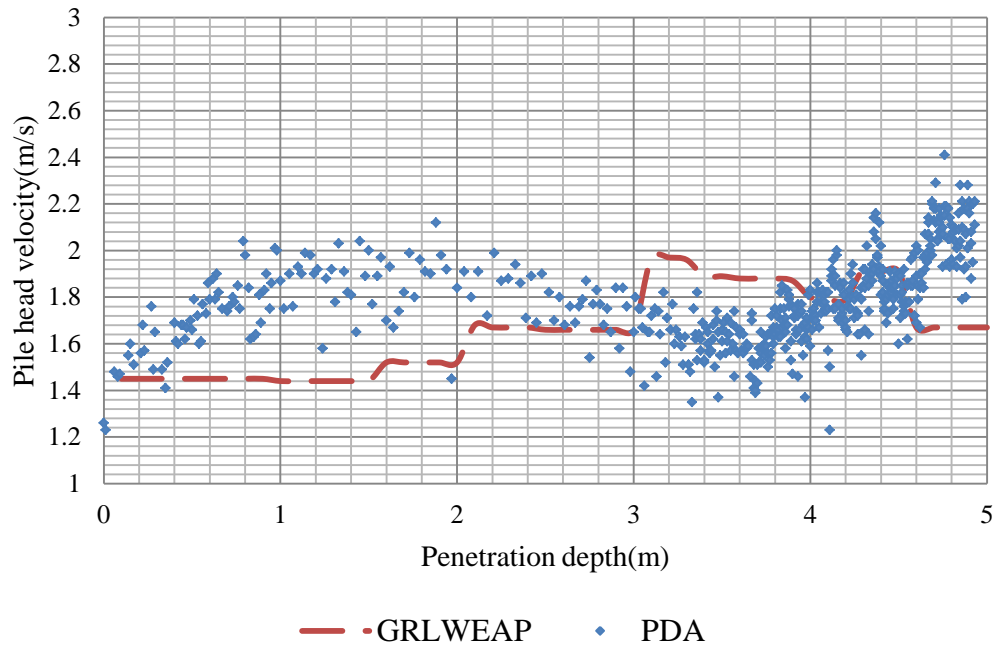
รูปที่ ช - 6 ความเร็วที่หัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมGRLWEAP ที่ระดับความลึกการตอก  
26.00 เมตร(โครงการที่7)



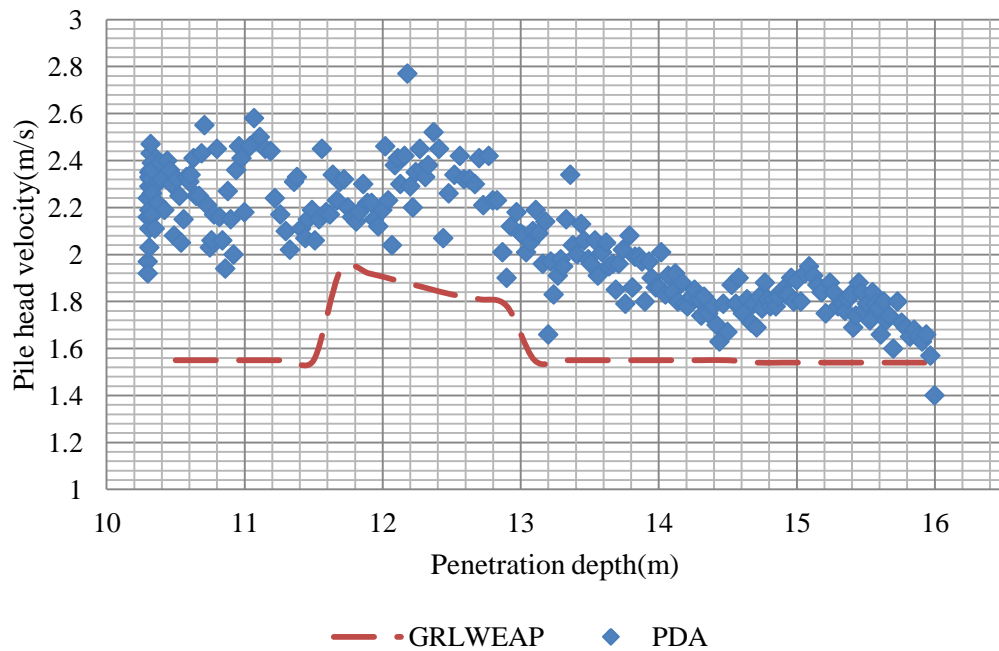
รูปที่ ๗ - 7 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอก(โครงการที่ 1)



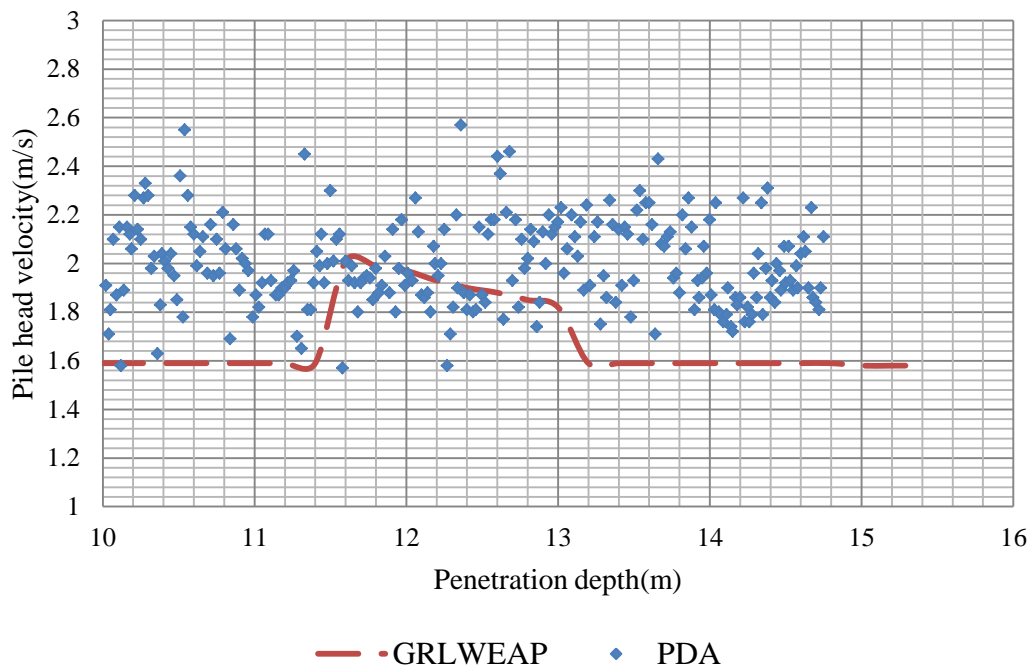
รูปที่ ๘ - 8 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 1 (โครงการที่ 2)



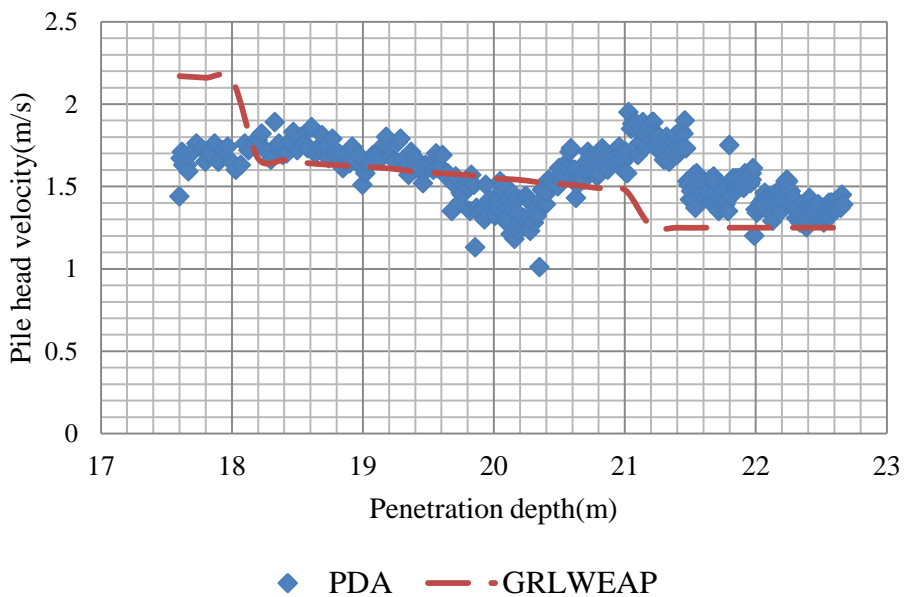
รูปที่ ๙ - 9 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 2 (โครงการที่ 2)



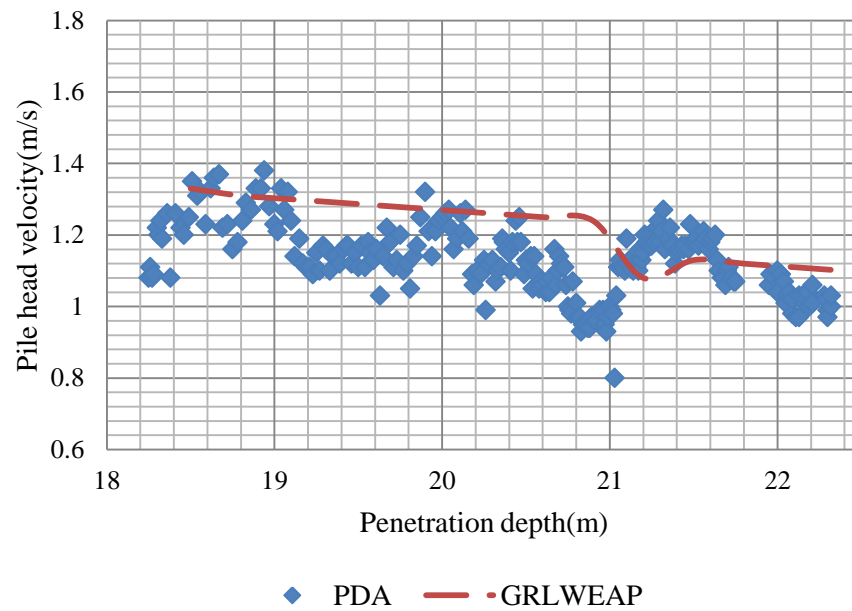
รูปที่ ๑๐ - 10 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 1 (โครงการที่ 3)



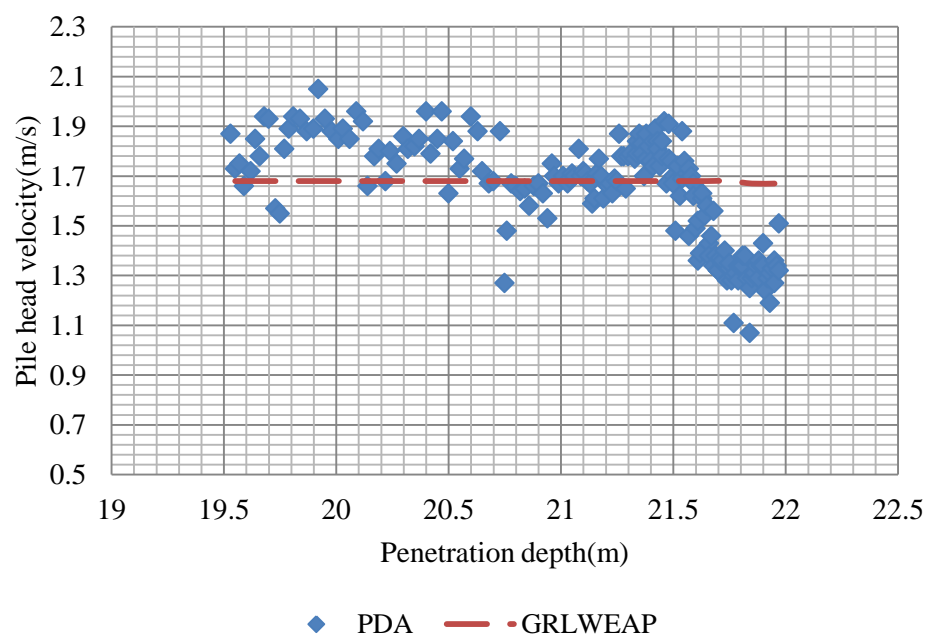
รูปที่ ข - 11 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 2 (โครงการที่ 3)



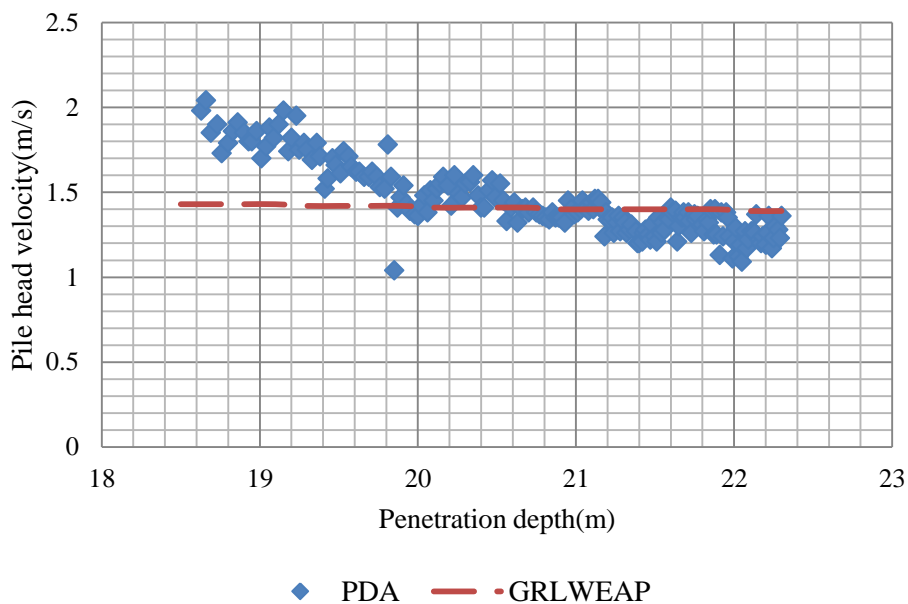
รูปที่ ข - 12 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 1 (โครงการที่ 5)



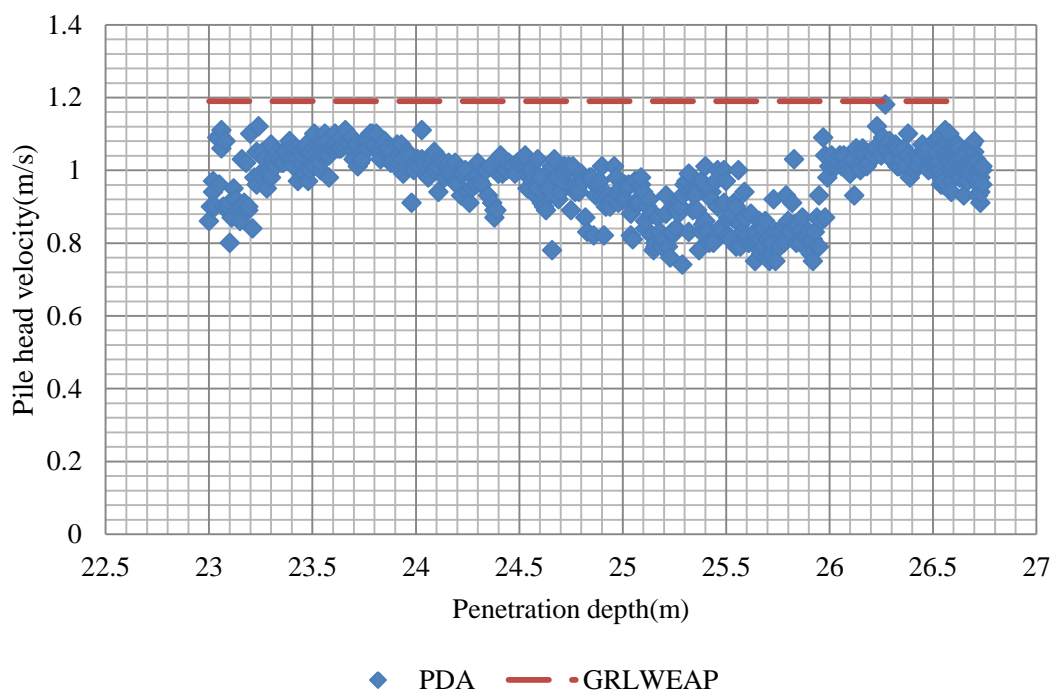
รูปที่ ข - 13 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 2 (โครงการที่ 5)



รูปที่ ข - 14 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 1 (โครงการที่ 6)



รูปที่ ๑๕ - 15 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอกเสาเข็มต้นที่ 2 (โครงการที่ 6)



รูปที่ ๑๖ - 16 ความเร็วหัวเสาเข็มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP เทียบกับ PDA ที่แต่ละความลึกการตอก (โครงการที่ 7)

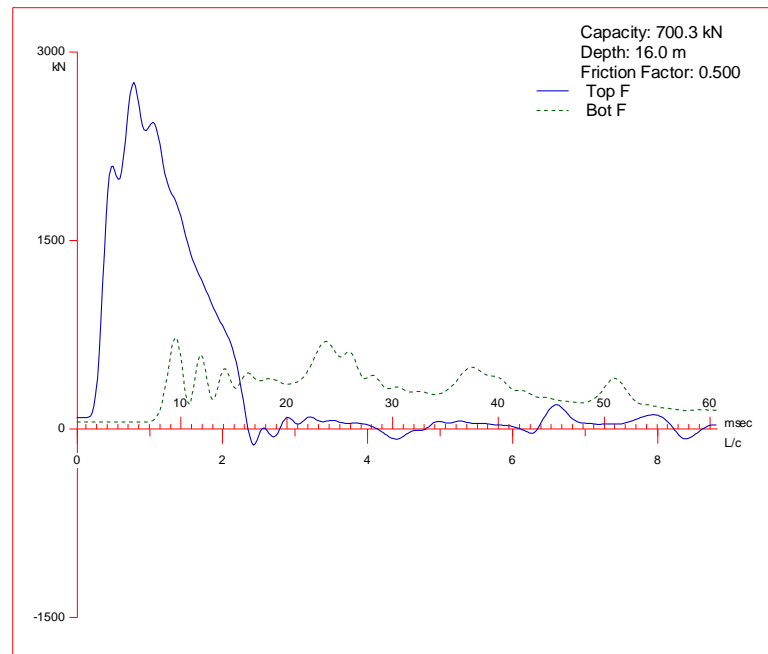


ภาคผนวก ซ

วิเคราะห์แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตด้วยโปรแกรม GRLWEAP

STS Instruments Co Ltd  
Scott\_factory

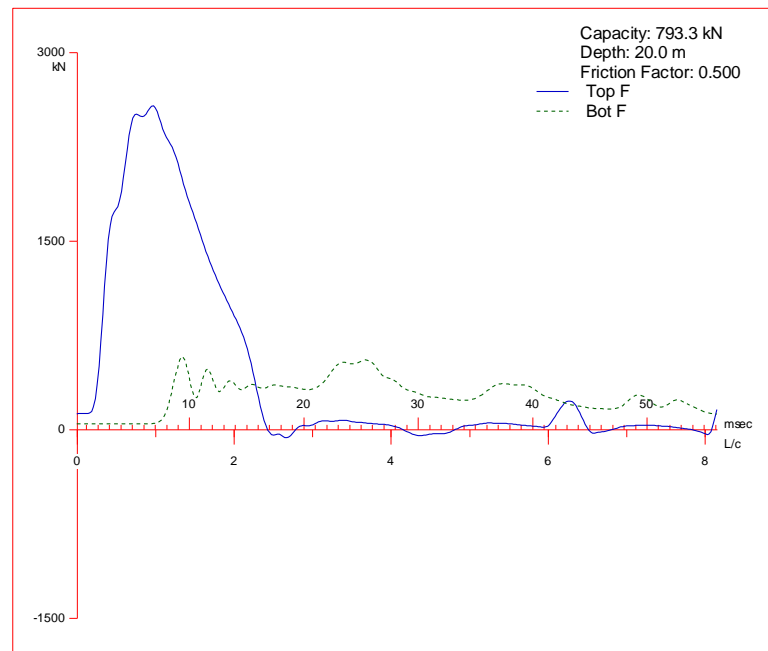
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ซ - 1 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 16.00 เมตร(โครงการที่ 1)

STS Instruments Co Ltd  
scott

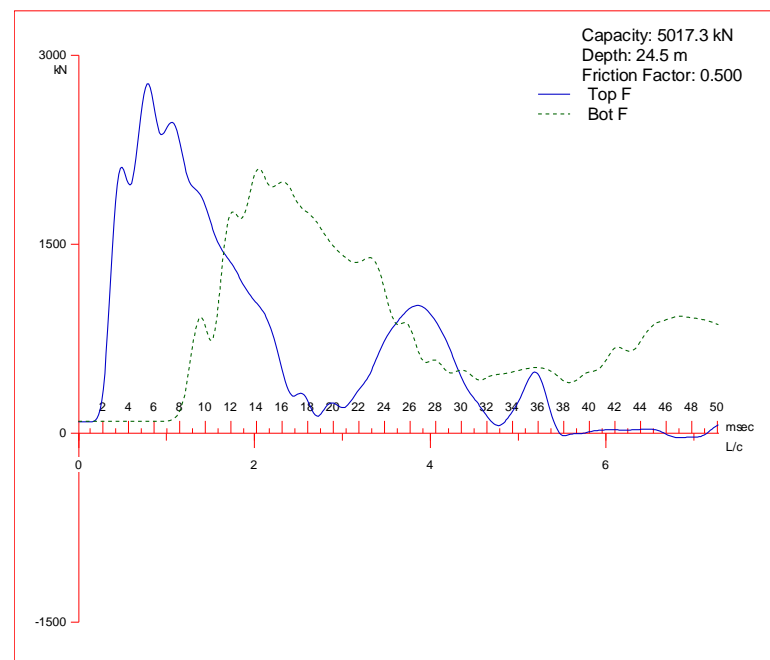
2013 May 01  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ซ - 2 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 20.00 เมตร(โครงการที่ 1)

STS Instruments Co Ltd  
Scott\_factory

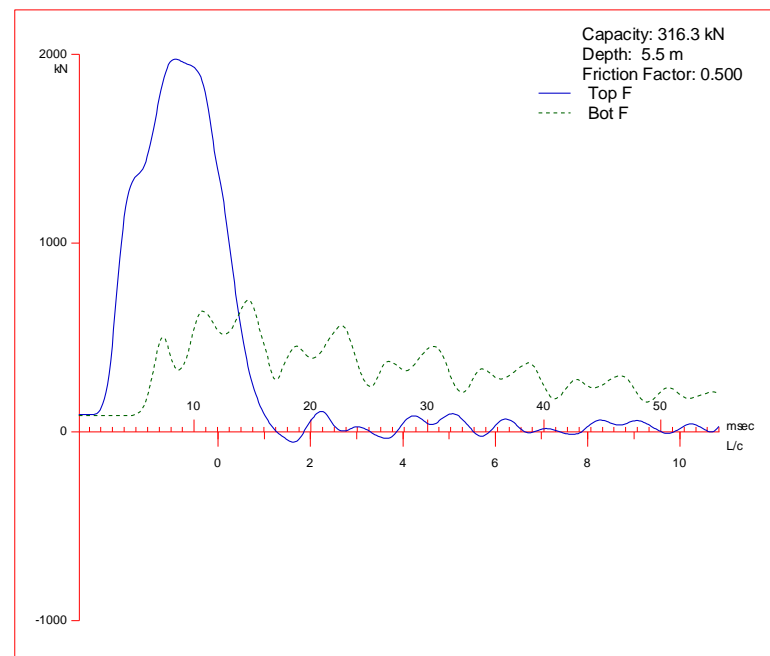
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๓ - 3 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 24.50 เมตร(โครงการที่ 1)

STS Instruments Co Ltd  
KM65

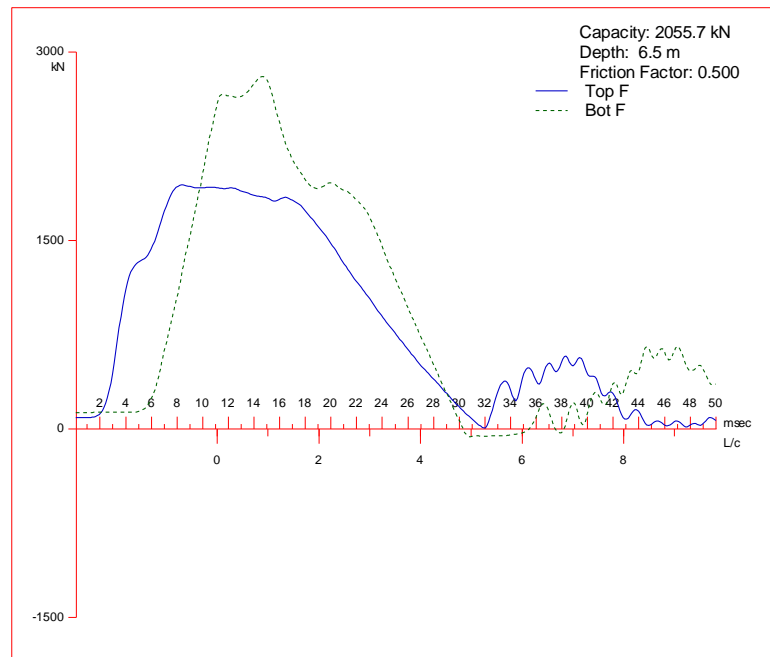
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๔ - 4 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 5.50 เมตร(โครงการที่ 2)

STS Instruments Co Ltd  
KM65

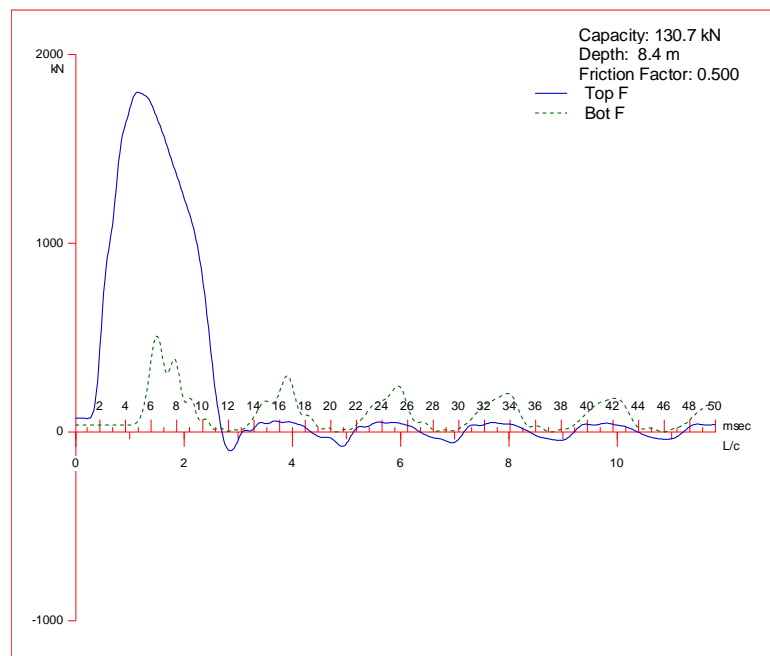
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๕ - 5 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 6.50 เมตร(โครงการที่ 2)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

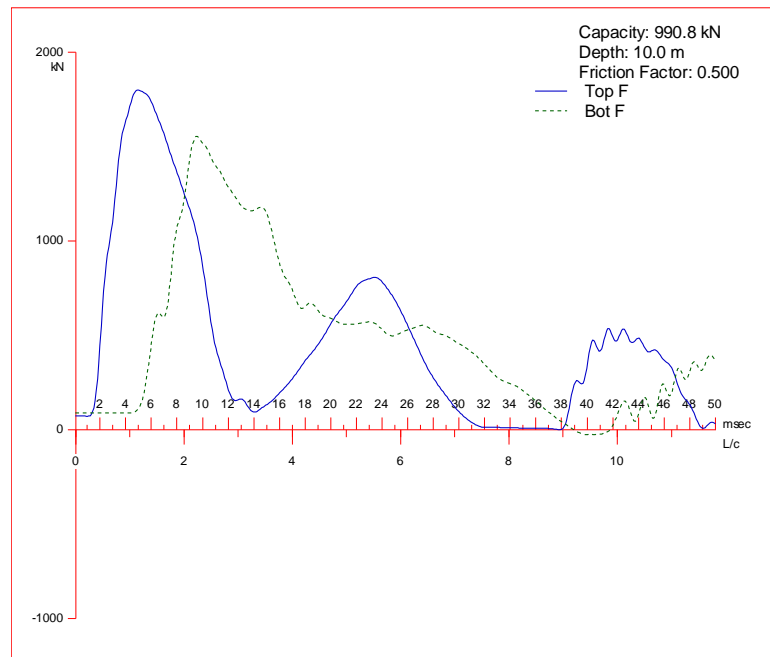
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๖ - 6 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 8.40 เมตร(โครงการที่ 3)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

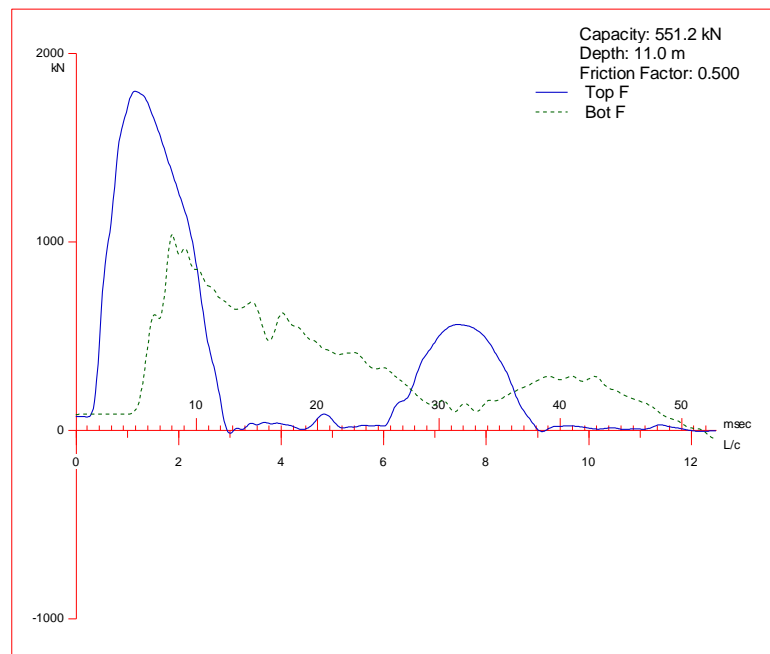
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 7 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 10.00 เมตร(โครงการที่ 3)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

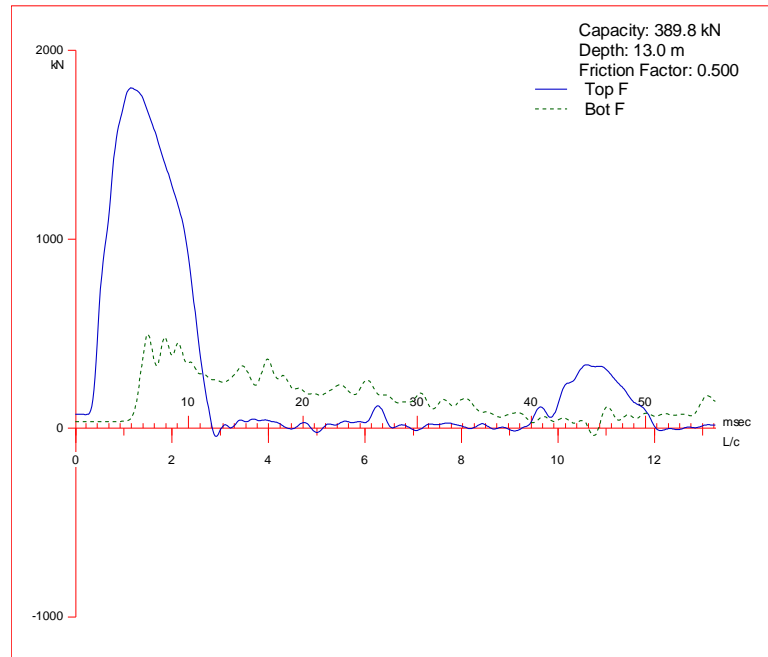
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 8 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 11.00 เมตร(โครงการที่ 3)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

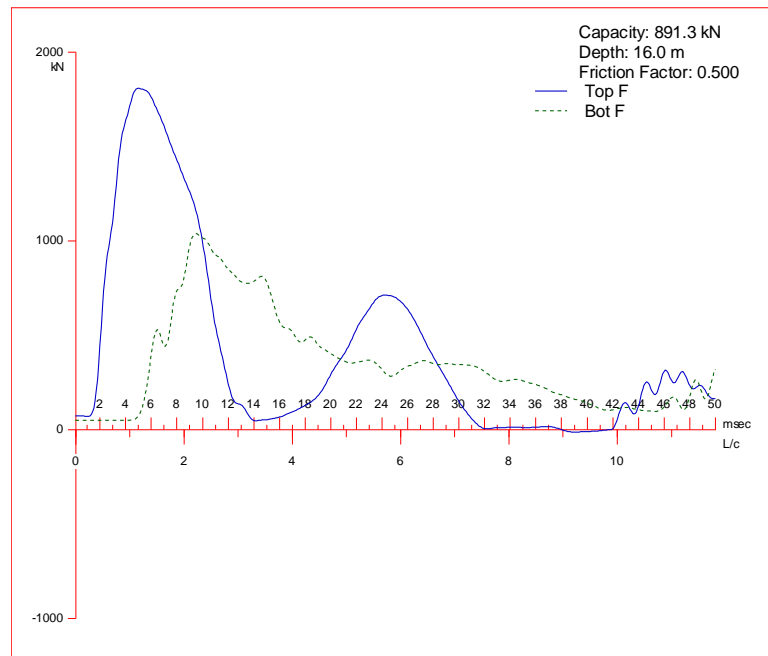
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ซ - 9 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์หัตถ์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 13.00 เมตร(โครงการที่ 3)

STS Instruments Co Ltd  
Idol\_P1

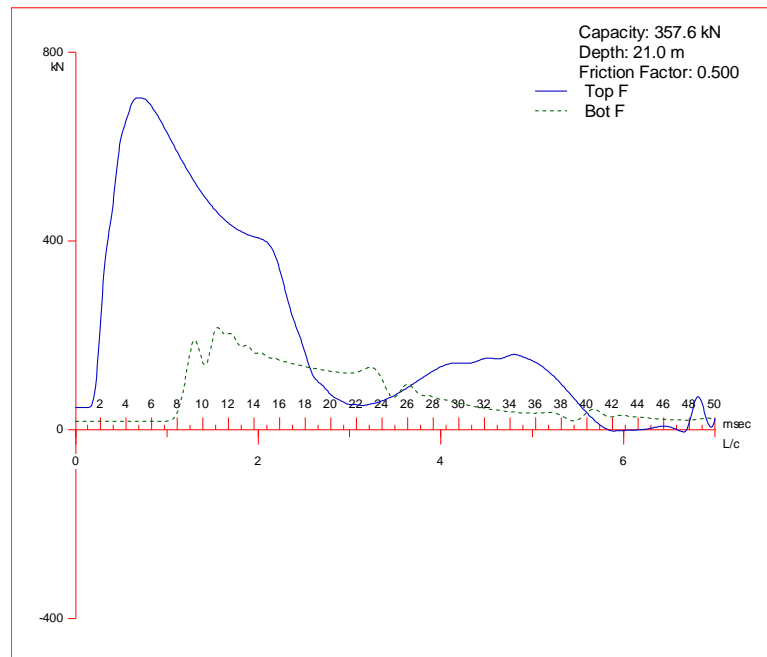
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ซ - 10 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์หัตถ์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 16.00 เมตร(โครงการที่ 3)

STS Instruments Co Ltd  
Bangna

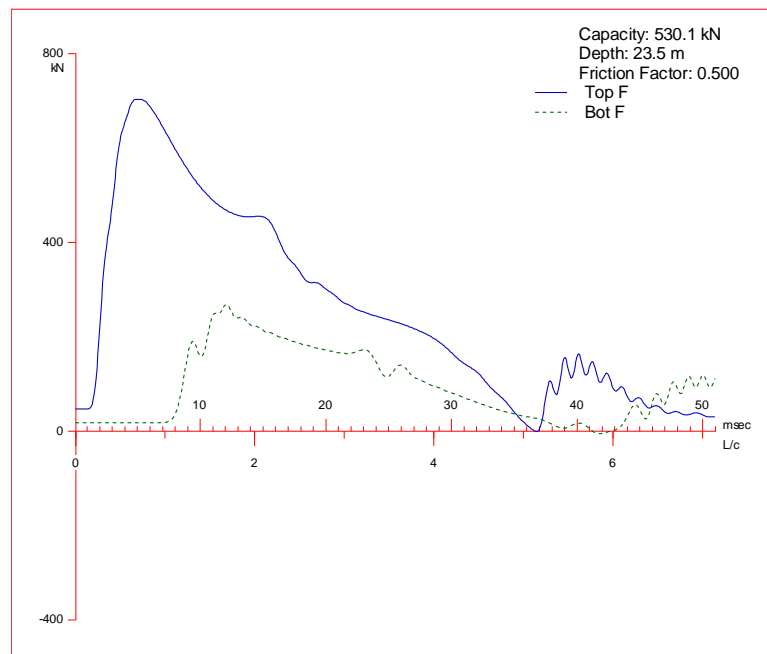
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 11 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 21.00 เมตร(โครงการที่ 4)

STS Instruments Co Ltd  
Bangna

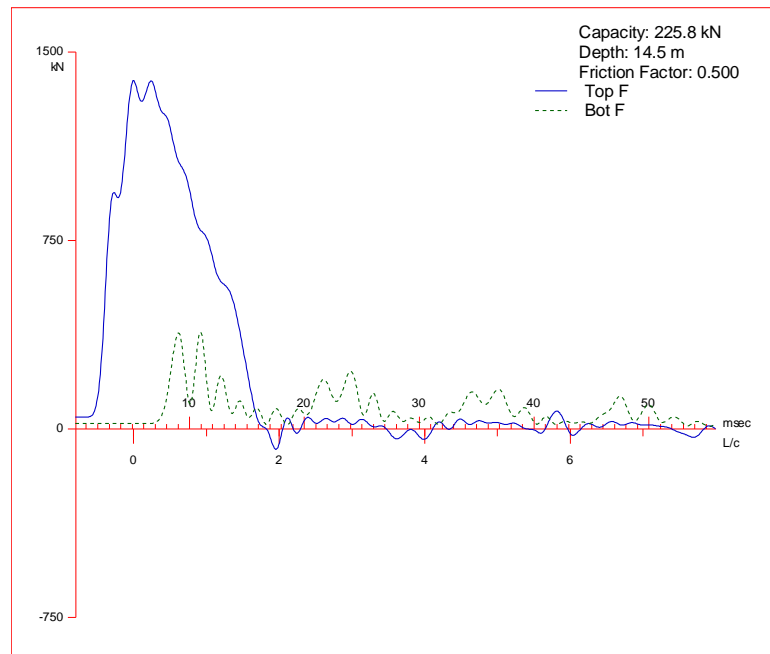
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 12 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 23.50 เมตร(โครงการที่ 4)

STS Instruments Co Ltd  
KPI\_I35

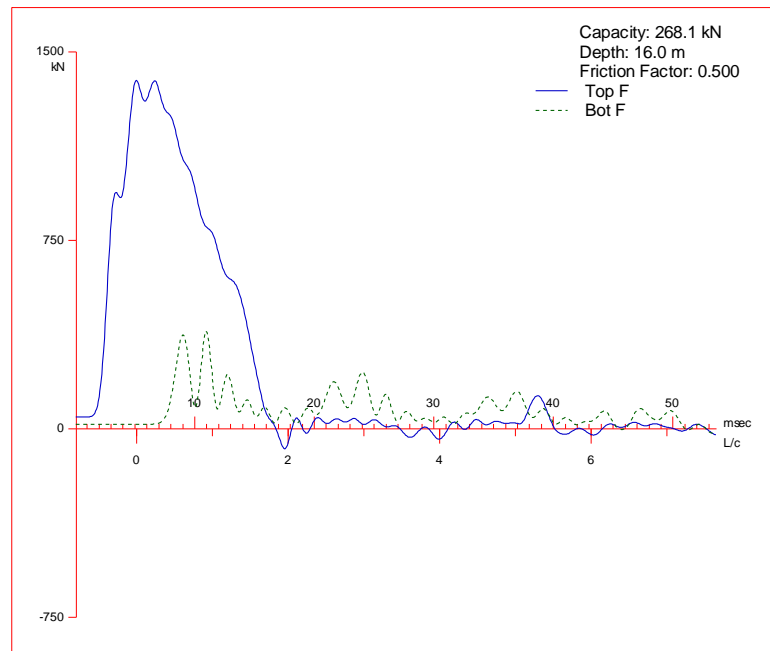
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 13 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 14.50 เมตร(โครงการที่ 6)

STS Instruments Co Ltd  
KPI\_I35

2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005

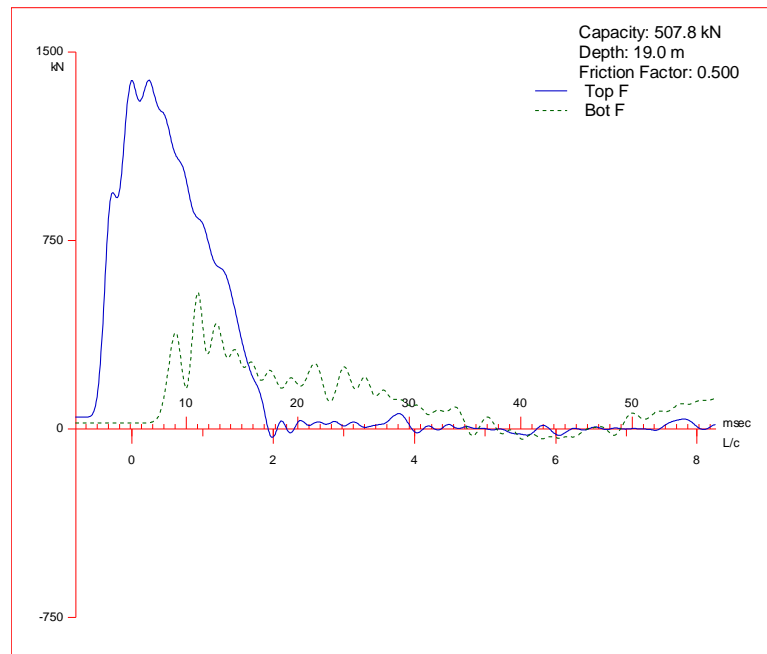


รูปที่ ๗ - 14 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 16.00 เมตร(โครงการที่ 6)



STS Instruments Co Ltd  
KPI\_I35

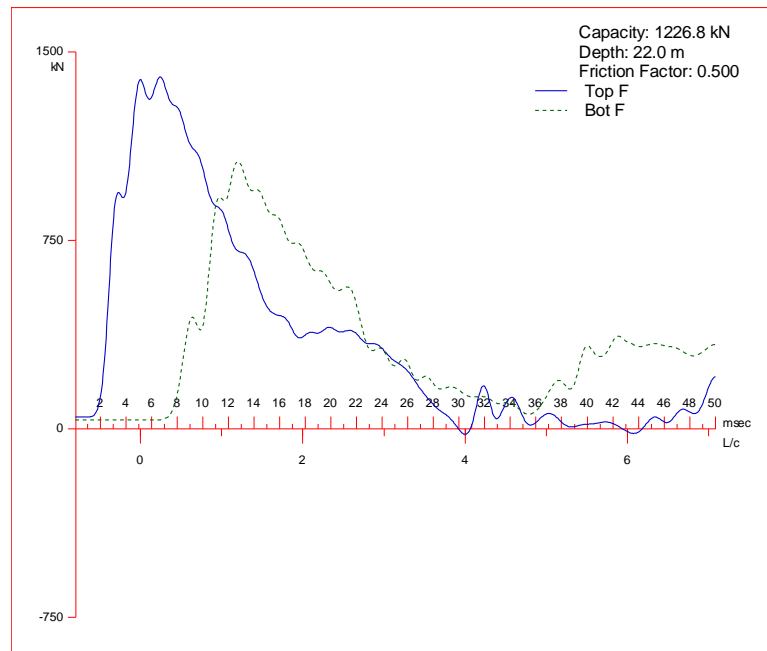
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๑๕ - 15 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 19.00 เมตร(โครงการที่ 6)

STS Instruments Co Ltd  
KPI\_I35

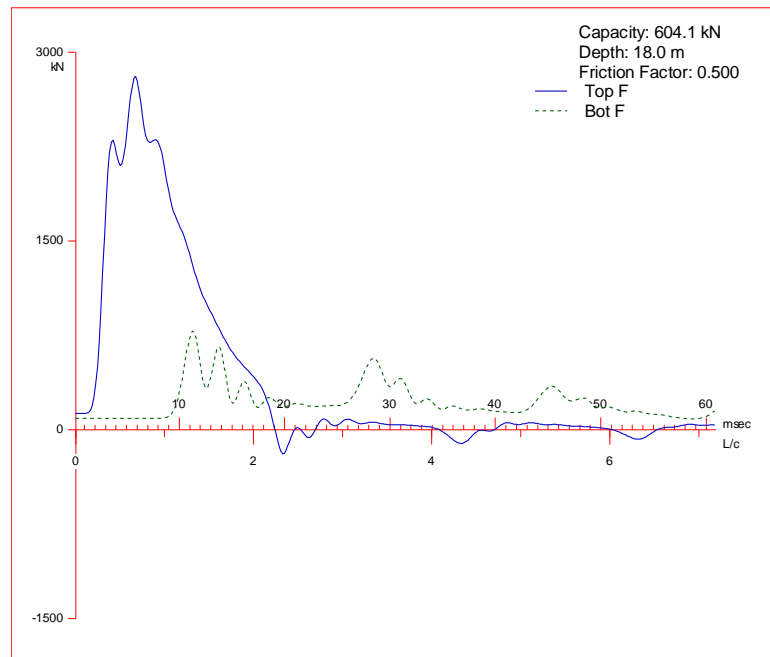
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๑๖ - 16 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 22.00 เมตร(โครงการที่ 6)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

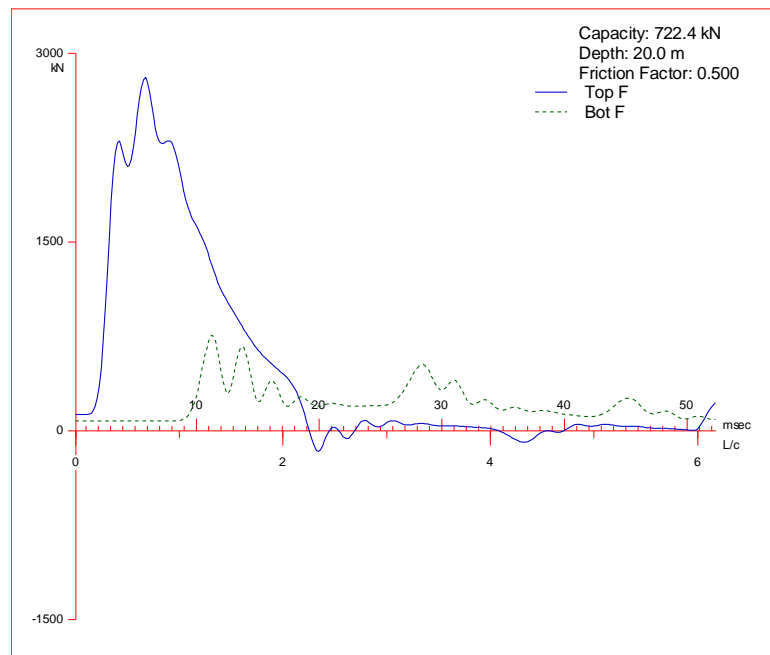
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 17 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 18.00 เมตร (โครงการที่ 7)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

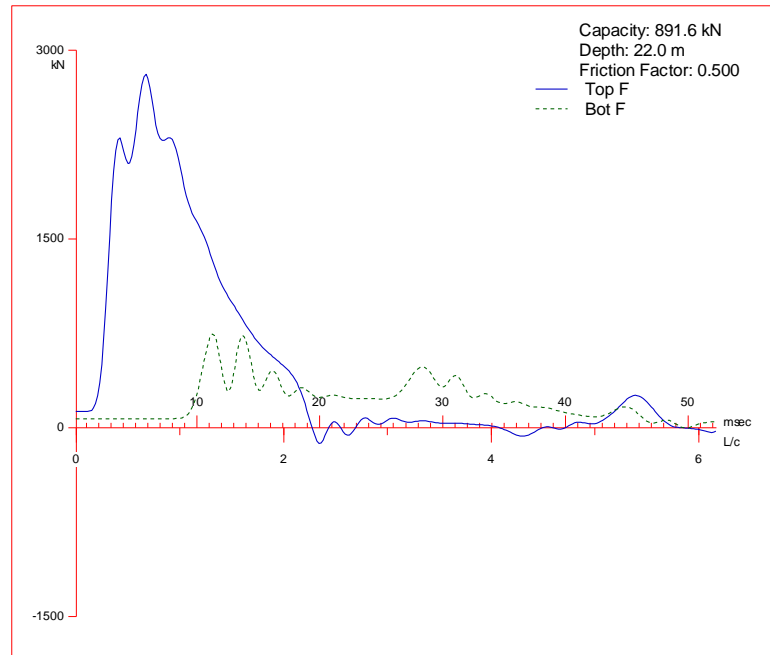
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 18 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 20.00 เมตร (โครงการที่ 7)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

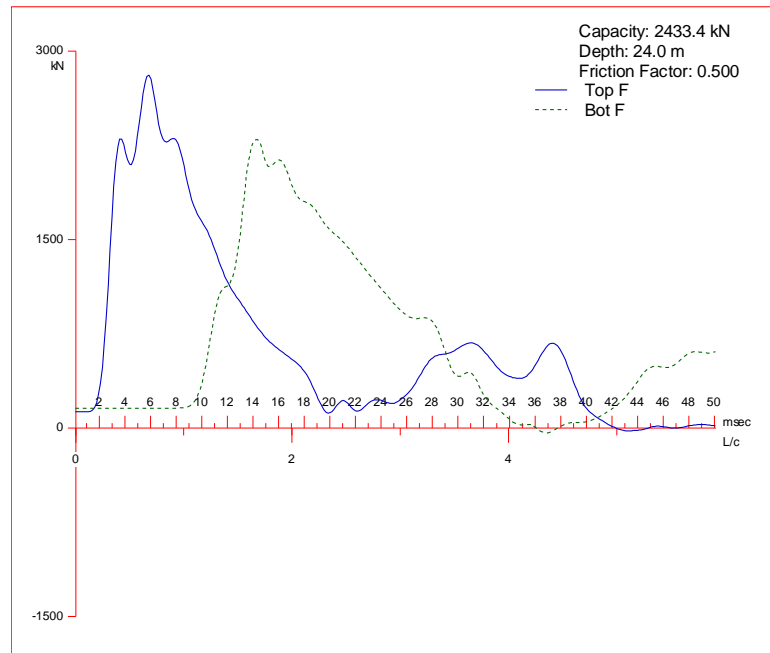
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 19 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 22.00 เมตร(โครงการที่ 7)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

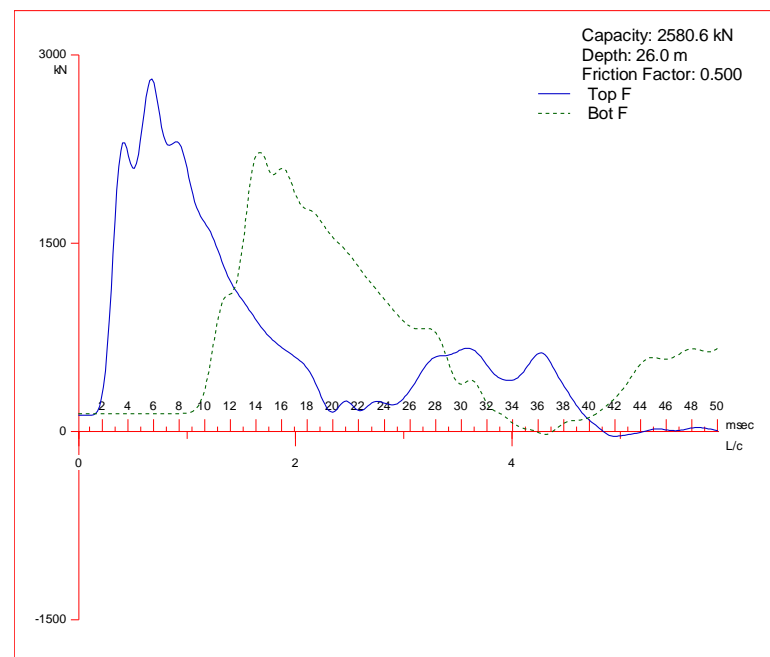
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 20 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 24.00 เมตร(โครงการที่ 7)

STS Instruments Co Ltd  
MRT\_K

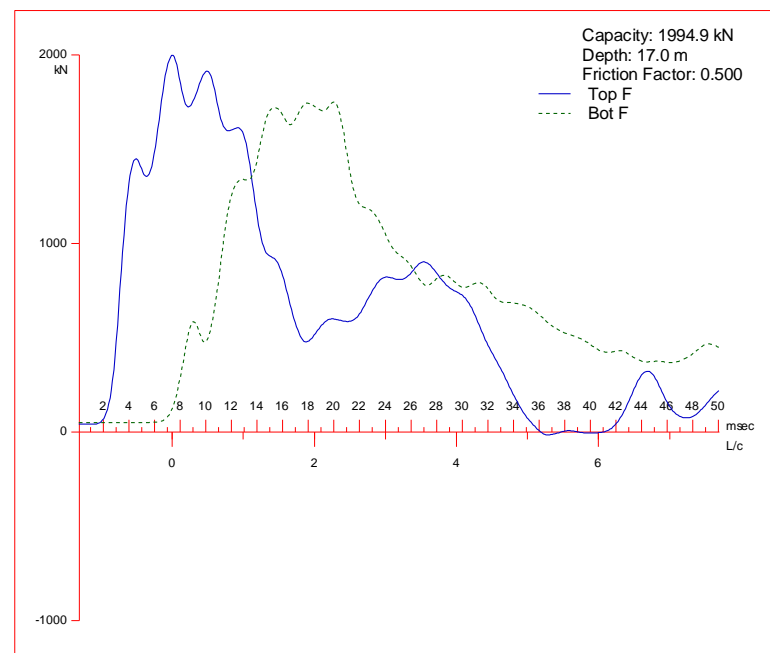
2013 Apr 06  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 21 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 26.00 เมตร (โครงการที่ 7)

STS Instruments Co Ltd  
Bangyai

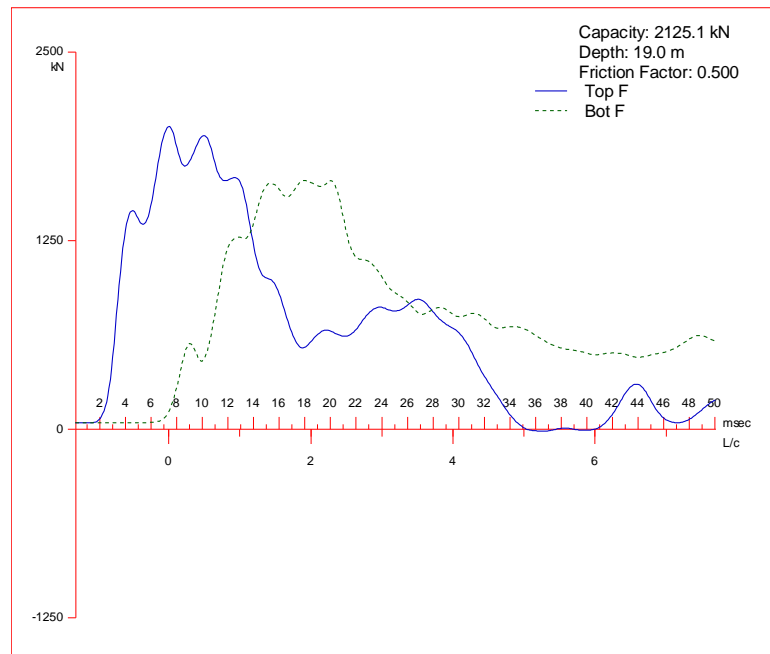
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 22 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 17.00 เมตร (โครงการที่ 8)

STS Instruments Co Ltd  
Bangyai

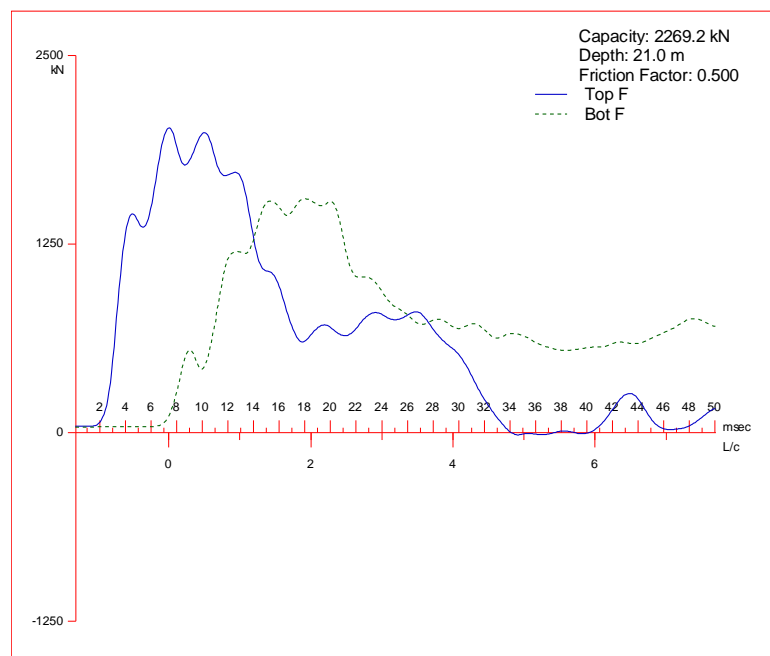
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 23 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 19.00 เมตร (โครงการที่ 8)

STS Instruments Co Ltd  
Bangyai

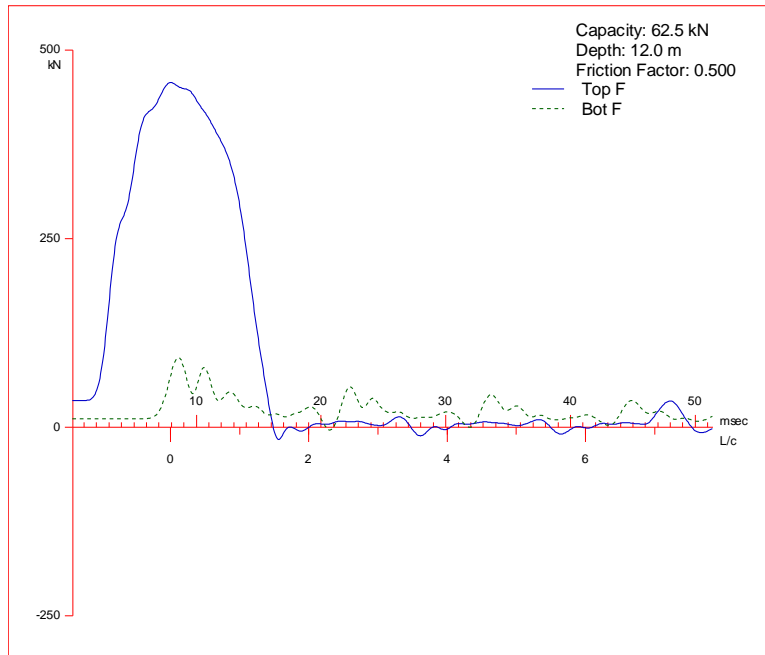
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๗ - 24 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 21.00 เมตร (โครงการที่ 8)

STS Instruments Co Ltd  
Praram5\_P1

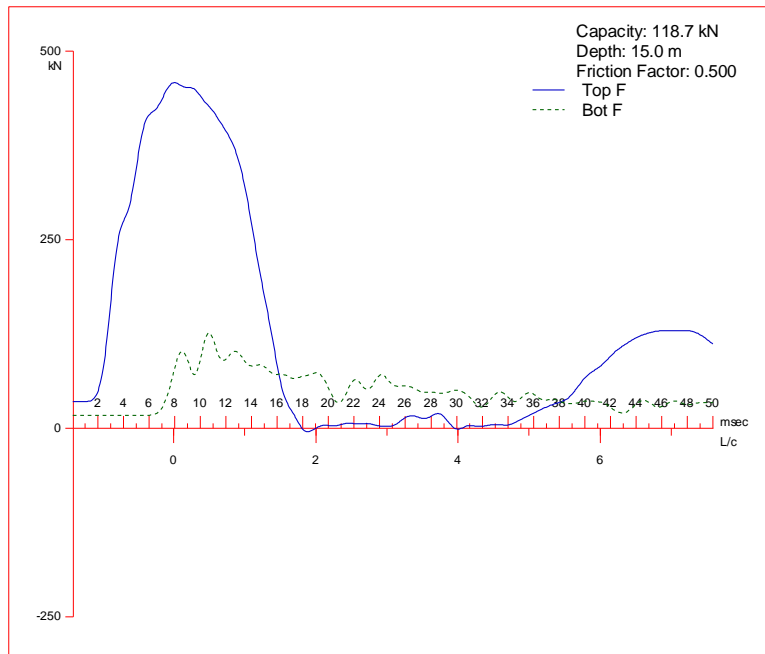
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๒๕ - 25 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 12.00 เมตร (โครงการที่ 9)

STS Instruments Co Ltd  
Praram5\_P1

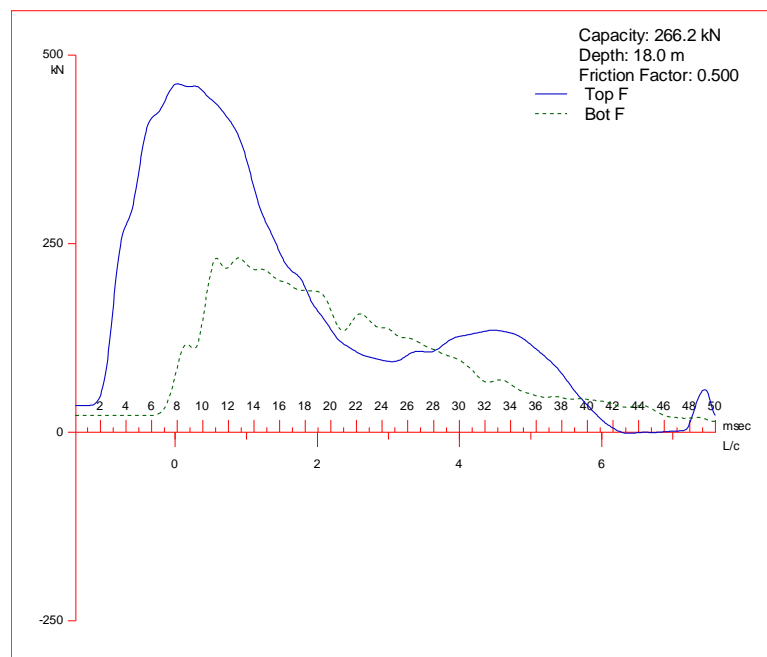
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๒๖ - 26 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 15.00 เมตร (โครงการที่ 9)

STS Instruments Co Ltd  
Praram5\_P1

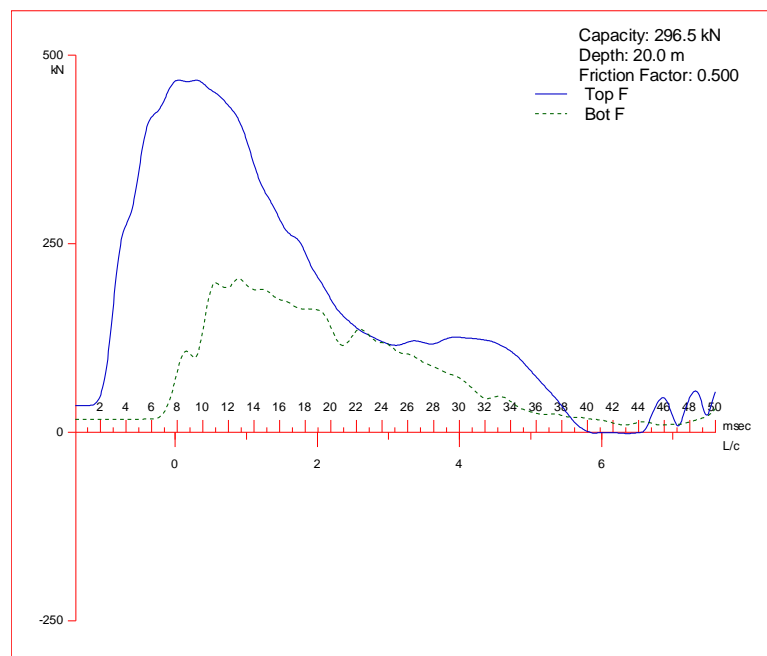
2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๒๗ - 27 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 18.00 เมตร (โครงการที่ 9)

STS Instruments Co Ltd  
Praram5\_P1

2013 Apr 24  
GRLWEAP(TM) Version 2005



รูปที่ ๒๘ - 28 แรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $F_{top}$ ) และแรงภายในเสาเข็มที่ตำแหน่งปลายเสาเข็ม ( $F_{bot}$ ) กับเวลาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่ระดับความลึก 20.00 เมตร (โครงการที่ 9)

ตาราง ข - 1 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP (โครงการที่ 1)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิว เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
16.00	2488.20	707.90
16.50	2488.80	741.70
17.00	2493.40	728.00
17.50	2497.50	720.60
18.00	2501.40	712.50
18.50	2505.10	703.50
19.00	2508.80	694.20
20.00	2528.00	575.80
20.50	2530.40	572.90
21.00	2533.00	570.00
21.50	2536.40	566.10
22.00	2540.00	562.30
22.50	2543.10	559.60
23.00	2546.60	557.00
24.50	2492.40	1659.00
25.00	2499.10	1644.10
25.20	2479.20	2144.80



ตาราง ซ - 2 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่ 2)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลายเสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
5.00	1644.10	686.20
5.10	1644.50	688.40
5.20	1644.70	690.60
5.30	1644.90	693.00
5.40	1644.90	695.40
5.50	1644.60	697.90
6.10	1217.70	2845.30
6.20	1218.10	2842.30
6.30	1194.40	2809.30
6.40	1194.80	2806.20
6.50	1195.20	2803.10

ตาราง ข - 3 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่3)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิว เสาเข็ม(กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม(กิโลนิวตัน)
7.40	1735.80	524.50
7.60	1739.20	521.00
7.80	1742.50	517.20
8.00	1746.00	513.20
8.20	1748.30	509.60
8.40	1750.70	506.00
9.00	1695.10	1567.00
9.20	1695.70	1562.70
9.40	1696.30	1558.00
9.60	1696.90	1554.60
9.80	1697.50	1553.00
10.00	1698.00	1552.00
10.20	1700.40	988.50
10.40	1700.80	1001.70
10.60	1701.10	1014.50
10.80	1701.40	1027.20
11.00	1701.70	1039.90
12.00	1744.20	518.50
12.20	1746.80	506.20
12.40	1749.20	501.30
12.60	1750.80	498.20
12.80	1751.70	496.60
13.00	1752.70	495.10
14.00	1733.30	1058.50
14.20	1734.20	1054.60
14.40	1735.30	1052.40
14.60	1736.40	1050.50
14.80	1737.50	1048.90
15.00	1738.70	1048.00
15.20	1740.00	1044.40
15.40	1741.20	1042.00
15.60	1742.30	1039.80
15.80	1743.50	1037.60
16.00	1744.70	1036.60

ตาราง ซ - 4 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่ 4)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัต ที่ผิวเสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
20.00	683.10	228.30
20.50	684.30	222.40
21.00	685.40	216.10
21.50	686.50	209.30
22.00	687.50	202.90
22.50	682.70	276.60
23.00	684.10	272.50
23.50	685.40	267.70

ตาราง ซ - 5 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่ 6)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัต ที่ผิวเสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
13.50	1364.10	385.80
14.00	1364.60	384.50
14.50	1365.60	384.30
15.00	1366.60	385.70
15.50	1367.50	386.60
16.00	1368.40	386.90
17.00	1358.10	546.70
17.50	1357.50	565.00
18.00	1359.40	557.90
18.50	1361.30	550.00
19.00	1363.00	541.40
21.00	1354.90	1105.90
21.50	1359.80	1068.90
22.00	1364.10	1061.80

ตาราง ซ - 6 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่7)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิว เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
17.00	2695.60	673.20
17.50	2698.10	668.20
18.00	2670.20	719.30
19.00	2675.40	710.60
19.50	2678.90	704.00
20.00	2682.30	697.70
21.00	2686.10	718.50
21.50	2689.10	718.10
22.00	2692.10	715.60
23.00	2601.60	2262.00
23.50	2605.50	2247.90
24.00	2609.40	2236.20
25.00	2617.00	2216.10
25.50	2620.80	2202.20
26.00	2624.60	2192.50

ตาราง ซ - 7 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP(โครงการที่8)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิว เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
16.00	1357.40	1320.70
16.50	1359.50	1300.50
17.00	1361.70	1278.10
18.00	1365.90	1234.30
18.50	1367.90	1213.10
19.00	1370.10	1189.40
20.50	1376.50	1120.40
21.00	1378.10	1095.50

ตาราง ข - 8 แรงต้านทานการตอกเชิงพลวัตที่ระดับความลึกต่างๆวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP (โครงการที่9)

ความลึกการตอก (เมตร)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิว เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)	แรงต้านทานเชิงพลวัตที่ปลาย เสาเข็ม (กิโลนิวตัน)
12.00	415.10	92.20
12.50	415.70	90.90
13.00	416.30	89.90
13.50	416.80	89.00
14.00	409.20	117.30
14.50	409.30	122.50
15.00	409.70	125.90
16.50	413.30	125.60
17.00	414.50	124.90
17.50	415.70	123.60
18.00	406.80	230.50
18.50	417.50	119.90
19.00	418.70	125.70
19.50	413.40	197.10
20.00	414.80	203.40
20.50	429.60	203.80

ภาคผนวก ฅ  
การวิเคราะห์แรงสัมพันธ์ที่เสาเข็ม

ตาราง ฅ -1 สรุปรการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสารั้มนที่แต่ละความลึกของโครงการที่1

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn				m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s						
16.00	5	0.16	13	0.20	217	9301	160	4285	253.64	72.16	56	0.4	0.3	40.21	6.31	0.46	0.94	332	3.4	1194	1194	1120	1.24	1.23	1381	121	11
16.50	6	0.16	15	0.20	226	10157	162	4463	253.70	75.61	56	0.4	0.3	41.47	6.12	0.44	0.83	293	3.3	1146	1146		1.26				
17.00	6	0.16	15	0.20	226	10157	164	4630	254.17	74.21	56	0.4	0.3	43	6	0.46	0.8	290	3.2	1125	1125		1.24				
17.50	6	0.16	15	0.20	226	10157	166	4788	254.59	73.46	56	0.4	0.3	44	6	0.47	0.8	288	3.2	1113	1113		1.24				
18.00	6	0.16	15	0.20	226	10157	167	4937	254.98	72.63	56	0.4	0.3	45	6	0.49	0.8	285	3.1	1101	1101		1.23				
18.50	7	0.16	15	0.20	226	10157	169	5078	255.36	71.71	56	0.4	0.3	46	5	0.50	0.8	282	3.1	1087	1087		1.22				
19.00	7	0.17	15	0.20	226	10157	170	5212	255.74	70.76	56	0.4	0.3	48	5	0.51	0.8	279	3.0	1072	1072		1.21				
20.00	7	0.17	11	0.19	206	8198	172	5361	257.70	58.70	56	0.4	0.3	50	5	0.65	1.0	356	3.1	1102	1102	1084	1.14	1.13	1226	136	9
20.50	7	0.17	11	0.19	206	8198	173	5431	257.94	58.40	56	0.4	0.3	52	5	0.66	1.0	351	3.1	1097	1097		1.14				
21.00	7	0.17	11	0.19	206	8198	174	5496	258.21	58.10	56	0.4	0.3	53	5	0.67	1.0	346	3.1	1091	1091		1.13				
21.50	7	0.17	11	0.19	206	8198	175	5559	258.55	57.71	56	0.4	0.3	54	5	0.68	1.0	341	3.1	1084	1084		1.13				
22.00	7	0.17	11	0.19	206	8198	175	5619	258.92	57.32	56	0.4	0.3	55	5	0.69	1.0	337	3.1	1076	1076		1.13				
22.50	7	0.17	11	0.19	206	8198	176	5677	259.24	57.04	56	0.4	0.3	57	5	0.69	0.9	332	3.0	1071	1071		1.12				
23.00	8	0.17	11	0.19	206	8198	177	5731	259.59	56.78	56	0.4	0.3	58	4	0.70	0.9	328	3.0	1066	1066		1.12				
24.50	9	0.17	24	0.21	262	14513	182	6269	254.07	169.11	21	0.4	0.3	62	4	0.43	0.4	58	5.1	673	673	647	1.25	1.28	827	134	6
25.00	9	0.17	24	0.21	262	14513	183	6434	254.75	167.59	21	0.4	0.3	63	4	0.44	0.4	57	5.1	667	667		1.25				
25.20	9	0.17	39	0.22	306	21020	186	6720	252.72	218.63	21	0.4	0.3	63	4	0.32	0.3	36	4.6	600	600		1.33				

ตาราง ฅ -2 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสารัฒที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 2

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	ws	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
	m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn				tn	Hz	m	m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>	mm	mm/s	mm						
5.00	15	0.19	25	0.21	267	15131	218	9851	167.59	69.95	35	0.2	0.3	8	21	0.65	1.0	221	3.6	791	791	797	1.13	1.1	898	87	10
5.10	15	0.19	25	0.21	267	15131	219	9954	167.64	70.17	35	0.2	0.3	8	21	0.66	1.0	219	3.6	793	793						
5.20	15	0.19	25	0.21	267	15131	220	10054	167.66	70.40	35	0.2	0.3	8	20	0.66	1.0	217	3.6	796	796						
5.30	16	0.19	25	0.21	267	15131	221	10150	167.68	70.64	35	0.2	0.3	8	20	0.67	1.0	215	3.6	799	799						
5.40	16	0.19	25	0.21	267	15131	222	10242	167.68	70.89	35	0.2	0.3	9	19	0.68	1.0	212	3.6	801	801						
5.50	16	0.19	25	0.21	267	15131	223	10331	167.65	71.14	35	0.2	0.3	9	19	0.68	1.0	210	3.7	804	804						
6.10	17	0.19	60	0.23	351	28331	228	11019	124.13	290.04	20	0.2	0.3	10	13	0.39	0.3	37	8.0	1001	1001	992	1.27	1.3	1248	96	13
6.20	18	0.20	60	0.23	351	28331	230	11298	124.17	289.73	20	0.2	0.3	10	13	0.40	0.3	37	8.0	1000	1000						
6.30	19	0.20	60	0.23	351	28331	232	11569	121.75	286.37	20	0.2	0.3	10	12	0.41	0.3	36	7.9	988	988						
6.40	19	0.20	60	0.23	351	28331	234	11831	121.79	286.06	20	0.2	0.3	10	12	0.42	0.3	36	7.9	987	987						
6.50	20	0.20	60	0.23	351	28331	236	12085	121.83	285.74	20	0.2	0.3	10	12	0.43	0.3	36	7.8	986	986						



ตาราง ณ -3 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาริมที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 3

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn				m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s						
7.40	8	0.17	6	0.17	170	4820	183	6238	176.94	53.47	71	0.2	0.3	10	17	1.29	3	1384	10	4396	4396	4319	0.93	0.93	4023	56	71
7.60	8	0.17	6	0.17	170	4820	182	6201	177.29	53.11	71	0.2	0.3	11	17	1.29	3	1356	10	4367	4367						
7.80	8	0.17	6	0.17	170	4820	182	6166	177.62	52.72	71	0.2	0.3	11	16	1.28	3	1330	10	4335	4335						
8.00	8	0.17	6	0.17	170	4820	182	6132	177.98	52.31	71	0.2	0.3	11	16	1.27	3	1305	10	4302	4302						
8.20	8	0.17	6	0.17	170	4820	182	6100	178.22	51.95	71	0.2	0.3	11	16	1.27	3	1281	10	4271	4271						
8.40	8	0.17	6	0.17	170	4820	181	6069	178.46	51.58	71	0.2	0.3	12	15	1.26	3	1257	10	4241	4241						
9.00	10	0.17	36	0.22	298	19744	189	6981	172.79	159.73	15	0.2	0.3	13	14	0.35	0.5	43	7.2	677	677	673	1.29	866	61	14	
9.40	11	0.18	36	0.22	298	19744	194	7524	172.92	158.82	15	0.2	0.3	13	13	0.38	0.5	43	7.1	673	673						
9.60	12	0.18	36	0.22	298	19744	196	7779	172.98	158.47	15	0.2	0.3	13	13	0.39	0.5	43	7.1	672	672						
9.80	12	0.18	36	0.22	298	19744	198	8023	173.04	158.31	15	0.2	0.3	14	13	0.41	0.4	42	7.1	671	671						
10.00	13	0.18	36	0.22	298	19744	200	8257	173.09	158.21	15	0.2	0.3	14	12	0.42	0.4	42	7.1	671	671						
10.20	14	0.18	59	0.23	348	27918	203	8643	173.33	100.76	19	0.2	0.3	14	12	0.31	0.3	34	3.2	383	383	393	1.32	519	59	9	
10.40	14	0.18	59	0.23	348	27918	206	9014	173.37	102.11	19	0.2	0.3	15	12	0.32	0.3	34	3.2	388	388						
10.60	15	0.18	59	0.23	348	27918	208	9370	173.40	103.41	19	0.2	0.3	15	12	0.34	0.3	34	3.3	393	393						
12.00	18	0.19	22	0.21	256	13705	220	10824	177.80	52.85	50	0.2	0.3	17	11	0.79	0.7	212	3.4	1076	1076	1043	1.08	1130	45	25	
12.20	19	0.19	22	0.21	256	13705	221	10871	178.06	51.60	50	0.2	0.3	17	10	0.79	0.7	210	3.3	1051	1051						
12.40	19	0.19	22	0.21	256	13705	221	10917	178.31	51.10	50	0.2	0.3	17	10	0.80	0.7	208	3.3	1041	1041						
12.60	19	0.19	22	0.21	256	13705	222	10961	178.47	50.78	50	0.2	0.3	18	10	0.80	0.7	205	3.3	1034	1034						
12.80	19	0.19	22	0.21	256	13705	222	11004	178.56	50.62	50	0.2	0.3	18	10	0.80	0.6	203	3.3	1031	1031						
13.00	19	0.19	22	0.21	256	13705	223	11045	178.66	50.47	50	0.2	0.3	18	10	0.81	0.6	201	3.3	1028	1028						

ตาราง ฅ -3 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 3(ต่อ)

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average Vmax	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	G <sub>smax</sub>	Vs	G <sub>smax</sub>	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	Vmax						
	m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn				tn	Hz	m	m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>	m	mm	mm/s						
14.00	19	0.19	23	0.21	260	14230	226	11273	176.69	107.90	20	0.2	0.3	20	9	0.79	0.6	72	6.7	846	846	837	1.08	1.08	902	52	17
14.20	19	0.19	23	0.21	260	14230	226	11314	176.78	107.50	20	0.2	0.3	20	9	0.80	0.6	71	6.7	843	843		1.08				
14.40	19	0.19	23	0.21	260	14230	226	11355	176.89	107.28	20	0.2	0.3	20	9	0.80	0.6	71	6.7	842	842		1.08				
14.60	19	0.19	23	0.21	260	14230	227	11394	177.00	107.08	20	0.2	0.3	20	9	0.80	0.6	70	6.7	840	840		1.08				
14.80	19	0.19	23	0.21	260	14230	227	11433	177.12	106.92	20	0.2	0.3	21	9	0.80	0.6	69	6.7	839	839		1.08				
15.00	19	0.19	23	0.21	260	14230	228	11470	177.24	106.83	20	0.2	0.3	21	8	0.81	0.5	69	6.7	838	838		1.08				
15.20	19	0.19	23	0.21	260	14230	228	11506	177.37	106.46	20	0.2	0.3	21	8	0.81	0.5	68	6.6	835	835		1.08				
15.40	19	0.19	23	0.21	260	14230	229	11541	177.49	106.22	20	0.2	0.3	22	8	0.81	0.5	67	6.6	833	833		1.08				
15.60	19	0.19	23	0.21	260	14230	229	11576	177.60	105.99	20	0.2	0.3	22	8	0.81	0.5	67	6.6	832	832		1.07				
15.80	20	0.19	23	0.21	260	14230	229	11610	177.73	105.77	20	0.2	0.3	22	8	0.82	0.5	66	6.6	830	830		1.07				
16.00	20	0.19	23	0.21	260	14230	230	11642	177.85	105.67	20	0.2	0.3	22	8	0.82	0.5	66	6.6	829	829		1.07				

ตาราง ฅ -4 สรุปรการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 4

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
20.00	7	0.17	24	0.21	263	14658	170	5680	69.63	23.27	16	0.1	0.3	21	3	0.39	0.2	15	1.9	191	191	184	1.28	1.27	232	15	16
20.50	8	0.17	24	0.21	263	14658	172	5899	69.76	22.67	16	0.1	0.3	21	3	0.40	0.1	15	1.9	186	186		1.27				
21.00	8	0.18	24	0.21	263	14658	174	6107	69.87	22.03	16	0.1	0.3	22	3	0.42	0.1	15	1.8	181	181		1.26				
21.50	8	0.18	24	0.21	263	14658	176	6306	69.98	21.34	16	0.1	0.3	22	3	0.43	0.1	15	1.7	175	175		1.25				
22.00	9	0.18	24	0.21	263	14658	178	6496	70.08	20.68	16	0.1	0.3	23	3	0.44	0.1	15	1.7	170	170	153	1.24	1.31	201	16	13
22.50	10	0.18	43	0.23	317	22649	181	6855	69.59	28.20	16	0.1	0.3	23	3	0.30	0.1	8	1.5	150	150		1.34				
23.00	10	0.18	43	0.23	317	22649	184	7198	69.73	27.78	16	0.1	0.3	24	3	0.32	0.1	8	1.5	148	148		1.33				

ตาราง ฅ -5 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 6

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
13.50	4	0.15	9	0.18	191	6695	148	3313	139.1	39.3	45	0.2	0.3	23	6.0	0.49	0.6	179	6.2	1740	1740	1736	1.22	1.21	2106	58	36
14.00	4	0.15	9	0.18	191	6695	149	3434	139.1	39.2	45	0.2	0.3	24	5.8	0.51	0.6	175	6.1	1735	1735		1.21				
14.50	4	0.15	9	0.18	191	6695	151	3546	139.2	39.2	45	0.2	0.3	25	5.6	0.53	0.6	172	6.1	1734	1734		1.20				
15.00	4	0.15	9	0.18	191	6695	152	3651	139.3	39.3	45	0.2	0.3	26	5.4	0.55	0.6	169	6.2	1740	1740	1743	1.19	1.19	2069	57	37
15.50	5	0.15	9	0.18	191	6695	153	3750	139.4	39.4	45	0.2	0.3	27	5.2	0.56	0.6	166	6.2	1744	1744		1.19				
16.00	5	0.15	9	0.18	191	6695	155	3842	139.5	39.4	45	0.2	0.3	28	5.0	0.57	0.6	163	6.2	1745	1745		1.18				
17.00	5	0.16	25	0.21	267	15131	159	4258	138.4	55.7	35	0.2	0.3	29	4.7	0.28	0.2	45	3.9	849	849	857	1.37	1.34	1151	91	13
18.00	6	0.16	25	0.21	267	15131	165	4862	138.6	56.9	35	0.2	0.3	31	4.5	0.32	0.2	44	3.9	866	866		1.34				
18.50	7	0.16	25	0.21	267	15131	168	5139	138.8	56.1	35	0.2	0.3	32	4.3	0.34	0.2	44	3.9	854	854		1.33				
19.00	7	0.16	25	0.21	267	15131	170	5402	138.9	55.2	35	0.2	0.3	33	4.2	0.36	0.2	44	3.8	841	841		1.31				
21.00	11	0.17	38	0.22	305	20744	186	7256	138.1	112.7	17	0.2	0.3	36	3.8	0.35	0.1	14	5.7	608	608	593	1.32	1.31	777	89	9
21.50	12	0.17	38	0.22	305	20744	188	7570	138.6	109.0	17	0.2	0.3	37	3.7	0.36	0.1	14	5.5	588	588		1.31				
22.00	13	0.17	38	0.22	305	20744	191	7869	139.1	108.2	17	0.2	0.3	38	3.7	0.38	0.1	14	5.5	584	584		1.30				

ตาราง ฅ-6 สรูลการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่7

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
17.00	6	0.16	6	0.17	170	4810	169	4725	274.78	68.62	42	0.4	0.3	43	6.4	0.98	2.3	606	6.2	1647	1647	1386	1.01	1.07	1490	97	15
17.50	6	0.17	6	0.17	170	4810	169	4728	275.04	68.11	42	0.4	0.3	44	6.3	0.98	2.2	593	6.2	1635	1635		1.01				
18.00	6	0.17	14	0.20	221	9663	171	4865	272.19	73.32	42	0.4	0.3	45	6.0	0.50	0.9	242	3.3	876	876		1.21				
19.00	7	0.17	14	0.20	221	9663	173	5117	272.72	72.44	42	0.4	0.3	48	5.7	0.53	0.9	236	3.3	865	865	858	1.20	1.19	1022	78	13
19.50	7	0.17	14	0.20	221	9663	174	5234	273.08	71.76	42	0.4	0.3	49	5.6	0.54	0.9	233	3.2	857	857		1.19				
20.00	7	0.17	14	0.20	221	9663	176	5345	273.43	71.12	42	0.4	0.3	50	5.4	0.55	0.9	231	3.2	850	850		1.19				
21.00	7	0.17	16	0.20	232	10856	178	5579	273.81	73.24	42	0.4	0.3	53	5.2	0.51	0.7	194	3.0	779	779	778	1.21	1.20	932	93	10
21.50	7	0.17	16	0.20	232	10856	179	5701	274.12	73.20	42	0.4	0.3	54	5.1	0.53	0.7	192	3.0	778	778		1.20				
22.00	8	0.17	16	0.20	232	10856	180	5819	274.42	72.95	42	0.4	0.3	55	5.0	0.54	0.7	190	2.9	776	776		1.19				
23.00	9	0.17	33	0.22	291	18566	185	6373	265.20	230.58	19	0.4	0.3	58	4.6	0.34	0.4	42	5.4	649	649	645	1.31	1.30	841	91	9
23.50	9	0.18	33	0.22	291	18566	187	6632	265.60	229.14	19	0.4	0.3	59	4.5	0.36	0.3	42	5.4	645	645		1.30				
24.00	10	0.18	33	0.22	291	18566	190	6881	265.99	227.95	19	0.4	0.3	60	4.4	0.37	0.3	42	5.4	641	641		1.29				
25.00	11	0.18	33	0.22	291	18566	194	7348	266.77	225.90	19	0.4	0.3	63	4.2	0.40	0.3	41	5.3	635	635	632	1.28	1.27	802	92	9
25.50	11	0.18	33	0.22	291	18566	196	7568	267.16	224.49	19	0.4	0.3	64	4.2	0.41	0.3	41	5.3	632	632		1.27				
26.00	12	0.18	33	0.22	291	18566	197	7780	267.54	223.50	19	0.4	0.3	65	4.1	0.42	0.3	41	5.3	629	629		1.26				

ตาราง ฅ-7 สรุปลการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่8

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
16.00	10	0.18	27	0.21	271	15810	194	7059	138.37	134.63	17	0.3	0.3	30	4.6	0.45	0.3	35	5.0	531	531	522	1.24	1.23	642	60	11
16.50	10	0.18	27	0.21	271	15810	196	7324	138.58	132.57	17	0.3	0.3	31	4.5	0.46	0.3	34	4.9	522	522		1.23				
17.00	11	0.18	27	0.21	271	15810	198	7574	138.81	130.29	17	0.3	0.3	32	4.3	0.48	0.3	34	4.8	513	513		1.22				
18.00	12	0.18	27	0.21	271	15810	202	8031	139.24	125.82	17	0.3	0.3	34	4.1	0.51	0.3	33	4.6	496	496	487	1.20	1.20	583	89	7
18.50	12	0.19	27	0.21	271	15810	204	8241	139.44	123.66	17	0.3	0.3	35	4.0	0.52	0.3	33	4.6	487	487		1.20				
19.00	12	0.19	27	0.21	271	15810	206	8441	139.66	121.24	17	0.3	0.3	36	3.9	0.53	0.3	32	4.5	478	478		1.19				
20.50	13	0.19	27	0.21	271	15810	211	8980	140.32	114.21	18	0.3	0.3	39	3.6	0.57	0.3	33	4.2	477	477	471	1.17	1.17	551	79	7
21.00	14	0.19	27	0.21	271	15810	212	9142	140.48	111.67	18	0.3	0.3	40	3.5	0.58	0.3	32	4.1	466	466		1.17				

ตาราง ณ-8 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 9 (เสาเข็มต้นที่ 1)

Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
12.00	4	0.15	4	0.14	144	2990	151	3526	42.31	9.40	39	0.1	0.3	13	3.4	1.18	0.7	160	5.1	1260	1260	1237	0.95	0.95	1177	27	44
12.50	4	0.15	4	0.14	144	2990	151	3504	42.38	9.27	39	0.1	0.3	13	3.2	1.17	0.6	155	5.1	1242	1242		0.95				
13.00	4	0.15	4	0.14	144	2990	150	3485	42.44	9.16	39	0.1	0.3	14	3.1	1.17	0.6	150	5.0	1229	1229		0.95				
13.50	4	0.15	4	0.14	144	2990	150	3466	42.49	9.07	39	0.1	0.3	14	3.0	1.16	0.6	146	5.0	1216	1216		0.95				
14.00	5	0.15	14	0.20	224	9959	153	3698	41.71	11.96	39	0.1	0.3	15	2.8	0.37	0.1	33	2.0	481	481	500	1.31	1.29	646	28	23
14.50	5	0.15	14	0.20	224	9959	155	3914	41.72	12.49	39	0.1	0.3	15	2.7	0.39	0.1	33	2.1	503	503		1.29				
15.00	5	0.15	14	0.20	224	9959	157	4116	41.76	12.83	39	0.1	0.3	16	2.7	0.41	0.1	32	2.1	516	516		1.28				
16.50	6	0.16	14	0.20	224	9959	163	4647	42.13	12.80	14	0.1	0.3	17	2.4	0.47	0.1	11	2.1	185	185	217	1.24	1.23	267	56	5
17.00	6	0.16	14	0.20	224	9959	165	4803	42.25	12.73	14	0.1	0.3	18	2.4	0.48	0.1	11	2.1	184	184		1.23				
17.50	6	0.16	14	0.20	224	9959	167	4950	42.38	12.60	14	0.1	0.3	18	2.3	0.50	0.1	11	2.1	182	182		1.22				
18.00	7	0.16	16	0.20	231	10706	169	5110	41.47	23.50	14	0.1	0.3	19	2.2	0.48	0.1	10	3.6	316	316		1.23				
18.50	7	0.16	16	0.20	231	10706	170	5261	42.56	12.22	14	0.1	0.3	19	2.2	0.49	0.1	10	1.9	164	164	146	1.23	1.31	192	41	5
19.00	7	0.16	17	0.20	238	11493	172	5425	42.68	12.81	14	0.1	0.3	20	2.1	0.47	0.1	9	1.8	160	160		1.24				
19.50	8	0.17	41	0.22	311	21754	176	5844	42.14	20.09	14	0.1	0.3	20	2.1	0.27	0.0	4	1.5	133	133		1.38				
20.00	9	0.17	41	0.22	311	21754	179	6242	42.28	20.73	14	0.1	0.3	21	2.0	0.29	0.0	4	1.6	137	137		1.37				

ตาราง ณ-9 สรุปการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เสาเข็มที่แต่ละความลึกของโครงการที่ 9 (เสาเข็มต้นที่ 2)

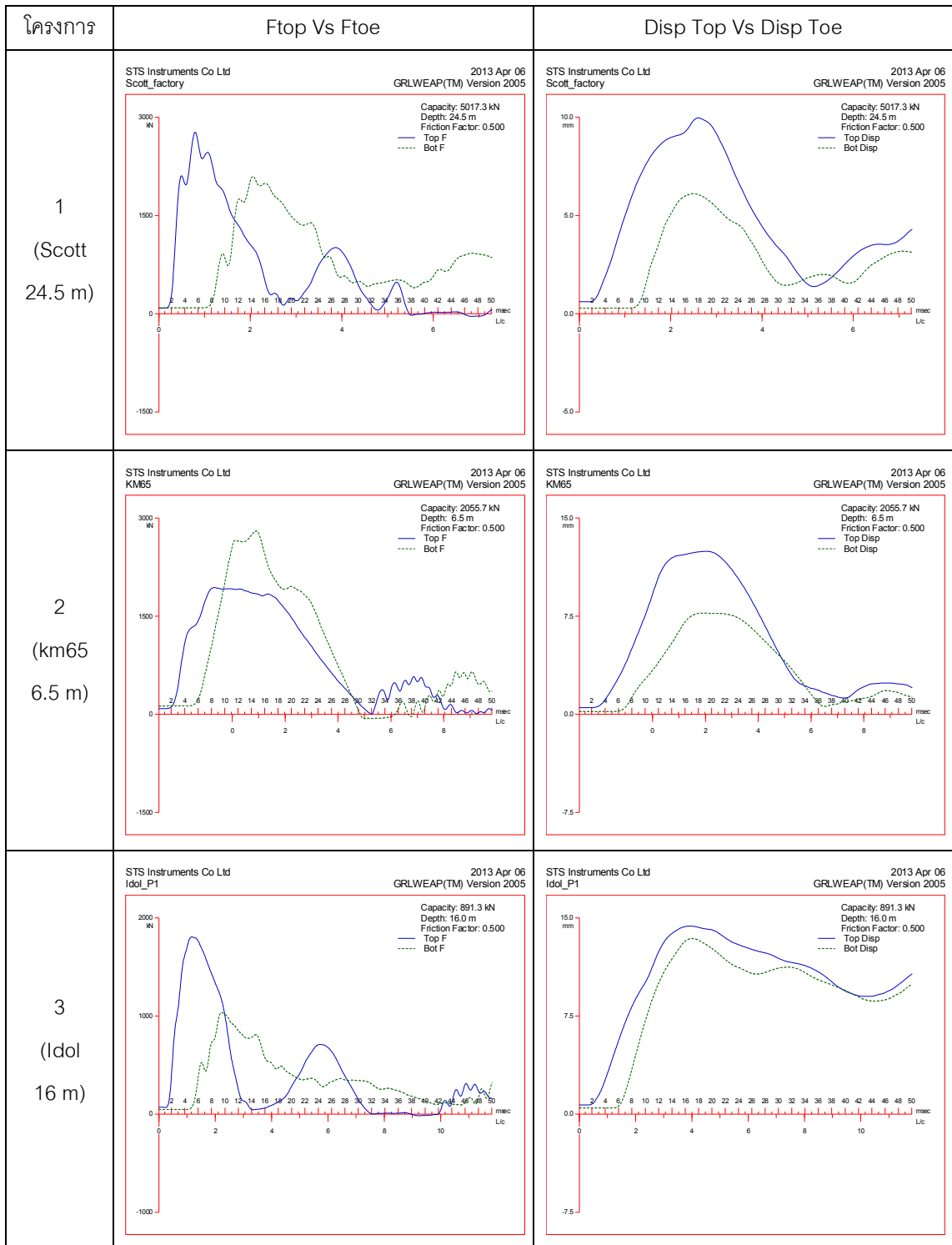
Depth	Friction		Bearing		Bearing		Friction		Dynamic Resistance		f	r <sub>0</sub>	Poisson ratio	Friction parameter			SETTLEMENT and VELOCITY					Average V <sub>max</sub>	T. coef.	Average T. coef.	V <sub>cal</sub>	V <sub>ref</sub>	Ratio
	N-SPT	density	N-SPT	density	Vs	Gsmax	Vs	Gsmax	Friction	End Bearing				surface area	shear stress	m	wf	Vf	wb	Vb	V <sub>max</sub>						
m	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	blow/ft	(t/m <sup>3</sup> )/(m/s <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	(m/s)	(t/m <sup>2</sup> )	tn	tn	Hz	m		m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>		mm	mm/s	mm	mm/s	mm/s	mm/s			mm/s	mm/s	
12.00	4	0.15	4	0.14	144	2990	151	3526	42.31	9.40	39	0.1	0.3	13	3.4	1.18	0.7	160	5.1	1260	1260	1237	0.95	0.95	1177	28	42
12.50	4	0.15	4	0.14	144	2990	151	3504	42.38	9.27	39	0.1	0.3	13	3.2	1.17	0.6	155	5.1	1242	1242		0.95				
13.00	4	0.15	4	0.14	144	2990	150	3485	42.44	9.16	39	0.1	0.3	14	3.1	1.17	0.6	150	5.0	1229	1229		0.95				
13.50	4	0.15	4	0.14	144	2990	150	3466	42.49	9.07	39	0.1	0.3	14	3.0	1.16	0.6	146	5.0	1216	1216		0.95				
14.00	5	0.15	14	0.20	224	9959	153	3698	41.71	11.96	39	0.1	0.3	15	2.8	0.37	0.1	33	2.0	481	481	500	1.31	1.29	646	39	17
14.50	5	0.15	14	0.20	224	9959	155	3914	41.72	12.49	39	0.1	0.3	15	2.7	0.39	0.1	33	2.1	503	503		1.29				
15.00	5	0.15	14	0.20	224	9959	157	4116	41.76	12.83	39	0.1	0.3	16	2.7	0.41	0.1	32	2.1	516	516		1.28				
16.50	6	0.16	14	0.20	224	9959	163	4647	42.13	12.80	14	0.1	0.3	17	2.4	0.47	0.1	11	2.1	185	185	217	1.24	1.23	267	50	5
17.00	6	0.16	14	0.20	224	9959	165	4803	42.25	12.73	14	0.1	0.3	18	2.4	0.48	0.1	11	2.1	184	184		1.23				
17.50	6	0.16	14	0.20	224	9959	167	4950	42.38	12.60	14	0.1	0.3	18	2.3	0.50	0.1	11	2.1	182	182		1.22				
18.00	7	0.16	16	0.20	231	10706	169	5110	41.47	23.50	14	0.1	0.3	19	2.2	0.48	0.1	10	3.6	316	316		1.23				
18.50	7	0.16	16	0.20	231	10706	170	5261	42.56	12.22	14	0.1	0.3	19	2.2	0.49	0.1	10	1.9	164	164	146	1.23	1.31	192	38	5
19.00	7	0.16	17	0.20	238	11493	172	5425	42.68	12.81	14	0.1	0.3	20	2.1	0.47	0.1	9	1.8	160	160		1.24				
19.50	8	0.17	41	0.22	311	21754	176	5844	42.14	20.09	14	0.1	0.3	20	2.1	0.27	0.0	4	1.5	133	133		1.38				
20.00	9	0.17	41	0.22	311	21754	179	6242	42.28	20.73	14	0.1	0.3	21	2.0	0.29	0.0	4	1.6	137	137		1.37				



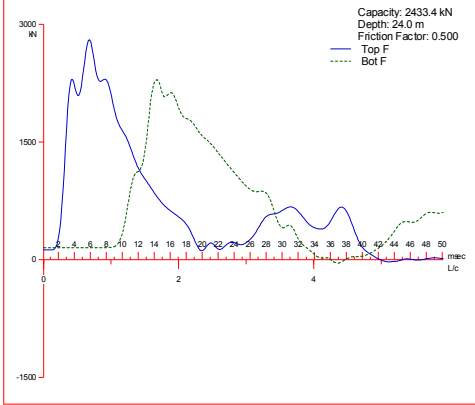
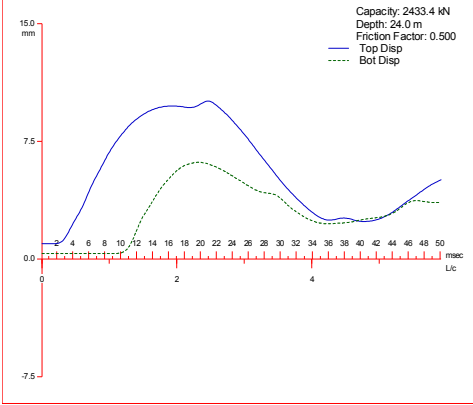
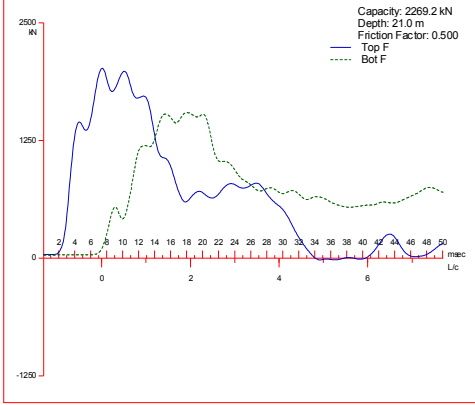
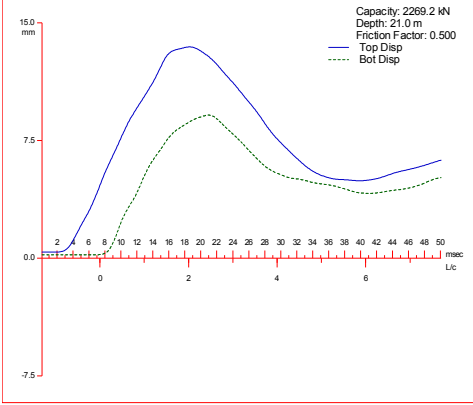
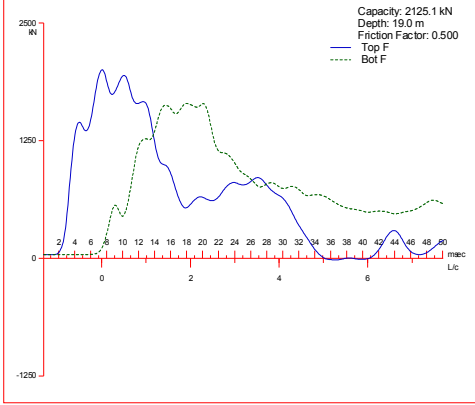
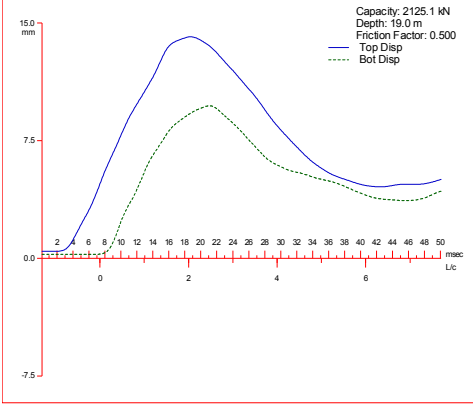
ภาคผนวก ญ

การวิเคราะห์เพื่อแบ่งประเภทของเสาเข็มในแต่ละโครงการทดสอบ

ตาราง ญ-1 เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง กรณีที่ปลายระดับเสาเข็มเป็นดินทราย



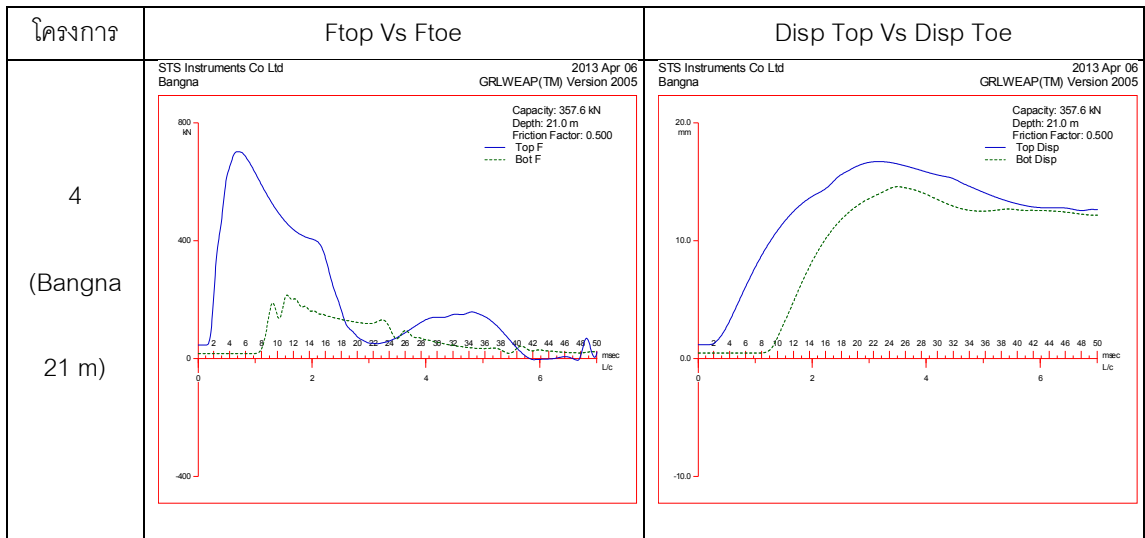
โครงการ	Ftop Vs Ftoe	Disp Top Vs Disp Toe
<p>3 (Ido P3 10 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Idol_P1 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 990.8 kN Depth: 10.0 m Friction Factor: 0.500 Top F Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Idol_P1 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 990.8 kN Depth: 10.0 m Friction Factor: 0.500 Top Disp Bot Disp</p>
<p>6 (KPI 22 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd KPI_I35 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 1226.8 kN Depth: 22.0 m Friction Factor: 0.500 Top F Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd KPI_I35 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 1226.8 kN Depth: 22.0 m Friction Factor: 0.500 Top Disp Bot Disp</p>
<p>7 (MRT 26 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd MRT_K 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 2580.6 kN Depth: 26.0 m Friction Factor: 0.500 Top F Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd MRT_K 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 2580.6 kN Depth: 26.0 m Friction Factor: 0.500 Top Disp Bot Disp</p>

โครงการ	Ftop Vs Ftoe	Disp Top Vs Disp Toe
<p>7 (MRT 24 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd MRT_K 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STS Instruments Co Ltd MRT_K 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 
<p>8 (Bangyai 21 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Bangyai 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STS Instruments Co Ltd Bangyai 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 
<p>8 (Bangyai 19 m)</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Bangyai 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STS Instruments Co Ltd Bangyai 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 

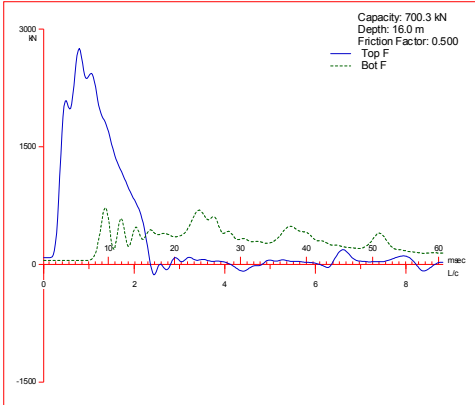
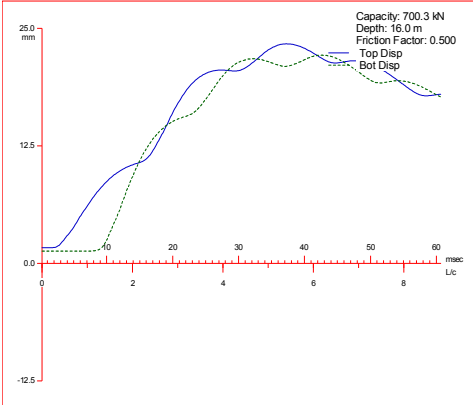
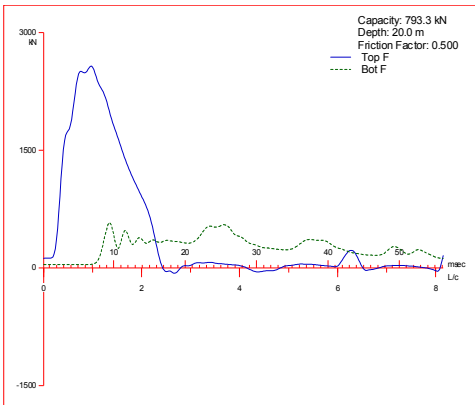
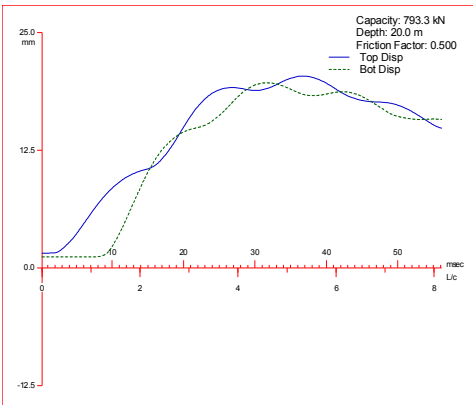
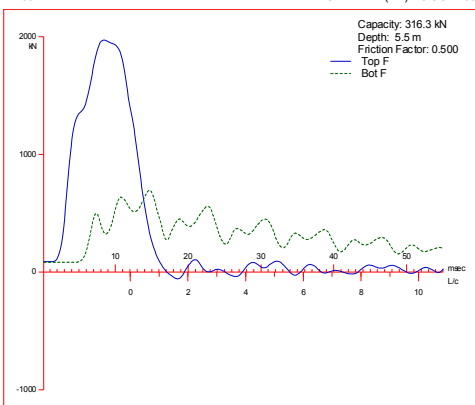
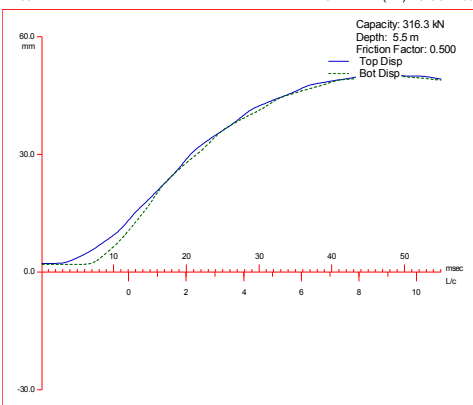
โครงการ	Ftop Vs Ftoe	Disp Top Vs Disp Toe
<p>8 (Bangyai 17 m)</p>	<p>STC Instruments Co Ltd Bangyai</p> <p>2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 1994.9 kN Depth: 17.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>Top F Bot F</p>	<p>STC Instruments Co Ltd Bangyai</p> <p>2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 1994.9 kN Depth: 17.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>Top Disp Bot Disp</p>
<p>9 (Praram 5 18 m)</p>	<p>STC Instruments Co Ltd Praram5_P1</p> <p>2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 266.2 kN Depth: 18.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>Top F Bot F</p>	<p>STC Instruments Co Ltd Praram5_P1</p> <p>2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 266.2 kN Depth: 18.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>Top Disp Bot Disp</p>

ตาราง ญ-2 เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ปลายขณะตอกสูง กรณีที่ปลายระดับเสาเข็มเป็นดินเหนียว

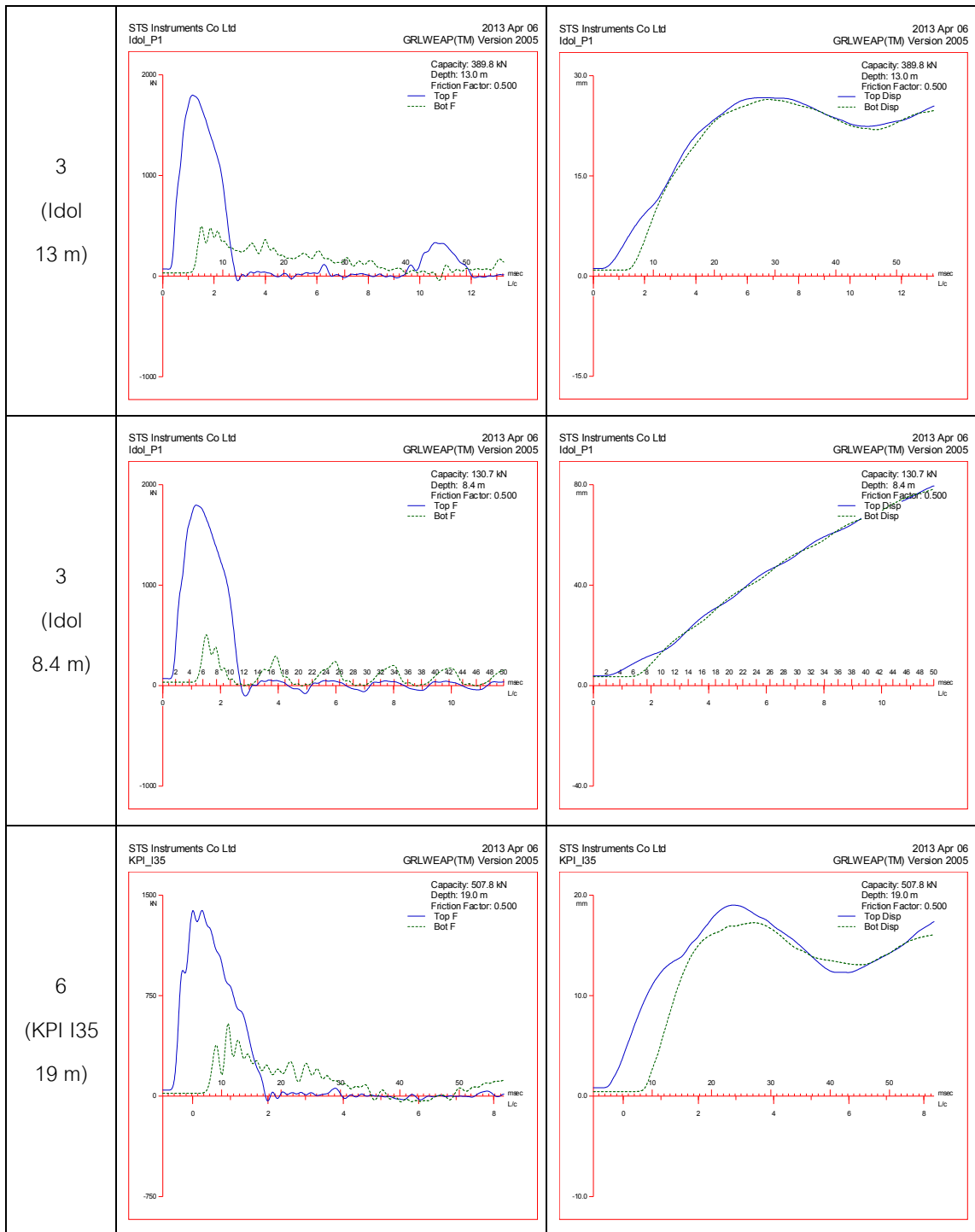
โครงการ	Ftop Vs Ftoe	Disp Top Vs Disp Toe
3 (Idol 11 m)	<p>STS Instruments Co Ltd Idol_P1 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 551.2 kN Depth: 11.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top F - - - Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Idol_P1 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 551.2 kN Depth: 11.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top Disp - - - Bot Disp</p>
9 (Praram5 ) 20 m	<p>STS Instruments Co Ltd Praram5_P1 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 296.5 kN Depth: 20.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top F - - - Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Praram5_P1 2013 Apr 24 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 296.5 kN Depth: 20.0 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top Disp - - - Bot Disp</p>
4 (Bangna 23.5 m)	<p>STS Instruments Co Ltd Bangna 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 530.1 kN Depth: 23.5 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top F - - - Bot F</p>	<p>STS Instruments Co Ltd Bangna 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> <p>Capacity: 530.1 kN Depth: 23.5 m Friction Factor: 0.500</p> <p>— Top Disp - - - Bot Disp</p>

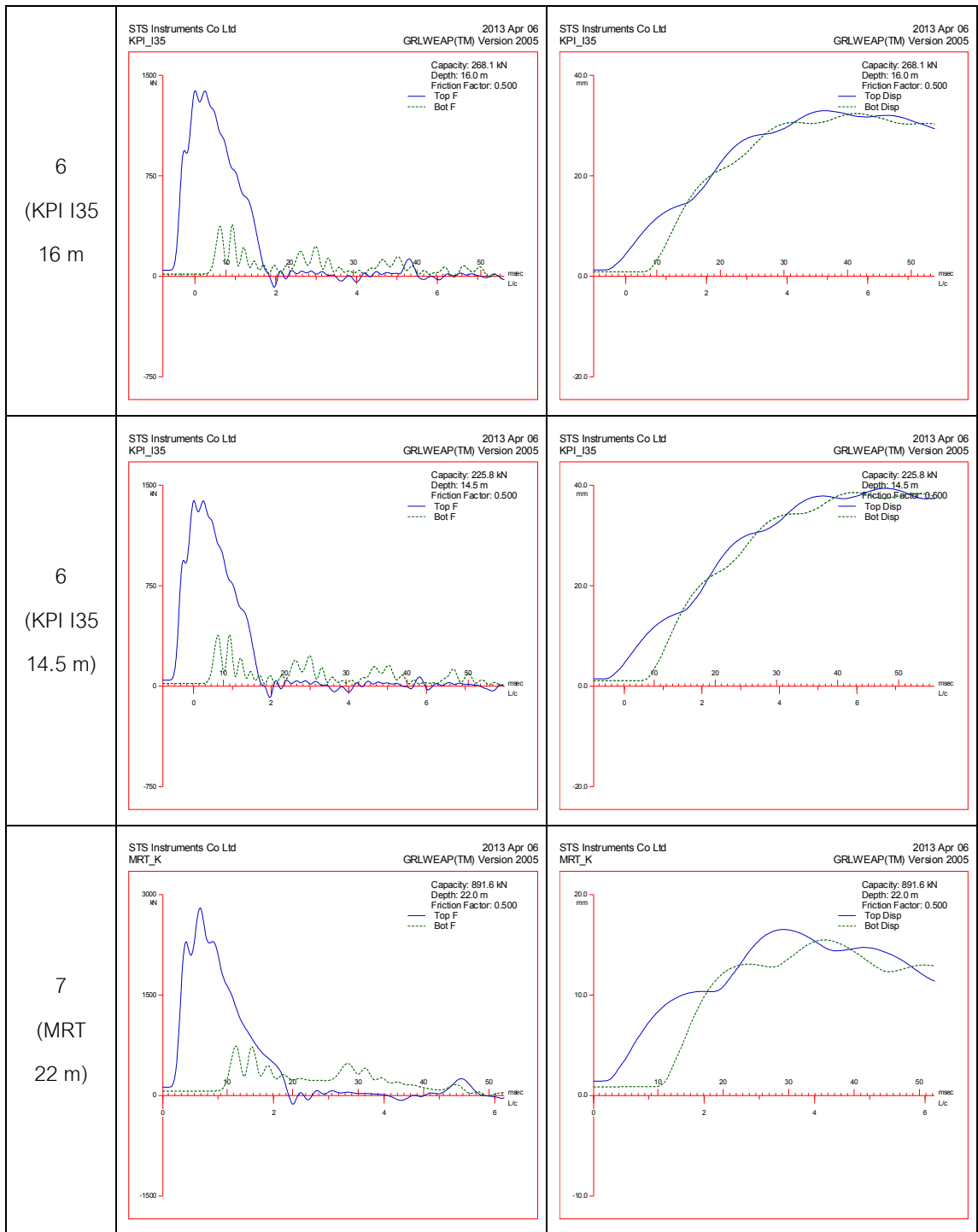


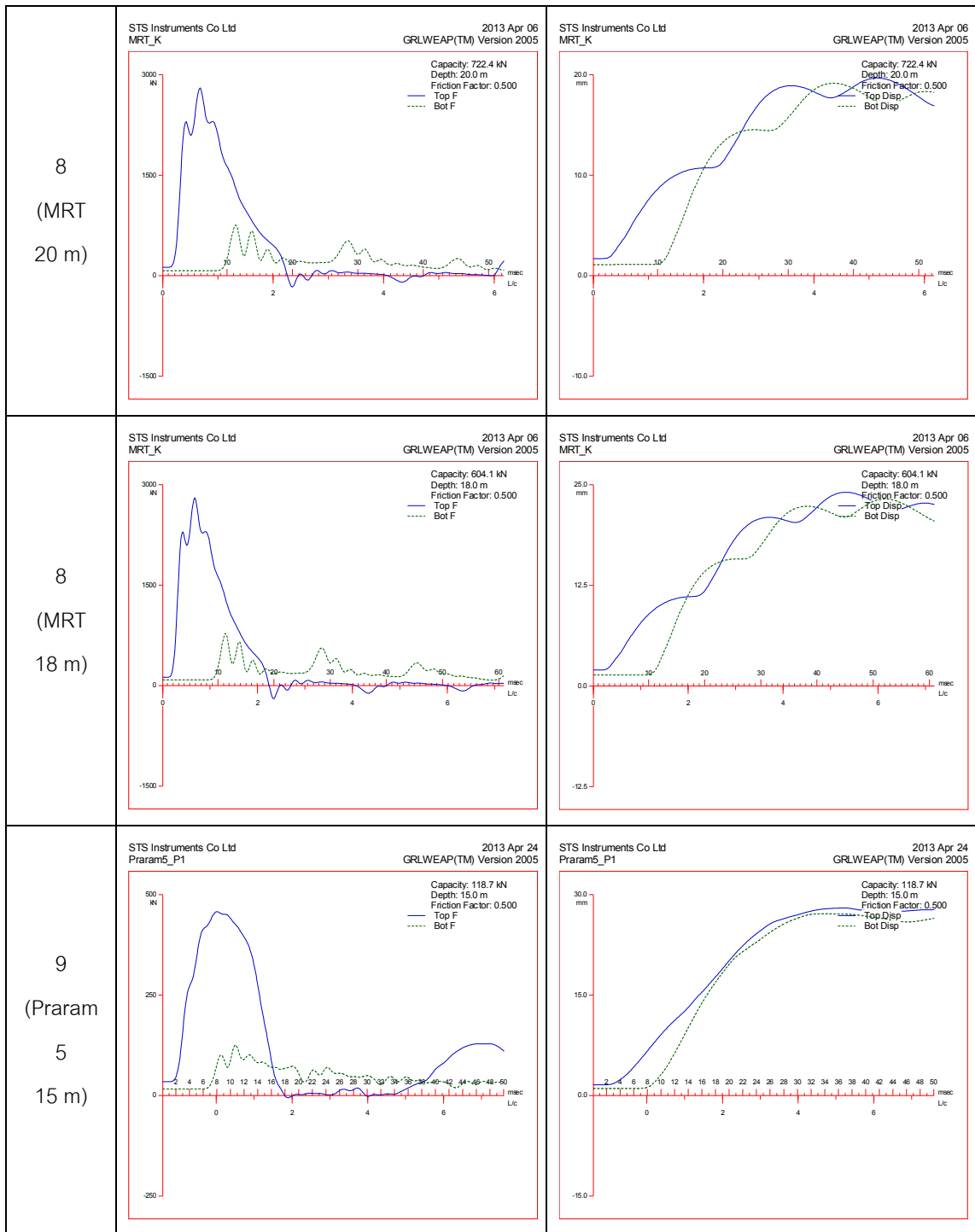
ตาราง ญ-3 เสาเข็มมีแรงต้านทานตามผิวด้านข้างขณะตอกสูง

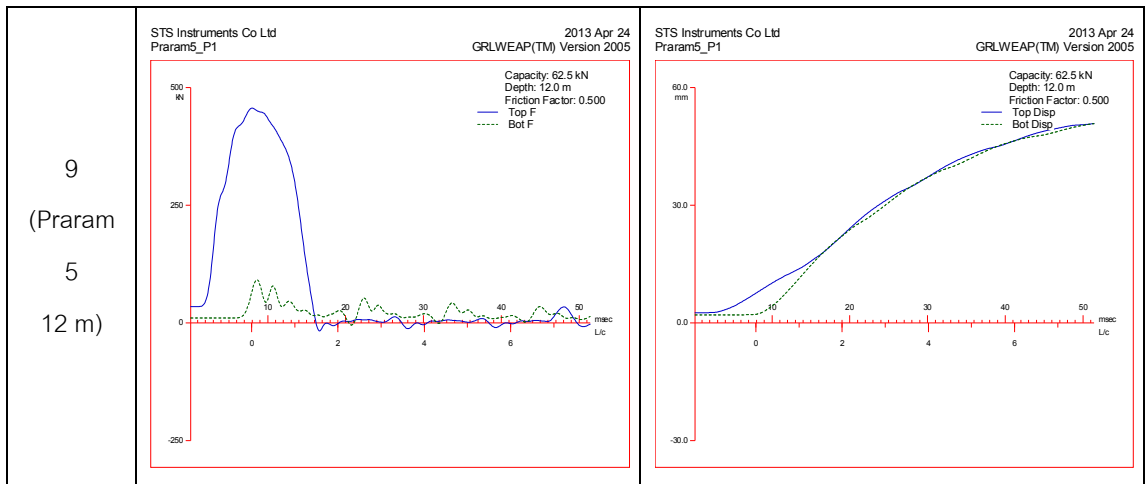
โครงการ	Ftop Vs Ftoe	Disp Top Vs Disp Toe
<p>1 (Scott 16 m)</p>	<p>STC Instruments Co Ltd Scott_factory 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STC Instruments Co Ltd Scott_factory 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 
<p>1 (Scott 20 m)</p>	<p>STC Instruments Co Ltd scott 2013 May 01 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STC Instruments Co Ltd scott 2013 May 01 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 
<p>2 (km 65 5.5 m)</p>	<p>STC Instruments Co Ltd KM65 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 	<p>STC Instruments Co Ltd KM65 2013 Apr 06 GRLWEAP(TM) Version 2005</p> 











ตาราง ญ – 4 ร้อยละแรงต้านทานเชิงพลวัตที่ผิวเสาเข็มเทียบกับแรงต้านทานสุทธิในแต่ละ  
โครงการทดสอบ

โครงการ ที่	f (Hz)	ความลึกการตอก (m)	$Q_f^*$ (kN)	$Q_b^*$ (kN)	แรงต้านทานเชิง พลวัตสุทธิ (kN)	% friction
1	56	16.0	2515	715	3231	78
		16.5	2515	749	3265	77
		17.0	2520	735	3255	77
		17.5	2524	722	3246	78
		18.0	2527	709	3236	78
		18.5	2531	697	3227	78
		19.0	2534	684	3218	79
1	56	20.0	2554	622	3177	80
		20.5	2556	619	3175	80
		21.0	2558	616	3174	81
		21.5	2560	612	3172	81
		22.0	2563	608	3171	81
		22.5	2565	605	3170	81
1	21	23.0	2567	602	3169	81
		24.5	2511	1633	4144	61
		25.0	2516	1617	4133	61
		25.2	2496	2095	4591	54
2	35	5.0	1644	686	2330	71
		5.1	1645	688	2333	70
		5.2	1645	691	2335	70
		5.3	1645	693	2338	70
		5.4	1645	695	2340	70
		5.5	1645	698	2343	70
2	20	6.1	1218	2845	4063	30
		6.2	1218	2842	4060	30
		6.3	1194	2809	4004	30
		6.4	1195	2806	4001	30
		6.5	1195	2803	3998	30
3	71	7.4	1736	525	2260	77
		7.6	1739	521	2260	77
		7.8	1743	517	2260	77
		8.0	1746	513	2259	77

โครงการ ที่	f (Hz)	ความลึกการตอก (m)	$Q_f^*$ (kN)	$Q_b^*$ (kN)	แรงต้านทานเชิง ผลวัสดุสุทธิ (kN)	% friction
		8.2	1748	510	2258	77
		8.4	1751	506	2257	78
3	15	9.0	1695	1567	3262	52
		9.2	1696	1563	3258	52
		9.4	1696	1558	3254	52
		9.6	1697	1555	3252	52
		9.8	1698	1553	3251	52
		10.0	1698	1552	3250	52
3	18.5	10.2	1700	989	2689	63
		10.4	1701	1002	2703	63
		10.6	1701	1015	2716	63
		10.8	1701	1027	2729	62
		11.0	1702	1040	2742	62
3	50	12.0	1744	519	2263	77
		12.2	1747	506	2253	78
		12.4	1749	501	2251	78
		12.6	1751	498	2249	78
		12.8	1752	497	2248	78
		13.0	1753	495	2248	78
3	20	14.0	1733	1059	2792	62
		14.2	1734	1055	2789	62
		14.4	1735	1052	2788	62
		14.6	1736	1051	2787	62
		14.8	1738	1049	2786	62
		15.0	1739	1048	2787	62
		15.2	1740	1044	2784	62
		15.4	1741	1042	2783	63
		15.6	1742	1040	2782	63
		15.8	1744	1038	2781	63
		16.0	1745	1037	2781	63
6	45	13.5	1364	386	1750	78
		14.0	1365	385	1749	78
		14.5	1366	384	1750	78
6	45	15.0	1367	386	1752	78
		15.5	1368	387	1754	78

โครงการ ที่	f (Hz)	ความลึกการตอก (m)	$Q_f^*$ (kN)	$Q_b^*$ (kN)	แรงต้านทานเชิง พลวัตสุทธิ (kN)	% friction
		16.0	1368	387	1755	78
6	36	17.0	1358	547	1905	71
		17.5	1358	565	1923	71
		18.0	1359	558	1917	71
		18.5	1361	550	1911	71
		19.0	1363	541	1904	72
6	17	21.0	1355	1106	2461	55
		21.5	1360	1069	2429	56
		22.0	1364	1062	2426	56
7	42	17.0	2744	730	3474	79
		17.5	2747	724	3471	79
		18.0	2719	780	3498	78
7	42	19.0	2724	771	3494	78
		19.5	2728	763	3491	78
		20.0	2731	757	3487	78
7	42	21.0	2731	756	3487	78
		21.5	2734	750	3484	78
		22.0	2737	743	3481	79
7	18.5	23.0	2643	2330	4972	53
		23.5	2647	2310	4957	53
		24.0	2651	2294	4945	54
7	18.5	25.0	2659	2258	4917	54
		25.5	2663	2237	4900	54
		26.0	2667	2220	4887	55
8	17	16.0	1357	1321	2678	51
		16.5	1360	1301	2660	51
		17.0	1362	1278	2640	52
8	17	18.0	1366	1234	2600	53
		18.5	1368	1213	2581	53
		19.0	1370	1189	2560	54
8	17	20.5	1377	1120	2497	55
		21.0	1378	1096	2474	56
9	38.5	12.0	415	92	507	82
		12.5	416	91	507	82
		13.0	416	90	506	82

โครงการ ที่	f (Hz)	ความลึกการตอก (m)	$Q_f^*$ (kN)	$Q_b^*$ (kN)	แรงต้านทานเชิง ผลวัสดุสุทธิ (kN)	% friction
		13.5	417	89	506	82
9	38.5	14.0	409	117	527	78
		14.5	409	123	532	77
		15.0	410	126	536	76
		16.5	413	126	539	77
9	13.5	17.0	415	125	539	77
		17.5	416	124	539	77
		18.0	407	231	637	64
		18.5	418	120	537	78
9	14.3	19.0	419	126	544	77
		19.5	413	197	611	68
		20.0	415	203	618	67
		20.5	430	204	633	68



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ช่อธรรม ศรีนิล เกิดวันที่ 26 มกราคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี การศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในแขนงวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาดัน ปี การศึกษา 2554