

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในขณะที่ตอกเสาเข็มบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
Lateral movement of the existing piles during pile driving in soft  
Bangkok Clay

โดย

นายธนากร ใจمند

นายธฤต เชาว์กิจคำ

นายนวนภูมิ จำนงศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lateral movement of the existing piles during pile driving in soft  
Bangkok Clay



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในขณะที่ตอกเสาเข็ม  
บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
Lateral movement of the existing piles during pile  
driving in soft Bangkok Clay

นักศึกษา นายธนกร ใจมนต์ รหัสนักศึกษา 62010385  
นายธฤต เขาว์กิจคำ รหัสนักศึกษา 62010407  
นายนวนภูมิ จำนงศรี รหัสนักศึกษา 62010476

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ช่อธรรม ศรีนิล

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิรุฬ	คำชุม	
ผศ.ดร.ประทีป	หล่อประเสริฐ	
ดร.ช่อธรรม	ศรีนิล	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อุตะภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 21 มิย 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในขณะในที่ขณะตอกเสาเข็มบนดินเหนียวอ่อน กรุงเทพ

นาย ธนากร	ใจมนต์	รหัสนักศึกษา 62010385
นาย ธฤต	เชาว์กิจคำ	รหัสนักศึกษา 62010407
นาย นวภูมิ	จำนงศรี	รหัสนักศึกษา 62010476

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ช่อธรรม ศรีนิล

ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ติดตั้งแล้วจากตำแหน่งที่กำหนดขณะที่กำลังติดตั้งเสาเข็มแบบแทนที่ดิน นับเป็นปัญหาสำคัญที่พบมากในงานก่อสร้างฐานรากระบบเสาเข็มแทนที่ดินแบบกลุ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มในบริเวณพื้นที่ที่มีชั้นดินเหนียวอ่อน ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ติดตั้งแล้ว และดินรอบเสาเข็ม จากการติดตั้งเสาเข็มแบบแทนที่ดินในชั้นดินเหนียวกรุงเทพด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ โดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในงานก่อสร้าง คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม และ ระยะห่างของเสาเข็ม โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์การติดตั้งเสาเข็มคงที่โดยให้ปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็มเดี่ยวได้ถูกสอบเทียบกับการคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก แนวทางการวางแผนการติดตั้งเสาเข็มแบบแทนที่ดินในชั้นดินเหนียวกรุงเทพเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ติดตั้งแล้วได้ถูกนำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: เสาเข็มแบบแทนที่ดิน, ดินเหนียวกรุงเทพ, โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์, การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง

## Lateral movement of the existing piles during pile driving in soft Bangkok Clay

Mr. Tanakorn Jaimon Student ID. 62010385

Mr. Tharit Chaokijka Student ID. 62010407

Mr. Nawaphum Jamnongsri Student ID. 62010476

Advisor: Dr.Chortham Srinil

Academic Year 2022

### Abstract

The lateral movements of the existing piles from their original locations during the installation of displacement pile group, especially in the Bangkok clay, cause many problems in the construction and design. In this research, we study the effects of three main factors that the constructors normally control in the pile installation process, including pile diameter and pile spacing on the lateral movements of the existing piles and surrounding soils by the simulations. Pile embedment depth is kept constant where the tip pile is embedded in the stiff clay layer. Three-dimensional finite element program is used in this study. The simulation results of the surrounding soil movement of a single pile are validated with the theory of cylindrical cavity expansion. The guidelines of the displacement pile installation to alleviate the lateral movement of the existing pile are recommended.

Keywords: Displacement Pile, Bangkok Clay, Finite Element Program, Lateral Movement

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ช่อธรรม ศรีนิล อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย และช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยสำหรับผู้อ่าน และขอมอบความกตัญญูทเวทิตาคคุณ แก่บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสประสบความสำเร็จในการศึกษาเล่าเรียนจนทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสทำงานวิจัยเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ไปด้วยดี สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดแต่เพียงผู้เดียว และยินดีรับฟังข้อเสนอแนะต่างๆ จากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

นายธนากร ใจมนต์

นายธฤต เชาว์กิจคำ

นายนวนภูมิ จำนงศรี

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มา และความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>6</b>
2.1 การเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเสาเข็มขณะตอกเสาเข็มเดียว	6
2.1.1 การตอกเสาเข็มในดินทราย	6
2.1.2 การตอกเสาเข็มในดินเหนียว	7
2.2 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มขณะตอก	8
2.2.1 การขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Expansion of cylindrical cavity)	8
2.2.2 คุณสมบัติของดิน และลักษณะเฉพาะของชั้นดิน	10
2.2.3 การเคลื่อนที่สะสมของดินทางด้านข้าง (Cumulative Lateral Displacement)	16
2.2.4 พื้นผิวลาดเอียง (Inclined Ground Surface)	17
2.2.5 เงื่อนไขในการก่อสร้าง	18
2.2.6 แนวทางการวิเคราะห์ และตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มขณะตอกในชั้นดินเหนียวอ่อน	19
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	<b>25</b>
3.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอก	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การจำลองเสาเข็มในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Solid Element Method (SEM)	25
3.1.2 กำหนดพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	25
3.1.3 แนวทางการจำลองการติดตั้งเสาเข็มตอกด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ	28
3.2 กำหนดกรณีศึกษาในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกโดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในงานก่อสร้าง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
3.2.1 วิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว	44
3.3 สรุปผล และเสนอแนวทางการวางแผนการตอกเสาเข็มเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	44
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ</b>	45
4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว	45
4.1.1 ผลการคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Expansion of cylindrical cavity)	45
4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46
4.2. วิเคราะห์โดยพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม	47
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็มโดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในการก่อสร้าง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	47
4.2.2 วิเคราะห์โดยพิจารณาความยาวของเสาเข็ม	52
<b>บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	54
5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการศึกษา	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
<b>ภาคผนวก ก</b>	56
<b>ภาคผนวก ข</b>	57
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	63
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Balasubramaniam et al,2009)	11
ตารางที่ 2.2	การจัดพื้นที่ และคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนในแต่ละบริเวณ (Amonkul ,2010)	13
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติที่บ่งบอกความเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Likitlersuang et al,2013)	13
ตารางที่ 2.4	พารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Bergado et al,1994)	14
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน	26
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลอ้างอิงจากการเจาะทดสอบชั้นดินสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	27
ตารางที่ ก-1	ลักษณะชั้นดินของโครงการโรงพยาบาลพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร	56
ตารางที่ ข-1	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 1	57
ตารางที่ ข-1	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 1	58
ตารางที่ ข-2	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 2	59
ตารางที่ ข-2	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 2	60
ตารางที่ ข-3	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 3	61
ตารางที่ ข-3	ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ของหลุมที่ 3	62

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	แผนผังของโครงการก่อสร้างแสดงลาดคลองขนาดทั้ง 2 ด้านของพื้นที่โครงการ	2
รูปที่ 1.2	คลองที่ขนาดพื้นที่ของโครงการ	3
รูปที่ 1.3	ลักษณะการวางตัวของเสาเข็มที่แน่นอนในโครงการ	3
รูปที่ 2.1	คลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มในดินเนื้อเดียว	6
รูปที่ 2.2	การเคลื่อนที่ของดินรอบเสาเข็มขณะตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน(Massarch et al,2013)	7
รูปที่ 2.3	การขยายตัวของโพรงทรงกระบอก	9
รูปที่ 2.4	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม และการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก ( Massarch et al,2013)	10
รูปที่ 2.5	แผนที่จำแนกลักษณะดินเหนียวอ่อนในแต่ละบริเวณ (Amornkul et al,2010)	12
รูปที่ 2.6	a) รูปแบบ และลำดับชั้นการตอกเสาเข็ม และ b) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินและเสาเข็มตามลำดับชั้นการตอกเสาเข็ม (Wersall and Massarsch, 2013)	16
รูปที่ 2.7	ข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับผลกระทบของพื้นผิวลาดเอียงต่อการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Massarsch et al.,2013)	17
รูปที่ 2.8	ผลกระทบของความลาดเอียงต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินและเสาเข็ม (Massarsch et al.,2013)	17
รูปที่ 2.9	การจัดเรียงทางเรขาคณิตและลำดับการตอกเสาเข็ม (Massarch et al.,2013)	18
รูปที่ 2.10	การเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มทางด้านข้างหลังการติดตั้งเสาเข็มจากรูปที่ 2.9 (Massarsch et al.,2013)	19
รูปที่ 2.11	แบบจำลอง 3 มิติของเสาเข็มที่มีองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง (SEM)	21
รูปที่ 2.12	โมเดล 3 มิติของเสาเข็มและดินที่มีองค์ประกอบเชื่อมต่อแบบ Beam+Solid(BSCM)	22
รูปที่ 2.13	โมเดล 3 มิติของเสาเข็มและดินที่มีองค์ประกอบเชื่อมต่อแบบ embedded piles (EP	23
รูปที่ 2.14	(a) บล็อกกลไกการพังด้วยตาข่ายปกติ(Mesh)(b) ด้วยตาข่ายที่กว้างขึ้น (Widened Mesh)(c) แรงที่ใช้สอดคล้องกัน (Syawal SATIBI,Msc.,2007,P21)	24
รูปที่ 3.1	การสร้างไฟล์การทำงานใหม่	28
รูปที่ 3.2	การเปลี่ยนระนาบการทำงานใหม่	28
รูปที่ 3.3	การสร้างระนาบดิน	29
รูปที่ 3.4	ระนาบดิน	29
รูปที่ 3.5	การสร้างระนาบเสาเข็ม	30
รูปที่ 3.6	ระนาบเสาเข็ม	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 การยึดระนาบชั้นดินและเสาเข็ม	31
รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อองค์ประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน	31
รูปที่ 3.9 กำหนด Parameter สำหรับ Elastic material	32
รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Elastic	33
รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Mohr's coulomb	33
รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Modified Cam-Clay	34
รูปที่ 3.13 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลอง	34
รูปที่ 3.14 การสร้างโครงข่ายแบบ 3มิติ	35
รูปที่ 3.15 การกำหนดขนาดโครงข่ายของเสาเข็ม	35
รูปที่ 3.16 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินcrust	36
รูปที่ 3.17 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินเหนียวอ่อน	36
รูปที่ 3.18 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินเหนียวแข็ง	36
รูปที่ 3.19 การสร้างอินเทอร์เฟซและ Ligid link ระหว่างดินและเสาเข็ม	37
รูปที่ 3.20 การเลือกชิ้นส่วนสำหรับการสร้าง Interface และ Rigid link	37
รูปที่ 3.21 เปิด solid geometry ชั้นดินเหนียวอ่อน	38
รูปที่ 3.22 กำหนดเงื่อนไขการระบายน้ำ	38
รูปที่ 3.23 กำหนดเงื่อนไขการระบายน้ำ	39
รูปที่ 3.24 กำหนดเงื่อนไขจำกัดเขต	39
รูปที่ 3.25 กำหนดเงื่อนไขจำกัดเขต	40
รูปที่ 3.26 กำหนดน้ำหนักรวมของเสาเข็ม	40
รูปที่ 3.27 กำหนดการขยายตัวของเสาเข็ม	41
รูปที่ 3.28 กำหนดน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์	41
รูปที่ 3.29 การกำหนดค่าในขั้นตอนการก่อสร้าง	42
รูปที่ 3.30 การตั้งค่า initial stage	42
รูปที่ 3.31 การตั้งค่า Deactivate pile	43
รูปที่ 3.32 การวิเคราะห์ผล	43
รูปที่ 4.1 การคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่าง ทรงกระบอก	45
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์เมื่อกำหนดรัศมีเสาเข็ม 0.2 เมตร	46
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่ระยะต่างๆเมื่อ กำหนดรัศมีเริ่มต้นเป็น 0.2 เมตรและขยายรัศมีเป็น 0.3 เมตร	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จาก  
ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร เพิ่มเป็น 0.3 เมตร 48
- รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่ระยะต่างๆเมื่อ  
กำหนดรัศมีเริ่มต้นเป็น 0.2 เมตรและขยายรัศมีเป็น 0.4 เมตร 49
- รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จาก  
ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร เพิ่มเป็น 0.4 เมตร 50
- รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร  
และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร เปรียบเทียบกับเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยาย  
เป็น 0.4 เมตร 51
- รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบอิทธิพลของความยาวเข็มเมื่อลดความยาวเข็มลงจาก 17 เมตรเป็น 10  
เมตร 52
- รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จาก  
ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อความยาวเสาเข็มเป็น 10 เมตร 53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มา และความสำคัญของงานวิจัย

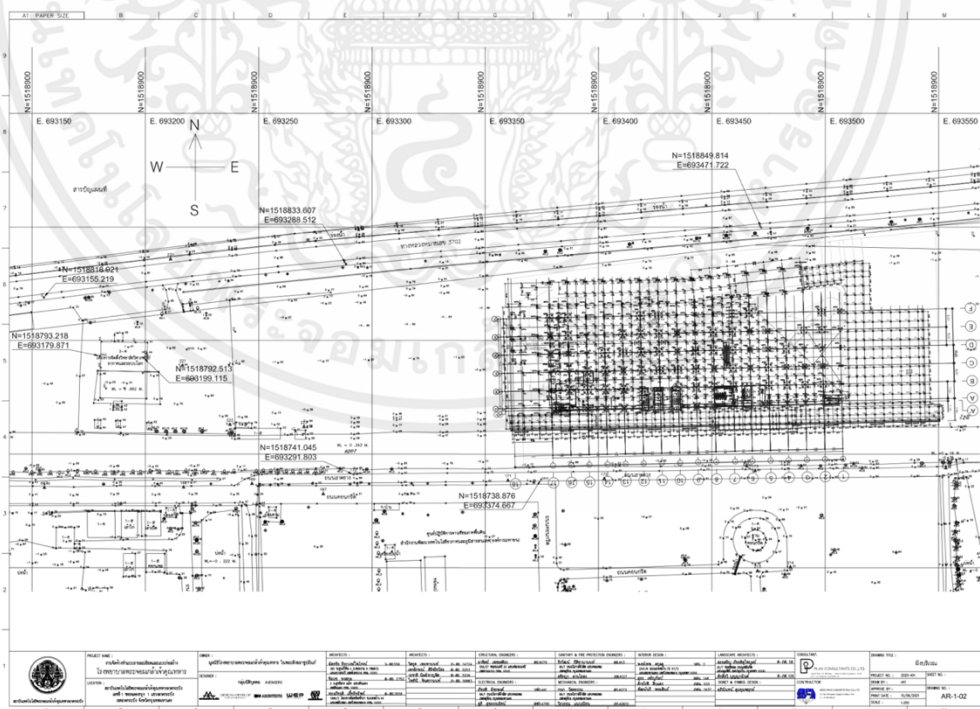
ฐานรากเสาเข็มตอกเป็นระบบฐานรากที่นิยมใช้สำหรับงานก่อสร้างอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่ที่ออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกสูง และสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่กำลังแบกทานของดินชั้นบนไม่สามารถรับน้ำหนักของอาคารได้ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการตอกเสาเข็มผู้ควบคุมการก่อสร้างสามารถควบคุมคุณภาพของเสาเข็ม ลดปัญหาที่เกิดจากความแปรปรวนของชั้นดินที่ส่งผลต่อระดับการวางตัวของปลายเสาเข็มบนชั้นดินแข็ง เพิ่มความสะดวกในการทำงาน และลดระยะเวลาในการก่อสร้างได้ อย่างไรก็ตามขณะตอกเสาเข็มเสาเข็มจะเข้าไปแทนที่ดินโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากทำการตอกเสาเข็มเข้าไปแทนที่ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะทำให้เกิดหน่วยแรงด้านข้าง และแรงดันน้ำส่วนเกิน ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และเกิดการอูท (Heave) ในแนวตั้ง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเสาเข็มที่ติดตั้งไปแล้ว รวมถึงอาคารข้างเคียง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวผิดไปจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ในงานก่อสร้าง และเกิดความเสียหายกับโครงสร้างอาคารข้างเคียงได้ (Massarch et al, 2013 ; Poulos , 1994 and Vytiniotis et al, 2018)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็ม เช่น Vytiniotis et al. (2018) ทำการตรวจตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ในสนาม และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างในโครงการการตอกเสาเข็มขนาดใหญ่ในดินเหนียวอ่อน พบว่า การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินบนระบบฐานรากเป็นเสาเข็มเกิดจากปัจจัยหลักคือ การตอกเสาเข็มในบริเวณข้างเคียง และยังคงพบการเคลื่อนตัวสะสมทางด้านข้างของดินในระยะที่ห่างจากจุดตอกออกไปในระยะทางที่มากกว่า 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทางด้านข้างส่วนใหญ่จะเคลื่อนไปในทิศทางที่มีทางลาดลง นอกจากนี้ Massarch et al (2013) ใช้แบบจำลองทางกายภาพ และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการศึกษาการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็มกลุ่มโดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม พบว่า แรงต้านทานของเสาเข็มที่ตอกแล้วต่อการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยมาก การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มกลุ่มมีความซับซ้อน โดยมีทิศทางการเคลื่อนตัวตามลำดับการตอกเสาเข็ม และการลดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกรณีตอกบนทางลาดคือให้เริ่มตอกที่ด้านบนของทางลาดและไล่ลงไป จะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินจากการตอกเสาเข็ม ประกอบด้วย คุณสมบัติของดินและชั้นดิน ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ระยะห่างของ

เสาเข็มกับโครงสร้างที่มีอยู่เดิม ลักษณะความลาดชันของพื้นที่ ความลึกการตอกเสาเข็ม ลำดับการ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอกเสาเข็ม เสาเข็ม และอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม เป็นต้น และสามารถคาดการณ์ได้ด้วยทฤษฎีการขยายตัวของช่องว่าง (cavity expansion) การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ การตรวจวัดในสนาม และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในการศึกษาวิจัยนี้ทางกลุ่มผู้วิจัยได้ตรวจสอบพบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มกลุ่มที่ตอกไปแล้วจากตำแหน่งที่กำหนดขณะกำลังตอกเสาเข็มต้นอื่นๆ ตามลำดับชั้นในพื้นที่โครงการการก่อสร้างโรงพยาบาลพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของโครงการ คือ 1) โครงการอยู่ในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นชั้นดินกรุงเทพฯ (ภาคผนวก 1) และ 2) มีลาดคลองขนานทั้ง 2 ด้านของพื้นที่โครงการ (รูปที่ 1.1 และ 1.2) การวางตัวของเสาเข็มมีลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่มากนัก (รูปที่ 1.3) จากข้อมูลที่ตรวจพบ กลุ่มผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสาเหตุและแนวทางการวางแผนการตอกเสาเข็มเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างของเสาเข็มในทีละตอกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินจากการตอกเสาเข็ม และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยใช้พารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯในการวิเคราะห์ตัวแปรที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินจากการตอกเสาเข็ม เก็บรวบรวมข้อมูล และเสนอแนะแนวทางในการตอกเสาเข็มเพื่อลดการเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 1.1 แผนผังของโครงการก่อสร้างแสดงลาดคลองขนานทั้ง 2 ด้านของพื้นที่โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 คลองที่ขุดในพื้นที่ของโครงการ



รูปที่ 1.3 ลักษณะการวางตัวของเสาเข็มที่แน่นหนาในโครงการ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกโดยพิจารณาเงื่อนไข ควบคุมในงานก่อสร้าง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เสนอแนวทางการวางแผนการตอกเสาเข็มเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกที่ติดตั้งแล้วทางด้านข้างซึ่งเกิดจากการตอกเสาเข็ม ข้างเคียงในชั้นดินกรุงเทพ
- 1.3.2 ข้อมูลลักษณะชั้นดินอ้างอิงตามข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่กรณีศึกษาพื้นที่โครงการการก่อสร้างโรงพยาบาลพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 1.3.3 พิจารณาเสาเข็มคอนกรีตกำลังสูงอัดแรงแบบแรงเหวี่ยงแบบปลายปิด (Closed end spun pile)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

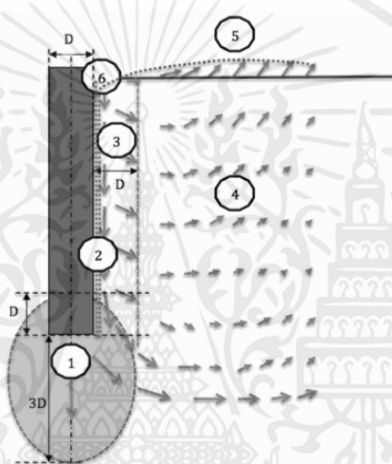
- 1.4.1 สามารถคาดการณ์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มตอกที่ติดตั้งแล้วซึ่งเกิดจากการตอกเสาเข็มข้างเคียงโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.2 สามารถกำหนดเงื่อนไขในการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างหรือให้เกิดน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อเป็นไม่ให้มีผลกระทบต่อตัวสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง หรือเสาเข็มที่ตอกไปแล้ว



ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ส่วนประกอบของดิน ระดับของน้ำใต้ดิน ประเภทของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม และ พลังงานการตอก เป็นต้น

### 2.1.2 การตอกเสาเข็มในดินเหนียว

เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปดินเหนียว หน่วยแรงด้านข้าง (Lateral stress) และแรงดันน้ำ (pore pressure) ในดินจะเพิ่มมากขึ้นและเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากการแทนที่ของเสาเข็มในดิน และที่บริเวณผิวดินจะเกิดการอูด (Heave) ในช่วงแรกและตามมาด้วยการทรุดตัวในภายหลังเมื่อแรงดันน้ำเกิดขึ้นได้ระบายออกไป การเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเสาเข็มขณะตอกเข็มในดินเหนียวอ่อนได้จากการสังเกตพฤติกรรมในการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ (Massarch et al,2013 ; Poulos, 1994 and Vytiniotis et al, 2018) มีลักษณะดังนี้ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของดินรอบเสาเข็มขณะตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน(Massarch et al,2013)

- บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่ดินถูกรบกวนได้ปลายเสาเข็ม เป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างการตอก เรียกว่าบัพ เมื่อเสาเข็มถูกตอกเข้าไปในดินความกว้างของบัพจะขนาดมีประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม โดยบัพจะขยายจะขยายตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มตามรูปที่ 4 ตามแบบจำลองที่รายงานโดย Randolph et al(1979) และ Ni et al.(2010) ที่วงรอบของบัพดินจะเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างเป็นหลัก ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบไปยังบริเวณอื่นๆ
- บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของทาบกันของเสาเข็มกับดินที่อยู่ติดกัน บริเวณนี้มีขนาดค่อนข้างเล็ก ความกว้างของบริเวณนี้ค่อนข้างน้อยและบาง โครงสร้างของดินเกือบจะถูกทำลายจนหมด มีความละเอียดอ่อนจนลักษณะคล้ายของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริเวณที่ 3 เป็นบริเวณที่เกิดการรบกวน มีขนาดประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 1 เสา เป็นบริเวณที่เกิดจาก undrained shear strength (ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ) โดยดินบริเวณนี้เคลื่อนที่ทางด้านข้างเป็นหลัก
- บริเวณที่ 4 เป็นบริเวณที่ได้รับความต้านทานของความดันจากบริเวณที่1 ในระหว่างการตอกเสาเข็ม โดยจากการวิเคราะห์ finite element รูปแบบของเวกเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนไปยังผิวดิน
- บริเวณที่ 5 เป็นบริเวณที่เกิดการยกตัวของผิวดิน (heave) โดยการยกตัวของผิวดินเกิดจากการตอกเสาเข็มจะมีขนาดเล็ก และมีระยะของการยกตัวประมาณ 0.3-1.0 ของความยาวเสาเข็ม
- บริเวณที่ 6 ที่บริเวณที่มักจะมีช่องว่าง หรือความกดอากาศระหว่างเสาเข็มกับดิน ผลกระทบนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ลงของปลายเสาเข็มในช่วงเริ่มต้น

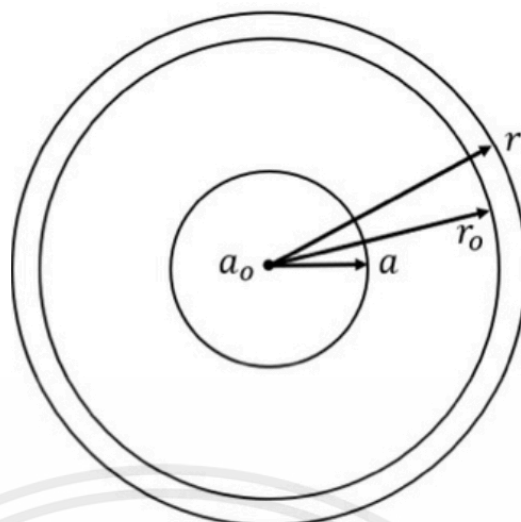
## 2.2 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มขณะตอก

เมื่อดินถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม ดินรอบข้างเสาเข็มจะเกิดการสะสม และทำให้ดินเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างส่งผลต่อเนื่องให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มด้วย โดยที่การเคลื่อนที่ของดินด้านข้างสามารถคาดการณ์ได้โดยใช้ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงทรงกระบอก

### 2.2.1 การขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Expansion of cylindrical cavity)

ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก คือการที่เมื่อตอกเสาเข็มไปแทนที่ดิน และทำให้เกิดการขยายตัวของช่องว่าง (cavity expansion) โดยดินที่ถูกแทนที่นั้นส่งผลต่อดินรอบ ๆ ทำให้ดินเกิดการเสียรูป เกิดความเค้น และเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในดินซึ่งเสนอโดย Bishop et al.(1945) ซึ่งอธิบายทฤษฎีในการคำนวณความเค้นที่ทำให้เกิดการขยายวงของการแข็งตัวของดินเนื่องจากการเกิดความเครียด (strain hardening) ของดิน

ในทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคใช้ทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกในการประมาณการเสียรูปของดิน และเปลี่ยนแปลงของความเครียด และแรงดันโพรงน้ำในดินขณะตอกเสาเข็ม โดยช่องว่าง (Cavity) มีรัศมีเริ่มต้น  $a_0$  ขยายเป็นช่องว่างซึ่งมีรัศมีเท่ากับรัศมีของเสาเข็ม  $a$  ที่ตอกลงดิน ดินที่ตำแหน่งวง  $r_0$  จะขยาย (เกิดการเคลื่อนตัว) เพิ่มเป็นรัศมี  $r$  ดังรูปที่ 2.3

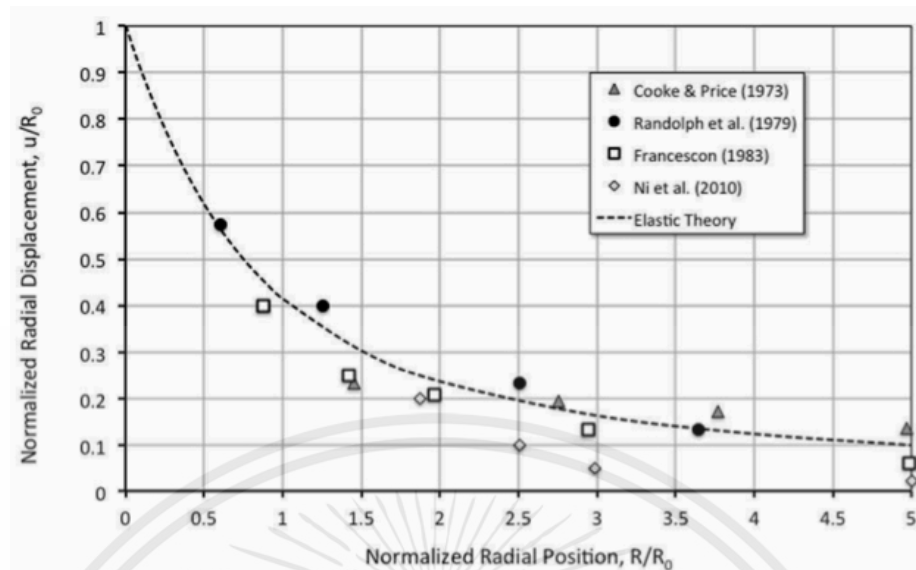


รูปที่ 2.3 การขยายตัวของโพรงทรงกระบอก

จากการศึกษาจากข้อมูลการตรวจวัดในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการของนักวิจัยหลายท่านพบว่า ปริมาตรของดินที่ถูกแทนจากการตอกเสาเข็มจะเท่ากับปริมาตรของเสาเข็มที่ตอกเข้าไปในชั้นดิน (Hagerty et al,1971) โดยดินจะมีการเคลื่อนด้านข้างอย่างมากเมื่อเมื่อความลึกการตอกเท่ากับ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (Cooke et al, 1973) และแบบจำลองเพื่อการสังเกตการเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเสาเข็มของดินเหนียวอ่อนซึ่ง (Ni et al,2010) ซึ่งจากการศึกษาข้างต้นทำให้ระบุได้ว่าการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างเนื่องจากการตอกเสาเข็มสามารถคาดการณ์ได้ด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกด้วยรัศมีที่เท่ากับรัศมีของเสาเข็ม ดังสมการที่ (1)

$$\frac{u}{r_0} = \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} - \frac{r}{r_0} \quad (1)$$

เมื่อ  $u$  คือระยะการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้าง  $r$  คือระยะทางในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของช่องว่างทรงกระบอกที่กำลังขยายตัว และ  $r_0$  คือรัศมีของช่องว่างทรงกระบอก หรือรัศมีของเสาเข็ม สมการที่ (1) นี้สามารถใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างที่เกิดจากการตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม และการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก ( Massarch et al,2013)

นอกจากนี้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกสามารถคาดการณ์ได้ด้วยสมการที่ (2) (Randolph et al., 1979)

$$p = 2 * Su * \ln \left( \frac{R}{r} \right) ; r_0 < r < R \quad (2)$$

$$\left( \frac{R}{r_0} \right)^2 = \frac{G}{Su} ; p = 0, r > R. \quad (3)$$

เมื่อ  $Su$  คือกำลังรับแรงที่ดินไม่มีการระบายน้ำ และ  $G$  คือค่าโมดูลัสแรงเฉือนแบบซีแคนท์ที่เหมาะสมสำหรับระดับแรงเฉือนที่เหนียวนำ ณ จุดนั้น มีรัศมีวิกฤติ  $R$  ซึ่งเกินกว่านั้นการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นผลจากการตอกเสาเข็มเพียงเล็กน้อย ภายใต้สมมุติฐานว่าเป็นวัสดุที่สามารถกลับคืนรูปได้บางส่วน (Elastoplastic material)

### 2.2.2 คุณสมบัติของดิน และลักษณะเฉพาะของชั้นดิน

เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปดินเหนียว หน่วยแรงด้านข้าง (Lateral stress) และแรงดันน้ำ (pore pressure) ในดินจะเพิ่มมากขึ้นและเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากการแทนที่ของเสาเข็มในดิน และที่บริเวณผิวดินจะเกิดการอูด (Heave) ดังนั้นคุณสมบัติของดิน และลักษณะเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นดินจึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ในหัวข้อนี้อธิบายคุณสมบัติของดิน และลักษณะเฉพาะของชั้นดินในพื้นที่เป้าหมายของการศึกษาส่งพบปัญหาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากการตอกเสาเข็มจำนวนมาก

#### 2.2.2.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพ

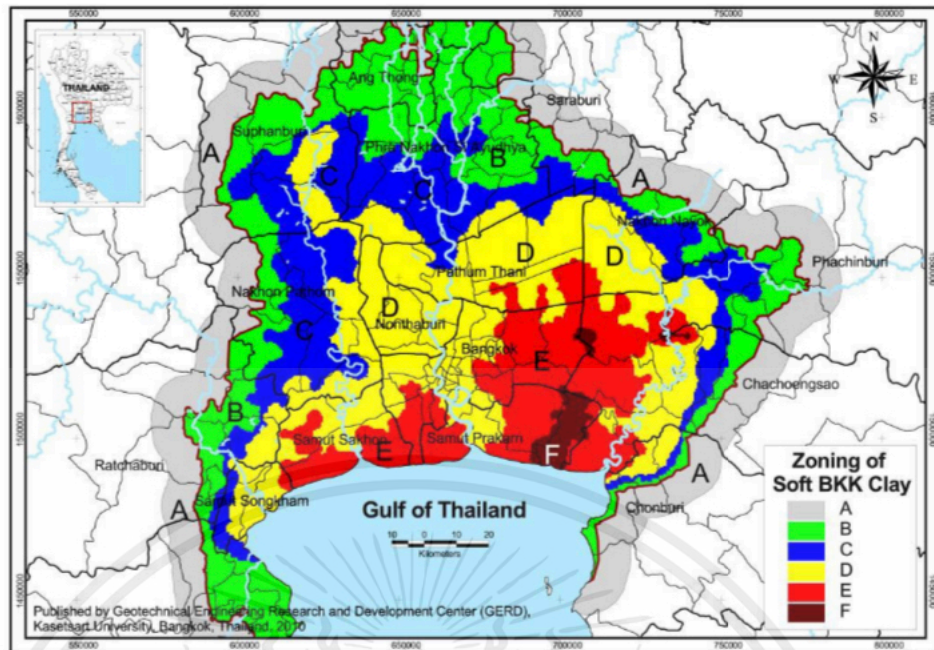
ชั้นดินกรุงเทพเกิดจากดินที่ถูกพัดพาจากจากแม่น้ำลงสู่ทะเลและน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตตะกอนบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง ทำให้เกิดดินที่มีการสะสมตัวจากแม่น้ำและน้ำกร่อย โดยตะกอนจะไปสิ้นสุดบริเวณจังหวัดอ่างทอง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ (Balasubramaniam et al,2009)

Soil type	Depth (m)	$w_n$ (%)	$w_l$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$ (%)	$\gamma$ (%)	e	$G_s$
Weathered Clay	0-2	35-70	35-55	-	23-30	16-18	1.3-1.4	2.6-2.7
Soft Clay	1-16	65-90	65-90	30-40	40-63	15-17	1.5-2.6	2.7
Stiff Clay	10-25	24-34	40-75	20-28	18.50	19-20	0.65-0.95	2.7-2.8
First sand	14-38	17-25	-	-	-	18-21	0.7	2.7
Hard clay	24-43	24-43	30-35	55-69	31-44	18-20	0.8-0.95	2.7
Second sand	30-58	20	-	-	-	18-26	0.75	2.7

#### 2.2.2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางถูกจัดแบ่งพื้นที่ออกเป็นกลุ่มๆ โดยใช้ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน และน้ำในดิน เป็นเกณฑ์ในการจำแนกออกเป็น 6 บริเวณ ดังรูปที่ 8 (Amonkul et al, 2553)แบ่งเป็น พื้นที่ A ถึง พื้นที่ F โดย พื้นที่ A หมายถึงบริเวณพื้นที่มีชั้นของดินเหนียวอ่อนหนาน้อยที่สุด และความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยพื้นที่ F จะมีชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนาที่สุด



รูปที่ 2.5 แผนที่จำแนกลักษณะดินเหนียวอ่อนในแต่ละบริเวณ (Amornkul et al,2010)

จากรูปที่ 2.5 สรุปได้ว่า

- Zone A เป็นพื้นที่ขอบนอกดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯขอบเขตสิ้นสุดห่างจาก Zone B ไปประมาณ 10 กิโลเมตร พบดินเหนียวค่อนข้างน้อย และดินเหนียวที่พบมีค่า water content, liquid limit, plastic index ต่ำมากและหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดินสูงถึง 2.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
- พื้นที่บริเวณ Zone B และ C เป็นพื้นที่สะสมตัวของดินเหนียวในน้ำทะเลบริเวณลาดเชิงเขาที่เป็นขอบนอกสุด Zone B เป็นขอบเขตสิ้นสุดการเกิดดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีตะกอนเชิงเขา และตะกอนธารน้ำไหลมารวมตัวปนกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทำให้มีพฤติกรรม และคุณสมบัติทางวิศวกรรมค่อนข้างดีกว่าพื้นที่ในแอ่ง
- พื้นที่บริเวณ Zone D เป็นพื้นที่ดินเหนียวอ่อนที่กินพื้นที่ในบริเวณกรุงเทพมหานครเป็นส่วนใหญ่ เนื้อที่ประมาณ 6,200 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมหลายจังหวัด
- Zone E และ F เป็นพื้นที่ที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ตอนล่างของจังหวัดปทุมธานี ตะวันตกของ ฉะเชิงเทรา ตะวันออกของกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการลงมาถึงอ่าวไทย และบริเวณจังหวัดที่ติดกับอ่าวไทยตั้งแต่สมุทรสาครไปจนถึง ฉะเชิงเทรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทางธรณีวิทยาของพื้นที่ Zone A ถึง D ได้ข้อสรุปลักษณะที่สำคัญได้แก่ พื้นที่ของ Zone ความหนาแน่นของดินเหนียวอ่อน และคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนของแต่ละพื้นที่ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจัดพื้นที่ และคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนในแต่ละบริเวณ (Amonkul ,2010)

Zoning	Area (km <sup>2</sup> )	Soft clay Thickness (m.)	Water Content (%)	Liquid Limit (%)	Plasticity Index (%)	Total unit Weight (t/m <sup>3</sup> )
A	9292.55	0-3	<20	<20	<10	>1.85
B	6171.75	3-6	20-40	20-40	10-20	1.75-1.85
C	4920.00	6-10	40-60	40-60	20-30	1.65-1.75
D	6186.50	10-14	60-80	60-80	30-50	1.55-1.65
E	3019.00	14-18	14-18	80-100	50-60	1.45-1.55
F	674.75	>18	>18	>100	>60	<1.45

โดยคุณสมบัติทางวิศวกรรม และพารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยข้อมูลจากการศึกษาของ Likitlersuang et al,2013 และ Bergado et al,1994 ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่บ่งบอกความเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Likitlersuang et al,2013)

คุณสมบัติ	Weathered Clay	Soft Clay	Stiff clay
Natural water content (%)	133±5	122-130	20-24
Natural voids ratio	3.86±0.15	3.11-3.64	1.10-1.30
Grain size distribution			
Sand(%)	7.5	4.0	23
Silt(%)	23.5	31.7	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clay(%)	69	64.3	34
Specific gravity	2.73	2.75	2.74
Liquid limit(%)	123±2	118±1	46±2
Plastic limit(%)	41±2	43±0.5	19±2
Dry unit weight(KN/m <sup>3</sup> )	15.8±0.3	16.5	15.5-16.5
Consistency	Soft	Soft	Stiff
Colour	Dark grey	Greenish grey	Greenish grey
Degree of Saturation(%)	95±2	98±2	94-100

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ(Bergado et al,1994)

ระดับใต้ผิวดิน	ชนิดของดิน	Model	พารามิเตอร์	Value
ชั้นที่ 1 0-1m.	Desiccated crust	Elastic-plastic	Young modulus ( $E$ )	4000 kPa
			Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.25
			Angle of friction ( $\Phi$ )	29°
			Unit weight ( $\gamma$ )	17.5 kN/m <sup>3</sup>
			Cohesion ( $C$ )	29 kPa
			Horizontal permeability ( $K$ )	13.9*10 <sup>-8</sup> m/sec
			Vertical permeability ( $K$ )	6.9*10 <sup>-8</sup> m/sec
ชั้นที่ 2 1-2m.	Soft clay	Modified Cam clay	Gamma ( $\Gamma$ ) at $p' = 1\text{kN/m}^2$	3
			Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.25
			Lambda ( $\lambda$ )	0.18
			Kappa ( $\kappa$ )	0.04
			$M$	1.1
			Unit weight ( $\gamma$ )	17.5 kN/m <sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

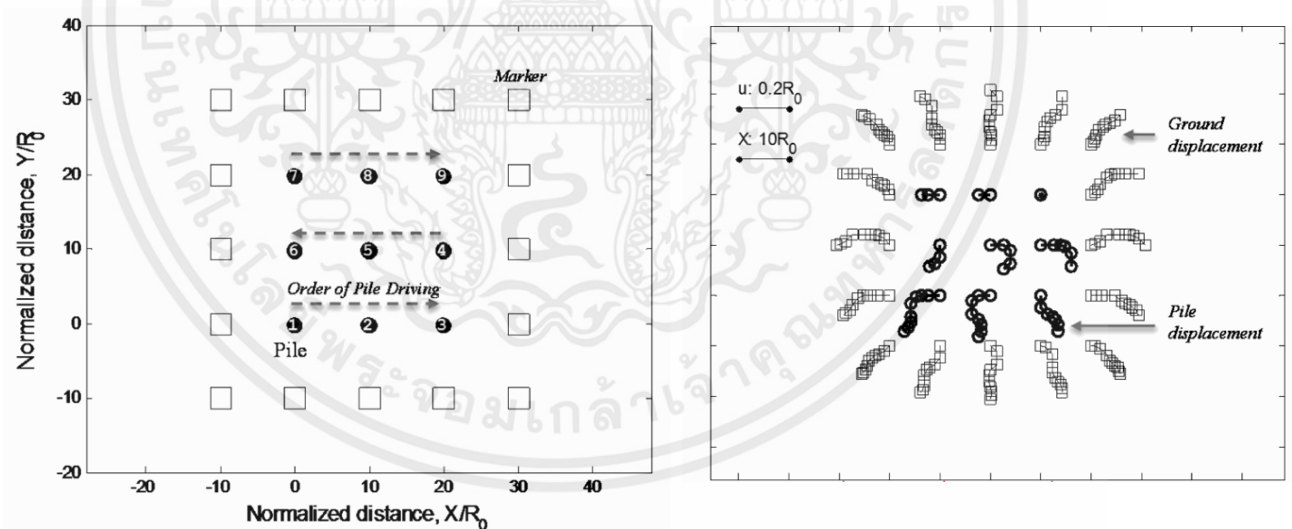
			Horizontal permeability ( $K$ )	$13.9 \cdot 10^{-8}$ m/sec
			Vertical permeability ( $K$ )	$6.9 \cdot 10^{-8}$ m/sec
ชั้นที่ 3 2-6m.	Soft clay	Modified Cam clay	Gamma ( $\Gamma$ ) at $p' = 1 \text{ kN/m}^2$	5.12
			Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3
			Lambda ( $\lambda$ )	0.51
			Kappa ( $\kappa$ )	0.11
			$M$	0.9
			Unit weight ( $\gamma$ )	15 kN/m <sup>3</sup>
			Horizontal permeability ( $K$ )	$2.1 \cdot 10^{-8}$ m/sec
			Vertical permeability ( $K$ )	$1 \cdot 10^{-8}$ m/sec
ชั้นที่ 4 6-8m.	Soft clay	Modified Cam clay	Gamma ( $\Gamma$ ) at $p' = 1 \text{ kN/m}^2$	4.0
			Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3
			Lambda ( $\lambda$ )	0.31
			Kappa ( $\kappa$ )	0.07
			$M$	0.95
			Unit weight ( $\gamma$ )	16.5 kN/m <sup>3</sup>
			Horizontal permeability ( $K$ )	$2.1 \cdot 10^{-8}$ m/sec
			Vertical permeability ( $K$ )	$1 \cdot 10^{-8}$ m/sec
ชั้นที่ 5 8-12m.	Soft clay	Modified Cam clay	Gamma ( $\Gamma$ ) at $p' = 1 \text{ kN/m}^2$	2.9
			Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.25
			Lambda ( $\lambda$ )	0.18
			Kappa ( $\kappa$ )	0.04
			$M$	1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			Unit weight ( $\gamma$ )	17.5 kN/m <sup>3</sup>
			Horizontal permeability ( $K$ )	13.9*10 <sup>-8</sup> m/sec
			Vertical permeability ( $K$ )	6.9*10 <sup>-8</sup> m/sec

### 2.2.3 การเคลื่อนที่สะสมของดินทางด้านข้าง (Cumulative Lateral Displacement)

การเคลื่อนที่ของดิน และเสาเข็มกรณีตอกเสาเข็มกลุ่มในพื้นที่ราบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามทิศทางตามลำดับขั้นตามตอกเสาเข็ม การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็มจะสามารถเกิดขึ้นกับเสาเข็มที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้วเท่านั้น แต่การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของดินเป็นผลสะสมของเสาเข็มทั้งหมด ที่ทำการติดตั้ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการสร้างแบบจำลองย่อส่วนทางกายภาพโดยทำการตรวจวัดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของดิน และเสาเข็มตามลำดับขั้นการตอกเสาเข็มที่กำหนด ดังรูปที่ 2.6



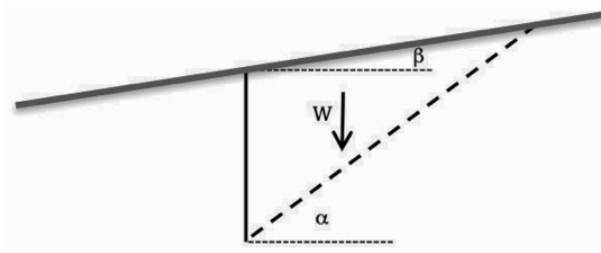
(a)

(b)

รูปที่ 2.6 a) รูปแบบ และลำดับขั้นการตอกเสาเข็ม และ b) การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของดินและเสาเข็มตามลำดับขั้นการตอกเสาเข็ม (Wersall and Massarsch, 2013)

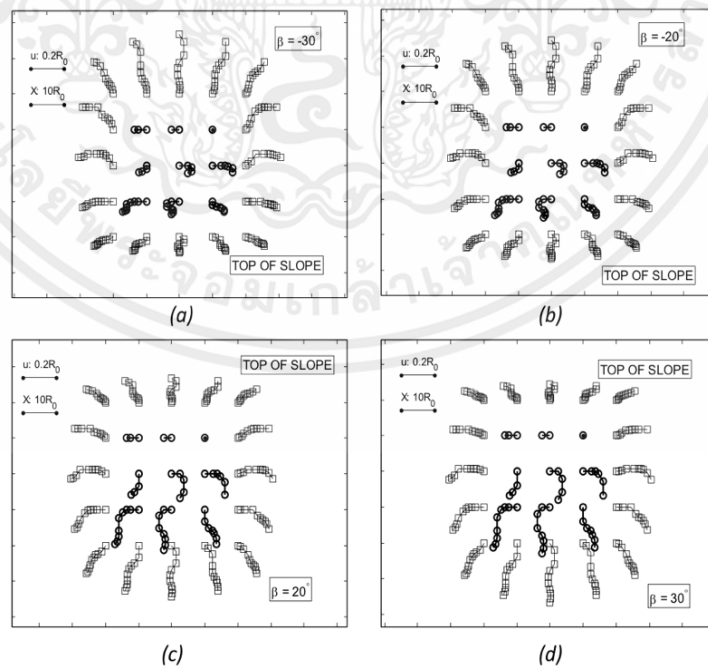
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 พื้นผิวลาดเอียง (Inclined Ground Surface)



รูปที่ 2.7 ข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับผลกระทบของพื้นผิวลาดเอียงต่อการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Massarsch et al.,2013)

อิทธิพลของความลาดเอียงของลาดดินเหนียวต่อการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างเนื่องจากการตอกเสาเข็ม สามารถอธิบายอย่างง่ายภายใต้สมมติฐานของแรงต้านทานทางด้านข้างที่ดินกระทำ (Lateral passive earth pressure) ต่อการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยลำดับขั้นการตอกเสาเข็มบริเวณลาดดินเหนียวจากด้านบนของลาดดินไปยังด้านล่างลาดดิน จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่น้อยกว่าลำดับขั้นการตอกจากด้านล่างขึ้นด้านบน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนตัวของดินรอบกลุ่มเสาเข็มจะไม่ได้รับอิทธิพลจากความลาดเอียงของลาดดินเหนียว ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน และเสาเข็มที่ติดตั้งแล้วบนทางลาดเอียงดินเหนียวเมื่อกำหนดระดับขั้นการตอกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความลาดเอียงต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินและเสาเข็ม (Massarsch et al.,2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.5 เงื่อนไขในการก่อสร้าง

### 2.2.5.1 ความลึก และขนาดของเสาเข็ม

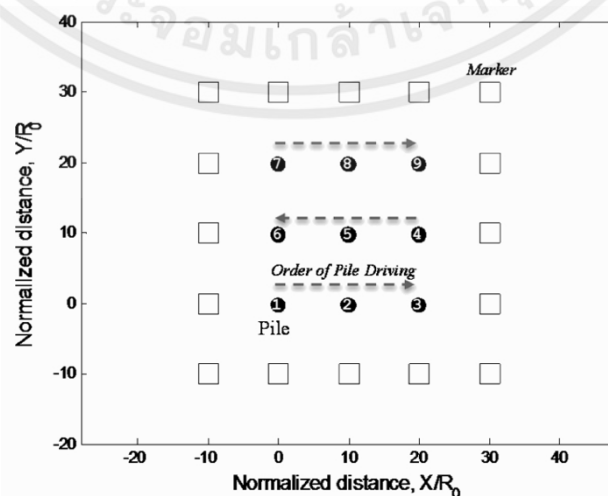
เนื่องจากการตอกเสาเข็มจะทำให้เกิดการแทนที่ดินซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเคลื่อนตัวของมวลดินในบริเวณก่อสร้างและพื้นที่ข้างเคียงได้ การเลือกใช้เสาเข็มที่มีปริมาตรน้อยจะช่วยลดปัญหาจากการเคลื่อนตัวของดินได้ ในกรณีที่ใช้เสาเข็มขนาดใหญ่ และยาวควรกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม มากกว่า 3 - 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินแต่ต้องระวังปัญหาจากการสั่นสะเทือนเพราะต้องตอกลงลึกและใช้พลังงานการตอกมาก (มยพ. 1106 มาตรฐานการป้องกันอาคารข้างเคียงจากการตอกเสาเข็ม)

### 2.2.5.2 กลุ่มของเสาเข็ม (ความหนาแน่นของเสาเข็ม)

ความหนาแน่นของเสาเข็มนั้นยังมีจำนวนของเสาเข็มมากเท่าไร จะส่งผลกระทบต่อเคลื่อนตัวทางด้านข้างได้มาก เนื่องจากจะเกิดจากเคลื่อนที่แบบเสริมแรงกันของเสาเข็ม โดยแรงที่สะสมจะส่งผลให้ดินเกิดการเคลื่อนที่ของดิน ทำให้ยังมีเสาเข็มมากดินก็จะเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น และเสาเข็มไม่ต้านทานการเคลื่อนที่กับดิน (มยพ. 1106 มาตรฐานการป้องกันอาคารข้างเคียงจากการตอกเสาเข็ม)

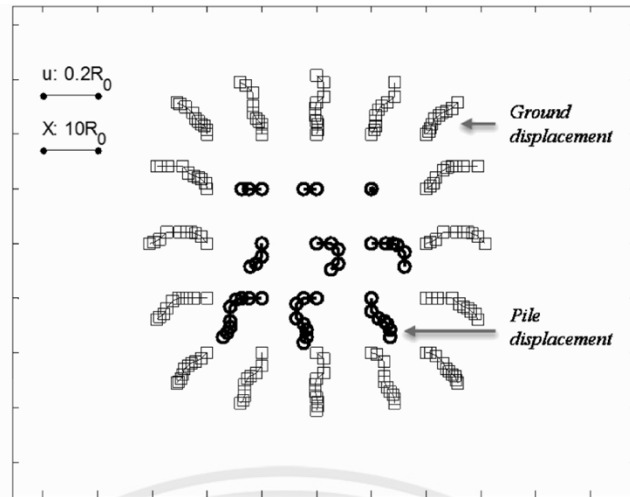
### 2.2.5.3 ลำดับการตอกเสาเข็ม

การตอกเสาเข็มโดยทั่วไปควรจะเริ่มจากใจกลางกลุ่มเสาเข็มก่อนและทยอยตอกสู่กลุ่มเสาเข็มที่อยู่ขอบหรือริมกลุ่มเพราะการเคลื่อนตัวจะกระจายออกนอกกลุ่มเสาเข็ม แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการจำกัดการเคลื่อนตัวนอกบริเวณตอกเสาเข็มให้น้อยลงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงอาจจำเป็นต้องตอกเสาเข็มใกล้สิ่งปลูกสร้างข้างเคียงเป็นแนวป้องกันก่อนแล้วตอกเสาเข็มถอยตั้งฉากออกจากแนวป้องกันการเคลื่อนตัวของมวลดินก็จะเคลื่อนตัวตามแนวการตอกเสาเข็มโดยเสาเข็มต้นที่ตอกแล้วจะทำหน้าที่เป็นแนวป้องกันใหม่ไม่ให้มวลดินเคลื่อนที่เข้าหาแนวป้องกันเดิม



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงทางเรขาคณิตและลำดับการตอกเสาเข็ม (Massarch et al., 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มทางด้านข้างหลังการติดตั้งเสาเข็มจากรูปที่ 2.9 (Massarsch et al., 2013)

รูปที่ 2.10 เป็นการจัดเรียงเสาเข็มตามรูปแบบเรขาคณิตและรูปแบบการติดตั้งเสาเข็ม โดยแสดงการติดตั้งเสาเข็ม 9 เสา (วงกลม) และมาร์คเพื่อระบุตำแหน่งของดินก่อนการติดตั้งเสาเข็ม (สี่เหลี่ยม)

รูปที่ 2.9 แสดงการเคลื่อนที่ของเสาเข็มที่ติดตั้งไว้ และการเคลื่อนที่ของมาร์คที่ติดตั้งไว้ โดยการเคลื่อนที่ของมาร์คจะเคลื่อนที่ออกจากกลุ่มเสาเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มขนาด 0.3 ม. ( $R_0=0.15$  ม.) ระยะห่างระหว่างเสาเข็มสองเสาที่อยู่ติดกันคือ 1.5 ม. และสเกลมีขนาด 1.5 ม. การเคลื่อนที่ของมาร์คจะอยู่ที่ประมาณ  $0.2R_0$  หรือ 0.03 ม. การเคลื่อนที่ของมาร์คจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ขณะที่ความยาวเสาเข็มดูจะไม่เกี่ยวข้อง และในพื้นที่ที่เรียบ การเคลื่อนที่ด้านข้างของมาร์คที่ตำแหน่งสุดท้ายจะมีความสมมาตรกัน จนเกือบจะเหมือนกันทุกประการ ในขณะที่การกระจัดของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับลำดับการติดตั้งเสาเข็ม

## 2.2.6 แนวทางการวิเคราะห์ และตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มขณะตอกในชั้นดินเหนียวอ่อน

### 2.2.6.1 สูตรการคำนวณทางประสบการณ์ (Empirical formulation)

สูตรคาดการณ์การคำนวณการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างในดินเหนียวด้วยทฤษฎีทรงกระบอกดังแสดงไว้ในสมการที่ (1)

สูตรการคาดการณ์แรงดันน้ำส่วนเกินจากการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกดังแสดงไว้ในสมการที่ (2) และ (3)

### 2.2.6.2 Physical model test

เริ่มจากการทำโมเดลเสาเข็มเดี่ยว เพื่อหาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยว จากนั้นเพิ่มจำนวนเสาเข็มให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเสาเข็ม และกำหนดตัวแปรในการเคลื่อนตัวของเสาเข็มให้มากขึ้น เช่น การจัดลำดับการตอกเสาเข็ม, ความยาวของเสาเข็ม เพื่อทราบลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในดินเหนียวอ่อนที่ครอบคลุม

### 2.2.6.3 การทดสอบในสนาม

การติดตั้ง surface settlement point เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวที่ผิวดินในแนวตั้งและแนวราบ ของลาดดินริมคลองทั้งสองด้านของโครงการ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม โดยจะมีการตรวจสอบตำแหน่งและระดับของ settlement point ทุกวันเพื่อเทียบกับกิจกรรมการก่อสร้างที่เกิดขึ้น

ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบ (Inclinometer) เพื่อใช้ในการวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบในระดับความลึกที่ต่างกัน และใช้เปรียบเทียบกับ การคาดการณ์ด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก และ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Vytiniotis, 2018)

### 2.2.6.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

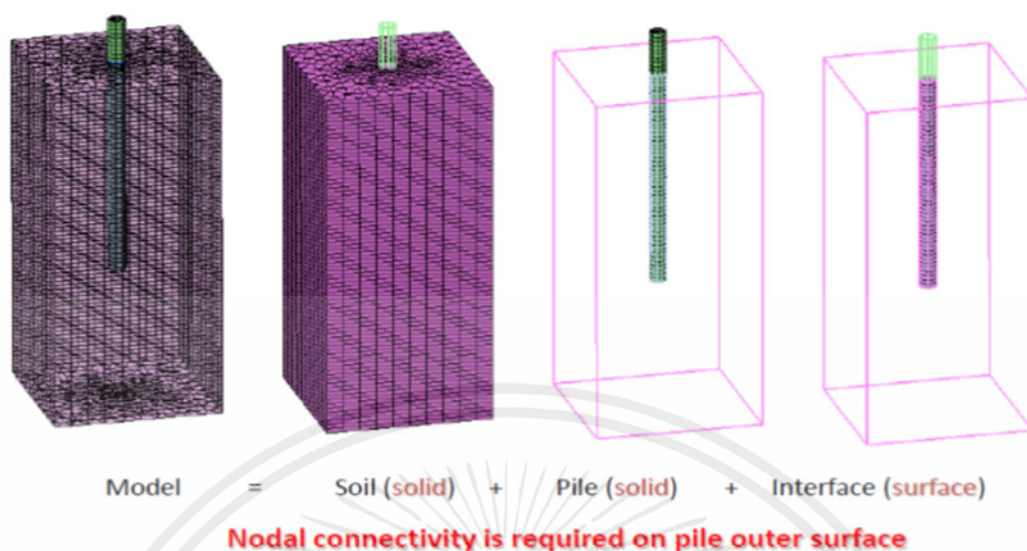
GTS NX คือโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อคาดการณ์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์งานชุด งานถม การให้แรงกระทำ และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อ การออกแบบ และก่อสร้าง สามารถวิเคราะห์เงื่อนไขในสนามต่างๆได้โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear analysis) เช่น การวิเคราะห์แบบแบบสถิต และพลศาสตร์กรณีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง หรือไม่ เป็นเส้นตรง การไหลซึมผ่าน และ การวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์แบบพฤติกรรมรวม (coupled analysis) ต่างๆ

#### 2.2.6.4.1 การจำลองโมเดลในระบบไฟไนต์เอลิเมนต์มี 3 ประเภท

- การจำลองแบบ Solid Element Method (SEM)

การจำลองเสาเข็มในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Solid Element Method (SEM) เป็นแนวคิดการจำลองให้ดินและเสาเข็มถูกจำลองให้เป็นองค์ประกอบเอลิเมนต์ของแข็ง โดยมีการสร้างพื้นผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม(interface) ในแบบจำลองเหล่านี้เพื่อเป็นการเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายนอกที่พื้นผิวของเสาเข็มกับดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยทางผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง Solid Element Method นี้เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถขยายเอลิเมนต์ของแข็งของเสาเข็มเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม เมื่อติดตั้งเสาเข็มแบบแทนที่ดินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แบบจำลอง 3 มิติของเสาเข็มที่มีองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง (SEM)

(A. Abdolrezayi et al,2021)

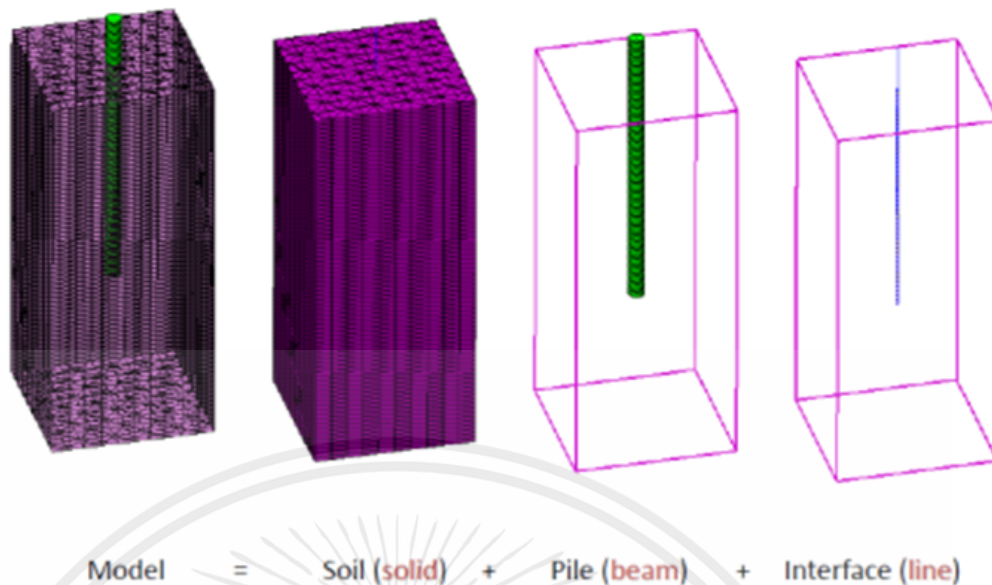
ข้อจำกัดของแบบจำลอง SEM มีดังต่อไปนี้

- การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง มีความซับซ้อน
- องค์ประกอบหลายอย่างถูกสร้างขึ้นในโมเดลเหล่านี้ซึ่งต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ที่มีการจำลองเสาเข็มจำนวนมากทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากโดยเฉพาะการศึกษาแบบพารามेटริก (Parametric study)
- ผู้ใช้ไม่สามารถหาแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดในเสาเข็มได้โดยตรง และผู้ใช้ควรคำนวณ ซึ่งทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ฐานราก เสาเข็มแบบพารามेटริก

- การจำลองแบบ Beam Solid Connectivity Model (BSCM)

การจำลองเสาเข็มในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Beam Solid Connectivity Model (BSCM) ดินจะถูกจำลองเป็นองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง แต่เสาเข็มถูกจำลองเป็นคานหรือองค์ประกอบเชิงเส้น และถ้าจำเป็นต้องพิจารณาการเคลื่อนตัวระหว่างเสาเข็มกับดิน หรือลดแรงเสียดทานสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดิน ให้ใช้เส้น องค์ประกอบอินเทอร์เฟซที่แสดงในรูปที่ 2.12 สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองเหล่านี้จำเป็นต้อง มีการเชื่อมต่อระหว่างเสาเข็มกับดินตามความยาวของเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โมเดล 3 มิติของเสาเข็มและดินที่มืองค์ประกอบเชื่อมต่อแบบ Beam+Solid(BSCM)  
(Abdolrezayi et al,2021)

ข้อจำกัดของแบบจำลอง BSCM มีดังต่อไปนี้

- สำหรับฐานรากแพที่มีเสาเข็มจำนวนมาก วิธีการสร้างแบบจำลองนี้นำไปสู่แบบจำลองที่ใหญ่ขึ้นพร้อมเวลาในการประมวลผลที่มากขึ้น แม้ว่าเวลาในการประมวลผลในแบบจำลองเหล่านี้จะต่ำกว่าแบบจำลอง SEM สำหรับเสาเข็มมาก

- การจำลองแบบ Embedded Pile Method (EPM)

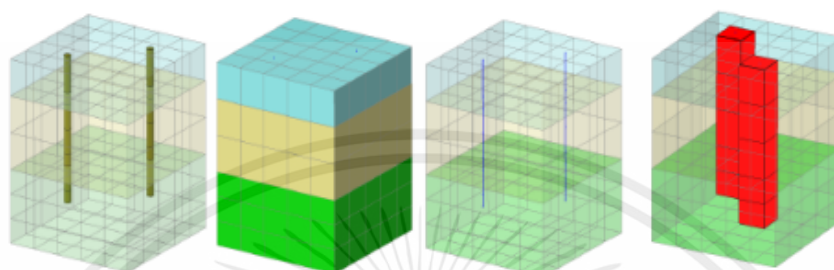
ในแบบจำลองนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดินถูกสร้างแบบจำลองโดยองค์ประกอบที่เป็นของแข็งและ เสาเข็มที่มืองค์ประกอบส่วนต่อประสานคานหรือเส้น

พื้นผิวสัมผัสมี 2 ชนิดคือ

- พื้นผิวสัมผัสแรกที่ใช้คือเชื่อมต่อเส้นกับของแข็ง (line to solid interface) สำหรับการสร้างแบบจำลอง แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินและความสามารถในการรับน้ำหนักด้านข้างและการกระจัดของเสาเข็ม
- พื้นผิวสัมผัสที่สองที่ใช้คือเชื่อมต่อจุดกับของแข็ง (point to solid interface) สำหรับการสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการรับน้ำหนักของปลายเสาเข็มและการกระจัดระหว่างดินกับเสาเข็มที่ปลายเสาเข็ม วิธีนี้ทำโดยการกำหนดพารามิเตอร์และองค์ประกอบของพื้นผิวที่เชื่อมต่อกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพิจารณาการกระจัดระหว่างเสาเข็มและดิน ในแบบจำลองนี้ ไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อโหนดระหว่างคานกับองค์ประกอบของดิน และการสร้างตาข่าย (Meshing) ดินสามารถทำได้แยกต่างจากการตอกเสาเข็ม ซึ่งทำให้แบบจำลองเหล่านี้เหมาะสำหรับฐานรากแพขนาคใหญ่



$$\text{Model} = \text{Soil (solid)} + \text{Pile (beam)} + \text{Interface (line-to-solid)}$$

รูปที่ 2.13 โมเดล 3 มิติของเสาเข็มและดินที่มีองค์ประกอบเชื่อมต่อแบบ embedded piles (EPM) (Abdolrezayi et al,2021)

#### 2.2.6.3.2 วิธีควบคุมการกระจัดของโพรงทรงกระบอก

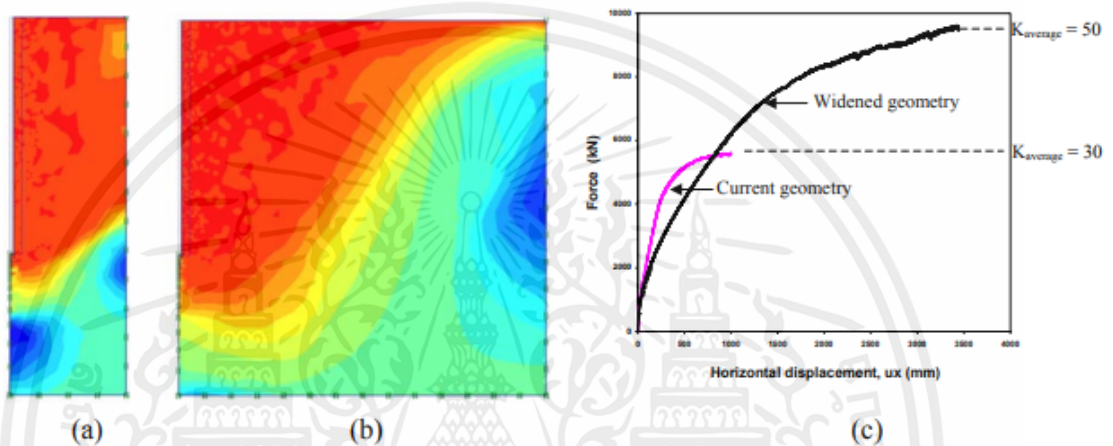
อีกวิธีหนึ่งในการจำลองการติดตั้งเสาเข็มคือการใช้การควบคุมการกระจัดของโพรงทรงกระบอก ซึ่งทำได้โดยการกำหนดการเคลื่อนที่ในแนวอนที่สม่ำเสมอบนผนังของช่องว่างกำแพง วิธีนี้ถูกใช้โดย Debats et al,2003 เพื่อจำลองการติดตั้งเสาเข็ม และ Dijkstra et al,2006 เพื่อใช้จำลองการติดตั้งเสาเข็ม

- การติดตั้งเสาเข็มด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ของโพรงทรงกระบอก  
ขั้นตอนการติดตั้งเสาเข็ม เริ่มต้นด้วยการตั้งค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions) หลังจากนั้นองค์ประกอบของเสาเข็มจะถูกปล่อยออกเพื่อสร้างโพรงทรงกระบอกตามแนวเส้นกึ่งกลางตามด้วยผนังโพรงที่ขยายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยการกำหนดการเคลื่อนที่ในแนวอน นอกเหนือจากนั้นความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_v = \gamma_{\text{unsat}} \cdot L$ ) จะถูกนำมาใช้กับด้านล่างของโพรงทรงกระบอก โดยที่  $L$  คือความยาวของการฝังเสาเข็ม

หลังจากขั้นตอนการควบคุมการกระจัดของโพรงทรงกระบอก เสาเข็มจะถูกฝังลงในโพรงทรงกระบอก ในการทำเช่นนั้น การกระจัดในแนวอนที่กำหนดรวมทั้งความเค้นในแนวตั้งที่ด้านล่าง

ของโครงทรงกระบอกจะถูกถอดออก ในกระบวนการนี้ แบบจำลองดินแข็งจะถูกนำมาใช้โดยตรงในระหว่างขั้นตอนการติดตั้ง สิ่งนี้ทำได้เนื่องจากเป็นขั้นตอนการติดตั้งที่ง่ายที่สุดและการขยายโครงกระบอกถูกบังคับใช้ให้เป็นแบบเดียวกัน นอกจากนี้ ยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากขั้นตอนการติดตั้งที่ง่ายที่สุดกับ ขั้นตอนที่ถูกดัดก่อนหน้า

รูปที่ 2.14a และ 2.14b แสดงกลไกการพังทลายของบล็อกดินโดยรอบ เนื่องจากการขยายตัวของโครงทรงกระบอกอย่างสม่ำเสมอ ด้วยตาข่ายปกติ (Mesh) และตาข่ายที่กว้างขึ้นตามลำดับ เส้นโค้งการแทนที่โหลดที่สอดคล้องกันแสดงในรูปที่ 2.14c แรงที่ได้มาจากการคำนวณเป็นกิโลนิวตันต่อเรเดียน(kN/Radian) และนำมาคูณด้วย  $2\pi$  เพื่อให้ได้แรงทั้งหมดที่กระทำภายในโครง



รูปที่ 2.14 : (a) บล็อกกลไกการพังด้วยตาข่ายปกติ(Mesh)  
 (b) ด้วยตาข่ายที่กว้างขึ้น (Widened Mesh)  
 (c) แรงที่ใช้สอดคล้องกัน (Syawal SATIBI,Msc.,2007,P21)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกโดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในงานก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนดังนี้

#### 3.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอก

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการจำลองการตอกเสาเข็ม และคู่มือการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ MIDAS GTS NX สามารถสรุปแนวทางการจำลองเสาเข็มในงานวิจัยนี้ดังนี้

##### 3.1.1 การจำลองเสาเข็มในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Solid Element Method (SEM)

การจำลองเสาเข็มในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Solid Element Method (SEM) เป็นแนวคิดการจำลองให้ดินและเสาเข็มถูกจำลองให้เป็นองค์ประกอบเอลิเมนต์ของแข็ง โดยมีการสร้างพื้นผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม (interface) ในแบบจำลองเหล่านี้เพื่อเป็นการเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายนอกที่พื้นผิวของเสาเข็มกับดิน โดยทางผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง Solid Element Method นี้เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถขยายเอลิเมนต์ของแข็งของเสาเข็มเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม เมื่อติดตั้งเสาเข็มแบบแทนที่ดินได้

##### 3.1.2 กำหนดพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการศึกษาคู่มือการวิเคราะห์คู่มือการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ MIDAS GTS NX ในการจำลองเสาเข็ม คณะผู้ศึกษาได้กำหนดแบบจำลองพฤติกรรมของชั้นดิน และเสาเข็มรวมทั้งพารามิเตอร์ของวัสดุที่แสดงในตารางที่ 3.1 โดยชั้นดินที่กำหนดในการศึกษาอ้างอิงตามผลเจาะสำรวจของชั้นดินบริเวณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน

พารามิเตอร์	ชั้นดินถม (Crust) (Bergado et. al, 2012)	ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) (Bergado et al,2012)	ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (Likitlersuang et al,1994)	เสาเข็ม (Pile)
วัสดุ	Isotropic	Isotropic	Isotropic	Isotropic
แบบจำลอง	Mohr Coulomb	Modified Cam Clay	Mohr coulomb	Elastic
พารามิเตอร์ทั่วไป				
Elastic Modulus (kPa)	4000	10000	27500	2E7
Poisson's Ratio	0.25	0.3	0.495	0.2
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	17.5	16.5	19.5	24
Ko	0.6	0.5	0.6	1
<b>Porous</b>				
Unit weight (Saturated)	20	16.5	19.5	-
Initial void ratio	2	3	1.2	-
Drainage parameter	Drained	Drained	Drained	-
kx (m/s)	13.9E-8	2.1E-8	13.9E-8	-
ky (m/s)	13.9E-8	2.1E-8	13.9E-8	-
kz (m/s)	6.9E-8	1.0E-8	6.9E-8	-
Void ratio dependency of permeability	0.5	0.5	0.5	-
<b>Non-linear</b>				
OCR	-	1	-	-
Slope of consolidation line	-	0.31	-	-
Slope of over consolidation line	-	0.07	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ชั้นดินถม (Crust) (Likitlersuang ,1994)	ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) (Bergado et al,2012)	ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (Likitlersuang et al,1994)	เสาเข็ม (Pile)
Slope of critical state line	-	0.95	-	-
Pc (kPa)	-	110	-	-
Allowable Tensile stress (kPa)	-	100	-	-
Cohesion (kPa)	1	-	25	-
Frictional angle (degree)	25	-	26	-

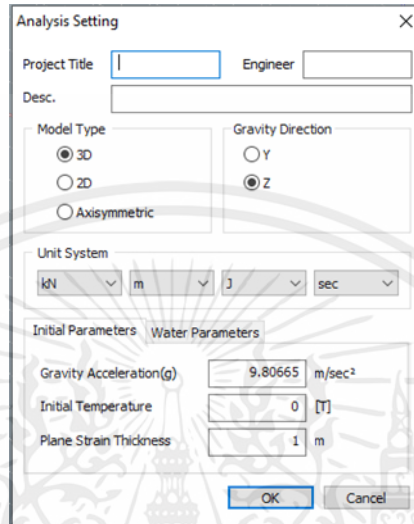
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลอ้างอิงจากการเจาะทดสอบชั้นดินสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

Depth	Soil
0-2	Crust
2-17	Very soft to Soft Clay
17-25	Stiff Clay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

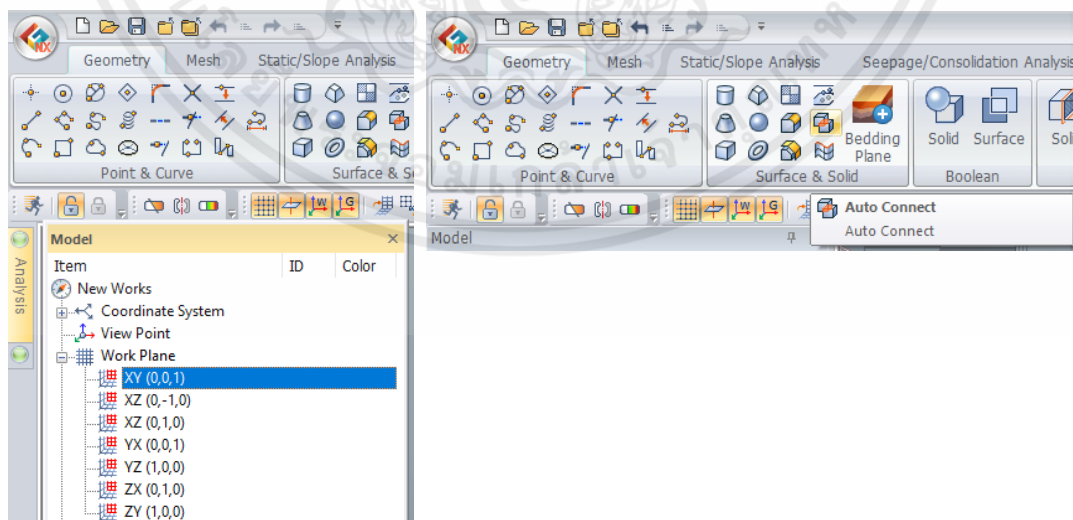
### 3.1.3 แนวทางการจำลองการติดตั้งเสาเข็มตอกด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

- I) สร้างไฟล์ใหม่ ทำการกำหนดชื่อเรื่อง ผู้จัดทำ กำหนดประเภทของแบบจำลองเป็นแบบ 3 มิติ กำหนดทิศทางแรงโน้มถ่วงที่ทิศทางแกน Z และทำการกำหนดค่าความเร่งโน้มถ่วงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 การสร้างไฟล์การทำงานใหม่

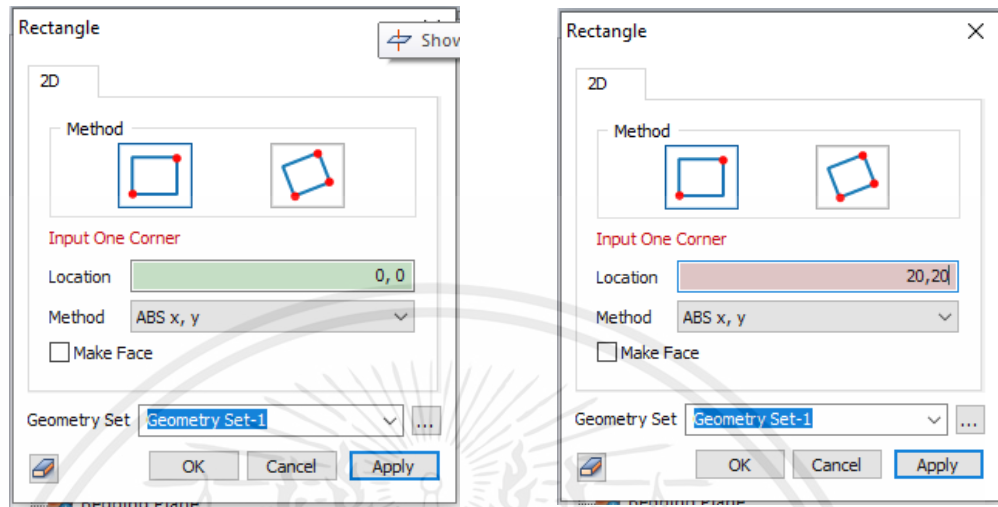
- II) สร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของแบบจำลอง
- เปลี่ยนระนาบการทำงานเป็น XY ดังรูปที่ 3.2



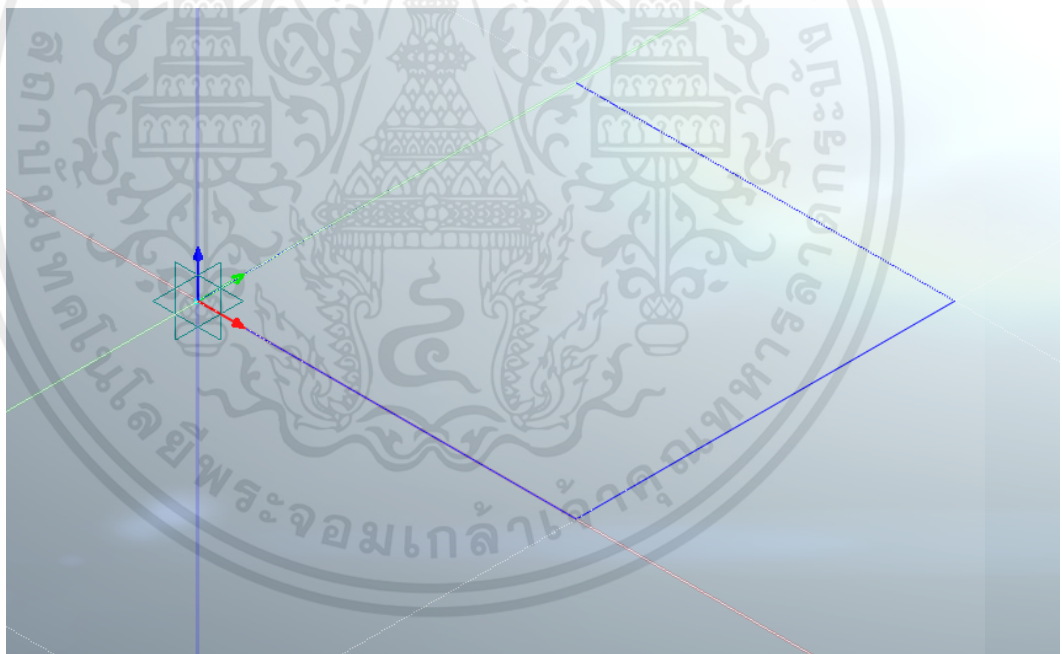
รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนระนาบการทำงานใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สร้างระนาบของดิน กำหนดที่ตั้ง และขนาดของแบบจำลองดิน ดังรูปที่ 3.3



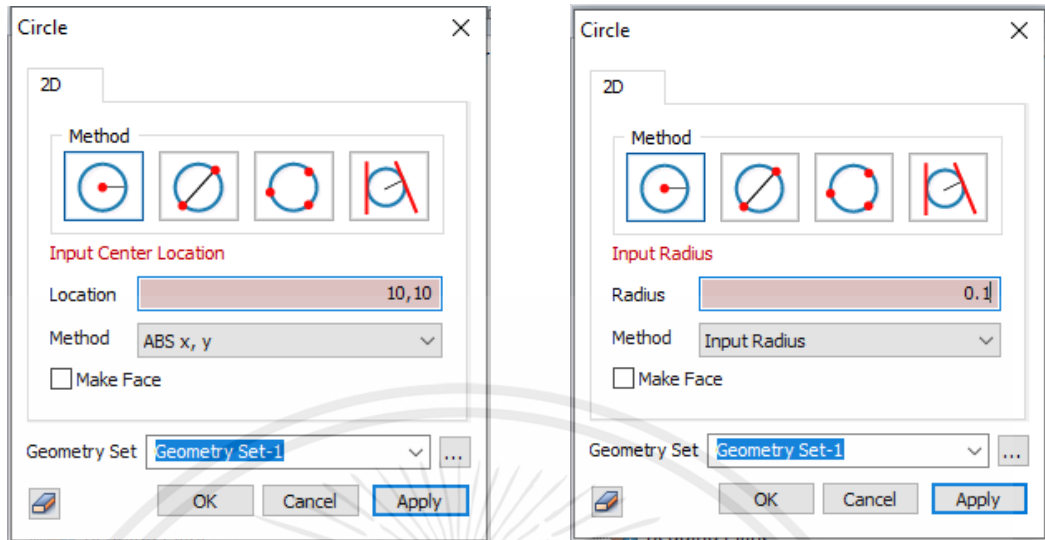
รูปที่ 3.3 การสร้างระนาบดิน



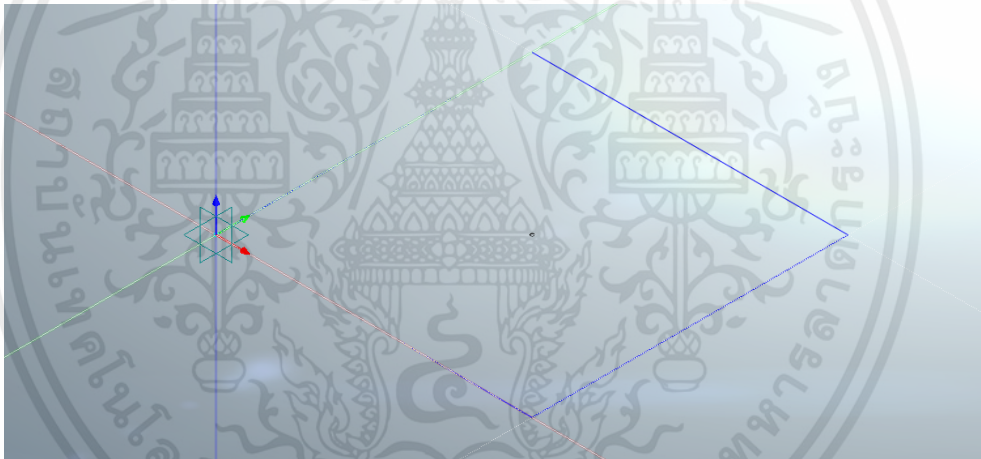
รูปที่ 3.4 ระนาบดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สร้างระนาบของเสาเข็ม กำหนดที่ตั้ง และขนาดของแบบจำลองเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.5



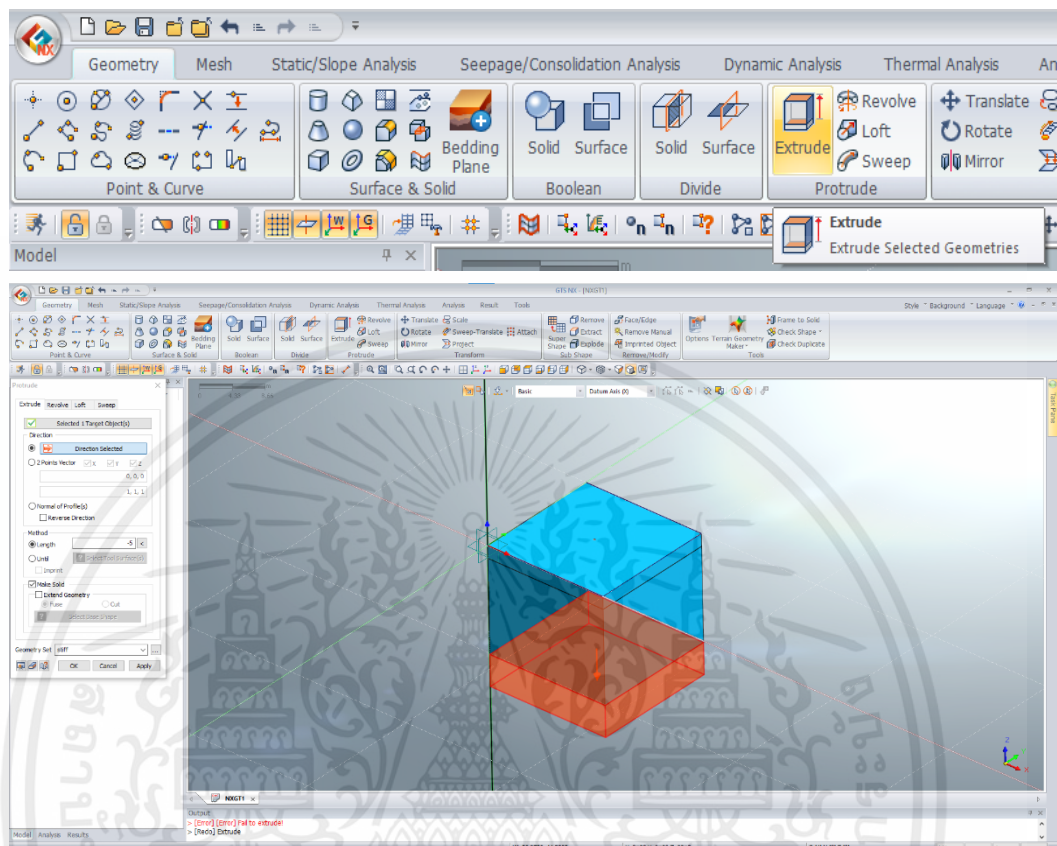
รูปที่ 3.5 การสร้างระนาบเสาเข็ม



รูปที่ 3.6 ระนาบเสาเข็ม

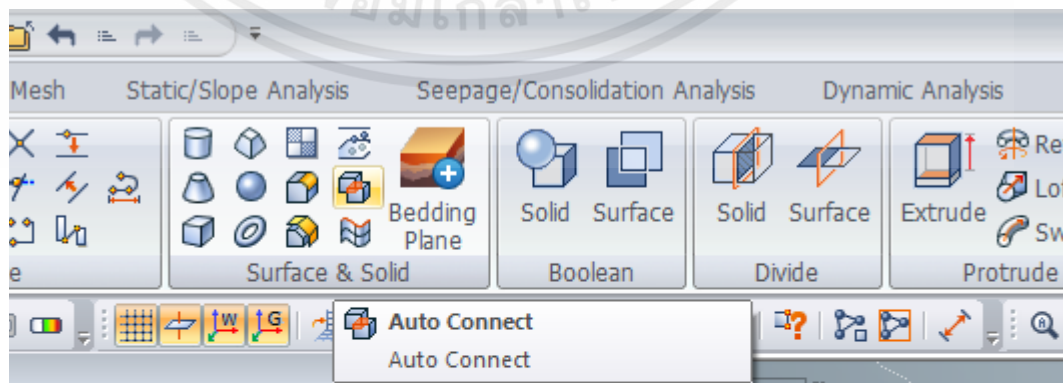
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ยี่ตระนาบของพื้นดินและเสาเข็ม โดยยึดชั้นดินถม 2 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อน 17 เมตร ดินเหนียวแข็ง 8 เมตร ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 การยี่ตระนาบชั้นดินและเสาเข็ม

- เชื่อมต่อองค์ประกอบทั้งหมด ทั้ง ชั้นดินและเสาเข็ม เข้าด้วยกัน โดยกดที่ Auto Connect จากนั้นเลือกชั้นดินถมดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวแข็ง ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.8

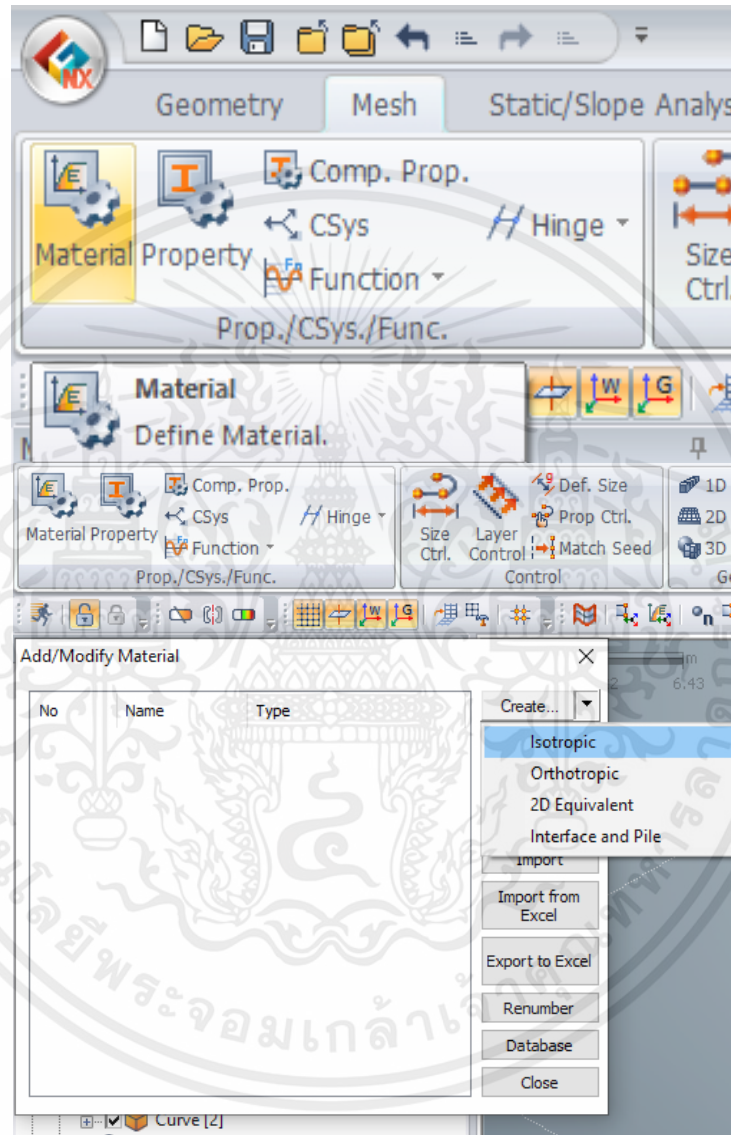


รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อองค์ประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### III) การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

- ตั้งค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มและชั้นดินทั้งหมดโดยเลือกที่ Material จากนั้นเลือก Isotropic โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มและชั้นดินต่างๆตามที่ระบุในตาราง 3.1 ดังแสดงในรูป 3.10 ถึง 3.12



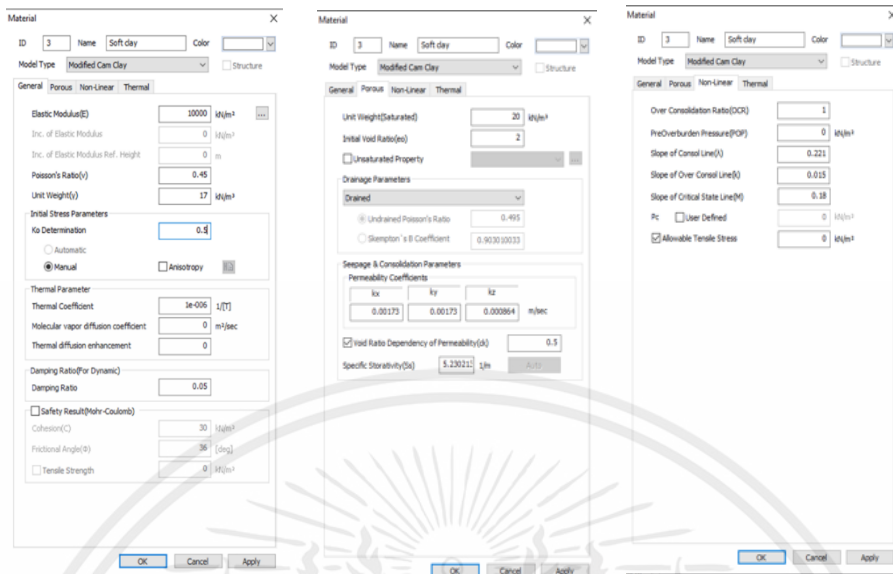
รูปที่ 3.9 กำหนด Parameter สำหรับ Elastic material

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Elastic

รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Mohr's coulomb

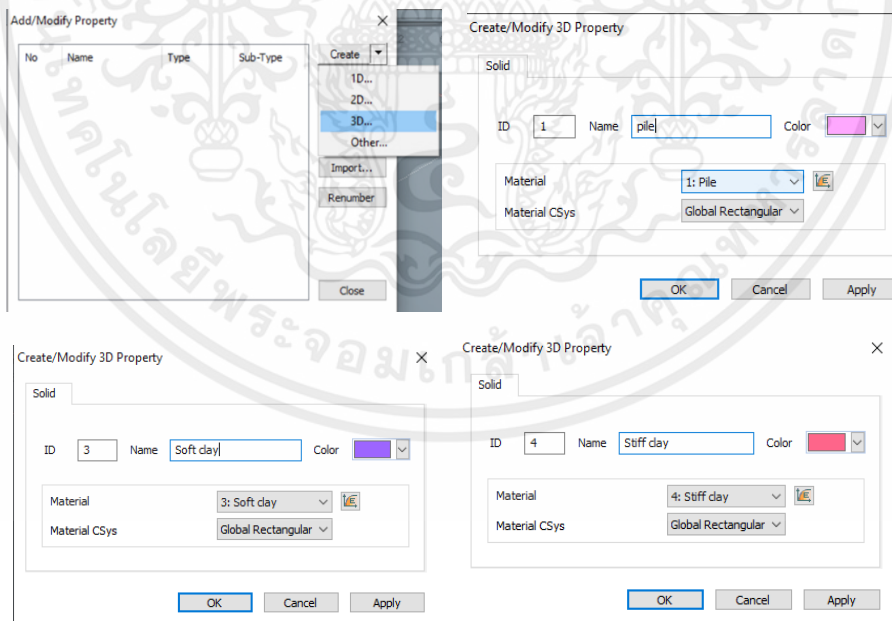
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Modified Cam-Clay

- กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ เสาค้ำ ชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวแข็ง ดังรูปที่

### 3.13

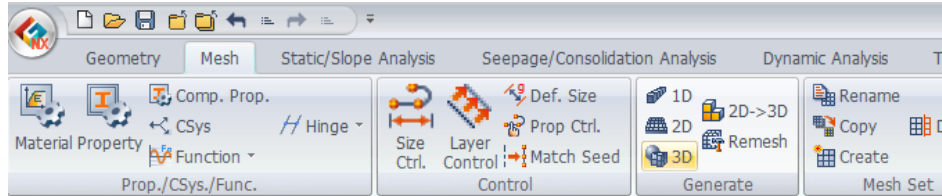


### รูปที่ 3.13 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

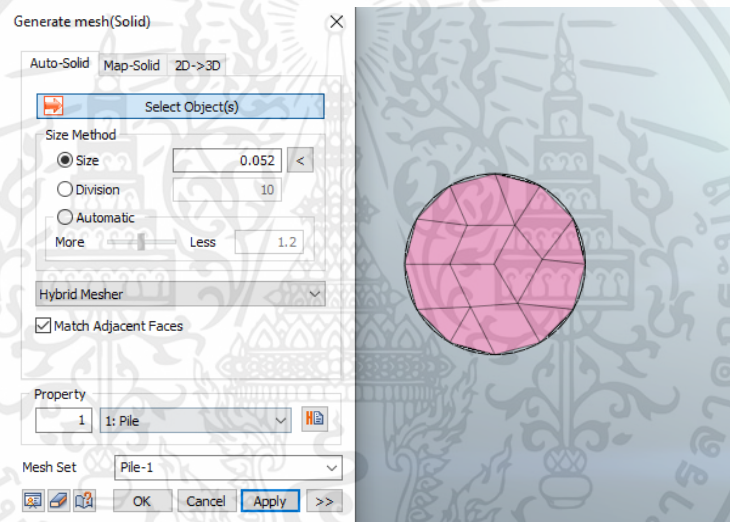
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### IV) สร้างโครงข่ายของ element

เลือกการเสริมโครงข่ายแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

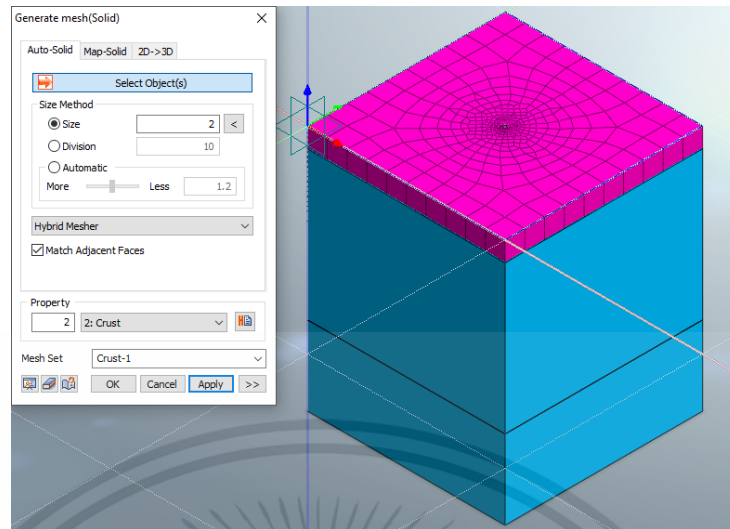


รูปที่ 3.14 การสร้างโครงข่ายแบบ 3 มิติ

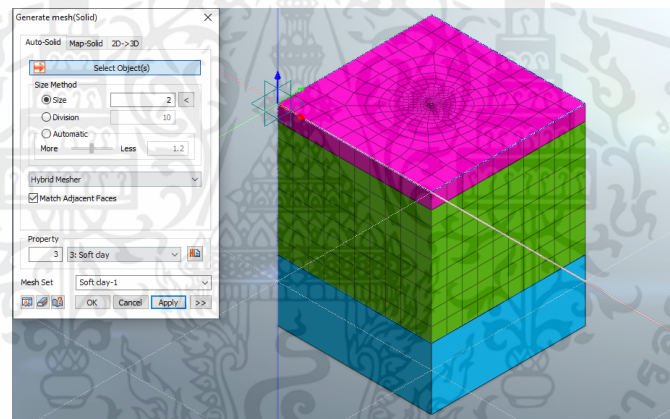


รูปที่ 3.15 การกำหนดขนาดโครงข่ายของเสาเข็ม

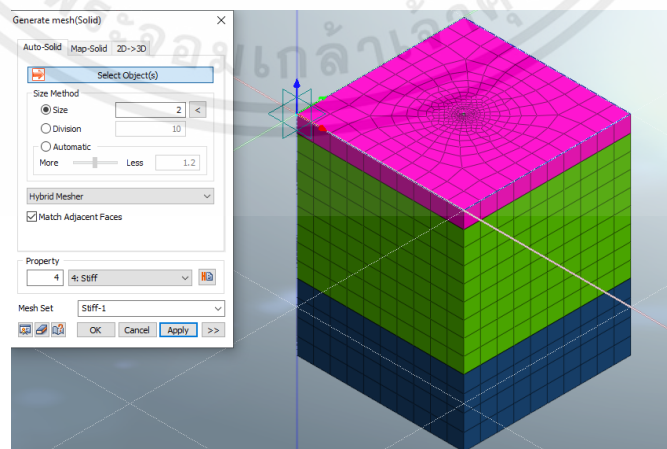
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินcrust



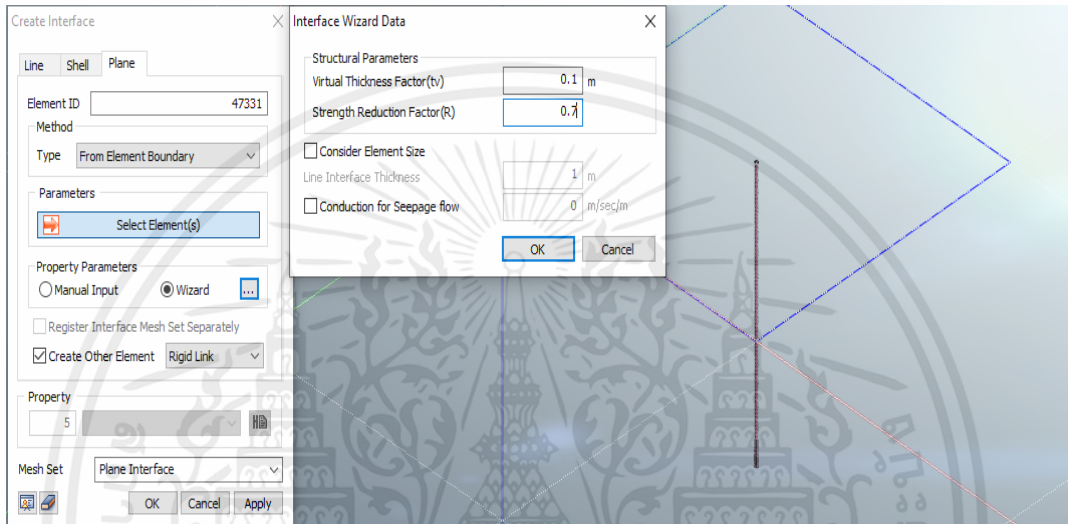
รูปที่ 3.17 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินเหนียวอ่อน



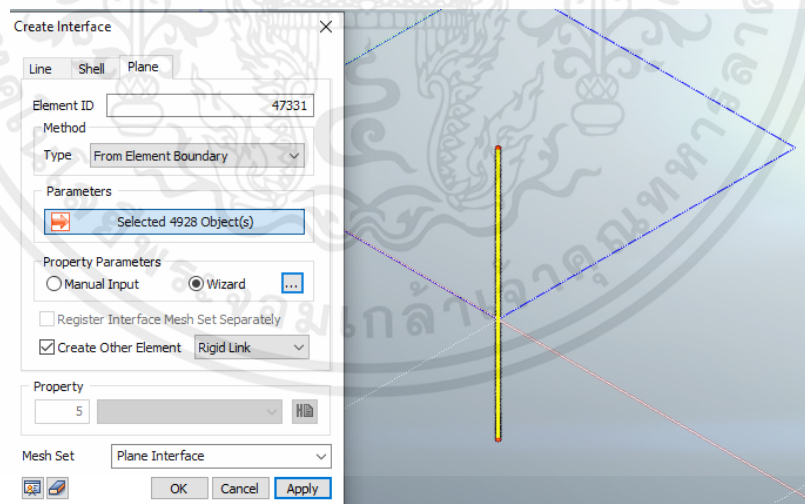
รูปที่ 3.18 การกำหนดขนาดโครงข่ายของชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V) สร้างอินเทอร์เฟซระหว่างดินและเสาเข็ม ถ้าไม่มีส่วนต่อประสาน เสาเข็มกับดินจะเชื่อมต่อกันในรูปแบบของของแข็ง จึงต้องทำการอินเทอร์เฟซ โดยตั้งค่า Virtual Thickness Factor(tv) 0.1 เมตร และค่า Strength Reduction Factor(R) 0.7 เมื่อมีการสร้างอินเทอร์เฟซ Node จะถูกแยกออกจากกัน เราจึงต้องสร้างการเชื่อมต่อ ปิดการใช้งานอินเทอร์เฟซ > Rigid link จะเชื่อมโยงกับ Nodeเปิดการใช้งานอินเทอร์เฟซ > จำเป็นต้องยกเลิกการเชื่อมต่อRigid link



รูปที่ 3.19 การสร้างอินเทอร์เฟซและ Rigid link ระหว่างดินและเสาเข็ม

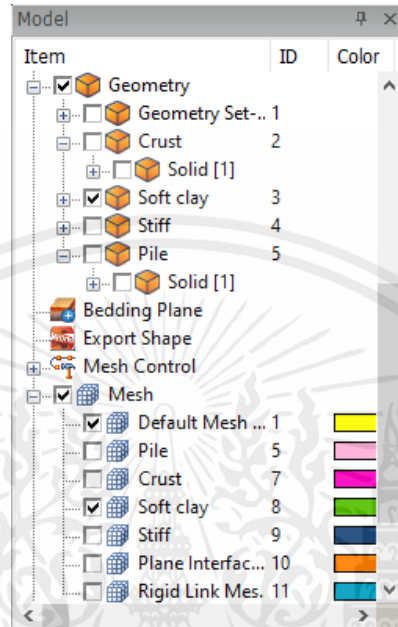


รูปที่ 3.20 การเลือกชิ้นส่วนสำหรับการสร้าง Interface และ Rigid link

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

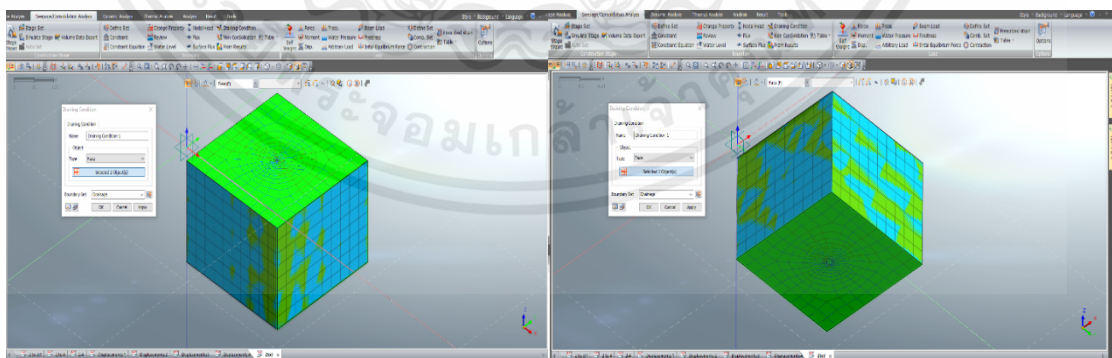
## VI) กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์กรณีการอัดตัวคายน้ำ

- เปิด solid geometry เฉพาะส่วนของที่จะเกิดการอัดตัวคายน้ำ โดยในที่นี้คือชั้นดินเหนียวอ่อน ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เปิด solid geometry ชั้นดินเหนียวอ่อน

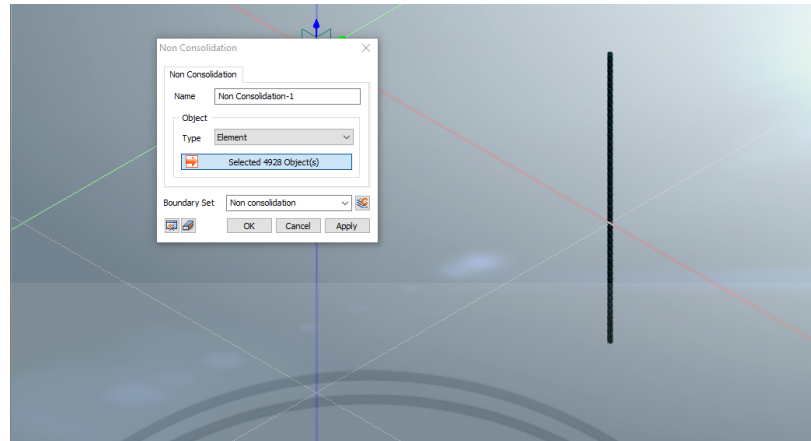
- กำหนดเงื่อนไขการระบายน้ำสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน โดยทำการเลือกด้านบนและล่างของชั้นดินเหนียวอ่อนก่อนทำการกำหนดเงื่อนไข ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กำหนดเงื่อนไขการระบายน้ำ

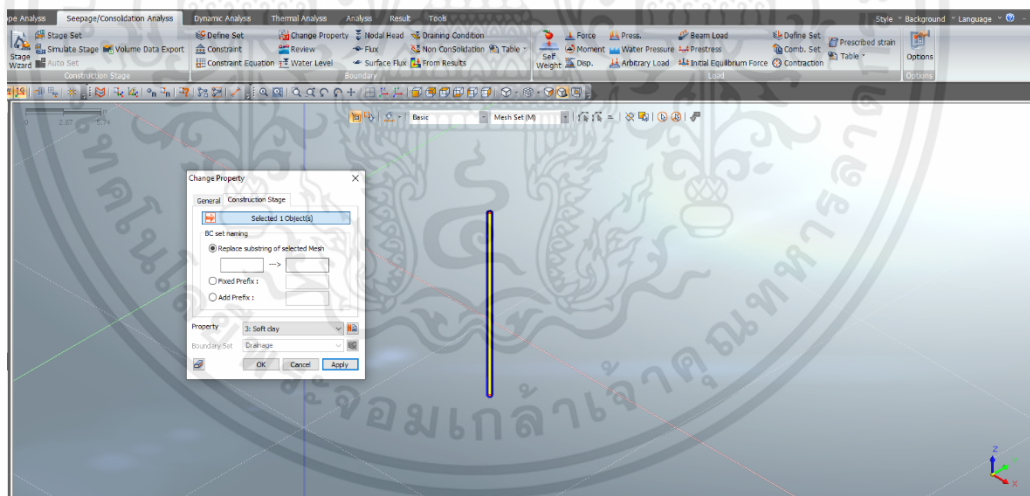
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการตั้งค่าในส่วนที่ไม่เกิดการอัดตัวคายน้ํา ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 กำหนดเงื่อนไขการระบายน้ำ

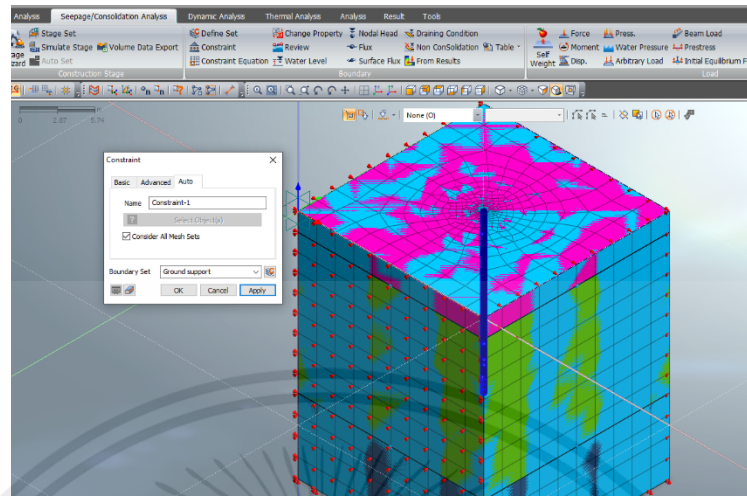
- ตั้งค่า in-situ condition. เปลี่ยนคุณสมบัติ (set the boundary condition) จากดินเป็นเสาเข็ม หลังจากการติดตั้งเสาเข็มในขั้นตอนการก่อสร้าง ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กำหนดเงื่อนไขจำกัดเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

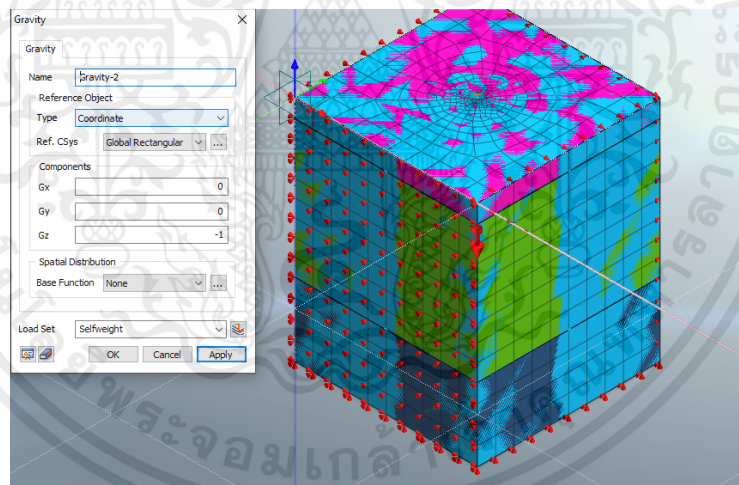
- ตั้งค่าการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจำกัด ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กำหนดเงื่อนไขจำกัดเขต

- กำหนดน้ำหนักของตัวเสาเข็มที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยทำการกำหนดค่า

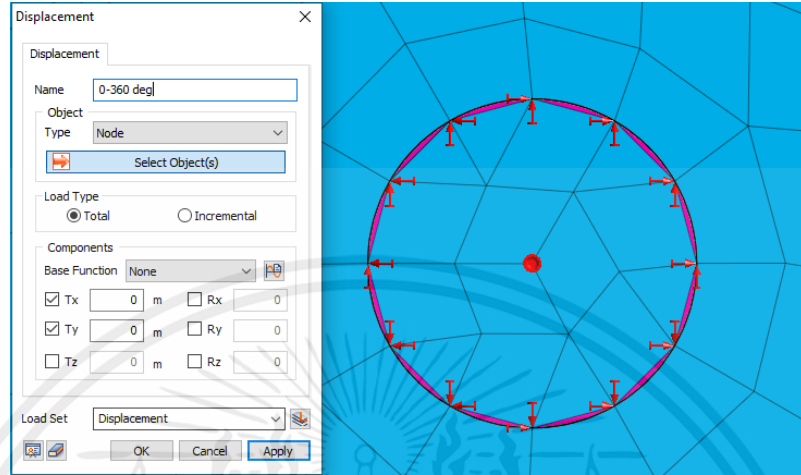
ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 กำหนดน้ำหนักของเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตั้งค่าแรงกระทำอื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งในการศึกษาคือการทำหนดการกระจัดเสาะเข็มแต่ละNodeของดินเพื่อแทนการขยายตัวของดินในแนวราบรอบเสาะเข็มที่แทนที่ดิน โดยค่าที่ใช้นำมาทำการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.28



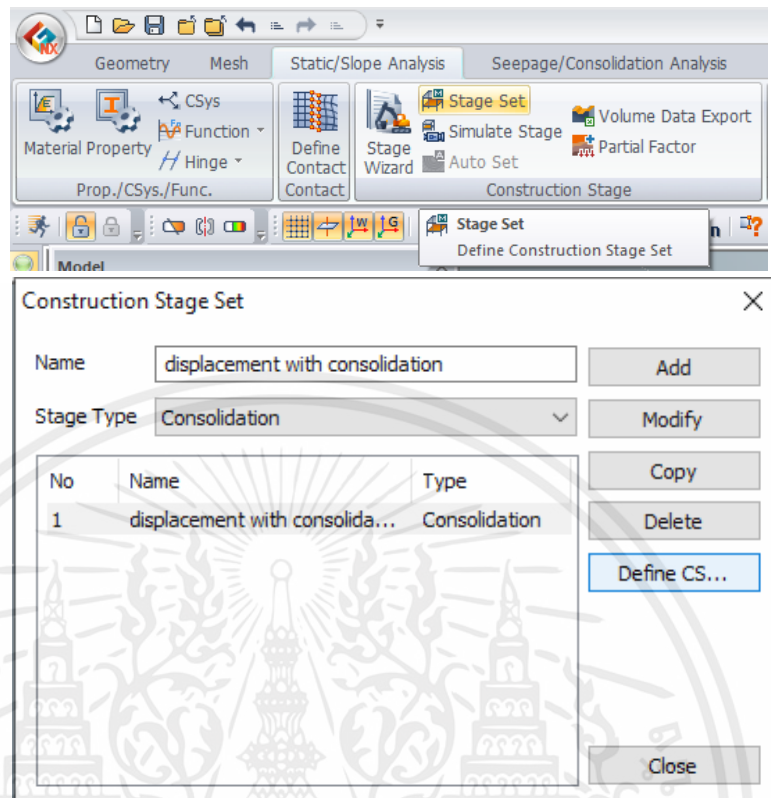
รูปที่ 3.27 กำหนดการขยายตัวของเสาะเข็ม

Inner radius	0.1 m	Perimeter	0.628319 m	Size of eler	0.052	Times	1.923077	No. of node	12.08305	12 degree	30
Outer radius	0.15 m	Inner radius		Displacement increment							
theta	Radian	x	y	theta	Radian	x	y				
0	0	0.15000	0.00000	0	0	0.10000	0.00000	0.05000	0.00000		
30	0.523599	0.12990	0.07500	30	0.523599	0.08660	0.05000	0.04330	0.02500		
60	1.047198	0.07500	0.12990	60	1.047198	0.05000	0.08660	0.02500	0.04330		
90	1.570796	0.00000	0.15000	90	1.570796	0.00000	0.10000	0.00000	0.05000		
120	2.094395	-0.07500	0.12990	120	2.094395	-0.05000	0.08660	-0.02500	0.04330		
150	2.617994	-0.12990	0.07500	150	2.617994	-0.08660	0.05000	-0.04330	0.02500		
180	3.141593	-0.15000	0.00000	180	3.141593	-0.10000	0.00000	-0.05000	0.00000		
210	3.665191	-0.12990	-0.07500	210	3.665191	-0.08660	-0.05000	-0.04330	-0.02500		
240	4.188790	-0.07500	-0.12990	240	4.188790	-0.05000	-0.08660	-0.02500	-0.04330		
270	4.712389	0.00000	-0.15000	270	4.712389	0.00000	-0.10000	0.00000	-0.05000		
300	5.235988	0.07500	-0.12990	300	5.235988	0.05000	-0.08660	0.02500	-0.04330		
330	5.759587	0.12990	-0.07500	330	5.759587	0.08660	-0.05000	0.04330	-0.02500		
360	6.283185	0.15000	0.00000	360	6.283185	0.10000	0.00000	0.05000	0.00000		

รูปที่ 3.28 กำหนดน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์

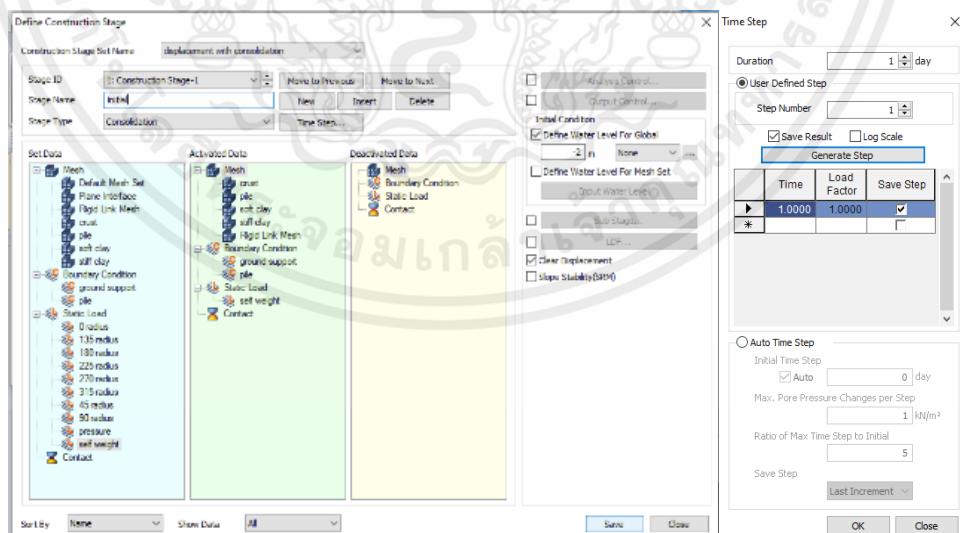
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VII) การกำหนดค่าขั้นตอนการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้าง



รูปที่ 3.29 การกำหนดค่าในขั้นตอนการก่อสร้าง

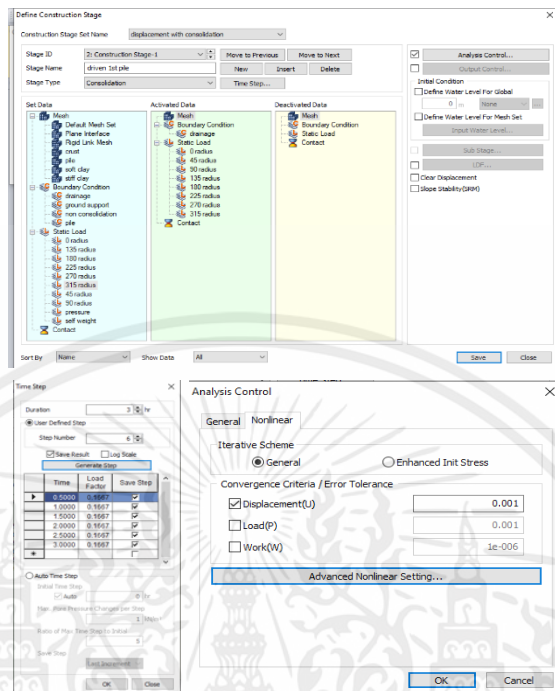
- initial stage กำหนดขั้นตอนการก่อสร้างขั้นต้น ตั้งค่าเวลาที่ใช้ที่ 1 วัน ดังรูปที่ 3.30



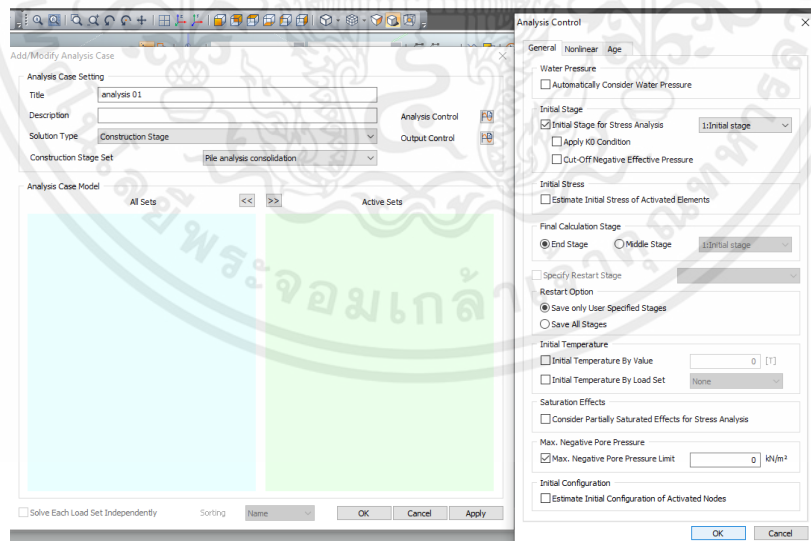
รูปที่ 3.30 การตั้งค่า initial stage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Deactivate pile และการใส่ระยะขยายทางด้านข้าง โดยทำการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้เท่ากับ 1 ชั่วโมง ทำการกำหนดค่าดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การตั้งค่า (Deactivate pile VIII) การวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.32 การวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กำหนดกรณีศึกษาในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกโดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในงานก่อสร้าง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.2.1 วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว

##### 3.2.1.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

เมื่อกำหนดรัศมีของโพรงช่องว่างเริ่มต้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ 0.4 เมตร และทำการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออกในแนวรัศมีเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม 0.6 เมตร และ 0.8 เมตร ตามลำดับ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม และทำการสอบเทียบผลกับการคาดการณ์การเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของดินด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก

##### 3.2.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความยาวของเสาเข็ม

เมื่อกำหนดความยาวของเสาเข็มเริ่มต้นที่ 17 เมตร และทำการลดความยาวของเสาเข็มลงเหลือ 10 เมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวของเสาเข็มที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม โดยทำการสอบเทียบผลกับความยาวเริ่มต้น

### 3.3 สรุปผล และเสนอแนวทางการวางแผนการตอกเสาเข็มเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

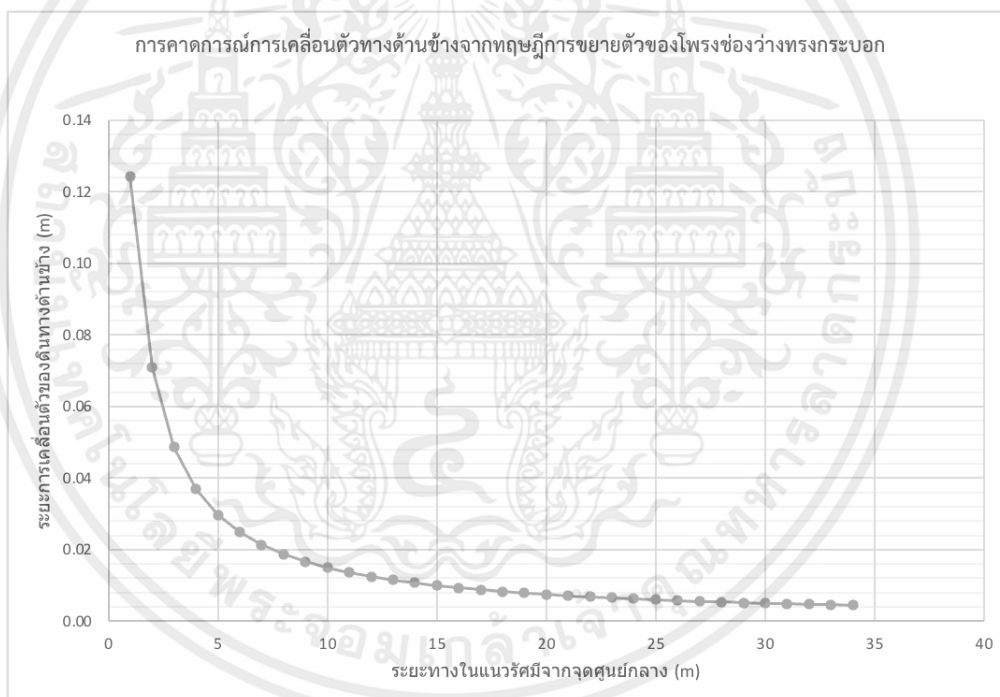
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการตอกเสาเข็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก

#### 4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว

4.1.1 ผลการคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก (Expansion of cylindrical cavity)

##### 4.1.1.1 คาดการณ์จากสมการการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก

จากสมการที่ (1) ระยะการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างเมื่อรัศมีของเสาเข็ม 0.2 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.1

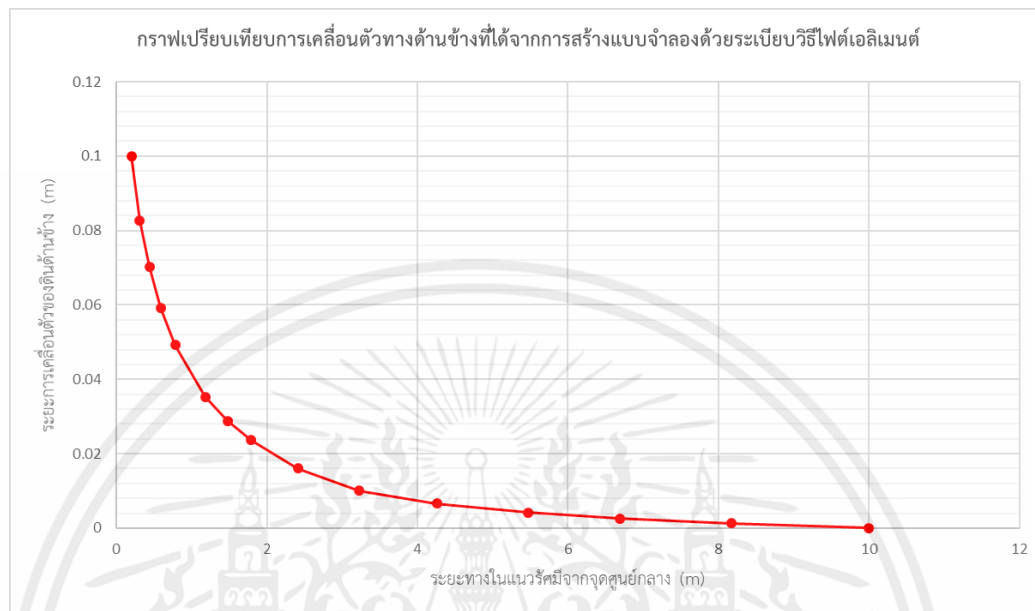


รูปที่ 4.1 การคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก

จากรูปที่ 4.1 เมื่อระยะทางในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของช่องว่างทรงกระบอกที่กำลังขยายตัวเพิ่มขึ้นระยะทางการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



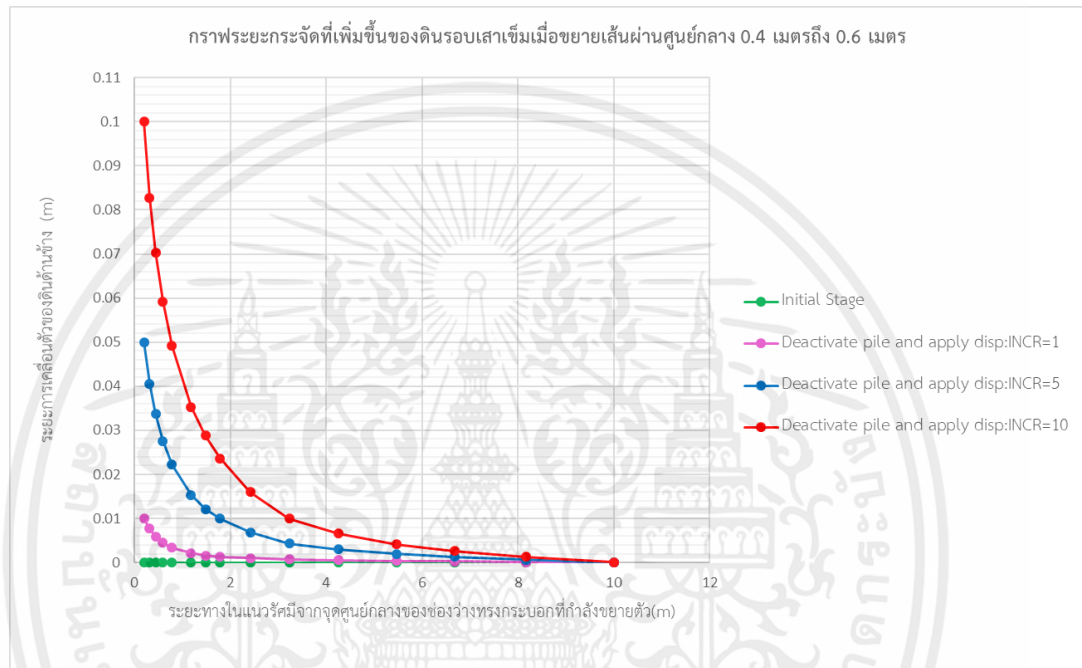
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อกำหนดรัศมีเสาเข็ม 0.2 เมตร

จากรูปที่ 4.2 เมื่อระยะทางในแนวนอนจากจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ การคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก

## 4.2. วิเคราะห์โดยพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็มโดยพิจารณาเงื่อนไขควบคุมในการก่อสร้าง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

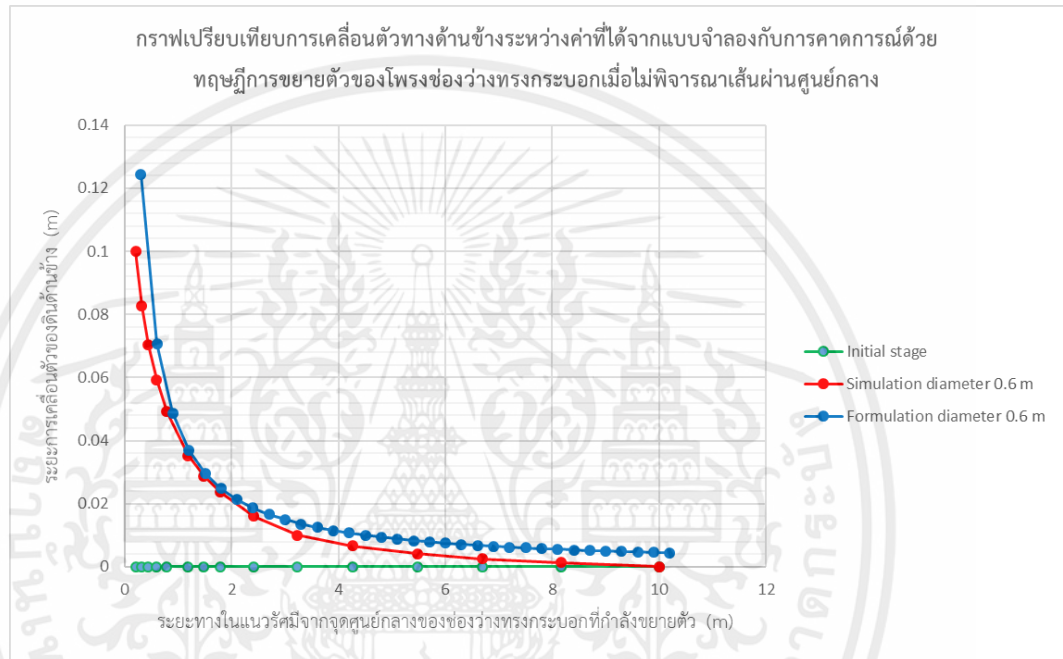
4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 m. เมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นของโพรงช่องว่างที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร เมื่อระยะเวลาการเคลื่อนตัวตามลำดับมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่ระยะต่างๆเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นเป็น 0.2 เมตรและขยายรัศมีเป็น 0.3 เมตร

จากรูปที่ 4.3 แนวโน้มของกราฟมีความชันเพิ่มเพิ่มเมื่อระยะที่พิจารณามากขึ้น โดยระยะเริ่มต้นมีระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่น้อยที่สุด จากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวมีการเพิ่มขึ้นตามลำดับ ระยะการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างจะมากขึ้นตามลำดับ โดยระยะการเคลื่อนตัวตามลำดับที่ Increment 10 จะมีค่ามากกว่า ระยะการเคลื่อนตัวตามลำดับที่ Increment 5

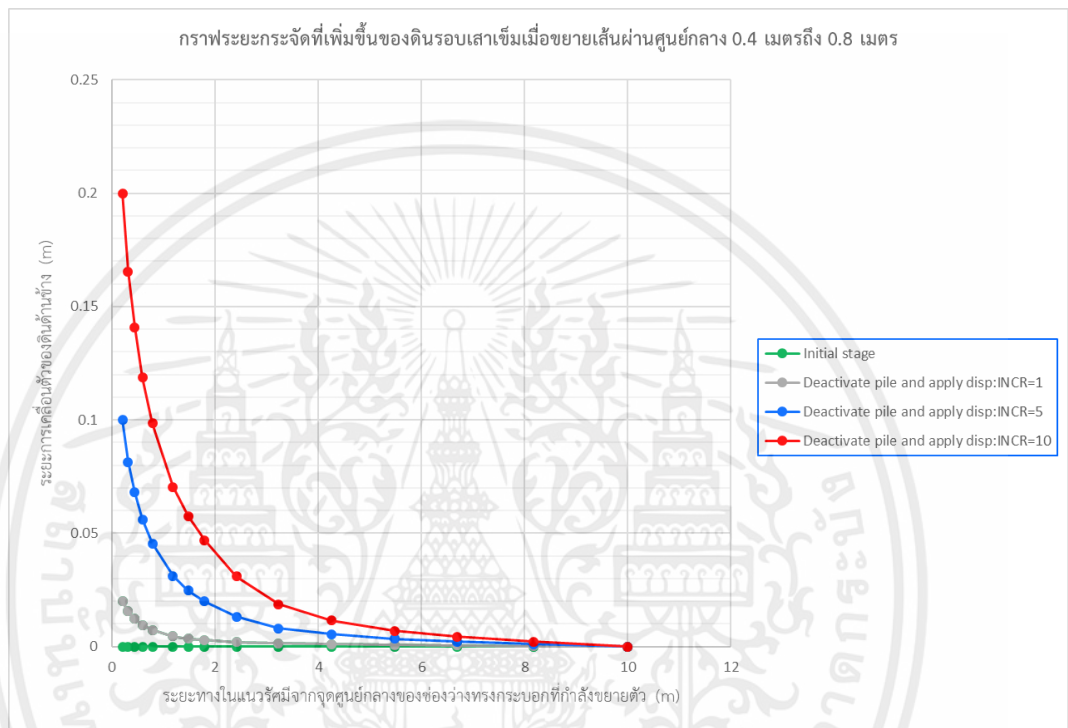
4.2.1.1.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มที่ได้จากวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับค่าการคาดการณ์ด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร เพิ่มเป็น 0.3 เมตร

จากรูปที่ 4.4 กราฟที่ได้จากแบบจำลอง และกราฟที่ได้จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเริ่มต้นกราฟที่ได้จากทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองประมาณ 0.025 เมตร และจะมีค่าลดลงจนกราฟมีความใกล้เคียงกันมีระยะห่างประมาณ 0.005 เมตร

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.4 เมตร เมื่อระยะการเคลื่อนตัวตามแนวลำดับเพิ่มขึ้น

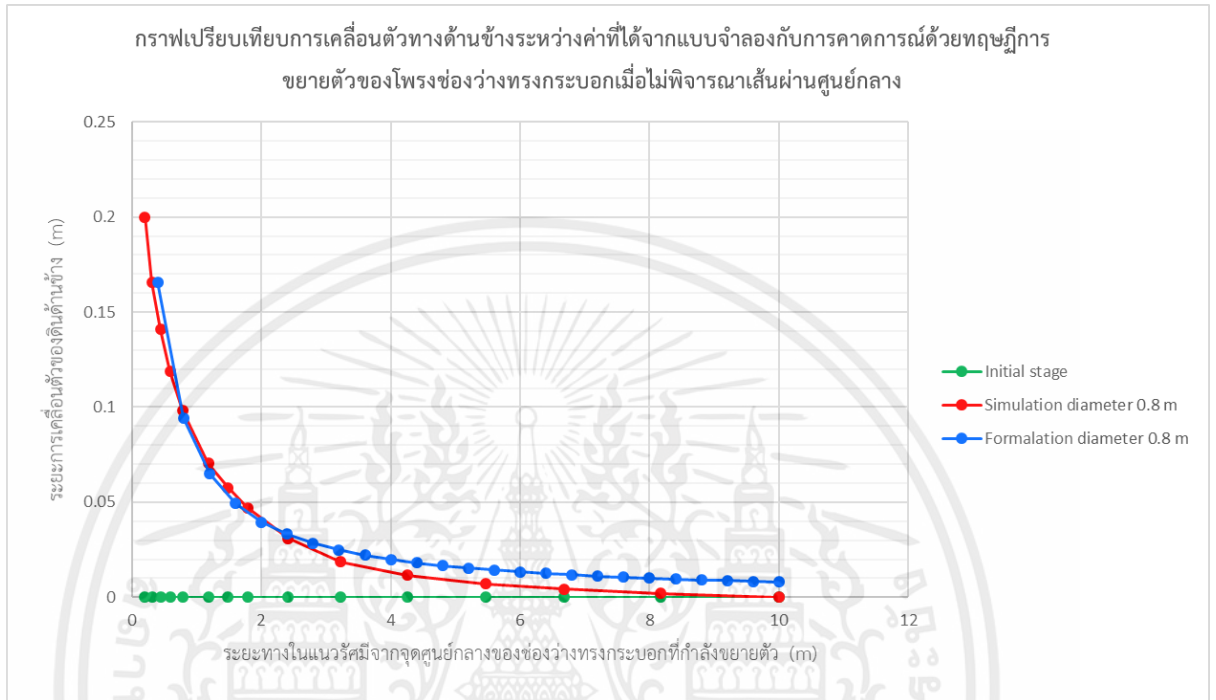


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่ระยะต่างๆเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นเป็น 0.2 เมตรและขยายรัศมีเป็น 0.4 เมตร

จากรูปที่ 4.5 แนวโน้มของกราฟมีความชันเพิ่มเพิ่มเมื่อระยะที่พิจารณามากขึ้น โดยระยะเริ่มต้นมีระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างที่น้อยที่สุด จากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนตัวตามแนวลำดับเพิ่มขึ้น ระยะการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างจะมากขึ้นตามลำดับ โดยระยะการเคลื่อนตัวตามลำดับที่ Increment 10 จะมีค่ามากกว่า ระยะการเคลื่อนตัวตามลำดับที่ Increment 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

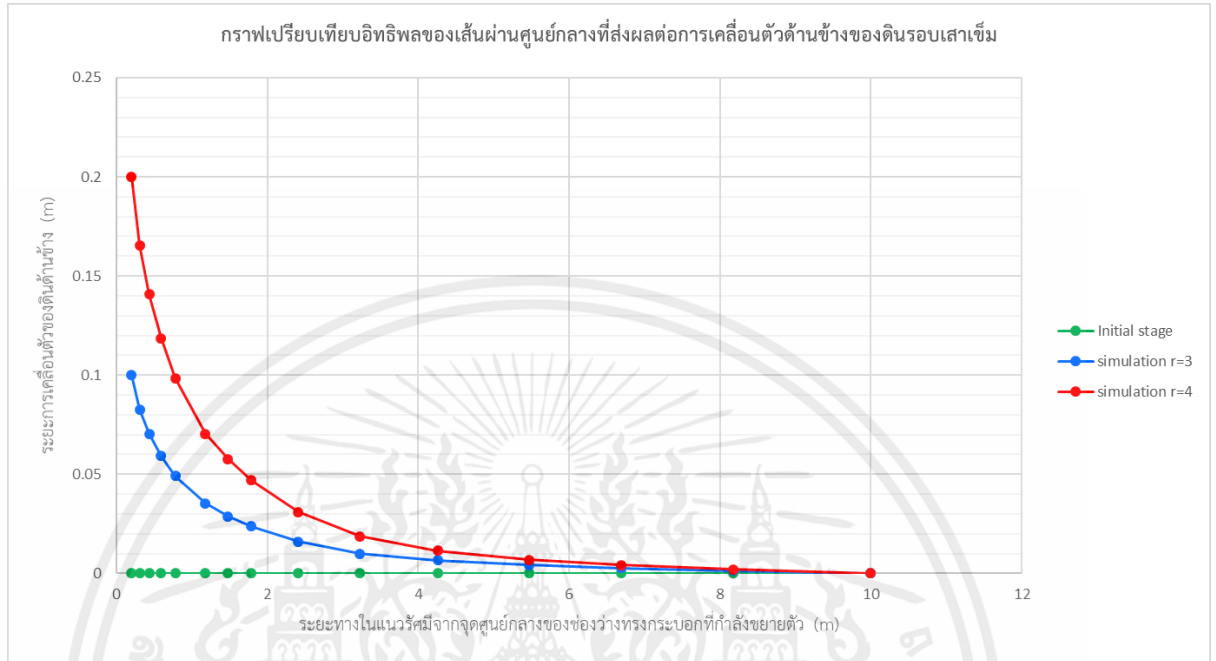
4.2.1.2.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มที่ได้จากวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับค่าการคาดการณ์ด้วยทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.4 เมตร



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร เพิ่มเป็น 0.4 เมตร

จากรูปที่ 55 กราฟที่ได้จากแบบจำลอง และกราฟที่ได้จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเริ่มต้นกราฟที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่ามากกว่ากราฟที่ได้จากทฤษฎีประมาณ 0.03 เมตร และจะมีค่าลดลงจนกราฟมีความใกล้เคียงกันและห่างกันประมาณ 0.005 เมตร

4.2.1.3 ผลการวิเคราะห์การอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร เปรียบเทียบกับเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.4 เมตร



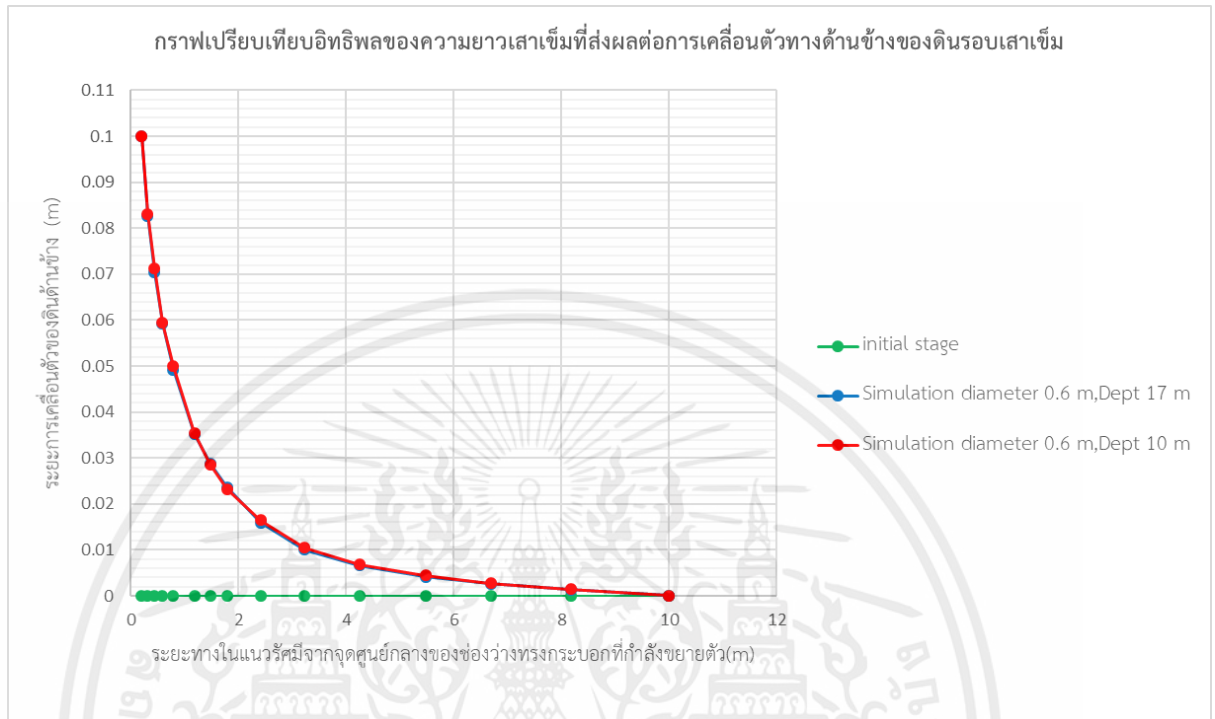
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร เปรียบเทียบกับเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.4 เมตร

จากรูปที่ 4.7 กราฟที่จำลองเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.4 เมตรมีความชันมากกว่ากราฟที่จำลองเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเมื่อกำหนดรัศมีเริ่มต้นที่ 0.2 เมตร และทำการขยายเป็น 0.3 เมตร

#### 4.2.2 วิเคราะห์โดยพิจารณาความยาวของเสาเข็ม

##### 4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม กรณีลด

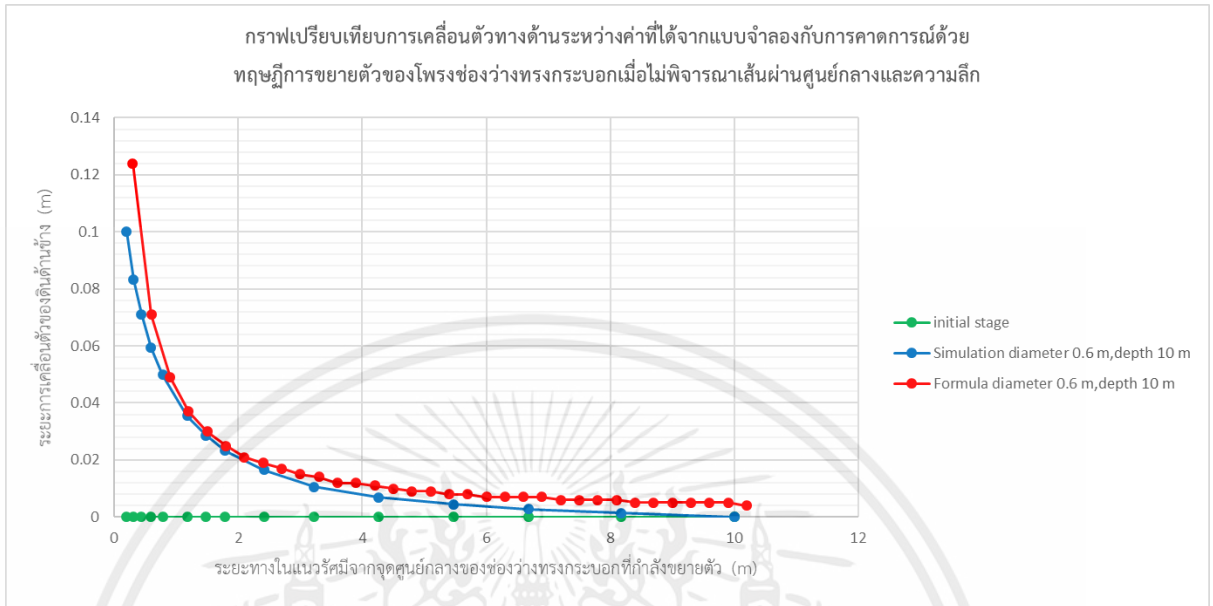
ความยาวเสาเข็มจาก 17 เมตร เป็น 10 เมตร



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบอิทธิพลของความยาวเข็มเมื่อลดความยาวเข็มลงจาก 17 เมตรเป็น 10 เมตร

จากรูปที่ 4.8 กราฟที่จำลองเข็มที่มีความลึก 17 เมตร และกราฟที่จำลองเสาเข็มที่มีความลึก 10 เมตรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่เส้นกราฟแทบจะเป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้นความลึกของเสาเข็มมีอิทธิพลต่อระยะการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างน้อย

4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็ม กรณีจำลองเข็มที่มีความยาวเสาเข็ม 10 เมตร เทียบค่ากับทฤษฎีการขยายตัวของช่องว่างทรงกระบอก



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอกเมื่อความยาวเสาเข็มเป็น 10 เมตร

จากรูปที่ 4.9 กราฟที่ได้จากแบบจำลอง และกราฟที่ได้จากทฤษฎีการขยายตัวของโพรงช่องว่างทรงกระบอก มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเริ่มต้นกราฟที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่ามากกว่ากราฟที่ได้จากทฤษฎีประมาณ 0.025 เมตร และจะมีค่าลดลงจนกราฟมีความใกล้เคียงกันและห่างกันประมาณ 0.005 เมตร

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยหัวข้อเรื่อง การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มในขณะที่ยึดเสาเข็มบนดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ ผู้จัดทำสามารถสรุปผลการศึกษาและนำเสนอผลการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. วิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเมื่อพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 2. วิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเมื่อพิจารณาความยาวของเสาเข็ม

โดยการศึกษาทำการรวบรวมข้อมูล 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือการคาดการณ์จากทฤษฎีการขยายตัวของช่องว่างทรงกระบอก และส่วนที่ 2 คือการจำลองเสาเข็มจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการศึกษา

ผลจากการศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มตอกทางด้านข้างขณะตอกเทียบกับวิธีจากสมการการขยายตัวของโพรงทรงกระบอกภายใต้สองเงื่อนไขสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเมื่อพิจารณาเงื่อนไขขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม พบว่าอิทธิพลจากการขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินบริเวณรอบเสาเข็ม พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตอกมีผลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินรอบเสาเข็มอย่างมาก

5.1.2 ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเมื่อพิจารณาเงื่อนไขความยาวของเสาเข็ม พบว่าการลดความยาวของเสาเข็มมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของมวลดินบริเวณรอบเสาเข็ม พบว่าอิทธิพลของเงื่อนไขอยู่ในระดับน้อยหรือแทบจะไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของดินบริเวณรอบเสาเข็ม

จากผลของข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเงื่อนไขขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของเสาเข็ม ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินบริเวณรอบเสาเข็มที่แตกต่างกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อผู้ที่สนใจในการต่อยอดงานวิจัย ดังนี้

1. ควรมีการทำแบบจำลองเสาเข็มจำนวน 2 ต้น เพื่อพิจารณาปัจจัยเรื่องระยะห่างของเสาเข็มว่ามีผลกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อนรอบเสาเข็มอย่างไร
2. ควรมีการทำแบบจำลองเสาเข็มกลุ่ม เพื่อพิจารณาปัจจัยเรื่องลำดับการตอกเสาเข็มว่ามีผลกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อนรอบเสาเข็มอย่างไร เนื่องจากเมื่อตอกเสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวสะสม และจะทำให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเป็นผลสะสมมาจากเสาเข็ม และเพื่อพิจารณาปัจจัยเรื่องความหนาแน่นของเสาเข็ม ว่าความหนาแน่นจะส่งผลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อนบริเวณรอบเสาเข็มอย่างไร
3. ในการใส่ตาข่าย (mesh) เพื่อใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ควรศึกษาขนาดของ mesh ให้ละเอียดกว่านี้ เนื่องจากทางกลุ่มได้ลองทำ mesh ที่ละเอียด แต่การประมวลผลของโปรแกรมใช้เวลานาน และรันต่อไม่ได้ จึงควรศึกษาขนาดของ mesh ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อนรอบเสาเข็มที่มีค่าถูกต้องมากที่สุด
4. parameter ของเสาเข็ม และชั้นดิน ที่ใช้ในการทำแบบจำลอง ควรมาจากการทำการเจาะสำรวจดินจากพื้นที่ที่ต้องการทำการศึกษา เพื่อให้ได้ผลการศึกษาออกมาใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
5. เนื่องจากวิธีที่ใช้ประมวลผลคือ วิธีควบคุมการกระจัดของโพรงทรงกระบอก (displacement-Controlled Cavity Expansion Method) แต่เนื่องจากเป็นวิธีการควบคุม จึงทำให้เมื่อประมวลผลแล้ววิธีนี้จะขาดเสถียรภาพในการวิเคราะห์ (Numerical Instability) เมื่อประมวลผลแบบจำลองเสาเข็มที่ต้องใช้เวลานาน ดังนั้นจึงควรศึกษาวิธีการประมวลผลชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เช่น K-Pressure Method หรือ Increased  $K_0$  Method
6. เนื่องจากเสาเข็มที่พิจารณาเป็นเสาเข็มตอก จึงควรเพิ่มความเค้น (Stress) ที่ปลายของเสาเข็ม เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขในการตอกเสาเข็ม
7. ควรเทียบค่าที่ได้จากการประมวลผลกับผลจากการวัดภาคสนาม (Field Test) แต่เนื่องจาก Field Test ที่ได้ไปสำรวจเป็นแบบลำดับการตอกเสาเข็ม จึงไม่สามารถเทียบค่าได้
8. ข้อจำกัดของการจำลองเสาเข็มแบบ Solid-Solid คือในการทำนายเสาเข็มตอก จะไม่สามารถเริ่มจากจุดที่เล็กมากๆได้ เพราะเมื่อประมวลผลแล้ววิธีนี้จะขาดเสถียรภาพในการวิเคราะห์ (Numerical Instability) เช่นเมื่อทำการขยายเสาเข็มที่มีรัศมี 0.2 เมตรเป็น 0.3 เมตร ผลที่ได้คือดินบริเวณใกล้เสาเข็มจะมีค่าการเคลื่อนที่ต่างกันมากกว่า ดินบริเวณอื่นๆซึ่งไม่สามารถทำนายได้
9. ข้อจำกัดของโปรแกรม Midas Gts NX คือเมื่อทำการขยายเสาเข็มโดยให้ระยะในการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปจะขาดเสถียรภาพในการวิเคราะห์ (Numerical Instability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการสำรวจสภาพชั้นดิน**

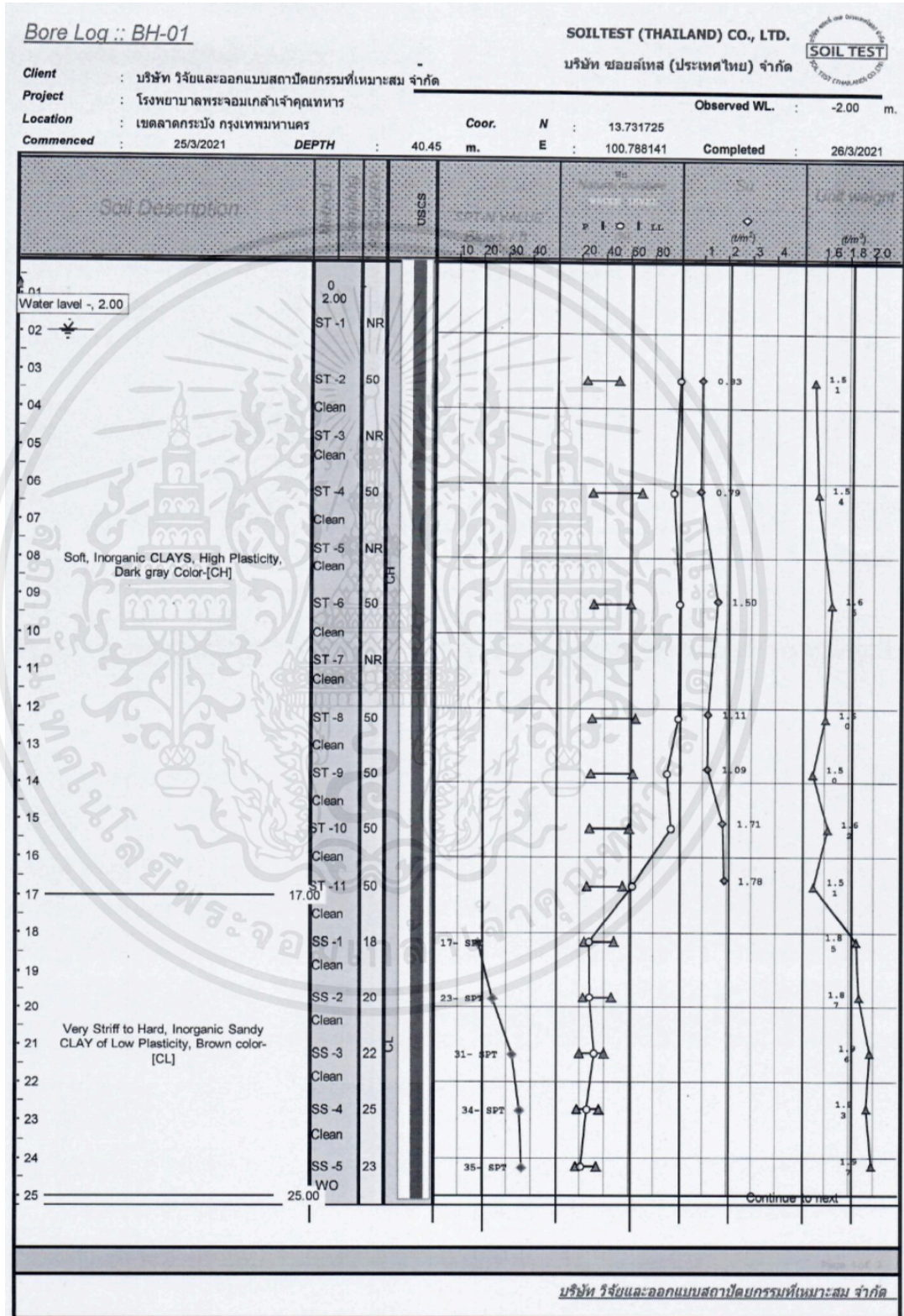
ตารางที่ ก-1 ลักษณะชั้นดินของโครงการโรงพยาบาลพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร เขตลาดกระบัง  
กรุงเทพมหานคร

หลุมเจาะ No.	ความลึกชั้น ดิน (ม.)	ลักษณะคุณสมบัติของชั้นดิน	ค่าระดับน้ำ ใต้ดิน	หมายเหตุ
BH-01	0.00-17.00	very soft to Soft, Inorganic CLAYS of High Plasticity, Dark gray color-[CH]	-2.00 m.	
	17.00-25.95	Very Striff to Hard, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Brown color-[CL]		
	25.95-31.95	Dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]		
	31.95-34.95	Hard, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Brown color-[CL]		
	34.95-40.45	Dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]		
BH-02	1.50-17.00	very soft to Medium, Inorganic CLAYS of High Plasticity, Dark gray color-[CH]	-2.00 m.	
	17.00-25.95	Very Striff to HARD, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Li brown color-[CL]		
	25.95-28.95	Dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]		
	28.95-31.95	Very Striff, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Dark Gray color-[CL]		
	31.95-34.95	Dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]		
	34.95-40.45	VERY Dense, Poorly graded Silty-SAND, Brown color-[SP-SM]		
BH-03	0.00-17.00	very soft to Medium, Inorganic CLAYS of High Plasticity, Dark gray color-[CH]	-2.00 m.	
	17.00-25.95	Very Striff to HARD, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Brown color-[CL]		
	25.95-30.45	Medium dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]		
	30.45-34.95	Striff to Hard, Inorganic Sandy CLAY of Low Plasticity, Gray color-[CL]		
หลุมเจาะ No.	ความลึกชั้น ดิน (ม.)	ลักษณะคุณสมบัติของชั้นดิน	ค่าระดับน้ำ ใต้ดิน	หมายเหตุ
BH-03	34.95-39.45	Dense to VERY Dense, Silty SAND, Brown color-[SM]	-2.00 m.	
	39.45-40.45	Dense, Clayey SAND, Brown color-[SC]		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

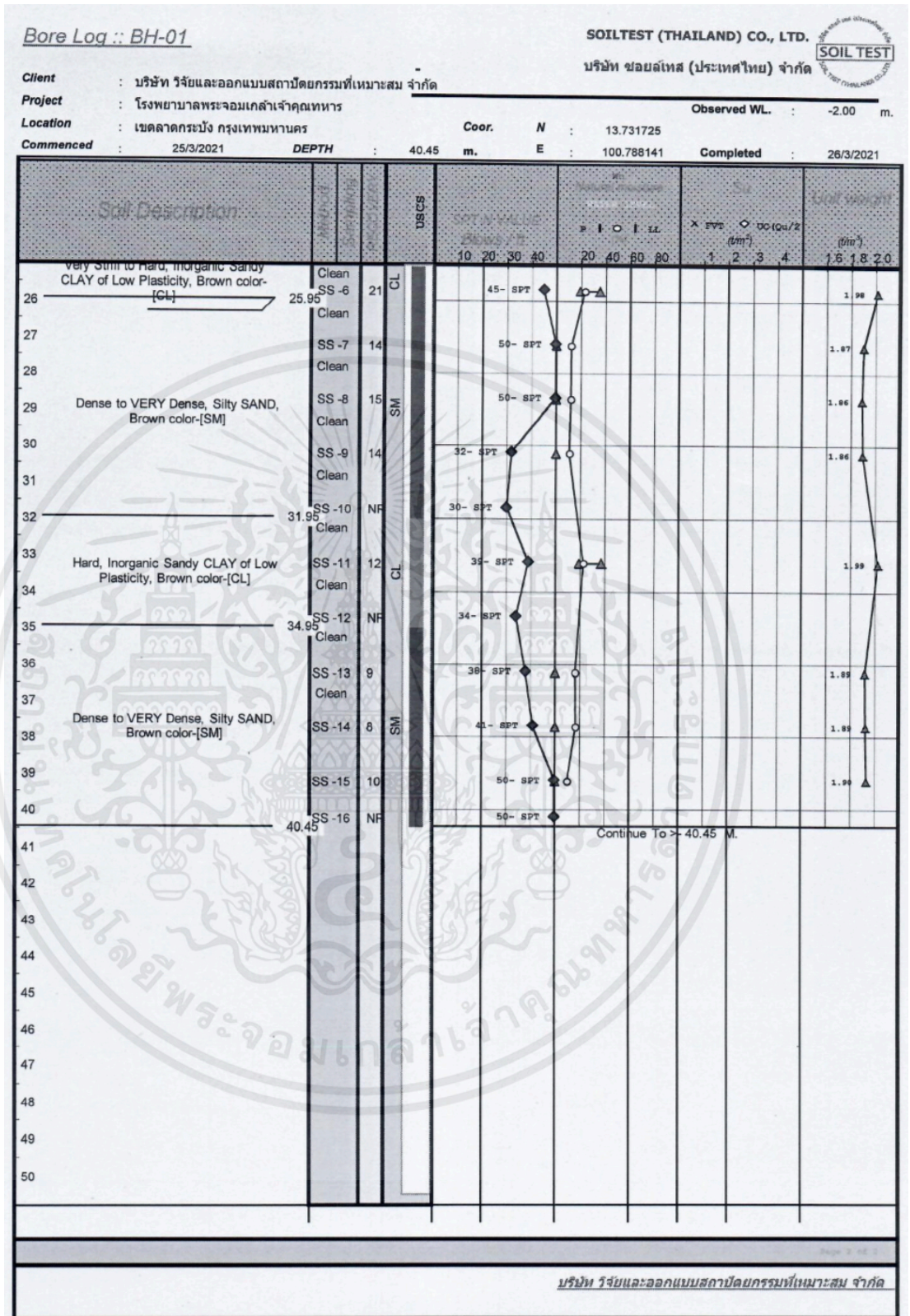
ภาคผนวก ข  
ผลการเจาะสำรวจดิน

ตาราง ข-1 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 1



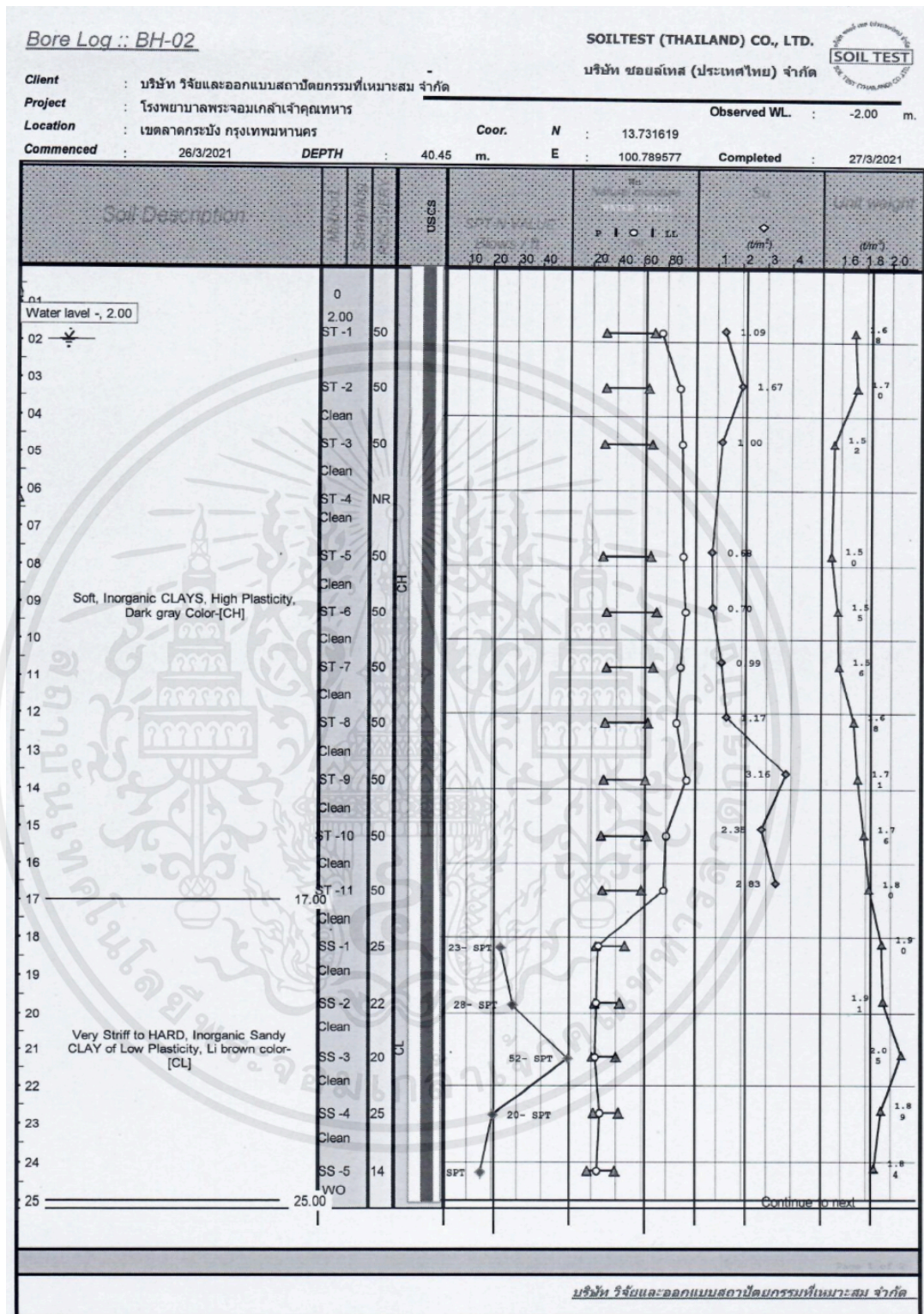
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 1



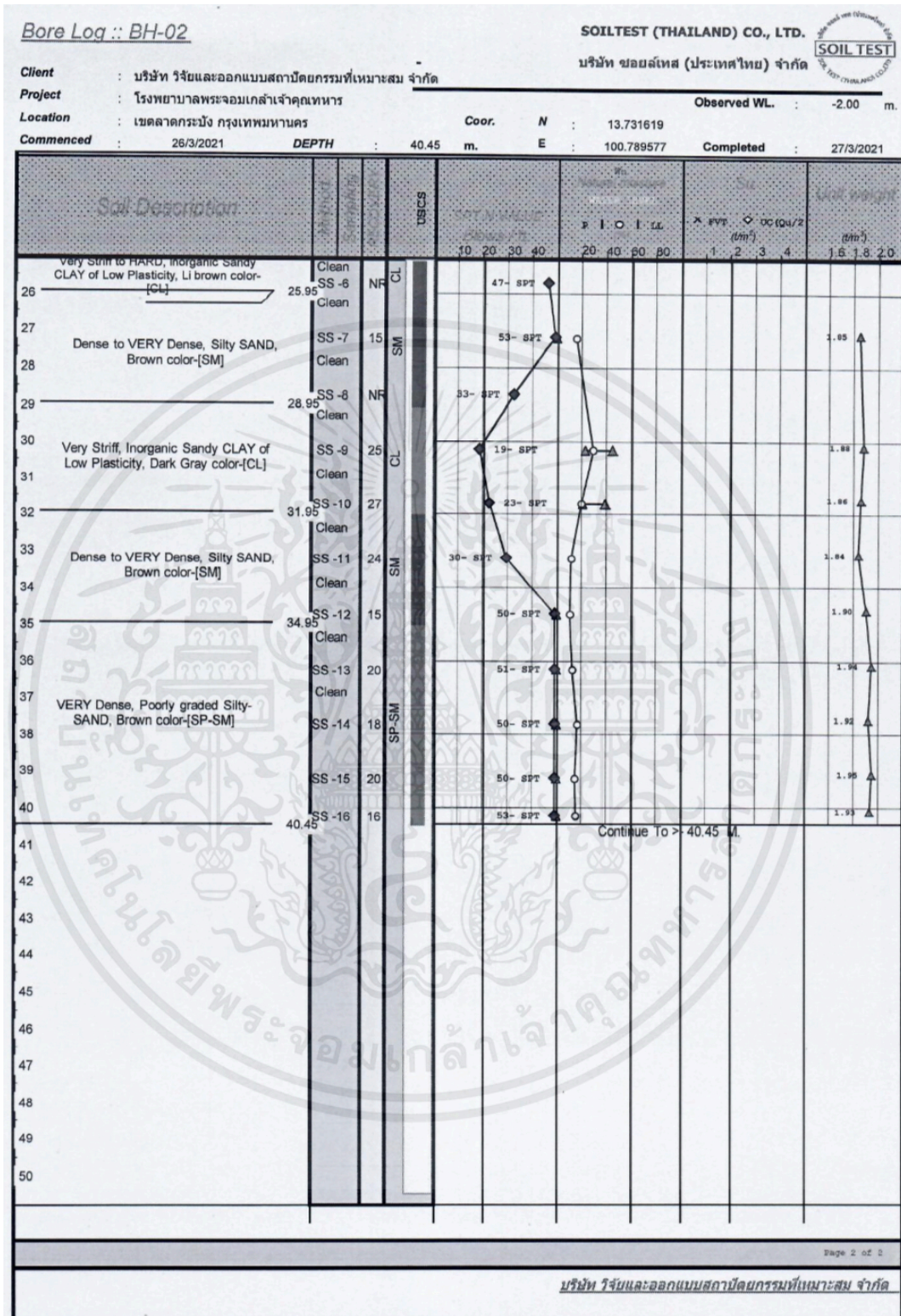
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 2



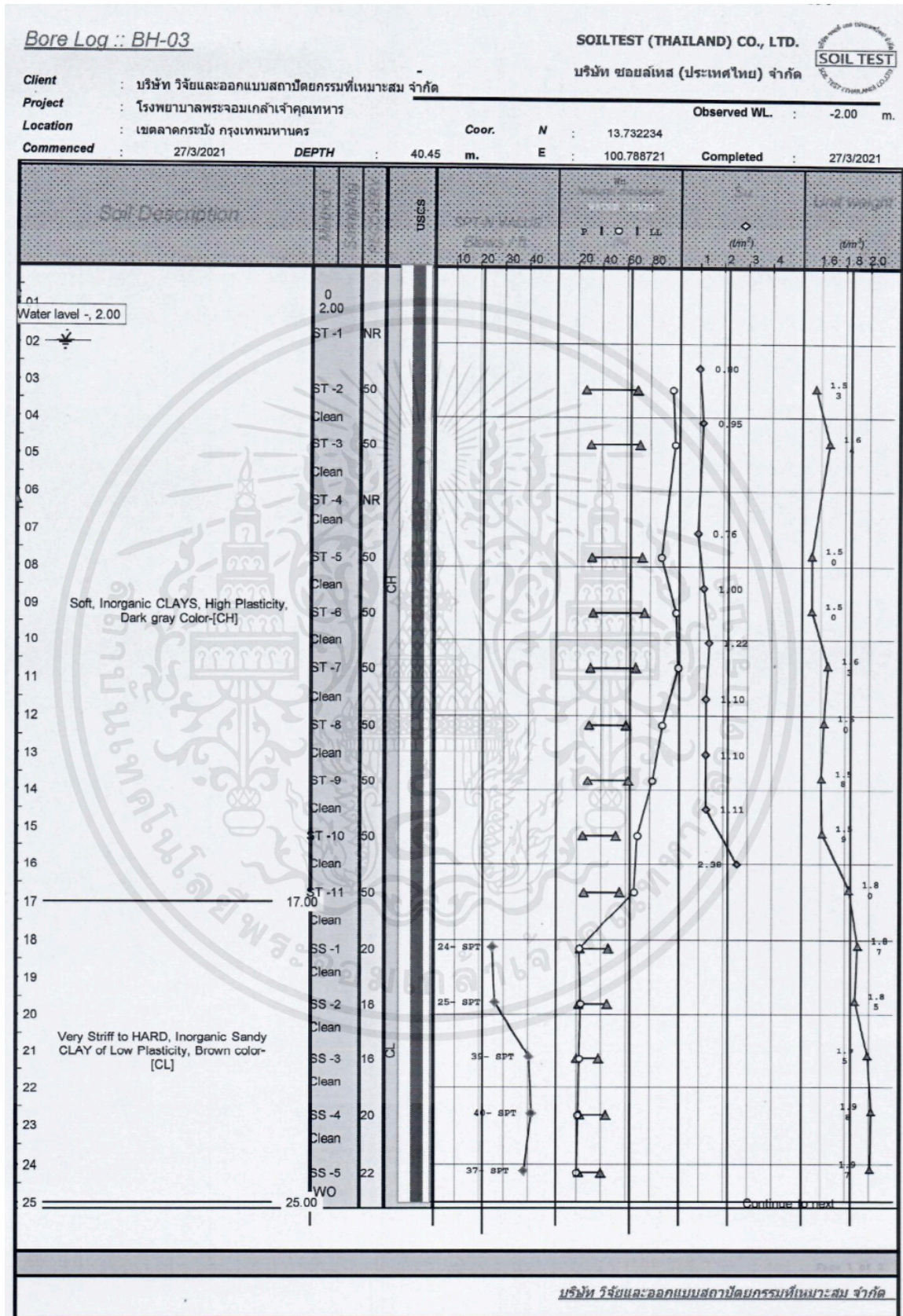
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 2



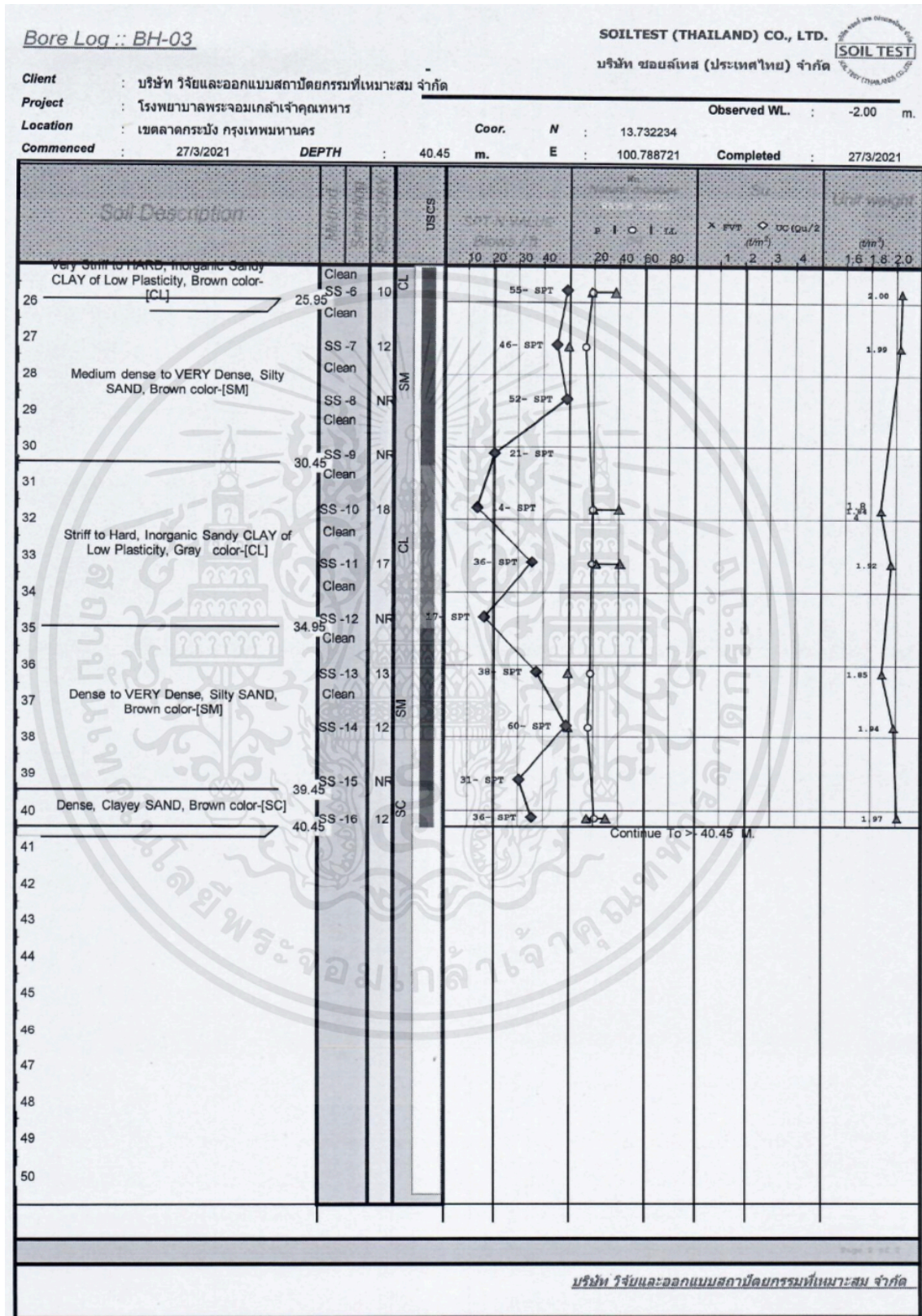
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ของหลุมที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 ตารางแสดงกราฟผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ของหลุมที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- H.G. Poulos (1994) “Effect of pile driving on adjacent piles in clay”[ระบบออนไลน์],  
แหล่งที่มา : <https://www.scribd.com/document/465341854/t94-102>
- Antonios Vytiniotis, Ph.D., P.E., A.M.ASCE; Brendan Casey, Ph.D., P.E., M.ASCE ; and David W. Sykora, Ph.D., P.E., D.GE, M.ASCE (2018) “Lateral Soil Movements Due to Pile Driving: A Case Study in Soft Clays”[ระบบออนไลน์],  
แหล่งที่มา : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784481622.010>
- Massarsch, K. R., & Wersäll, C. (2013) “ Cumulative lateral soil displacement due to pile driving in soft clay.[ระบบออนไลน์],  
แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/publication/268459065\\_Cumulative\\_Lateral\\_Soil\\_Displacement\\_Due\\_to\\_Pile\\_Driving\\_in\\_Soft\\_Clay](https://www.researchgate.net/publication/268459065_Cumulative_Lateral_Soil_Displacement_Due_to_Pile_Driving_in_Soft_Clay)
- A.S.Balasubramaniam, E.Y.N.Oh, N. Phienwej (2009) “Bored and driven pile testing in Bangkok Sub-Soils” [ระบบออนไลน์],  
แหล่งที่มา : [https://cot.unhas.ac.id/journals/index.php/ialt\\_lti/article/view/398/291](https://cot.unhas.ac.id/journals/index.php/ialt_lti/article/view/398/291)
- Boonchai Ukritchon ,Tirawat Boonyatee (2015) “Soil Parameter Optimization of the NGI-ADP Constitutive Model for Bangkok Soft Clay” [ระบบออนไลน์],  
แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/publication/274008060\\_Soil\\_Parameter\\_Optimization\\_of\\_the\\_NGI\\_ADP\\_Constitutive\\_Model\\_for\\_Bangkok\\_Soft\\_Clay](https://www.researchgate.net/publication/274008060_Soil_Parameter_Optimization_of_the_NGI_ADP_Constitutive_Model_for_Bangkok_Soft_Clay)
- Suched Likitlersuang ,Chanaton Surarak ,Arumugam Balasubramaniam ,Erwin Oh (2013) “Duncan-Chang - Parameters for Hyperbolic Stress Strain Behaviour of Soft Bangkok Clay” [ระบบออนไลน์],

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/publication/265914686\\_Duncan-Chang\\_](https://www.researchgate.net/publication/265914686_Duncan-Chang_)

Parameters\_for\_Hyperbolic\_Stress\_Strain\_Behaviour\_of\_Soft\_Bangkok\_Clay

- D T Bergado et al (2018) “Prefabricated Vertical Drain (PVD) and Deep Cement Mixing (DCM)/Stiffened DCM (SDCM) techniques for soft ground improvement” [ระบบออนไลน์],

แหล่งที่มา : [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/143/1/012002)

1315/143/1/012002

- Warakorn Mairaing, Cherdpun Amonkul, (2010) “Soft Bangkok Clay Zoning” [ระบบออนไลน์],

แหล่งที่มา : [https://www.gerd.eng.ku.ac.th/Paper/Paper\\_Other/Mairaing/\(EIT-Japan\)Soft%20Bangkok%20Clay%20Zoning.pdf](https://www.gerd.eng.ku.ac.th/Paper/Paper_Other/Mairaing/(EIT-Japan)Soft%20Bangkok%20Clay%20Zoning.pdf)

- DT Bergado, LR Anderson, N Miura, AS Balasubramaniam (1996) “Soft ground improvement in lowland and other environment” [ระบบออนไลน์]

แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Soil-parameters-of-soft-Bangkok-clay-from-Bergado-and-Balasubramaniam-1994\\_tbl1\\_253234313](https://www.researchgate.net/figure/Soil-parameters-of-soft-Bangkok-clay-from-Bergado-and-Balasubramaniam-1994_tbl1_253234313)

- Suched Likitlersuang , Chhunla Chheng , Chanaton Surarak and Arumugam Balasubramaniam (2018) “Strength and Stiffness Parameters of Bangkok Clays for Finite Element Analysis” [ระบบออนไลน์]

แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/publication/331832075\\_Strength\\_and\\_Stiffness\\_Parameters\\_of\\_Bangkok\\_Clays\\_for\\_Finite\\_Element\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/331832075_Strength_and_Stiffness_Parameters_of_Bangkok_Clays_for_Finite_Element_Analysis)

- A. Abdolrezayi, N. Khayat (2020) “Comparative Three-Dimensional Finite Element Analysis of Piled Raft Foundations” [ระบบออนไลน์]

แหล่งที่มา : [https://www.jcepm.com/article\\_115532\\_8c7394894fb24b8312b729b38198c234.pdf](https://www.jcepm.com/article_115532_8c7394894fb24b8312b729b38198c234.pdf)

Syawal SATIBI, MSc., Ayman ABED, MSc., Chuang YU, Dr., Martino LEONI, Dr., Pieter A. VERMEER, Prof. Dr.-Ing. “FE Simulation of installation and loading of a Tube-Installed Pile”, Universität Stuttgart



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธนากร ใจมนต์  
วัน-เดือน-ปีเกิด 1 กันยายน 2543  
ที่อยู่ 199/6 ซอย สาธุประดิษฐ์ 11 ถนน สาธุประดิษฐ์ แขวงบางโพงพาง เขต  
ยานนาวา กรุงเทพมหานคร  
โทร 0963967242  
E-mail 62010385@kmitl.ac.th  
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2558 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนวัดสุทธิวา  
รามณ.เจริญกรุง แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร  
พ.ศ.2561 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนวัดสุทธิ  
ณ.เจริญกรุง แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร  
ปัจจุบันศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

ชื่อ-นามสกุล นายธฤต เขาว์กิจคำ  
วัน-เดือน-ปีเกิด 24 กรกฎาคม 2543  
ที่อยู่ 75/11 ถ.ท่ากลาง ต.ทับเที่ยง อ.เมือง จ.ตรัง 92000  
โทร 0918451909  
E-mail 62010407@kmitl.ac.th  
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2558 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนบูรณะรำลึก  
อ.เมือง จ.ตรัง  
พ.ศ.2561 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนบูรณะ  
รำลึก อ.เมือง จ.ตรัง  
ปัจจุบันศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

ชื่อ-นามสกุล นายนวมภูมิ จำนงศรี  
 วัน-เดือน-ปีเกิด 26 กุมภาพันธ์ 2543  
 ที่อยู่ 83 หมู่ที่4 ถนน สบสาย-เชียงใหม่ ต.ตาลชุม อ.ท่าวังผา จ.น่าน 55140  
 โทร 0927178076  
 E-mail 62010476@kmitl.ac.th  
 ประวัติการศึกษา พ.ศ.2558 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม อ.ท่าวังผา จ.น่าน  
 พ.ศ.2561 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม อ.ท่าวังผา จ.น่าน  
 ปัจจุบันศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้