



การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบ
การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก ด้วยวิธีพลศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบ
การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก ด้วยวิธีพลศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

THE STUDY OF FACTORS AFFECTING THE ACCURACY OF THE PILE
LOADING TEST BY THE DYNAMIC LOAD TEST

BY
PONPITUG KLONGLAW

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
The Master of Engineering Degree in Engineering
at Sakon Nakhon Rajabhat University
March 2024

All Rights Reserved by Sakon Nakhon Rajabhat University



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

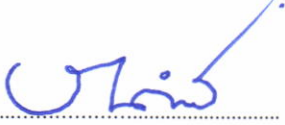
ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก
ของเสาเข็มตอก ด้วยวิธีพลศาสตร์
ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว

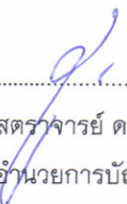
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการสอบ	 กรรมการสอบและ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สกล หอมมูมวงค์) ผู้ทรงคุณวุฒิ	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงฤทธิ์ พุทธลา) ประธานที่ปรึกษา
	วิทยานิพนธ์
 กรรมการสอบ	 กรรมการสอบและ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไวรัตน์ อิมไจ) แต่งตั้งเพิ่มเติม	(ดร.ภาคิน ลอยเจริญ) กรรมการที่ปรึกษา
	วิทยานิพนธ์

คณะกรรมการบริหารหลักสูตรรับรองแล้ว

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญญา พรหมพินิจ)
ประธานหลักสูตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุศักดิ์ แสนทวีสุข)
ผู้อำนวยการบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

เมื่อวันที่ 29 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงฤทธิ์ พุทธิลา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ภาดิน ลอยเจริญ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาแนะนำเสนอแนะ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่รวมไปถึงข้อมูลรายละเอียดในการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยฯ ตลอดทั้งให้ทุนในการศึกษา และสนับสนุนเครื่องมือเพื่อการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบคุณ กัลยาณมิตรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและส่งเสริมสนับสนุนการทำงานและข้อมูลต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดซึ่งเป็นผลทำให้ผู้เขียน สามารถทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความช่วยเหลือและ สนับสนุนในทุก ๆ ด้านด้วยความปรารถนาดียิ่ง และที่สำคัญยิ่งยังเป็นผู้ที่คอยให้กำลังใจเสมอมาโดยตลอด จนส่งผลให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา ของผู้วิจัย และบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนจนผู้วิจัยสามารถดำรงตนและบรรลุผลสำเร็จในปัจจุบัน

พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว

ชื่อเรื่อง	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก ด้วยวิธีพลศาสตร์
ผู้วิจัย	พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงฤทธิ์ พุทธลา ดร.ภาดิน ลอยเจริญ
ปริญญา	วศ.ม. (วิศวกรรมศาสตร)
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบวิธีพลศาสตร์ จากโครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร 3 โครงการ กลุ่มตัวอย่างได้แก่เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่ควบคุมการตอกด้วยสูตรการตอกเสาเข็ม Hiley's และทำการทดสอบเสาด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดหน้าตัด ความยาวของเสาเข็ม ผลข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และตำแหน่งการตอกเสาเข็ม มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็มโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาด้วยวิธีพลศาสตร์ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์ของเสาเข็มตอก และเสนอแนะข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการกำหนดขนาดและพารามิเตอร์ความปลอดภัยของโครงการก่อสร้าง

ผลการวิจัยพบว่า ความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน ในขณะที่ขนาดหน้าตัด ความยาว และตำแหน่งการตอกเสาเข็มไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำอย่างมีนัยสำคัญ การเปรียบเทียบผลการจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D มีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ และสูตรการตอกของ Hiley's เท่ากับ 3.00 มีความเหมาะสมสำหรับโครงการภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร และพื้นที่อื่น ๆ ที่มีลักษณะดินใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: การทดสอบเสาเข็มตอกแบบพลศาสตร์ น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

TITLE	The study of factors affecting the accuracy of the pile loading test by the Dynamic load test method
AUTHOR	Ponpitug Klongklaw
ADVISORS	Asst. Prof. Dr. Songrit Puttala Dr.Phakin Loyjaroen
DEGREE	M.Eng. (Engineering)
INSTITUTION	Sakon Nakhon Rajabhat University
YEAR	2024

ABSTRACT

This research investigates factors influencing the accuracy of dynamic pile load testing based on data from three construction projects at Sakon Nakhon Rajabhat University. The sample comprises prestressed concrete piles driven according to Hiley's pile-driving formula, tested dynamically, considering variables such as pile cross-sectional size, pile length, soil investigation results, and pile-driving locations. The objective is to study the mathematical simulation model of a single pile under load at the pile head using the PLAXIS 2D program and compare the model results with those from dynamic testing. Study of factors affecting the accuracy of dynamic load testing of driven piles and suggest information for decision identify in determining the size and safety parameters of construction projects.

The research findings indicate that the accuracy of dynamic pile load testing depends on soil investigation data. In contrast, pile cross-sectional, length, and piles driving location have no significant impact on accuracy. The comparison reveals that the load capacity of piles by simulation results using PLAXIS 2D are significantly higher than those obtained from dynamic testing. Additionally, Hiley's driving formula factor 3.00 is suitable for construction projects within Sakon Nakhon Rajabhat University and other areas with similar soil conditions.

Keywords: Dynamic pile testing Safe load capacity Mathematical modeling

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
คำถามของการวิจัย	3
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
สมมติฐานของการวิจัย	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	5
กรอบแนวคิดการวิจัย	6
นิยามศัพท์เฉพาะ	8
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
การเจาะสำรวจชั้นดิน	11
การจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification)	15
ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์	15
เสาเข็มและประเภทของเสาเข็ม	18
การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงบนชั้นดิน	19
การตอกเสาเข็มและสูตรตอกเสาเข็ม	20
การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	23
โปรแกรม Plaxis 2D	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย	33
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	35
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	36
การเก็บรวบรวมข้อมูล	37
การวิเคราะห์ข้อมูล	39
สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย	42
ผลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม	42
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	50
5 สรุป อภิปรายผล ข้อเสนอแนะ	62
ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก ของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์	62
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการจำลองน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D กับการทดสอบ การรับน้ำหนักวิธีพลศาสตร์	62
ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก การเจาะสำรวจชั้นดินในการวิจัย	69
ภาคผนวก ข ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม	73
ภาคผนวก ค การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม.....	80
ภาคผนวก ง การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D	91
ภาคผนวก จ การเผยแพร่ผลงาน	101
ประวัติย่อของผู้วิจัย	112

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และ N-Value ของดิน	13
2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-Value และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) สำหรับดินทราย	14
3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-Value และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) สำหรับดินเหนียว	14
4 จำนวนวัสดุและวัสดุตัวอย่าง	36
5 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ ในการสร้างแบบจำลองโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพ ระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย	45
6 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ ในการสร้างแบบจำลองโครงการอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์	46
7 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ ในการสร้างแบบจำลองโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา และโครงการขยายห้องเรียน	46
8 แสดงรายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม	48
9 ผลการตอกเสาเข็ม	49
10 ผลการวิเคราะห์การคำนวณการตอกเสาเข็ม	51

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 Flow chart การดำเนินงานวิจัย	8
2 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม	19
3 ภาพแสดงเครื่องมือ การติดตั้งที่ใช้ในการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์	26
4 ภาพแสดงการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load test)...	27
5 แสดงโหนด และจุดรวมความเครียด (Tutorial manual plaxis 2D v20)..	29
6 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	34
7 ตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดิน (Boring test) ของงานก่อสร้าง ทั้ง 3 โครงการ ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร	43
8 ภาพตัดการเรียงตัวของชั้นดินของหลุมเจาะ BH-1, BH-2 และ BH-3 ..	44
9 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพ ระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย	53
10 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคาร ปฏิบัติการสอนครูศาสตร์	53
11 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารเรียน ประถมศึกษาและโครงการขยายห้องเรียน	54
12 การทรุดตัวของเสาเข็มมีการทรุดของเสาเข็มแตกต่างกัน เมื่อการฝังตัวของเสาเข็มต่างกัน	54
13 การทรุดตัวของเสาเข็มเฉลี่ย 3 โครงการ	55
14 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้าง เพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย	57
15 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้าง อาคารปฏิบัติการสอนครูศาสตร์	57

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
16 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารเรียน ประถมศึกษาและโครงการขยายห้องเรียน	58
17 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพ ระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย	60
18 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอน ครุศาสตร์	60
19 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารเรียน ประถมศึกษา	61
20 การเจาะสำรวจชั้นดินโครงการเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา	70
21 การเจาะสำรวจชั้นดินโครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์	70
22 Boring และ STP โครงการเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา	71
23 Boring และ STP โครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์	71
24 Boring log โครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์	72
25 ตัวอย่างรายการคำนวณความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุก ของเสาเข็ม	74
26 ตัวอย่างรายการคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley	75
27 ตัวอย่างบันทึกการตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก	76
28 การตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก	77
29 การตอกเสาเข็ม	78
30 บันทึกเสาเข็มก่อนตอก	79
31 เครื่องทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม	81
32 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ	82
33 ผังแสดงตำแหน่งทดสอบเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์	83

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
34 การทดสอบเสาะเข็ม	84
35 ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบเสาะเข็ม	85
36 ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบเสาะเข็ม	86
37 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาะเข็ม	87
38 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาะเข็ม	88
39 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาะเข็ม	89
40 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาะเข็ม	90

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทยมีจำนวนมากขึ้นตามการพัฒนาของเมืองต่าง ๆ ภายในประเทศ สิ่งก่อสร้างส่วนมากนั้นยังคงนิยมก่อสร้างเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากยังคงมีราคาที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็ก โดยในระบบของโครงสร้างนั้นก็จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบหลักของอาคาร ได้แก่ หลังคา พื้น บันได คาน เสา ฐานราก และเสาเข็ม เป็นต้น ซึ่งระบบการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างอาคารนั้นจะถูกถ่ายน้ำหนักในแนวตั้งลงมาจากหลังคาจนถึงเสาเข็มที่ฝังอยู่ในชั้นดิน ดังนั้นเสาเข็มที่ฝังตัวอยู่ในชั้นดินจึงมีความสำคัญเป็นอันดับต้น ๆ ในการก่อสร้างอาคารจึงจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบ การควบคุมการก่อสร้าง และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ดี เพื่อให้เสาเข็มเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วสามารถรับน้ำหนักบรรทุกตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ เสาเข็มคอนกรีตแบ่งเป็น 2 แบบ หลัก ๆ ได้แก่ เสาเข็มตอก และเสาเข็มเจาะ โดยเสาเข็มทั้ง 2 แบบนั้น จะรับน้ำหนักบรรทุก 2 ส่วน คือ แรงเสียดทานที่ผิวรอบเสาเข็มตลอดความยาว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะเป็นผลรวมกันระหว่างของแรงเสียดทานที่ผิวรอบเสาเข็มตลอดความยาวและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ยกเว้นเมื่อเสาเข็มเจาะฝังตัวในดินที่อ่อนมากเกินไปยังดินที่แข็งกว่า (Bowles, 1997)

ในการก่อสร้างฐานรากที่ใช้เสาเข็มตอก ขั้นตอนการออกแบบจะเป็นขั้นตอนแรก และเป็นขั้นตอนที่จำเป็นจะต้องประเมินการรับน้ำหนักของบรรทุกของเสาเข็มจากผลการเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring log) ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 (ASTM International, 2022) ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญเนื่องจากดินในแต่ละพื้นที่นั้นจะมีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกันออกไป คุณสมบัติของดินไม่สามารถระบุครอบคลุมพื้นที่ได้ แต่สามารถประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกได้จากผลการเจาะสำรวจของชั้นดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบ ชั้นดินนั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงแม้ในพื้นที่ก่อสร้างเดียวกัน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ, 2557) ดังนั้นการเจาะสำรวจชั้นดินยิ่งมีจำนวนการเจาะมากก็จะทำให้ผลการ

วิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่จะต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย และระยะเวลาตามไปด้วย ซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาหลุมเจาะเบื้องต้นที่เหมาะสมนั้นไม่ได้ระบุชัดเจน แต่มีการแนะนำระยะห่างของหลุมเจาะในการก่อสร้างอาคารว่าควรมีจำนวนอย่างน้อย 3 หลุม (Bowles, 1997) แต่ในบางโครงการมีข้อกำหนดด้านระยะเวลา และค่าใช้จ่าย จึงจำเป็นต้องเจาะสำรวจชั้นดินตรงบริเวณที่มีการรับน้ำหนักสูงสุดของตัวอาคารเพียงจุดเดียวเพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณและระยะเวลา

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงนั้นมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย หน้าที่หลักคือรับน้ำหนักจากอาคารและถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดิน ดังนั้นการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ วิธีการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ (Static Load test) และวิธีการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) แม้ว่าวิธีการทดสอบแบบสถิตศาสตร์จะให้ค่าความน่าเชื่อถือมากที่สุด (ทินกร ทานา และสยาม ยิ้มศิริ, 2563) แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน มีราคาที่สูงกว่าแบบพลศาสตร์ และที่สำคัญขณะทำการทดสอบจะต้องหยุดการก่อสร้างในบริเวณที่ใกล้เคียงการทดสอบ ดังนั้นวิธีการทดสอบแบบพลศาสตร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม เนื่องจากได้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว ราคาที่ถูกกว่า และที่สำคัญสามารถทำการก่อสร้างส่วนอื่นได้ต่อเนื่อง วิธีพลศาสตร์จึงมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นแต่ก็ยังต้องมีข้อสงสัยเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (และคณะ, 2566) ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ควรมีการวิเคราะห์ความแม่นยำของการทดสอบเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเสาเข็มมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อก่อสร้างเสร็จจำเป็นต้องทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ในการวิจัยนี้ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง โดยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจะถูกตอกฝังลงไปชั้นดิน โดยใช้สูตรในการคำนวณเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนตอก ซึ่งสูตรการตอกเสาเข็มจะต้องใช้ข้อมูล น้ำหนักตุ้มตอก ขนาดเสาเข็ม ความยาว และระยะยกตุ้มตอก เป็นต้น ซึ่งในกรณีศึกษาที่ใช้สูตรการตอกเสาเข็มของ Hiley's เนื่องจากงานก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครส่วนใหญ่เลือกใช้การตอกเสาเข็มด้วยสูตรการตอกเสาเข็มของ Hiley's และผลการเปรียบเทียบค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการคำนวณโดยสูตรดังกล่าวที่อัตราส่วนความปลอดภัย 2.50 กับการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์มีความ

ใกล้เคียงที่ร้อยละ 90 (วัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์, ปัญชาน์ ต่อกิตติกุล และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, 2564) จากนั้นทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์โดยเลือกเสาเข็มต้นที่มีข้อมูลการตอกที่วิกฤติสุด กล่าวคือ มีผลบันทึกการตอกที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดแต่ไม่เกินค่าที่คำนวณได้จากสูตร Hiley's ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D สร้างแบบจำลองเพื่อทำการเปรียบเทียบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จะเป็นการจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีลักษณะเหมือนการทดสอบแบบวิธีสถิตยศาสตร์ จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์เพื่อประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์ ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

คำถามของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดคำถามของการวิจัยไว้ ดังนี้

1. ปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และตำแหน่งการตอกเสาเข็ม
2. แบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็ม โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ให้ผลลัพธ์แตกต่างจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์จากการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's อย่างไร และนำผลลัพธ์จากการศึกษานี้ไปใช้ในการตัดสินใจในการก่อสร้างสำหรับโครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครอย่างไร

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดความมุ่งหมายของการวิจัยไว้ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ภายใต้การกำหนดตัวแปรที่แตกต่างกันของ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ผลข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และตำแหน่งการตอกเสาเข็ม

2. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกบนหัวเสาเข็ม โดยใช้ โปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งใช้ผลข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจกำหนด ขนาด การเลือกสูตรและค่าความปลอดภัย ของโครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

สมมุติฐานของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานของการวิจัย ไว้ดังนี้

1. การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D จำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกบนหัวเสาเข็มที่มีขนาดต่างกันและชุดข้อมูลเจาะสำรวจดินเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ สามารถอธิบายการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มได้
2. ความแปรปรวนของชั้นดิน ขนาด ความยาว และตำแหน่งของเสาเข็มเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D สำหรับเทียบกับผลการทดสอบเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และผลจากการใช้ค่าความปลอดภัยในสูตร Hiley's เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของผลการทดสอบ

ความสำคัญของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดความสำคัญของการวิจัย ไว้ดังนี้

1. ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ภายใต้การกำหนดตัวแปรที่แตกต่างกันของ ขนาด หน้าตัดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ผลข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และตำแหน่งการตอกเสาเข็ม
2. ทราบถึงผลการสร้างแบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกบนหัวเสาเข็ม โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งใช้ผลข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจกำหนด ขนาดเสาเข็ม

ความยาวเสาเข็ม การเลือกใช้ค่าความปลอดภัยของสูตร Hiley's ของโครงการก่อสร้าง
ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัย ไว้ดังนี้

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

การวิจัยนี้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับ
น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งได้กำหนดปัจจัยในการวิจัยที่แตกต่างกัน
ของ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ผลข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และ
ตำแหน่งการตอกเสาเข็ม ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D
เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยอาศัยข้อมูลของการเจาะ
สำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็มบันทึกการตอกเสาเข็ม และข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม
โดยวิธีพลศาสตร์ในการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

2. วัสดุ และกลุ่มวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน
ที่ก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบ
ประปาภายในมหาวิทยาลัย จำแนกเป็นเสาเข็มขนาด 22.00 x 22.00 เซนติเมตร จำนวน
119 ต้น และ 30.00 x 30.00 เซนติเมตร จำนวน 60 ต้น โครงการก่อสร้างอาคาร
ปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ จำแนกเป็นเสาเข็มขนาด 18.00 x 18.00 เซนติเมตรจำนวน 94
ต้น และ 22.00 x 22.00 เซนติเมตร จำนวน 15 ต้น โครงการก่อสร้างอาคารเรียน
ประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียน จำแนกเป็นเสาเข็มขนาด 22.00 x 22.00 เซนติเมตร
จำนวน 27 ต้น, 26.00 x 26.00 เซนติเมตร จำนวน 17 ต้น และ 35.00 x 35.00
เซนติเมตร จำนวน 9 ต้นความยาว 10.00 ถึง 13.00 เมตร

2.2 กลุ่มวัสดุตัวอย่าง

ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตันขนาด 18.00 x 18.00
เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 8 ต้น, 22.00 x 22.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 เมตร
จำนวน 1 ต้น, 22.00 x 22.00 เซนติเมตร ยาว 12.00 เมตร จำนวน 2 ต้น, 22.00 x 22.00
เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 2 ต้น, 26.00 x 26.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร

จำนวน 1 ต้น, 30.00 x 30.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 เมตร จำนวน 1 ต้น, 30.00 x 30.00 เซนติเมตร ยาว 12.00 เมตร จำนวน 2 ต้น และ 35.00 x 35.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 1 ต้น

3. ตัวแปรที่ศึกษา

3.1 ตัวแปรอิสระ แบ่งเป็นดังนี้

3.1.1 เสาค้ำคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน

- 1) ขนาด 18.00 x 18.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร
- 2) ขนาด 22.00 x 22.00 เซนติเมตร ยาว 10.00, 12.00, และ 13.00 เมตร
- 3) ขนาด 26.00 x 26.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร
- 4) ขนาด 30.00 x 30.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 และ 12.00 เมตร

- 5) ขนาด 35.00 x 35.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร

3.1.2 ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ได้จากการเจาะสำรวจเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D

3.2 ตัวแปรตาม

3.2.1 ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาค้ำคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน

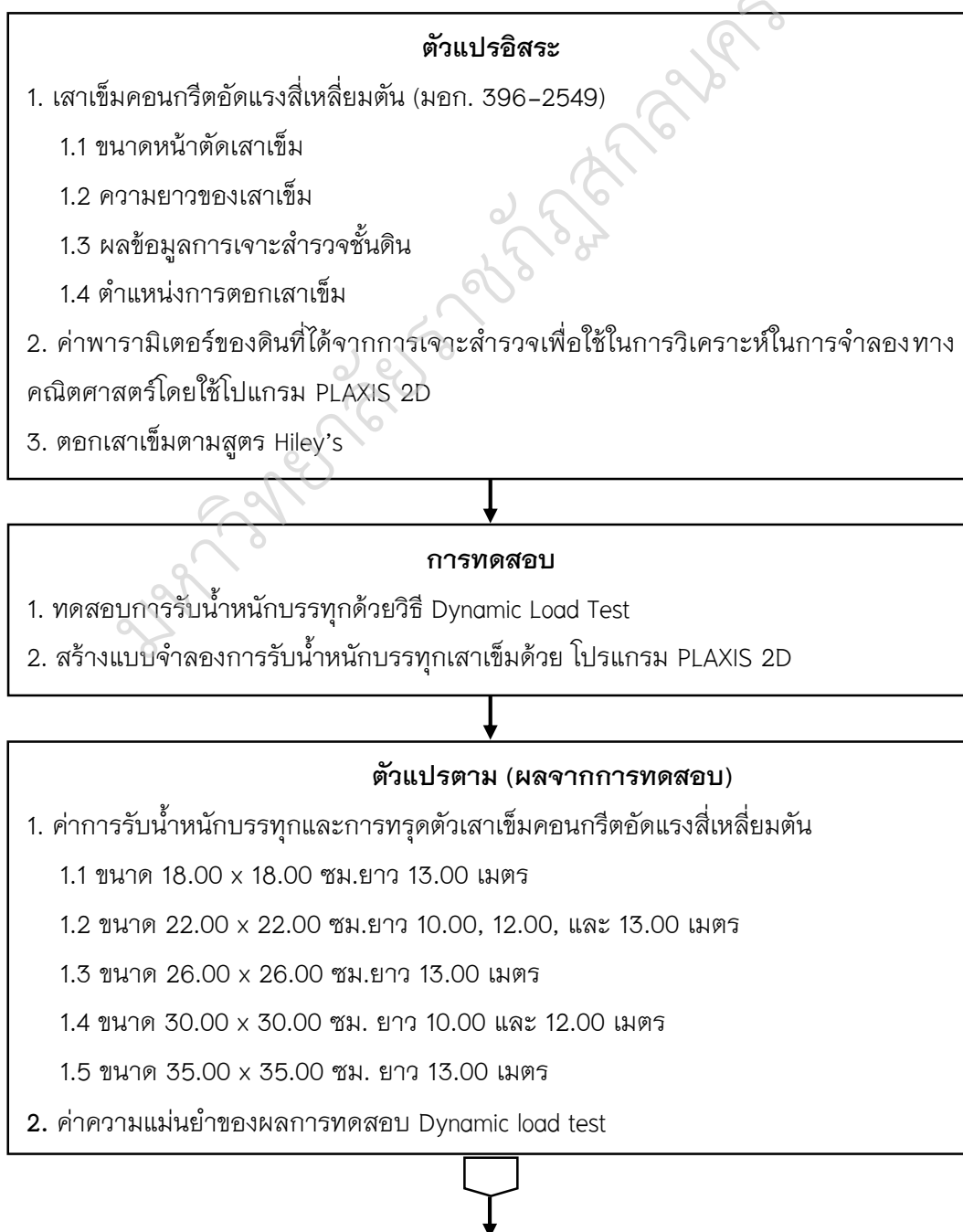
- 1) ขนาด 18.00 x 18.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร
- 2) ขนาด 22.00 x 22.00 เซนติเมตร ยาว 10.00, 12.00, และ 13.00 เมตร
- 3) ขนาด 26.00 x 26.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร
- 4) ขนาด 30.00 x 30.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 และ 12.00 เมตร

- 5) ขนาด 35.00 x 35.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร

กรอบแนวคิดของการวิจัย

ในการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาค้ำคอนกรีตด้วยวิธีพลศาสตร์ ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย

โดยอาศัยข้อมูลเสาเข็ม ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และการจำลองการทดสอบแบบ สถิติศาสตร์ โดยการกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกลงบนหัวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D สร้างแบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกบนหัวเสาเข็ม เพื่อหาค่าการ รับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มตอก นำผลที่ได้จากการจำลองมา เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ จากการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's ของโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย โครงการ ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ และโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา โครงการขยายห้องเรียน ผู้วิจัยจึงสรุปเป็นกรอบแนวคิดของการวิจัย ดังภาพประกอบ 1





วิเคราะห์และสรุปผล

1. เปรียบเทียบการรับน้ำหนักบรรทุกจาก สูตร Hiley's การทดสอบ Dynamic Load Test และแบบจำลองจาก PLAXIS 2D
2. สรุปปัจจัยของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบ Dynamic Load Test โครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ภาพประกอบ 1 Flow chart การดำเนินงานวิจัย

นิยามศัพท์เฉพาะ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้นิยามศัพท์เฉพาะไว้

1. หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ_u) หมายถึง คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน เป็นอัตราส่วนน้ำหนักของดินต่อปริมาตรของดิน
2. มุมเสียดทานของดิน (Friction angle, ϕ) หมายถึง มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน
3. โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หมายถึง อัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น หรือความชันของกราฟ
4. โมดูลัสยืดหยุ่น (Poisson's ratio, ν) หมายถึง อัตราส่วนความเครียดด้านขวางต่อความยาวของดิน
5. พลศาสตร์ (Dynamic Load Test, DLT) หมายถึง วิธีการทดสอบหาความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบวิธีพลศาสตร์
6. ระยะเวลาของเสาเข็มจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (Last ten blow, LTB) หมายถึง ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการตอกด้วยตุ้มเหล็กจำนวน 10 ครั้ง ที่มีเงื่อนไขตามสูตรตอกเสาเข็ม
7. แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) หมายถึง ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างพื้นผิวรอบเสาเข็มตลอดความยาวเสาเข็มกับเม็ดดินโดยรอบ

8. แรงต้านทานที่ปลายเข็ม (End Bearing) หมายถึง ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ปลายเสาเข็มที่ตอกลงไปถึงชั้นดินแข็ง

9. น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Pile Capacity) หมายถึง ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เกิดจากผลรวมของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม และแรงต้านทานที่ปลายเข็ม

10. สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas) หมายถึง สูตรการตอกเสาเข็มที่ใช้ประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มขณะตอก

11. อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) หมายถึง อัตราส่วนที่ใช้ลดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเนื่องจากความไม่แน่นอนต่าง ๆ

12. กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ (Allowable pile capacity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก ด้วยวิธี พลศาสตร์ โดยสามารถสรุปสาระสำคัญตามลำดับ ดังนี้

1. การเจาะสำรวจชั้นดิน
2. การจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification)
3. เสาเข็มและประเภทของเสาเข็ม
4. การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงบนชั้นดิน
5. การตอกเสาเข็ม และสูตรตอกเสาเข็ม
6. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
7. โปรแกรม Plaxis 2D
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเจาะสำรวจชั้นดิน

การเจาะสำรวจชั้นดินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินทดสอบดินในสนาม เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ นำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องของชั้นดินทั้งด้านกายภาพและด้านวิศวกรรมตลอดจนให้ทราบความลึกของระดับน้ำใต้ดิน และแสดงรูปตัดรายละเอียดของชั้นดิน ในการกำหนดจำนวนหลุมเจาะนั้นยากที่จะกำหนดให้เป็นมาตรฐานคงที่ทั้งนี้เพราะการกำหนดจำนวนหลุมจะขึ้นอยู่กับขนาดของสิ่งปลูกสร้างคุณลักษณะคุณสมบัติ และความแปรปรวนของชั้นดิน (ปิยะ รัตนสุวรรณ, 2561)

1. ความลึกของหลุมเจาะ

การกำหนดความลึกของหลุมเจาะจะขึ้นอยู่กับขนาดของอาคารและน้ำหนักของอาคารที่ถ่ายลงในชั้นดิน ในการเจาะสำรวจชั้นดินจะต้องลึกลงไปถึงระดับที่ผลกระทบของน้ำหนักอาคารที่ก่อให้เกิดการทรุดตัว ในการเจาะสำรวจชั้นดินนั้น (Tomlinson, 2001)

แนะนำความลึกที่ 1.50 เท่าของความกว้างของฐานราก กรณีโครงสร้างเป็นฐานรากแผ่ที่มีระยะห่างกันหรือฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ความลึกของหลุมเจาะจะประมาณ 1.50 เท่าของความกว้างของฐานรากเริ่มจากระดับความลึกของฐานราก และกรณีโครงสร้างเป็นฐานรากมีเสาเข็มความลึกของหลุมเจาะจะประมาณ 1.50 เท่าของความกว้างของฐานรากเริ่มจากระดับความลึก 2/3 ของความยาวเสาเข็ม

2. วิธีการเจาะสำรวจ

การได้มาซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของดินที่มีความถูกต้อง การเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างดินจะต้องทำด้วยความระมัดระวังให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อตัวอย่างที่ต้องการน้อยที่สุด วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินนั้นมีหลายวิธีซึ่งมีขั้นตอนขบวนการที่ต่างกันไป และการเจาะสำรวจชั้นดินนั้นในการเจาะแต่ละหลุมอาจใช้วิธีการเจาะได้มากกว่า 1 วิธี โดยแยกวิธีการเจาะต่าง ๆ ดังนี้

2.1 วิธีการขุดบ่อทดสอบ (Trial Pits)

วิธีการนี้ทำโดยการขุดดินรอบ ๆ ดินตัวอย่างที่ต้องการเก็บให้เป็นลูกสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 20.00 ถึง 30.00 เซนติเมตรแล้วใช้มีดตัดก่อนตัวอย่างนั้นแล้วทำการเคลือบด้วยพาราฟิน (Paraffin) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นก่อนนำตัวอย่างส่งห้องปฏิบัติการทดสอบ ข้อดีของวิธีการนี้คือตัวอย่างที่ได้จะได้รับการกระทบกระเทือนที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ แต่ไม่สามารถทำการเจาะเก็บตัวอย่างในระดับที่ลึกได้

2.2 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่าน (Auger Boring)

การเจาะสำรวจชั้นดินนี้เป็นการเจาะด้วยสว่านโดยใช้เครื่องปั้นหรือแรงคน การขุดเจาะด้วยเครื่องปั้น (Mechanical Auger) จะสามารถเจาะได้ลึกมากกว่า 10.00 เมตร และสำหรับการขุดเจาะด้วยแรงคน (Hand Auger) จะขุดเจาะได้ที่ความลึกประมาณ 4.00 ถึง 6.00 เมตร วิธีการเจาะทำโดยการหมุนสว่านเอาดินออกจนได้ระดับความลึกที่ต้องการแล้วทำการการเก็บตัวอย่างตามความลึกที่ต้องการ วิธีการนี้เหมาะสำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวและมีข้อจำกัดคือไม่สามารถเจาะบริเวณที่เป็นดินเป็นทรายหรือกรวดและที่มีน้ำใต้ดินได้

2.3 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้าง (Wash Boring)

เป็นวิธีการเจาะโดยอาศัยการตกกระแทกของหัวเจาะให้ดินแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วใช้น้ำฉีดอัดผ่านก้านเจาะดันดินชิ้นเล็ก ๆ นั้นขึ้นมา ตามผนังเจาะ

โดยดินจะไหลไปลงบ่อดกตะกอนข้างหลุมเจาะ และน้ำจะถูกสูบกลับคืนมาใช้ใหม่ ในการเจาะสำรวจด้วยวิธีนี้จะมีการป้องกันผนังหลุมไม่ให้ดินพังทลายโดยการตอก Steel Casing ลงไปในชั้นดินเหนียวอ่อนและในกรณีที่จะผ่านชั้นทรายจะอาศัย Bentonite ช่วยป้องกันการพังทลายของหลุม วิธีการเจาะวิธีนี้เป็นวิธีการเจาะที่ทำได้ง่ายอุปกรณ์ไม่สลับซับซ้อนสะดวกต่อการขนย้าย และขณะเจาะยังสามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของชั้นดินได้จากสีของน้ำที่ล้นขึ้นมาจากหลุม แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถเจาะผ่านชั้นลูกรังแข็ง ชั้นหินปูน ชั้นดินดานหรือชั้นกรวดขนาดใหญ่ได้

2.4 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบเจาะปั่น (Rotary Drilling)

เป็นวิธีการเจาะโดยเครื่องยนต์ที่มีหัวเจาะแบบปั่น ที่หัวเจาะปั่นจะมีรูสำหรับฉีดปล่อยน้ำสำหรับนำเอาดินออกมา เป็นวิธีที่มีการป้องกันผนังหลุมเจาะไม่ให้พังทลายเหมือนกับวิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้าง วิธีการนี้เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการเจาะที่รบกวนชั้นดินน้อย เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับชั้นหินและดินทุกชนิดเพราะสามารถเปลี่ยนหัวเจาะได้ตามที่ต้องการแล้วแต่กรณีชั้นดินหรือหินที่เจอ

3. การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินในการเจาะสำรวจชั้นดิน ในกรณีที่ชั้นดินมีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยทั่วไปจะทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ ระยะ 1.50 เมตร ส่วนในกรณีของชั้นดินที่มีความแปรปรวนอาจทำการเก็บตัวอย่างดินทุก ๆ ความลึก 1.00 เมตร ตลอดความลึกของหลุมเจาะ การเก็บตัวอย่างดินโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ ได้แก่

3.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample)

การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพจะทำได้โดยใช้กระบอกบาง (Shelly-Tube) สำหรับดินอ่อน ซึ่งเป็นเหล็กกระบอกบางไม่มีตะเข็บมีความหนาประมาณ 1.50 ถึง 2.00 มิลลิเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 75.00 มิลลิเมตร และมีความยาวประมาณ 600.00 มิลลิเมตรทำการกดลงไปชั้นดินด้วยความเร็วสูงอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ แล้วบิดนำตัวอย่างขึ้นมา หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินขึ้นมาจะทำการปิดผนึกตัวอย่างด้วยพาราฟินเพื่อป้องกันมิให้ความชื้นระเหยออกจากตัวอย่างดินก่อนนำส่งห้องปฏิบัติการทดสอบต่อไป

3.2 ตัวอย่างดินไม่คงสภาพ (Disturbed Sample)

การเก็บตัวอย่างดินไม่คงสภาพจะทำได้โดยใช้กระบอกลูกฟัก (Split-Spoon Soil Sampler) ซึ่งเป็นกระบอกลูกฟักครึ่งวงกลม 2 แผ่นประกบกันด้วยข้อต่อหัวท้าย ใช้สำหรับชั้นดินดินเหนียวแข็งหรือชั้นทราย การเก็บตัวอย่างดินทำได้โดยการตอกกระบอกลูกฟักลงในดินโดยต่อกับปลายก้านเจาะในการทำ Standard Penetration Test (SPT) เมื่อนำกลับขึ้นมาคลายเกลียวข้อต่อหัวท้ายออกตัวกระบอกลูกฟักจะเปิดออกเป็น 2 ส่วน ทำการตัดตัวอย่างเก็บดินใส่ขวดเก็บตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

4. การทดสอบในสนาม

การทดสอบตัวอย่างดินนอกจากมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้วยังมีการทดสอบตัวอย่างดินในภาคสนามซึ่งมีหลายวิธีได้แก่

4.1 Standard Penetration Test (SPT)

การทดสอบ STP มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่า Consistency ของดิน Cohesive Soil และค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดิน Cohesionless Soil ทำโดยใช้ลูกตุ้มหนักมาตรฐานหนัก 140.00 ปอนด์ตอกกระบอกลูกฟักมาตรฐานโดยยกตุ้มน้ำหนักเท่ากับ 76.00 เซนติเมตร แล้วทำการนับจำนวนครั้งที่ตอกกระบอกลูกฟักต่อให้จมลงไป 15.00 เซนติเมตร ทำซ้ำ 3 รอบนำค่าครึ่งในรอบที่ 2 และที่ 3 มาเฉลี่ยเป็นค่า STP หรือเรียกว่าค่า N-Value โดยค่า STP ที่ได้สามารถบ่งบอกถึงความหนาแน่น และสามารถแปลผลของดินตัวอย่างได้ดังตาราง 1, 2, และ 3

ตาราง 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และ N-Value ของดิน

Relative Density เทียบกับ N-Value		N/ft
Vary Loose	หลวมมาก	0-4
Loose	หลวม	5-10
Medium	แน่นปานกลาง	11-30
Dense	แน่น	31-50
Vary Dense	แน่นมาก	มากกว่า 50

ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-Value และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) สำหรับดินทราย

รายละเอียด	N/ft	ϕ (Degree)
หลวมมาก (Vary Loose)	0-4	25-30
หลวม (Loose)	5-10	27-32
แน่นปานกลาง (Medium)	11-30	30-35
แน่น (Dense)	31-50	35-40
แน่นมาก (Vary Dense)	มากกว่า 50	35-45

(ที่มา : Meyerhof, 1956)

ตาราง 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-Value และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u)
สำหรับดินเหนียว

รายละเอียด	N/ft	q_u (ksc)
อ่อนมาก (Vary Soft)	< 2	<0.25
อ่อน (Soft)	2-4	0.25-0.50
ปานกลาง (Medium)	4-8	0.50-1.00
แข็ง (Stiff)	8-15	1.00-2.00
แข็งมาก (Very Stiff)	15-30	2.00-4.00
แข็งสุด (Hard Stiff)	> 30	>4.00

(ที่มา : Terzaghi, 1967)

4.2 Field Vane Shear Test

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแรงเฉือนของดินอ่อนในสภาพธรรมชาติโดยปราศจากการกระทบกระเทือนต่อโครงสร้างของดิน ทำโดยใช้ใบมี 4 แฉกทำด้วยโลหะไม่เป็นสนิมหนาไม่น้อยกว่า 1.60 มิลลิเมตรแต่ไม่เกิน 3.20 มิลลิเมตร มีก้านใบมีก้านใบมีดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.25 เซนติเมตรยาวไม่เกิน 1.00 เมตร การทดสอบเริ่มจากกดใบมีดเหล็กลงในดินลึกประมาณ 30.00 เซนติเมตร แล้วหมุนใบมีดตัดดินให้ขาดทำการอ่านค่า Torque (Kg-cm) แล้วนำไปหาค่าแรงเฉือนของดินต่อไป

การจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification)

การจำแนกประเภทของดินมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดประเภทของดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นหมวดหมู่ ดินที่เป็นหมวดหมู่เดียวกันจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเหมือนกัน และสามารถนำคุณสมบัติทางวิศวกรรมไปใช้ในการออกแบบและการก่อสร้างทางวิศวกรรมได้ ระบบการจำแนกประเภทของดินนั้นมีหลายระบบ ในที่นี้จะแยกดินตามขนาดตามมาตรฐานของ AASHTO โดยสามารถแยกออกเป็น กรวด ทรายหยาบ ทรายละเอียด ตะกอนทราย และดินเหนียว โดยกรวดนั้นจะมีเม็ดขนาดตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรขึ้นไป กรวดนั้นไม่มีความเหนียวจัดอยู่ในดินประเภท Cohesionless Soil กำลังต้านทานของกรวดจึงเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดกรวดอย่างเดียว ส่วนทรายนั้นจะมีขนาดเม็ดอยู่ระหว่าง 0.075 ถึง 2.00 มิลลิเมตร ทรายมีขนาดเล็กกว่ากรวดแต่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ตะกอนทรายมีขนาดเม็ดอยู่ระหว่าง 0.002 ถึง 0.075 มิลลิเมตร ความเหนียวเกิดจากแรงดึงดูดของน้ำที่เคลือบเม็ดดิน ดังนั้นเมื่อดินตะกอนทรายแห้งจะไม่มีค่าความเหนียวจึงจัดอยู่ในประเภท Non-Cohesive Soil และดินเหนียวมีขนาดใหญ่ไม่เกิน 0.002 มิลลิเมตร ดินเหนียวจัดอยู่ในประเภท Cohesive Soil กำลังของดินเหนียวจะเกิดจากแรงเสียดทาน และแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าระหว่างเม็ดดิน

ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์

1. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E)

Young's modulus (E) เป็นค่าที่แสดงถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกระทำ ค่า Young's modulus มีหน่วยเป็น GPa หรือ MPa และคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

โดยที่:

E คือ Young's modulus (หน่วยเป็น GPa หรือ MPa)

σ คือความเค้น (stress) ซึ่งคำนวณจากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (หน่วยเป็น N/m² หรือ Pa)

ϵ คือความเครียด (strain) ซึ่งคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุเทียบกับความยาวเดิม (ไม่มีหน่วย)

การหาค่า Young's modulus เริ่มจากเตรียมตัวอย่างวัสดุตามมาตรฐาน เช่น ASTM หรือ ISO จากนั้นนำไปทดสอบในเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) โดยการดึงตัวอย่างด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และบันทึกข้อมูลความเครียด และความเค้นตลอดการทดสอบ ใช้เซ็นเซอร์ เช่น extensometer วัดความเค้น (σ) จากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ($\frac{F}{A}$) และความเครียด (ϵ) จากการเปลี่ยนแปลงความยาวเทียบกับความยาวเดิม (L_0) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลโดยสร้างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) และคำนวณค่า Young's modulus (E) จากความชันของกราฟในช่วงเส้นตรงที่วัสดุแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นสมบูรณ์

$$\frac{\Delta L}{L_0}$$

ยาวเดิม (L_0) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลโดยสร้างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) และคำนวณค่า Young's modulus (E) จากความชันของกราฟในช่วงเส้นตรงที่วัสดุแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นสมบูรณ์

2. ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν)

Poisson's ratio (ν) เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้านข้างกับการยืดตัวตามยาวของวัสดุเมื่อวัสดุได้รับแรงดึง ค่านี้ไม่มีหน่วยและคำนวณได้จากสมการ

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}}$$

โดยที่:

ν คือ Poisson's ratio (ไม่มีหน่วย)

ϵ_{lat} คือความเครียดในทิศทางด้านข้าง (lateral strain)

ϵ_{long} คือความเครียดในทิศทางตามยาว (longitudinal strain)

การหาค่า Poisson's ratio เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างวัสดุในรูปทรงที่กำหนด โดยขนาดและรูปร่างของตัวอย่างตามข้อกำหนดของมาตรฐาน จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบในเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งจะดึงตัวอย่างด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดความเครียดและความเค้นในตัวอย่าง ข้อมูลแรงที่กระทำและการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างจะถูกบันทึกตลอดการทดสอบ ระหว่างการทดสอบจะมีการวัดความเครียดในทิศทางด้านข้าง (lateral strain) และตามยาว (longitudinal strain) โดยใช้ extensometer สำหรับวัดความเครียดในทิศทางตามยาวและ strain gauges สำหรับวัด

ความเครียดในทิศทางด้านข้าง ความเครียดเหล่านี้เป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความยาวต่อความยาวเดิมสุดท้าย นำค่าความเครียดที่วัดได้มาคำนวณ Poisson's ratio ตามสมการ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการหดตัวด้านข้างเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางตามยาว

3. หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ)

หน่วยน้ำหนัก คือ ปริมาณน้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยปริมาตร โดยทั่วไป หน่วยน้ำหนักจะถูกใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธาและงานก่อสร้าง หน่วยน้ำหนักมีความสำคัญในการคำนวณความมั่นคงของโครงสร้างและการคำนวณโหลดที่กระทำบนวัสดุ หน่วยน้ำหนักสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

โดยที่:

γ คือ หน่วยน้ำหนัก (N/m^3 หรือ kN/m^3)

W คือ น้ำหนักของวัสดุ (N หรือ kN)

V คือ ปริมาตรของวัสดุ (m^3)

หน่วยน้ำหนักสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight) และหน่วยน้ำหนักเปียก (Wet Unit Weight) หน่วยน้ำหนักแห้งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักของวัสดุที่ไม่มีน้ำผสม ในขณะที่หน่วยน้ำหนักเปียกเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักของวัสดุที่มีน้ำผสม การหาค่าหน่วยน้ำหนักเปียกมักมีการนำปริมาณน้ำในวัสดุเข้ามาคำนวณด้วย หน่วยน้ำหนักมีบทบาทสำคัญในการออกแบบโครงสร้างฐานราก การวิเคราะห์ความเสถียรของดิน รวมถึงการคำนวณปริมาณวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ การทราบค่าหน่วยน้ำหนักที่ถูกต้องและแม่นยำจะช่วยให้การออกแบบและการก่อสร้างมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. มุมเสียดทานของดิน (Friction Angle, ϕ)

มุมเสียดทานของดินเป็นค่ามุมที่แสดงถึงความต้านทานภายในของดินเมื่อเกิดการเลื่อนไถลระหว่างเม็ดดิน มุมเสียดทานนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินและการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานในงานวิศวกรรมโยธา มุมเสียดทานของดินสามารถหาได้จากการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแรงอัดสามแกน

(Triaxial Test) หรือการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) การทดสอบเหล่านี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเค้นเฉือนที่ดินสามารถรับได้ก่อนเกิดการเลื่อนไถล ซึ่งสามารถนำไปคำนวณมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของดินได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานเฉือนของดินคือสมการของ Coulomb ดังสมการ

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

โดยที่:

τ คือ ความต้านทานเฉือนของดิน (Shear strength)

σ คือ ความเค้นตามแนวระนาบ (Normal stress)

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน (Friction angle)

c คือ ค่าความเหนียว (Cohesion) ของดิน

ค่ามุมเสียดทานภายในของดินมีความสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับดิน เช่น การออกแบบฐานราก การวิเคราะห์ความเสถียรของลาดดิน ค่ามุมเสียดทานภายในสามารถบ่งบอกถึงความสามารถของดินในการต่อต้านการเลื่อนไถล ซึ่งช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างและการปรับปรุงคุณภาพของดินได้อย่างเหมาะสม มุมเสียดทานของดินจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาวะแวดล้อม ตัวอย่างเช่น ดินทรายมักมีมุมเสียดทานสูงเนื่องจากการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินต่ำ ในขณะที่ดินเหนียวอาจมีมุมเสียดทานต่ำแต่มีความเหนียวสูง

เสาเข็มและประเภทของเสาเข็ม

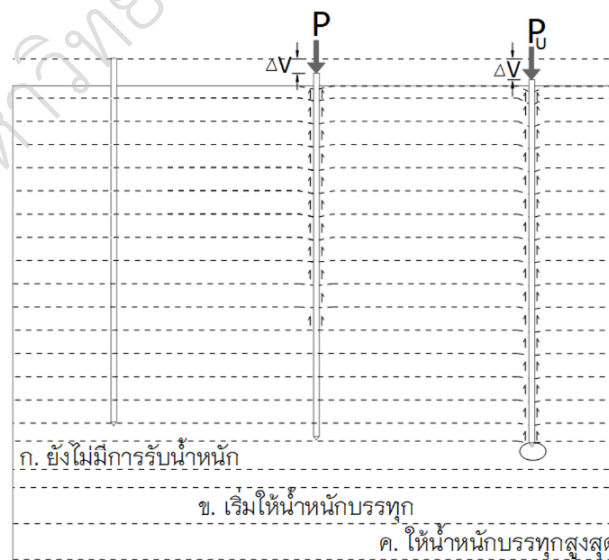
เสาเข็ม (Piles) เป็นส่วนประกอบสำคัญของฐานราก ทำหน้าที่รับน้ำหนักของอาคารลงสู่ชั้นดิน ทำให้อาคารมีความมั่นคงแข็งแรง ชนิดของเสาเข็ม (Type of Piles) สามารถจำแนกตามวัสดุที่ทำ และการทำงานดังต่อไปนี้

1. เสาเข็มไม้ โดยทั่วไปทำจากไม้เบญจพรรณ ปลายและหัวเสาเข็มจะถูกเลื่อยให้เรียบตั้งฉากกับตัวเสา
2. เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) จะทำการผลิตที่โรงงาน เมื่อได้อายุแล้วค่อยขนย้ายจากโรงงานไปยังสถานที่ก่อสร้าง เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จแบ่งได้ 2 ชนิดได้แก่ เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforcement Precast Concrete piles) และเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Precast Prestressed Concrete piles)

3. เสาเข็มหล่อในที่ เป็นเสาเข็มที่ผลิต ณ สถานที่ก่อสร้าง แบ่งตามลักษณะได้ 3 ชนิด ได้แก่ Shell type (case type), Shell-less type (Uncased type) และ Pedestal (enlarged bulb)

การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงบนชั้นดิน

เมื่อติดตั้งเสาเข็มลงไปในดินแล้วเสร็จแล้วปล่อยให้ระยะเวลาหนึ่ง เสาเข็มและดินรอบ ๆ จะยังไม่มี การเคลื่อนที่ใด ๆ จนกว่าเมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็ม เสาเข็มและดินรอบ ๆ จะเริ่มเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรง ในเวลาเดียวกันนั้นดินที่สัมผัสกับผิวของเสาเข็มจะพยายามต้านทานการเคลื่อนที่ของเสาเข็มไว้ เรียกแรงชนิดนี้ว่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ด้วยแรงนี้จึงเกิดการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ดิน เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มมากขึ้นการเคลื่อนที่ก็จะมากขึ้นตาม ในช่วงนี้จะมีแรงต้านที่ปลายเสาเข็มเกิดขึ้นร่วมด้วยเรียกแรงนี้ว่าแรงต้านทานที่ปลายเข็ม (End Bearing) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นจนระดับชั้นดินไม่สามารถรับแรงได้ ดินบริเวณรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็มก็จะเกิดการวิบัติ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มอย่างรวดเร็ว โดยน้ำหนักบรรทุกไม่ได้เพิ่มขึ้น น้ำหนักบรรทุกนี้เรียกว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Pile Capacity)



ภาพประกอบ 2 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม

การตอกเสาเข็มและสูตรตอกเสาเข็ม

1. การตอกเสาเข็ม

การตอกเสาเข็ม เป็นวิธีที่ทำให้เสาเข็มอยู่ ณ ตำแหน่งที่เราต้องการ และมีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากอาคารได้อย่างปลอดภัย การเลือกใช้จะพิจารณาความเหมาะสมตามสถานที่ก่อสร้าง วิธีการตอกเสาเข็มมีอยู่หลายวิธีได้แก่

1.1 Drop hammer เป็นวิธีที่ใช้ปั้นจั่นตัวใหญ่พร้อมกับลูกตุ้มเหล็กที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ตามความต้องการ โดยใช้สายลวดสลิงเป็นตัวยกลูกตุ้มให้สูงขึ้นแล้วปล่อยตกอิสระลงมากระทบบนหัวเสาเข็มทำให้เสาเข็มจมลงไปในชั้นดินในตำแหน่งและสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ต้องการ

1.2 Steam hammer เป็นวิธีการตอกเข็มโดยการควบคุมลูกตุ้มให้ขึ้นลงตามรางที่ประกอบด้วยกรอบเหล็กสั้น ๆ ด้วยแรงกดของอากาศ หรือการระเบิดของไอน้ำ Steam hammer เป็นวิธีการตอกที่มีความสม่ำเสมอ มีการสั่นสะเทือนคงที่ และเสาเข็มเกิดการเสียหายเนื่องจากการตอกน้อยกว่าวิธี Drop hammer

1.3 Water jet เป็นวิธีการตอกที่ติดตั้งท่อไว้กับเสาเข็ม แล้วใช้น้ำแรงดันสูงอัดลงไปตามท่อไปยังปลายของเสาเข็ม แรงดันน้ำ จะทำให้ดินบริเวณปลายเสาเข็มหลวม แล้วเสาเข็มจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง การตอกวิธีนี้เหมาะกับดินทรายหรือดินกรวด แต่ไม่เหมาะกับดินเหนียว และดินตะกอน

1.4 Jacking เป็นวิธีการตอกโดยใช้ Hydraulic Jack กดเสาเข็มให้เสาเข็มจมลง วิธีนี้เหมาะกับการทำงานที่บริเวณที่ตอกมีระยะยกไม่สูงนัก หรือบริเวณที่ต้องการให้เกิดการสั่นสะเทือนไม่ได้

2. สูตรตอกเสาเข็ม

สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas) เป็นการประเมินกำลังของเสาเข็มตอกขณะทำงานโดยนำหลักการของงาน (Work) และพลังงาน (Energy) กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในขณะทำการตอก โดยใช้ข้อมูลจากการตอกเสาเข็มได้แก่ น้ำหนักตุ้ม ความสูงที่ยก และระยะจมของเสาเข็ม โดยจะวัดระยะเสาเข็มจมลงเมื่อตอกได้สิบครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาค่าต่อการตอก 1 ครั้ง ในการทำงานจะใช้สูตรการตอกเสาเข็มควบคุมการตอกเสาเข็มเพื่อให้เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยได้ และไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นใน

เสาเข็มมากเกินไปจนเสาเข็มชำรุด ในสูตรการตอกเสาเข็มสมมติว่าพลังงานที่สูญเสียเกิดจาก ระบบของตุ้มน้ำหนัก การกระแทก การอัดตัวแบบยืดหยุ่นของเสาเข็ม การอัดตัวของหมอนรองหัวเสา และการอัดตัวของดิน สูตรการตอกเสาเข็มมีหลายสูตรได้แก่

2.1 Hiley's Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) แสดงดังสมการ

$$Q_u = \frac{ewhz}{s + \frac{C}{2}}$$

โดยที่ Q_u = Ultimate bearing capacity หน่วยเป็นตัน

$$\frac{W + Pr^2}{W + P}$$

e = Efficiency factor = $\frac{W + Pr^2}{W + P}$

W = น้ำหนักของตุ้มหน่วยเป็นตัน

P = น้ำหนักของเสาเข็มหน่วยเป็นตัน

r = Coefficient of restitution = 0.25 กรณีที่ เสาเข็มตอกถูกรอง

ด้วยกระสอบ

h = ระยะยกตุ้มสูงจากหัวเสาหน่วยเป็นเซนติเมตร

Z = Equipment Loss Factor

= 1 สำหรับ Falling hammer

= 0.80 สำหรับ Drop hammer with Friction winch

s = ระยะที่เสาเข็มจมหน่วยเป็นเซนติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจากการ

ตอก 10 ครั้งสุดท้าย

$$C = \text{Temporary Compression} = C_1 + C_2 + C_3$$

C_1 = ระยะยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L_2 (เมตร)

$$= 1.8 \frac{Q_u L_2}{A} \text{ เซนติเมตร}$$

C_2 = ระยะยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยาว L (เมตร)

$$= 1.8 \frac{Q_u L}{A} \text{ เซนติเมตร}$$

C_3 = ระยะยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม

$$= \frac{0.36 Q_u}{A} \text{ เซ็นติเมตร}$$

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (ตาราง
เซ็นติเมตร)

2.2 Engineering News Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) แสดง

ดังสมการ

$$Q_u = \frac{Wh.Y}{s + 2.54C}$$

โดยที่ Q_u = Ultimate bearing capacity หน่วยเป็นตัน

W = น้ำหนักของตุ้มหน่วยเป็นตัน

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาหน่วยเป็นเซ็นติเมตร

s = ระยะที่เสาเข็มจมหน่วยเป็นเซ็นติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจาก

การตอก 10 ครั้งสุดท้าย

$C = 0.90$ สำหรับ Drop hammer

$C = 1.00$ สำหรับลูกตุ้มแบบอื่น

2.3 Janbu's Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) แสดงดังสมการ

$$Q_u = \frac{Wh}{K_u S}$$

โดยที่ Q_u = Ultimate bearing capacity หน่วยเป็นตัน

W = น้ำหนักของตุ้มหน่วยเป็นตัน

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาหน่วยเป็นเซ็นติเมตร

s = ระยะที่เสาเข็มจมหน่วยเป็นเซ็นติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจาก

การตอก 10 ครั้งสุดท้าย

$$K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right)$$

$$\lambda = \frac{Wh.L}{AES^2}$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \frac{P}{W}$$

L = ความยาวเสาเข็มหน่วยเป็นเมตร

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กหน่วยเป็นตาราง

เซนติเมตร

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม = 282.84 ตันต่อตาราง

เซนติเมตร

P = น้ำหนักของเสาเข็มหน่วยเป็นตัน

2.4 Danish Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) แสดงดังสมการ

$$Q_u = \frac{eWh.}{S + \sqrt{\frac{eWhL}{2AE}}}$$

โดยที่ Q_u = Ultimate bearing capacity หน่วยเป็นตัน

W = น้ำหนักของตุ้มหน่วยเป็นตัน

h = ระยะยกตุ้มสูงจากหัวเสาหน่วยเป็นเซนติเมตร

s = ระยะที่เสาเข็มจมหน่วยเป็นเซนติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจาก

การตอก 10 ครั้งสุดท้าย

L = ความยาวเสาเข็มหน่วยเป็นเมตร

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กหน่วยเป็น

ตารางเซนติเมตร

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม = 282.84 ตันต่อตาราง

เซนติเมตร

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

1. การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Load Test)

การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์เป็นวิธีการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยทำให้เสาเข็มรับน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้และตรวจสอบการเคลื่อนตัว (Settlement) ภายใต้น้ำหนักที่กำหนด ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วยการเตรียมเสาเข็ม ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวบนเสาเข็ม ติดตั้งระบบถ่วงน้ำหนักซึ่งมักเป็นแผ่นเหล็กหรือคอนกรีตที่มีน้ำหนักสูง แล้วเพิ่มน้ำหนักเป็นขั้นๆ (Incremental Loading) จนกว่าจะถึงน้ำหนักที่ออกแบบไว้ พร้อมวัดผลการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้น โดยประเภทของ

การทดสอบมีทั้งแบบ Maintained Load Test (MLT) ที่เพิ่มน้ำหนักและรักษาน้ำหนักไว้ที่ระดับหนึ่งในระยะเวลาที่กำหนดเพื่อดูการเคลื่อนตัว และแบบ Quick Load Test (QLT) ที่เพิ่มน้ำหนักอย่างรวดเร็วและตรวจสอบการเคลื่อนตัวเมื่อถอดน้ำหนักออก ข้อดีของการทดสอบวิธีนี้คือสามารถวัดความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้อย่างแม่นยำ ได้ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นของการรับน้ำหนัก และสามารถทดสอบเสาเข็มในสภาพแวดล้อมจริง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียคือใช้เวลานานในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักสูง ผลการทดสอบนี้จะใช้ในการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยในการออกแบบเสาเข็มให้มีความแข็งแรงและปลอดภัยตามที่ต้องการ

2. การทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load test)

การทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม (Pile stress) และความสมบูรณ์ของเสาเข็มได้ โดยอาศัยสมการคลื่นซึ่งอยู่ในรูปของ Finite difference พิจารณาร่วมกับแรงต้านทานใต้ดินตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho} \right) \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \pm R$$

โดยที่

D = การเคลื่อนที่ทางด้านยาวของอนุภาคเสาเข็มจากตำแหน่งเดิม (มิลลิเมตร)

E = อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต (ตันต่อตารางเมตร)

ρ = ความหนาแน่นของเสาเข็ม (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)

t = เวลา (วินาที)

x = ทิศทางตามยาวของเสาเข็ม (เมตร)

R = แรงต้านทานดิน (ตัน)

สมการดังกล่าวถูกใช้ในการหาคำตอบของความสัมพันธ์เวลากับการเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง การวิเคราะห์การตอกเสาเข็มโดยสมการคลื่น Smith (1960) ได้พัฒนาแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์เป็นครั้งแรก

โดยใช้สมการคลื่น 1 มิติ จำลองดินด้วยแรงต้านสถิตศาสตร์ในรูปแบบ Elasto-plastic และแรงทางพลศาสตร์เป็นแบบแรงหน่วง ซึ่งใช้กับตึมน้ำหนัก เพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักประลักษ์กับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและการจมตัวของเสาเข็มขณะตอกในแต่ละครั้ง ในปีเดียวกัน Michigan Department of Highway ได้มีโครงการค้นคว้าและออกแบบเครื่องมือวัดแรงและความเร่งเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการถ่ายทอดพลังงานจากการตอก (Hammer Performance) ต่อมา Case Institute of Technology (1964) ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาลำกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการตอกเข็มด้วยตึมน้ำหนักแต่ละครั้ง โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า Pile Driving Analyzer (PDA) เป็นเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Case Method และยังได้เสนอโปรแกรมวิเคราะห์การทดสอบเสาเข็ม Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) โดย Rausche (1970) และได้พัฒนาเป็น CAPWAPC ในเวลาต่อมา

การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ Initial Driving Test (IDT) โดยเป็นการทดสอบระหว่างดำเนินการตอกเสาเข็ม ซึ่งได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดและบันทึกคลื่นสัญญาณเป็นช่วง ๆ ตลอดการตอก ทำให้ทราบค่ากำลังกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม และ Re-Strike Driving Test (RTD) เป็นการทดสอบหลังการตอกเสาเข็ม โดยทิ้งระยะเวลาดังแต่ 7-28 วัน เพื่อให้ดินรอบ ๆ เสาเข็มคืนสภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาดังต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของดิน ค่ากำลังรับน้ำหนักของเข็มที่ได้จะมีค่าสูงกว่าวิธีแรก และให้ผลใกล้เคียงกับวิธี Static Load Test มากที่สุด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load test) ประกอบไปด้วย

1. PDA (Pile Driving Analyzer) เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ใช้ในการรับสัญญาณจากเกจวัดความเร่งและเกจวัดความเครียด ขณะตอกเสาเข็มด้วยปั๊มน้ำ PDA จะเปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล และทำการขยาย ปรับสัญญาณจากตัวแปลงสัญญาณ สัญญาณจากเกจวัดความเร่งจะถูกแปลงเป็นความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา และสัญญาณจากเกจวัดความเครียดจะถูกแปลงเป็นแรงตามแนวแกนซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาเช่นกัน คลื่นของความเร็วและแรงจะปรากฏที่หน้าจอ และถูกบันทึกไว้ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ภายหลังได้

2. Accelerometer Sensors เป็นเกจวัดรับสัญญาณความเร่งส่งไปยังเครื่อง PDA

3. Strain Transducers Sensors เป็นเกจวัดรับสัญญาณความเครียดส่งไปยังเครื่อง PDA

4. สว่านและฟูกสำหรับยึดอุปกรณ์วัดสัญญาณไว้กับเสาเข็ม
5. เครื่องเจียรสำหรับแต่งผิวคอนกรีตให้เรียบสำหรับติดตั้งอุปกรณ์
6. ปั่นจั่นสำหรับยกตุ้มน้ำหนักที่จะใช้ทดสอบเสาเข็ม ซึ่งการปล่อยตุ้มน้ำหนักจะเป็นการตกอย่างอิสระ
7. ตุ้มน้ำหนักสำหรับให้พลังงานแก่เสาเข็มที่จะทดสอบ
8. ซอฟต์แวร์ CAPWAP สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสนาม



ภาพประกอบ 3 ภาพแสดงเครื่องมือ การติดตั้งที่ใช้ในการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

8. การทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์แบบ RTD

วิธีการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวิธี RTD การทดสอบเริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์เกจวัดความเร่งและเกจวัดความเครียดกับผิวด้านข้างทั้งสองด้านของเสาเข็มทดสอบ ที่ระยะห่างจากหัวเสาเข็มลงมาไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเสาเข็ม หลังจากนั้นทำการปรับเทียบสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่ค่าที่เหมาะสม ในขั้นตอนถัดมาจะทำการให้แรงโดยปล่อยตุ้มเหล็กให้ตกอย่างอิสระลงบนหัวเสาเข็มที่มีแผ่นกันกระแทกรองรับ เมื่อพลังงานในการตอกเพียงพอสัญญาณจากเกจวัดความเร่งและสัญญาณจากเกจวัดความเครียดจะถูกแสดงที่หน้าจอและถูกบันทึกไว้โดยจะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Case Pile Wave Analysis Method Program (CAPWAP) เพื่อสรุปหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ถูกต้องในท้องปฏิบัติต่อไป



ภาพประกอบ 4 ภาพแสดงการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load test)

โปรแกรม Plaxis 2D

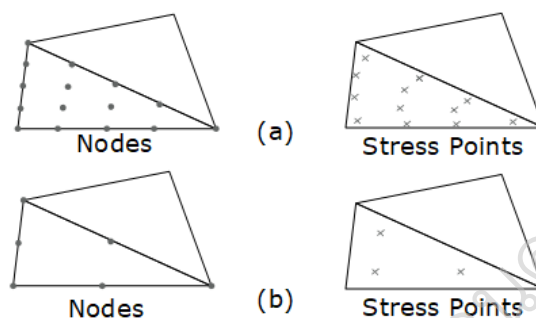
โปรแกรม Plaxis 2D เป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์การเสียรูปและความมีเสถียรภาพในโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีวิทยาแบบ 2 มิติ โดยมีขั้นตอนการป้อนข้อมูลแบบกราฟฟิกอย่างง่ายซึ่งช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว มีการคำนวณเป็นไปโดยอัตโนมัติอย่างสมบูรณ์ และสามารถแสดงผลลัพธ์ในการคำนวณได้อย่างหลากหลาย ในการใช้โปรแกรม Plaxis 2D นี้ผู้ใช้งานต้องมีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับกลศาสตร์ของดิน และตัวโปรแกรมเป็นอย่างดี เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

1. รูปแบบการจำลองโดยทั่วไป

สำหรับแต่ละงานที่จะวิเคราะห์สิ่งสำคัญคือต้องสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตก่อนแบบจำลองทางเรขาคณิตเป็นการนำเสนอปัญหา 3 มิติในรูปแบบ 2 มิติ ซึ่งจะประกอบไปด้วย จุด เส้น และพื้นที่ กลุ่มแบบจำลองทางเรขาคณิตควรประกอบไปด้วยการแบ่งชั้นของดินออกเป็นชั้นที่แตกต่างกัน ตัวโครงสร้าง วิธีก่อสร้าง และการให้น้ำหนักบรรทุก แบบจำลองจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ขอบเขตจะไม่มีผลต่อผลลัพธ์ของปัญหาที่จะศึกษาส่วนประกอบในแบบจำลองเรขาคณิตโดย จุด เป็นจุดเริ่มต้นและ

จุดสิ้นสุดของเส้น จุดสามารถใช้สำหรับการวางตำแหน่งของจุดยึด จุดให้แรง และสำหรับการปรับแต่งจุดของตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ เส้น ใช้เพื่อกำหนดขอบเขตทางกายภาพ และความไม่ต่อเนื่องของแบบจำลอง เช่นการแยกชั้นดินที่แตกต่างกัน และ พื้นที่ ที่เกิดจากการปิดล้อมของเส้น พื้นที่ที่ปิดล้อมด้วยเส้นนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นชนิดเดียวกัน หลังจากการสร้างโมเดลทางเรขาคณิตแล้วโปรแกรมสามารถสร้างตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ได้โดยอัตโนมัติโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นที่และเส้นในโมเดลนั้น ตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถระบุส่วนประกอบได้ 3 ประเภทคือ องค์ประกอบ (Elements) เกิดจากการสร้างตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ พื้นที่จะถูกแบ่งออกเป็นองค์ประกอบสามเหลี่ยม โดยสามารถเลือกได้ระหว่างองค์ประกอบ 15 จุด (Nodes) หรือองค์ประกอบ 6 จุด องค์ประกอบ 15 จุดจะมีความละเอียดมากกว่าองค์ประกอบ 6 จุดแต่องค์ประกอบ 15 จุดจะใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่าองค์ประกอบ 6 จุด ซึ่งจุดเป็นส่วนประกอบขององค์ประกอบโดยองค์ประกอบ 15 จุดประกอบด้วย 15 จุดและองค์ประกอบ 6 จุดจะประกอบด้วย 6 จุด จุดที่อยู่ติดกันจะเชื่อมต่อผ่านจุด ระหว่างการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายจะถูกคำนวณที่จุดความเครียด (Stress points) ตรงกันข้ามกับการกระจายความเค้นและความเครียดจะถูกคำนวณที่จุดรวมความเครียดมากกว่า ที่จุดองค์ประกอบ 15 จุดมีจุดรวมความเครียด 12 จุดและองค์ประกอบ 6 จุดมีจุดรวมความเครียด 3 จุดดังแสดงตามรูป 3 a และ b ตามลำดับ ข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนอีลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์โมเดลมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของโปรแกรม การใช้จำนวนอีลิเมนต์มากขึ้นจะทำให้การประมวลผลใช้เวลานานและต้องการทรัพยากรคอมพิวเตอร์มากขึ้น ซึ่งอาจทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานช้าหรือโปรแกรมหยุดทำงานหากทรัพยากรไม่เพียงพอ ข้อจำกัดจำนวนอีลิเมนต์ยังขึ้นอยู่กับประเภทของไลเซนส์ที่ใช้และการตั้งค่าโมเดล การใช้จำนวนอีลิเมนต์มากเกินไปอาจทำให้การแสดงผลกราฟิกช้าลงหรือไม่เรียบร้อย ขณะที่การใช้จำนวนอีลิเมนต์น้อยเกินไปอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่แม่นยำ การพิจารณาและปรับจำนวนอีลิเมนต์ให้เหมาะสมกับความต้องการและทรัพยากรที่มีอยู่จะช่วยให้การจำลองและการวิเคราะห์โมเดลใน Plaxis 2D V20 มีประสิทธิภาพ เมื่อสร้างโมเดลทางเรขาคณิตแล้ว โปรแกรมสามารถสร้างตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ได้โดยอัตโนมัติตามองค์ประกอบของพื้นที่และเส้นในโมเดลนั้น โดยแบ่งออกเป็นองค์ประกอบสามเหลี่ยม ซึ่งสามารถเลือกได้ระหว่างองค์ประกอบ 15 จุดหรือน้อยกว่า องค์ประกอบ 15 จุดจะมีความละเอียดมากกว่าแต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่าเช่นกัน ขณะที่จุดความเครียดจะถูกคำนวณที่จุดรวม

ความเครียด องค์ประกอบ 15 จุดมีจุดรวมความเครียด 12 จุด และองค์ประกอบ 6 จุดมีจุดรวมความเครียด 3 จุด



ภาพประกอบ 5 แสดงโหนด และจุดรวมความเครียด (Tutorial manual plaxis 2D v20)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยในประเทศ

ทรงฤทธิ์ พุทธิลา และคณะ (2566) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียวและทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน ในการจำลองและวิเคราะห์เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงขนาด $0.35 \times 0.35 \times 12.00$ เมตร ที่ตอกบนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 4.00 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งหนา 6.00 เมตร และปลายเสาเข็มหยั่งลงไปบนชั้นทรายแน่น 2.00 เมตร ใ้รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 50 ตันต่อต้น ทำการจำลองที่มีลักษณะเหมือนการทดสอบแบบวิธีสถิตยศาสตร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 1143 ในการจำลองด้วยโปรแกรม Plaxis 2D จำลองเป็นแบบสมมาตรรอบแกนวัสดุ สร้างเอลิเมนต์ที่มี 15 โหนดและจุดความเค้น 12 จุด พฤติกรรมของชั้นดินเหนียวจำลองเป็นแบบมอร์คูลอมป์ ชั้นดินทรายกำหนดให้เป็นแบบ Hardening Soil กำหนดให้เสาเข็มมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติคเชิงเส้น และเอลิเมนต์ถูกแบ่งเป็นแบบ Medium แล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์จำนวน 8 ต้น ผลการศึกษาพบว่า โดยส่วนใหญ่ในทุกช่วง

ของการให้น้ำหนักบรรทุก ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Plaxis 2D มีค่าสูงกว่าผลจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์ยังพบว่าค่าการทรุดตัวจากผลการทดลองด้วยวิธีพลศาสตร์มีเสาค้างจำนวน 1 ต้นที่มีค่าการทรุดตัวสูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมที่ร้อยละ 47 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการทดสอบเสาค้างด้วยวิธีพลศาสตร์นั้นยังมีความแปรปรวน และยังพบว่าในการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์น้ำหนักบรรทุกของเสาค้างที่ได้ไม่ได้แปรผันตรงกับค่าการทรุดตัวที่ลดลง

ศิริลธิ์ ภิรมยาภรณ์ (2552) ได้ทำการศึกษาเรื่อง พฤติกรรมของเสาค้างดินซีเมนต์ในสนามเมื่อทดสอบแรงในแนวแกน โดยให้เสาค้างดินซีเมนต์มีสภาพแตกต่างกันที่ปลายเสาค้างต่างกันเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง ในการศึกษาได้ทำการให้แรงกับเสาค้างดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ความยาว 4 เมตรให้ปลายเสาค้างดินซีเมนต์วางอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ยาว 7 เมตรให้ปลายเสาค้างดินซีเมนต์วางอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง และยาว 9 เมตรให้ปลายเสาค้างดินซีเมนต์วางอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งมากตามลำดับ โดยเสาค้างทุกต้นจะถูกติดตั้ง Telltale rods และยางเส้นติด strain Gauges เพื่อติดตามวัดผลค่าการทรุดตัวและความเครียดที่เกิดขึ้นของเสาค้างดินซีเมนต์ในขณะทำการทดลอง ในการทดสอบจะให้แรงจนกระทั่งเสาค้างดินซีเมนต์เกิดการวิบัติ และนำผลที่ได้จากการทดสอบในสนามมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D ผลการศึกษาพบว่า เมื่อให้แรงจนถึงสภาวะวิบัติค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดที่หัวเสาค้างดินซีเมนต์และลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น โดยกรณีให้ปลายเสาค้างดินซีเมนต์วางอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนที่ปลายเสาค้างแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ กรณีให้ปลายเสาค้างดินซีเมนต์วางอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งเมื่อให้แรงมากพอจะเกิดแรงที่ปลายเสาค้าง การวางปลายเสาค้างดินซีเมนต์ให้อยู่ในชั้นดินที่แตกต่างกันนั้นจะเกิดรูปแบบการวิบัติของเสาค้างดินซีเมนต์ที่แตกต่างกัน และผลจากการเปรียบเทียบการทดสอบในสนามกับแบบจำลองโดยโปรแกรม Plaxis 2D ผลการคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามโดยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยบริเวณปลายเสาค้าง

ชลดา กาญจนกุล ทักษกร พรบุญยานนท์ และธนนท์ ชูอุปการ (2565) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์กำลังรับแรงของฐานรากเสาค้างฝังในดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนต์เอ-ลีเมนต์ ได้ทำการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ได้อาศัยข้อมูลพารามิเตอร์จากรายงานผลการเจาะสำรวจชั้นดิน ทำการคำนวณหาค่ารับน้ำหนักของเสาค้างตามหลักการ static Pile capacity และให้ขนาดและความลึกของเสาค้างเป็นตัวแปรต้น ในส่วนนี้ผล

ปรากฏว่ากำลังรับแรงของเสาเข็มของเสาเข็มจะแปรผันตามขนาดของเสาเข็มและความยาวที่เพิ่มขึ้น ในส่วนที่ 2 ผู้วิจัยได้อาศัยข้อมูลพารามิเตอร์จากรายงานผลการเจาะสำรวจชั้นดินทำการทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เปรียบเทียบกับการทดสอบ Static Pile Load Test ในภาคสนาม ในส่วนนี้ผลปรากฏว่า ค่าทรุดตัวในการทดสอบแบบ Static Pile Load Test มีค่าใกล้เคียงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

เท็ดคักดี เลไธสง และพงศกร พวงชมพู (2564) ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของดินด้วยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1143 กับเสาเข็มแบบเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตรยาว 20 เมตร นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มใช้พารามิเตอร์ของดินจากผลเจาะสำรวจชั้นดินทำการจำลองเป็นแบบสมมาตรรอบแกนวัสดุที่ใช้กำหนดเป็นองค์ประกอบแบบ 15 จุดขอบเขตแบบอัตโนมัติมิติในแนวราบเท่ากับ 2 เท่าความยาวของเสาเข็มและสัดส่วนในแนวตั้งเท่ากับ 2.5 ของความยาวเสาเข็มวัสดุดินเป็นแบบ อีลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอมป์ การวิเคราะห์เป็นกรณีไม่ระบายน้ำ ใช้ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบทะลวงมาตรฐาน ผลจากการวิจัยปรากฏว่า ค่าการทรุดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของดินมีค่าใกล้เคียงกัน การกระจายตัวของความเค้นของไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบถึงขอบเขตที่ได้รับผลกระทบได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินได้ และผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบในพื้นที่ใกล้เคียงได้

2. งานวิจัยต่างประเทศ

B P Naveen (2011) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเมื่อทดสอบแรงในแนวแกน ทำการทดลองโดยให้น้ำหนักแนวดิ่งกับเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 เมตร ยาว 15.00 เมตร ซึ่งฝังอยู่ในดินเหนียวหนา 6.00 เมตร และดินที่มีสภาพอ่อน 14.00 เมตร แล้วทำการบันทึกการทรุดตัวของเสาเข็ม จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ในการจำลองกำหนดให้เสาเข็มมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติกเชิงเส้น และจำลองดินด้วยองค์ประกอบแบบ 15 จุด ดินเป็นแบบ อีลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอมป์ และองค์ประกอบ

ส่วนต่อประสานถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองส่วนต่อประสานระหว่างเสาเข็มกับแบบจำลองดิน ผลจากการทดลองปรากฏว่า แบบจำลองมอร์คูลอมป์ เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทุกชั้นของดิน โดยแนะนำให้ใช้องค์ประกอบจำลองที่มีตาข่ายขนาดกลาง ใช้ความกว้างด้านข้างประมาณ 5 เท่าของขนาดเสาเข็ม และความลึกจากปลายเสาเข็มประมาณ 3-5 เท่าของขนาดเสาเข็ม จากการจำลองพบว่าแรงต้านทานที่ผิวของเสาเข็มจะสูงสุดที่ชั้นดินที่มีสภาพอ่อน

Paravita Sri Wulandaria, Daniel Tjandra (2015) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์ฐานรากแผ่แบบเสาเข็มบนดินอ่อนด้วยโปรแกรม Plaxis 2D การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแผ่ และการเพิ่มเสาเข็มช่วยการลดการทรุดตัวภายใต้การให้น้ำหนักบรรทุกทุกเท่ากัน โดยวิเคราะห์ตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D การจำลองให้น้ำหนักแบบกระจายอย่างสม่ำเสมอที่ 60 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร กับฐานรากขนาด 21.00 x 21.00 เมตร ด้วยจำนวนเสาเข็มและความยาวต่าง ๆ บนชั้นดินถมหนา 5.00 เมตรชั้นถัดมาเป็นดินเหนียวอ่อนที่ระดับ 5.00 เมตรถึง 13.00 เมตร และดินเหนียวปนทรายที่ระดับ 13.00 เมตรถึง 20.00 เมตร ผลจากการทดลองปรากฏว่า การเพิ่มเสาเข็มแม้จำนวนเล็กน้อยก็ช่วยลดการทรุดตัวของฐานรากได้ การตอกเสาเข็มเพิ่มสามารถลดการทรุดตัวได้แต่หลังจากเพิ่มเสาเข็มได้จำนวนหนึ่งการทรุดตัวมีแนวโน้มที่จะคงที่สำหรับการออกแบบในแง่เศรษฐศาสตร์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาจำนวนเสาเข็มที่เหมาะสมในระบบฐานรากตามการทรุดตัวที่ยอมรับได้

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งได้พบว่า จากการเจาะสำรวจชั้นดินและการทดสอบตัวอย่างดินทำการแยกประเภทของดินนำไปหาค่าพารามิเตอร์ของดิน ข้อมูลเสาเข็ม และการตอกเสาเข็ม เมื่อทำการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก การทรุดตัวของเสาเข็มได้ องค์ความรู้และผลการศึกษาที่ได้ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย ดังที่จะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

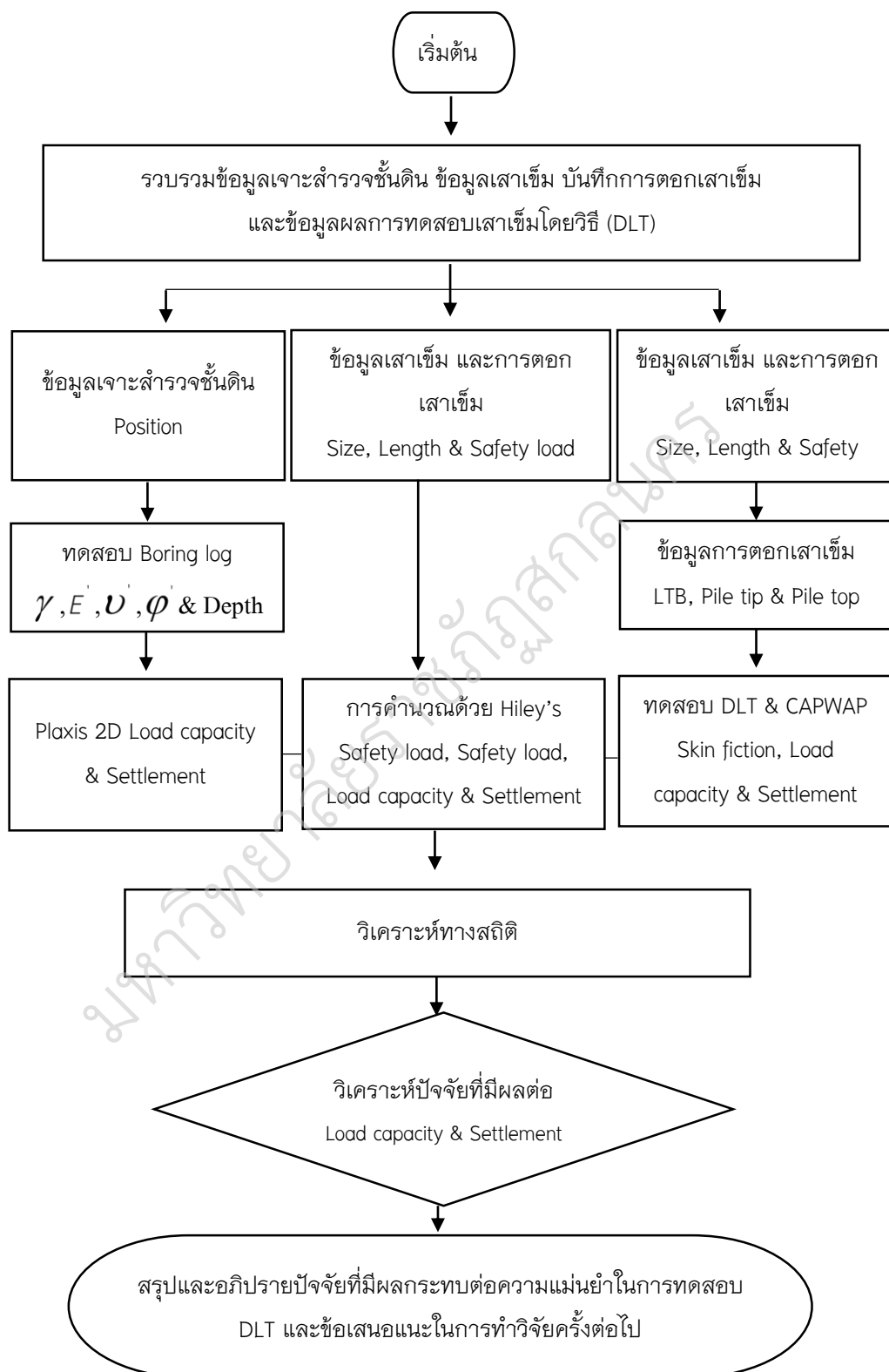
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อมุ่งศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์ จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าการใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็มทำการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก การทรุดตัวของเสาเข็มได้ และเมื่อนำผลการวิเคราะห์จากการจำลองไปเปรียบเทียบกับทดสอบแบบ Static Load Test ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ให้ค่าความน่าเชื่อถือมากที่สุด (ทินกร ทานา และสยาม ยิ้มศิริ, 2563) แล้วได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงนำมาซึ่งแนวคิด กระบวนการ และวิธีดำเนินการวิจัยในบทนี้ โดยมีเนื้อหาหลักดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การวิเคราะห์ข้อมูล
5. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

โดยกระบวนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน ตามมาตรฐาน มอก. 396-2549 ที่ก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร สำหรับโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย ได้ใช้เสาเข็มขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร จำนวน 119 ต้น และขนาด 30.00x30.00 เซนติเมตร จำนวน 60 ต้น ส่วนโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ได้ใช้เสาเข็มขนาด 18.00x18.00 เซนติเมตร จำนวน 94 ต้น และขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร จำนวน 15 ต้น ในขณะที่โครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาในโครงการขยายห้องเรียนได้ใช้เสาเข็มขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร จำนวน 27 ต้น, ขนาด 26.00x26.00 เซนติเมตร จำนวน 17 ต้น และขนาด 35.00x35.00 เซนติเมตร จำนวน 9 ต้น วัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตันตามมาตรฐาน มอก. 396-2549 ขนาดความยาวระหว่าง 10.00 ถึง 13.00 เมตร โดยมีเสาเข็มขนาด 18.00x18.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 8 ต้น, ขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 เมตร จำนวน 1 ต้น, ขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร ยาว 12.00 เมตร จำนวน 2 ต้น, ขนาด 22.00x22.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 2 ต้น, ขนาด 26.00x26.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 1 ต้น, ขนาด 30.00x30.00 เซนติเมตร ยาว 10.00 เมตร จำนวน 1 ต้น, ขนาด 30.00x30.00 เซนติเมตร ยาว 12.00 เมตร จำนวน 2 ต้น และขนาด 35.00x35.00 เซนติเมตร ยาว 13.00 เมตร จำนวน 1 ต้น ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกนำมาใช้เพื่อการวิจัยดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 จำนวนวัสดุและวัสดุตัวอย่าง

ลำดับ	ชื่อโครงการ	วัสดุ					วัสดุตัวอย่าง				
		เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง					เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง				
		สี่เหลี่ยมตัน(ตัน)					สี่เหลี่ยมตัน(ตัน)				
		18	22	26	30	35	18	22	26	30	35
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		18	22	26	30	35	18	22	26	30	35
1	ก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา		119		60			3		3	
2	ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์	94	15				8	1			
3	ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา		27	17		9		1	1		2
รวม		94	161	17	60	9	8	5	1	3	2

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรม Plaxis 2D v20 และเครื่องพิมพ์

โดยโปรแกรม Plaxis 2D v20 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคและวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในการทำการวิเคราะห์การทรุดตัว การเสถียรภาพของดิน และการไหลของน้ำในดิน เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควรมีระบบปฏิบัติการ Windows 7 (SP1), Windows 8/8.1, หรือ Windows 10 (64-bit) เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของซอฟต์แวร์ หน่วยประมวลผลควรเป็น Intel Core i5 หรือสูงกว่าเพื่อให้การประมวลผลข้อมูลรวดเร็วและไม่มีความล่าช้า หน่วยความจำ (RAM) ควรมีอย่างน้อย 8 GB พื้นที่เก็บข้อมูลควรเป็น SSD ขนาดอย่างน้อย 256 GB เพื่อให้การโหลดและบันทึกข้อมูลทำได้รวดเร็ว และป้องกันการติดขัดในระหว่างการทำงาน การ์ดจอควรรองรับ DirectX 11 หรือสูงกว่า และมี VRAM อย่างน้อย 2 GB เพื่อให้การแสดงผลกราฟิกมีความชัดเจนและไม่สะดุด ความละเอียดหน้าจอขั้นต่ำควรเป็น 1920x1080 พิกเซล เพื่อให้สามารถแสดงผลข้อมูลได้อย่างละเอียดและชัดเจน

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนดังนี้

1. ผู้วิจัยดำเนินการรวบรวมข้อมูลการบันทึกการตอกเสาเข็ม ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และผลการทดสอบเสาเข็มภายในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครจำนวน 3 โครงการ ได้แก่ โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยฯ โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ โครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียน โดยข้อมูลถูกเก็บไว้โดยหน่วยออกแบบและตรวจสอบงานก่อสร้าง งานอาคารสถานที่และยานพาหนะ สำนักงานอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

2. ผู้วิจัยตรวจสอบความถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์ของข้อมูลการบันทึกการตอกเสาเข็ม ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน และผลการทดสอบเสาเข็มภายในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครจำนวนทั้ง 3 โครงการ ว่าครบถ้วนถูกต้องหรือไม่ โดยมีรายละเอียดข้อมูลดังต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินภายในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร การเจาะสำรวจชั้นดินถูกดำเนินการอย่างละเอียดและครอบคลุม โดยมีการเจาะสำรวจจากโครงการทั้งหมด 3 โครงการ โดยแต่ละโครงการดำเนินการเจาะสำรวจ 1 หลุม ซึ่งรวมทั้งหมดเป็น 3 หลุมเจาะ โดยความลึกของหลุมเจาะอยู่ในช่วง 15.45 ถึง 18.45 เมตร การเจาะสำรวจชั้นดินนี้ดำเนินการด้วยเครื่องเจาะแบบขา 3 ขา โดยใช้วิธีการเจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในวงการวิศวกรรมโยธา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ชั้นดิน ในการเจาะสำรวจนี้ มีการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกผ่า (Split Spoon Sampler) พร้อมทั้งทำการทดสอบการเจาะทะลุของดิน (Standard Penetration Test หรือ SPT) ในแต่ละระดับความลึก นอกจากนี้ยังได้เก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 1.00 เมตร, 2.00 เมตร และทุก ๆ ระยะ 1.50 เมตรจนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะหลุม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมต่อไป ในระหว่างการเจาะสำรวจ ยังมีการทดสอบกำลังเฉือนของดินเหนียวด้วยวิธี Pocket Penetrometer เพื่อประเมินความแข็งแรงของดิน และนำตัวอย่างดินที่เก็บได้เข้าสู่กระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่า Wet Unit

Weight, Natural Water Content, การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน (Sieve Analysis) และการทดสอบ Atterberg's Limit ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินคุณสมบัติดินที่จำเป็นต่อการออกแบบทางวิศวกรรม ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจและทดสอบดินเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณและจำลองพฤติกรรมของชั้นดินในโปรแกรม Plaxis 2D V20 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจะช่วยให้การจำลองมีความแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่มากยิ่งขึ้น

2.2 ข้อมูลบันทึกการตอกเสาเข็มภายในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ข้อมูลบันทึกการตอกเสาเข็มในการวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมจากการติดตามและบันทึกกระบวนการตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปทรงสี่เหลี่ยมตันตามมาตรฐาน มอก. 396-2549 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณสมบัติและข้อกำหนดของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในงานก่อสร้างทั้งหมด 3 โครงการของการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เสาเข็มที่นำมาใช้ในการวิจัยมีขนาดหน้าตัดตั้งแต่ 18.00 x 18.00 เซนติเมตร ไปจนถึง 35.00 x 35.00 เซนติเมตร โดยมีความยาวตั้งแต่ 10.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร การตอกเสาเข็มนั้นได้ดำเนินการโดยใช้สูตรคำนวณของ Hiley ซึ่งเป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรมในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการตอก โดยมีการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ไม่น้อยกว่า 3.00 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนที่กำหนดขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่าเสาเข็มสามารถรองรับน้ำหนักที่ถูกถ่ายลงมาจากโครงสร้างได้อย่างปลอดภัยและมีความเสถียร การบันทึกข้อมูลดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของเสาเข็ม ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างมีความมั่นคงและปลอดภัยตามมาตรฐานที่กำหนด

2.3 ข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ ภายในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ในการวิจัยนี้ การทดสอบประสิทธิภาพของเสาเข็มได้ดำเนินการโดยใช้วิธีพลศาสตร์ (Dynamic Testing) ที่เรียกว่า Re-Strike Driving Test ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม โดยการทดสอบนี้ดำเนินการหลังจากการตอกเสาเข็มเสร็จสิ้น และให้เสาเข็มทิ้งระยะเวลาไว้ระหว่าง 7 ถึง 28 วัน เพื่อให้ดินรอบเสาเข็มคืนสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์และสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของเสาเข็มและดินโดยรอบได้ การทดสอบ Re-Strike Driving Test เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งใช้ลูกตุ้ม

เหล็กขนาดใหญ่กระแทกที่หัวเสาเข็มเพื่อสร้างแรงกระแทกซ้ำ ในขณะเดียวกันจะมีการวัดค่าแรงและความเร็วที่เกิดจากสัญญาณสะท้อนคลื่นความเค้น (Stress Wave) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ลูกตุ้มกระแทกเสาเข็ม ข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้จะถูกบันทึกและนำไปประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้วิธี Case Pile Wave Analysis Method (CAPWAP) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล การทดสอบทั้งหมดนี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 4945 และ มยผ. 1252-51 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดแนวทางและขั้นตอนในการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดสอบมีความถูกต้องและสอดคล้องกับความต้องการของโครงการ ทั้งนี้ผลการทดสอบยังมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินและยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเพื่อให้มั่นใจว่าเสาเข็มมีความมั่นคงและสามารถรองรับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัยในระยะยาว

การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากการรวบรวมข้อมูลในการวิจัยผู้วิจัยดำเนินการแยกแยะและวิเคราะห์ข้อมูลแล้วนำมาหาค่าการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มในแต่ละกรณีทำการทำการเปรียบเทียบ แล้วสรุปปัจจัยของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบโดยรายละเอียดดังนี้

1. นำข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดินในแต่ละโครงการมาแยกชั้นลักษณะของดินตามมาตรฐานของ AASHTO โดยสามารถแยกออกเป็น กรวด ทรายหยาบ ทรายละเอียด ตะกอนทราย และดินเหนียว แล้วหาค่าพารามิเตอร์ของดินในแต่ละชั้นที่จะใช้ในแบบจำลองต่อไปโดยคำนวณจาก วิธี Empirical Method ค่าที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D ได้แก่ ค่า Young's modulus (E') Poisson's ratio (ν') ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') และหน่วยน้ำหนัก (γ_s) แล้วทำการนำเสนอในรูปแบบตาราง
2. นำข้อมูลบันทึกการตอกเสาเข็มที่ได้จากการรวบรวม นำมาวิเคราะห์คำนวณหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Pile Capacity) และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยสูตรของ Hiley ค่าที่ได้นำเสนอในรูปแบบตาราง
3. ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินและเสาเข็มมาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดินและเสาเข็มภายใต้สภาวะต่าง ๆ อย่างแม่นยำ ที่มีลักษณะเหมือนการทดสอบแบบวิธี

สถิติศาสตร์ตามมาตรฐาน (ASTM International, 2022) เป็นแบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็ม การจำลองเป็นแบบสมมาตรรอบแกน กำหนดให้เสาเข็มมีพฤติกรรมเป็นนอิลาสติกเชิงเส้น ทำการจำลองดินด้วยองค์ประกอบแบบ 15 จุด ดินเป็นแบบ อิลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอมป์ และองค์ประกอบส่วนต่อประสานถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองส่วนต่อประสานระหว่างเสาเข็มกับแบบจำลองดิน เพื่อหาค่าการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มตอก ค่าที่ได้นำเสนอในรูปแบบตาราง

4. ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการนำค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่ได้จากทั้ง 3 กรณี วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มและการทรุดตัวของเสาเข็ม เพื่อสรุปและอภิปรายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการทดสอบ พลศาสตร์ และเสนอข้อเสนอนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่

1. สถิติพื้นฐาน ได้แก่

1.1 ค่าเฉลี่ย (Mean)

ค่าเฉลี่ย คือค่ากลางของชุดข้อมูล ซึ่งคำนวณได้โดยการนำผลรวมของข้อมูลทั้งหมดในชุดมาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่มี

สูตรคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) คือ:

$$Mean = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n}$$

โดยที่:

$$\sum_{i=1}^n x \quad \text{คือผลรวมของข้อมูลทั้งหมดในชุด}$$

$$n \quad \text{คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดในชุด}$$

1.2 ค่าร้อยละ (percentage)

ค่าร้อยละ คือการแสดงค่าหรือสัดส่วนในรูปแบบของร้อยละ โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้:

$$Percentage = \left(\frac{Part}{Whole} \right) \times 100$$

โดยที่:

Part คือค่าที่ต้องการหาค่าร้อยละ (ส่วนที่สนใจ)

Whole คือค่าทั้งหมด (จำนวนทั้งหมด)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มตอก ด้วยวิธีพลศาสตร์ การวิจัยได้อาศัยข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม ในการดำเนินการวิจัยหาค่าน้ำหนักบรรทุก ค่าการทรุดตัวจากรูปแบบที่แตกต่างกันคือ อาศัยข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D อาศัยข้อมูลเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย ทำการคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตรการตอกของ Hiley และอาศัยข้อมูลเสาเข็ม ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ จากผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุก ค่าการทรุดตัว เพื่อทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ และเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจกำหนดวิธีการก่อสร้างเสาเข็มตอกของโครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร โดยมีเนื้อหาหลักดังต่อไปนี้

1. ผลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาที่ได้จากข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิเคราะห์จากการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D การคำนวณการตอกเสาเข็ม และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์การรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

ผลเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

1. ผลการทดสอบจากการเจาะสำรวจชั้นดิน

ในการศึกษานี้ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติของดินในพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จำนวน 3 หลุมที่นำมา

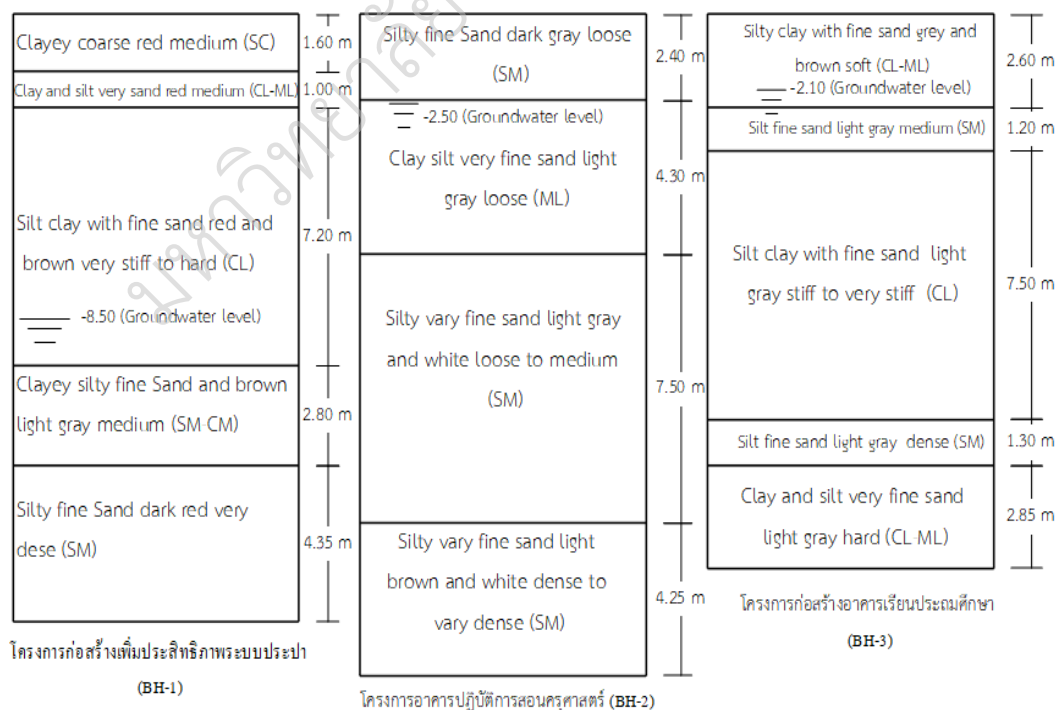
ศึกษาได้แก่ BH-1, BH-2, และ BH-3 ซึ่งตั้งอยู่ในโครงการก่อสร้าง 3 โครงการที่แตกต่างกันตำแหน่งของหลุมเจาะแสดงไว้ในภาพประกอบ 7 โดยแต่ละหลุมมีวัตถุประสงค์ในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของดินในพื้นที่นั้น ๆ



ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดิน (Boring test) ของงานก่อสร้าง ทั้ง 3 โครงการ ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสุพรรณบุรี

จากภาพแสดงลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินของหลุมเจาะ BH-1, BH-2 และ BH-3 ซึ่ง BH-1 ตั้งอยู่ในโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย แสดงถึงลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินที่น่าสนใจ โดยมีชั้นทรายหยาบหนา 1.60 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 1.00 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งมาก

หนา 7.20 เมตร ต่อจากนั้นเป็นชั้นทรายแน่นปานกลางหนา 6.40 เมตร และชั้นดินทรายแน่นมากหนา 4.35 เมตร โดยระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 8.50 เมตรจากผิวดิน ส่วน BH-2 ตั้งอยู่ในโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ แสดงลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินโดยเริ่มจากชั้นทรายหวมที่มีความหนา 2.40 เมตร ตามมาด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางที่หนา 4.30 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินทรายที่มีความแน่นหวมถึงปานกลาง ความหนา 7.50 เมตร และต่อด้วยชั้นดินทรายแน่นมากที่หนา 4.25 เมตร ทั้งนี้ระดับน้ำใต้ดินพบอยู่ที่ 2.50 เมตร จากผิวดิน และ BH-3 ซึ่งตั้งอยู่ในโครงการก่อสร้างอาคารเรียน ประถมศึกษาและโครงการขยายห้องเรียน แสดงให้เห็นลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินที่มีความหลากหลาย โดยเริ่มต้นจากชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนา 2.60 เมตร ตามด้วยชั้นดินทรายแน่นปานกลางที่หนา 1.20 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากที่หนา 7.50 เมตร ต่อไปคือชั้นทรายแน่นมากที่หนา 1.30 เมตร และสุดท้ายชั้นดินเหนียวแข็งมากที่มีความหนา 4.35 เมตร โดยระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 2.10 เมตร จากผิวดิน โดยลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินในหลุมเจาะทั้งสามหลุมสะท้อนให้เห็นถึงความหลากหลายและความแปรปรวนของชั้นดินในแต่ละพื้นที่



ภาพประกอบ 8 ภาพตัดการเรียงตัวของชั้นดินของหลุมเจาะ BH-1, BH-2 และ BH-3

ผลการเจาะสำรวจชั้นดินเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในบทที่ 4 ของงานวิจัยนี้ ตาราง 5 ถึง 7 แสดงคุณสมบัติของเสาเข็มและชั้นดินที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในแต่ละโครงการ โดยในการศึกษานี้เราใช้แบบจำลองแบบ Plane strain ซึ่งมีองค์ประกอบหลักดังนี้: เริ่มจากการจำลองแบบ 15 จุด เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการตอบสนองต่อเงื่อนไขต่าง ๆ อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ดินถูกจำลองในรูปแบบอิลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอม์ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของดินในเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ในส่วนของดินทราย กำหนดประเภทของดินเป็นแบบการระบายน้ำแบบ Drained เพื่อศึกษาผลกระทบของการระบายน้ำ ในขณะที่ดินเหนียวถูกจำลองในรูปแบบ Undrained เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการระบายน้ำในดินเหนียว เสาเข็มถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็น อิลาสติกเชิงเส้น เพื่อให้สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การระบายน้ำของเสาเข็มถูกกำหนดให้เป็นแบบ Non-porous เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินในสภาพที่ไม่มีการระบายน้ำ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจสอบผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและดินในแต่ละโครงการในงานวิจัยนี้

ตาราง 5 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย

Materials	Parameters Linear Elastic/Unit						
	Drainage Type	γ_{unsat}	γ_{sat}	E	ν	C	ϕ
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(deg)
Pile	Non-Porous	24	24	35.00×10 ⁶	0.17	–	–
Soft Clay	Undrained	17	19	12.40×10 ³	0.35	18.387	–
Medium Sand	Drained	19.63	21.63	18.33×10 ³	0.26	–	32
Stiff Clay	Undrained	18	20	79.58×10 ³	0.4	68.03	–
Dense Sand	Drained	20	22	31.20×10 ³	0.37	–	38
Stiff Clay	Undrained	18	20	49.28×10 ³	0.4	413	–

ตาราง 6 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ในการ
สร้างแบบจำลองโครงการอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์

Materials	Parameters Linear Elastic/Unit						
	Drainage Type	γ_{unsat}	γ_{sat}	E	ν	C	ϕ
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(deg)
Pile	Non-Porous	24	24	35.00×10 ⁶	0.17	–	–
Loose Sand	Drained	19	21	11.85×10 ³	0.3	–	27
Medium Clay	Undrained	19	23	48.3×10 ³	0.35	42.9	–
Loose to Medium Sand	Drained	21	23	14.16×10 ³	0.32	–	29
Dense Sand	Drained	20	22	63.37×10 ³	0.37	–	38

ตาราง 7 ค่าการแปรผลการเจาะสำรวจชั้นดินและคุณสมบัติของเสาเข็มที่ใช้ในการ
สร้างแบบจำลองโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาและโครงการ
ขยายห้องเรียน

Materials	Parameters Linear Elastic/Unit						
	Drainage Type	γ_{unsat}	γ_{sat}	E	ν	C	ϕ
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(deg)
Pile	Non-Porous	24	24	35.00×10 ⁶	0.17	–	–
Soft Clay	Undrained	17	19	12.40×10 ³	0.35	18.38	–
Medium Sand	Drained	19.63	21.63	18.33×10 ³	0.26	–	32
Stiff Clay	Undrained	18	20	79.58×10 ³	0.40	68.03	–
Dense Sand	Drained	20	22	31.20×10 ³	0.37	–	38
Stiff Clay	Undrained	18	20	49.28×10 ³	0.40	413.00	–

2. ผลการตอกเสาเข็ม

ในการศึกษานี้ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็มถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตรการตอกของ Hiley จำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D และทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ จากโครงการก่อสร้าง 3 โครงการ ตาราง 8 แสดงรายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม โดยขนาดเสาเข็มมีขนาดอยู่ในช่วง 18.00x18.00 เซนติเมตร ถึง 35.00 x 35.00 เซนติเมตร เสาเข็มมีความยาวอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10.00 เมตร ถึง 13.00 เมตร ตำแหน่งตอกเสาเข็มห่างจากหลุมเจาะในแต่ละโครงการตั้งแต่ 3.55 เมตร ถึง 37.20 เมตร กำหนดน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20.00 ถึง 35.00 ตันต่อต้น ตาราง 4.5 แสดงรายละเอียดผลการตอกเสาเข็ม โดยในการตอกเสาเข็มด้วยสูตรการตอกของ Hiley กำหนดอัตราส่วนปลอดภัยไม่น้อยกว่า 3.00 จากการตอกเสาเข็มได้กำหนดระยะที่เสาเข็มทรุดจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย ระดับที่ปลายเสาเข็มทรุดลงไปใ้ดินนั้นมีค่าแตกต่างกัน ในโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยระดับปลายเสาเข็มแตกต่างกัน 2.00 เมตร โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ ระดับปลายเสาเข็มแตกต่างกัน 2.80 เมตร โครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียน ระดับปลายเสาเข็มแตกต่างกัน 0.15 เมตร ค่าระดับปลายเสาเข็มที่แตกต่างกันในแต่ละโครงการสามารถบ่งบอกได้ว่าดินในแต่ละโครงการมีความแปรปรวนของชั้นดินที่แตกต่างกัน จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าดินในโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์แปรปรวนมากที่สุดรองลงมาคือโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย และโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียนชั้นดินมีความแปรปรวนน้อยสุด ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงวิธีการตอกเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย และระยะที่เสาเข็มทรุดลงไปใ้ดินในแต่ละโครงการอย่างชัดเจน

ตาราง 8 แสดงรายละเอียดข้อมูลเสาเข็ม

โครงการ	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน						
	Size of pile		Length	Safety load	Safety factor	Load capacity	ระยะจากหลุมเจาะ
	(cm)	(cm)	(m)	(Ton/Pile)		(Ton/Pile)	(m)
โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา							
TP1	30	30	10	25	2.50	62.50	28.75
TP2	22	22	12	20	2.50	50.00	24.00
TP3	22	22	10	20	2.50	50.00	29.95
TP4	22	22	12	20	2.50	50.00	37.20
TP5	30	30	12	25	2.50	62.50	10.20
TP6	30	30	12	25	2.50	62.50	11.65
ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์							
1	18	18	13	20	2.50	50.00	14.80
2	18	18	13	20	2.50	50.00	17.60
7	18	18	13	20	2.50	50.00	16.00
13	18	18	13	20	2.50	50.00	17.30
33	18	18	13	20	2.50	50.00	13.90
35	18	18	13	20	2.50	50.00	14.50
80	22	22	13	25	2.50	62.50	5.00
95	18	18	13	20	2.50	50.00	12.00
110	18	18	13	20	2.50	50.00	14.30
ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา							
TP1	35	35	13	35	3.00	105.00	7.20
TP2	35	35	13	35	3.00	105.00	3.55
TP3	26	26	13	25	3.00	75.00	9.00
TP4	22	22	13	15	3.00	45.00	9.50

ตาราง 9 ผลการตอกเสาเข็ม

โครงการ	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง สี่เหลี่ยมตัน			Hiley formula				ระยะทรุดเสาเข็ม	
	Size of pile		Length	Safety load	Safety factor	Load capacity	LTB	Pile top	Pile tip
	(cm)	(cm)	(m)	(Ton/Pile)		(Ton/Pile)	(cm)	(m)	(m)
ก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา									
TP1	30	30	10	25	3.25	81.25	14.9	1.00	-9.00
TP2	22	22	12	20	3.25	65.00	10.02	-1.20	-13.20
TP3	22	22	10	20	3.25	65.00	11.62	0.80	-9.20
TP4	22	22	12	20	3.25	65.00	10.02	-0.60	-12.60
TP5	30	30	12	25	3.25	81.25	13.22	0.00	-12.00
TP6	30	30	12	25	3.25	81.25	13.22	-1.00	-13.00
ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์									
1	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-3.80	-16.80
2	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-3.50	-16.50
7	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-1.40	-14.40
13	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-1.45	-14.45
33	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-2.10	-15.10
35	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-3.21	-16.21
80	22	22	13	25	3.00	75.00	13.29	-2.40	-15.40
95	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-1.20	-14.20
110	18	18	13	20	3.00	60.00	14.15	-1.00	-14.00
ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา									
TP1	35	35	13	35	3.00	105.00	9.15	-0.35	-13.35
TP2	35	35	13	35	3.00	105.00	9.15	-0.20	-13.20
TP3	26	26	13	25	3.00	75.00	10.75	-0.35	-13.35
TP4	22	22	13	15	3.00	45.00	26.49	-0.30	-13.30

LTB = Last Ten Blow

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการวิเคราะห์การคำนวณการตอกเสาเข็ม

การคำนวณการตอกเสาเข็มเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการประเมินกำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในขณะการทำงานของโครงสร้าง วิธีการคำนวณในการทดลองนี้ใช้สูตรของ Hiley เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเสาเข็มที่ได้จากการสร้างโครงการ 3 โครงการที่มีความแตกต่างกันในขนาดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย และระยะที่เสาเข็มหลุดจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย จากการวิเคราะห์ในตาราง 10 พบว่า เมื่อขนาดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม และน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยมีค่าคงที่ เมื่อค่าสัดส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ค่าระยะที่เสาเข็มหลุดจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายจะลดลง นั่นอาจแสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของเสาเข็มที่ดีขึ้น คือเมื่อมีการเพิ่มค่าสัดส่วนความปลอดภัย ค่าการหลุดตัวที่น้อยทำให้เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น และมีความปลอดภัยสูงขึ้นในการใช้งาน เรายังพบว่า เมื่อขนาดเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย และค่าสัดส่วนความปลอดภัยคงที่ เมื่อความยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ระยะที่เสาเข็มหลุดจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายจะลดลง นั่นอาจแสดงให้เห็นว่าเสาเข็มที่มีความยาวมากขึ้น ด้วยน้ำหนักบรรทุกที่เท่าเดิมจะเกิดการหลุดตัวที่น้อยลง นั่นแสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของเสาเข็มที่ดีขึ้น นอกจากนี้เรายังพบว่า หากความยาวเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย และค่าสัดส่วนความปลอดภัยคงที่ ค่าการหลุดตัวของเสาเข็มจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเสาเข็มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในการตอกเสาเข็มด้วยสูตรของ Hiley นั้นขนาดของเสาเข็มใหญ่ขึ้นไม่ส่งผลต่อความสามารถรับน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งสอดคล้องกับ (ทรงฤทธิ์ พุทธลา, 2566)

ในการการตอกเสาเข็มตามสูตรของ Hiley ค่าการหลุดตัวจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายสามารถบอกถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มคือค่าการหลุดตัวที่น้อยหมายถึงเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้มาก

ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์การคำนวณการตอกเสาเข็ม

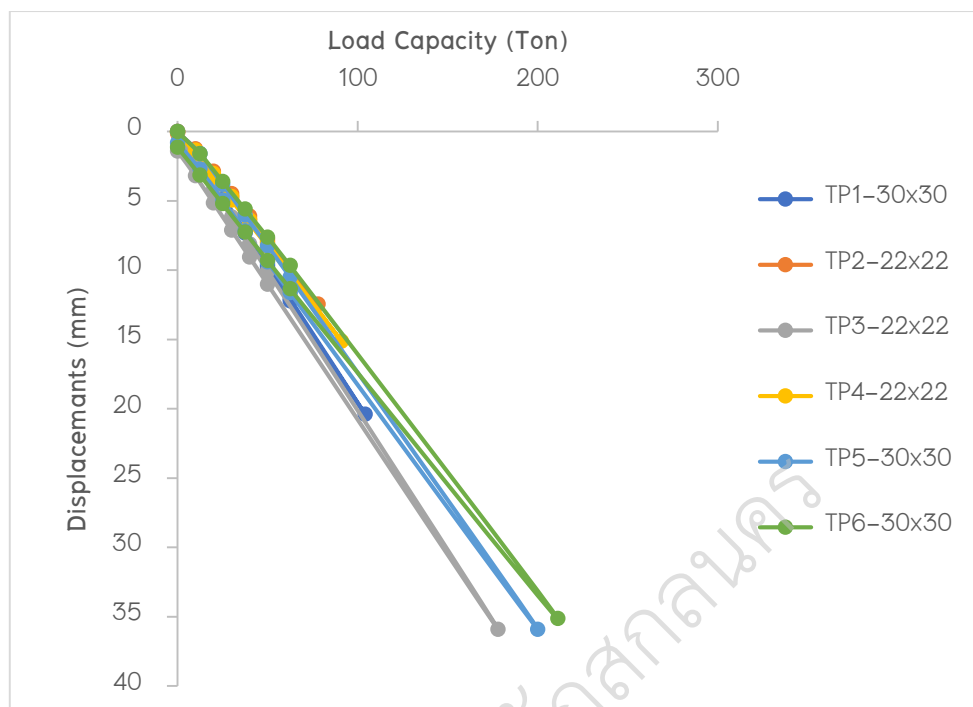
ลำดับ ที่	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง สี่เหลี่ยมตัน			Hiley formula			
	Size of pile		Length	Safety load	Safety factor	Load capacity	LTB
	(cm)	(cm)	(m)	(Ton/Pile)		(Ton/Pile)	(cm)
1	22	22	13	15.00	3.00	45.00	33.02
2	22	22	13	25.00	3.00	75.00	13.30
3	22	22	10	20.00	3.25	65.00	11.63
4	22	22	12	20.00	3.25	65.00	10.02
5	22	22	13	25.00	3.00	75.00	13.30
6	26	26	13	25.00	3.00	75.00	14.37
7	30	30	10	25.00	3.25	81.25	14.90
8	30	30	12	25.00	3.25	81.25	13.22
9	35	35	13	35.00	3.00	105.00	9.21
10	35	35	13	35.00	3.25	113.75	7.60

LTB = Last Ten Blow

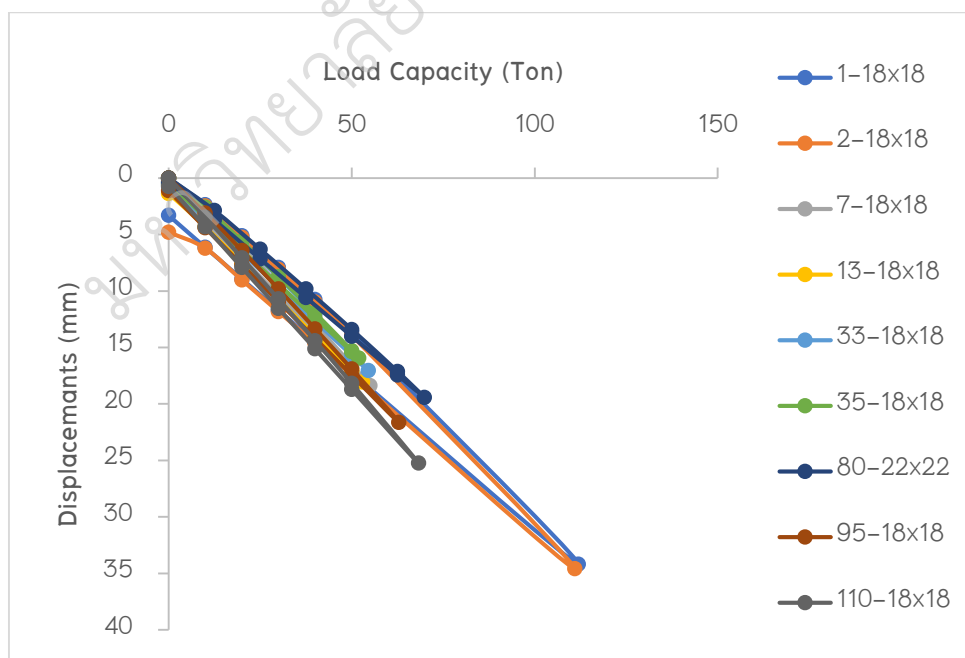
2. ผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ในการศึกษาเน้นการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในการรับน้ำหนักบนหัวเสาเข็ม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม การทดลองนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดินและข้อมูลการตอกเสาเข็มจากโครงการก่อสร้าง 3 โครงการ รูปแบบการจำลองเป็นแบบ Plane Strain โดยดินถูกจำลองพฤติกรรมเป็นแบบ อีลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอมบ์ สำหรับดินทรายมีการระบายน้ำเป็นแบบ Drained และสำหรับดินเหนียวมีการระบายน้ำเป็นแบบ Undrained C ส่วนเสาเข็มถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นอีลาสติกเชิงเส้น โดยการระบายน้ำถูกกำหนดให้เป็นแบบ Non-Porous แนวทางการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มใช้ข้อมูลในการตอกเสาเข็มในการจำลอง การจำลองการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย โดยเริ่มจากร้อยละ 0 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 จนถึงร้อยละ 250 จากนั้นใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ ในแต่ละต้นที่ทำการทดสอบ และเริ่ม

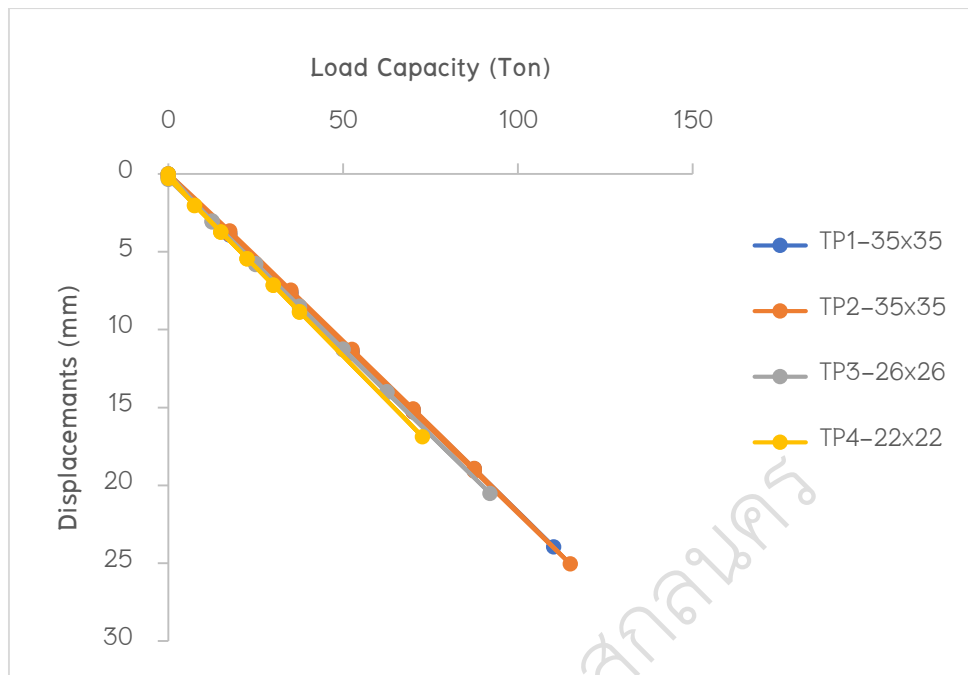
ลดน้ำหนักรับมาที่ร้อยละ 250 และลดลงครึ่งละ 50 เปอร์เซ็นต์ จนถึงร้อยละ 0 จากภาพประกอบ 8, 9 และ 10 แสดงผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ผลการวิเคราะห์ผลทดลอง พบว่า เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกตามค่าร้อยละของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นมีค่าลดลง และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกตามค่าร้อยละของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยลงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มลดลงด้วย และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกตามค่าร้อยละของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยจนถึงร้อยละ 0 จะพบว่าการคืบตัวคงค้างของเสาเข็ม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในดินที่มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน ขนาดและความยาวของเสาเข็มเท่ากัน รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยเท่ากัน ในการจำลองมีผลการทรุดตัวของเสาเข็มที่แตกต่างกัน คือเสาเข็มฝังตัวลึกกว่าจะมีค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่น้อยกว่าแสดงในภาพประกอบ 12 ผลการวิเคราะห์นี้ยืนยันได้ว่าเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นดินที่ลึกและแน่นกว่าจะสามารถน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า แต่ในการตอกเสาเข็มจริงพบว่ามีเข็มบางตัวอย่างมีการทรุดที่น้อยกว่าแต่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่านั้นแสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของชั้นดินได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบการทรุดตัวของเสาเข็มในโครงการก่อสร้างทั้ง 3 โครงการที่มีค่าพารามิเตอร์ของดินต่างกัน โดยที่โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยมีค่าการทรุดตัวที่น้อยกว่าโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ และโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียน ซึ่งทั้งสองโครงการมีค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันดังภาพประกอบ 13 ผลการวิเคราะห์นี้ยืนยันได้ว่าถึงแม้ดินจะมีลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันหากมีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่แตกต่างกันผลการรับน้ำหนักของเสาเข็มก็จะแตกต่างกันกล่าวคือจากการตอกเสาเข็มในโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยไว้ที่ 3.25 ส่วนในโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ และโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาโครงการขยายห้องเรียน กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยไว้ที่ 3.00 ผลคือค่าการทรุดตัวของโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย น้อยกว่าอีกสองโครงการมีค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน



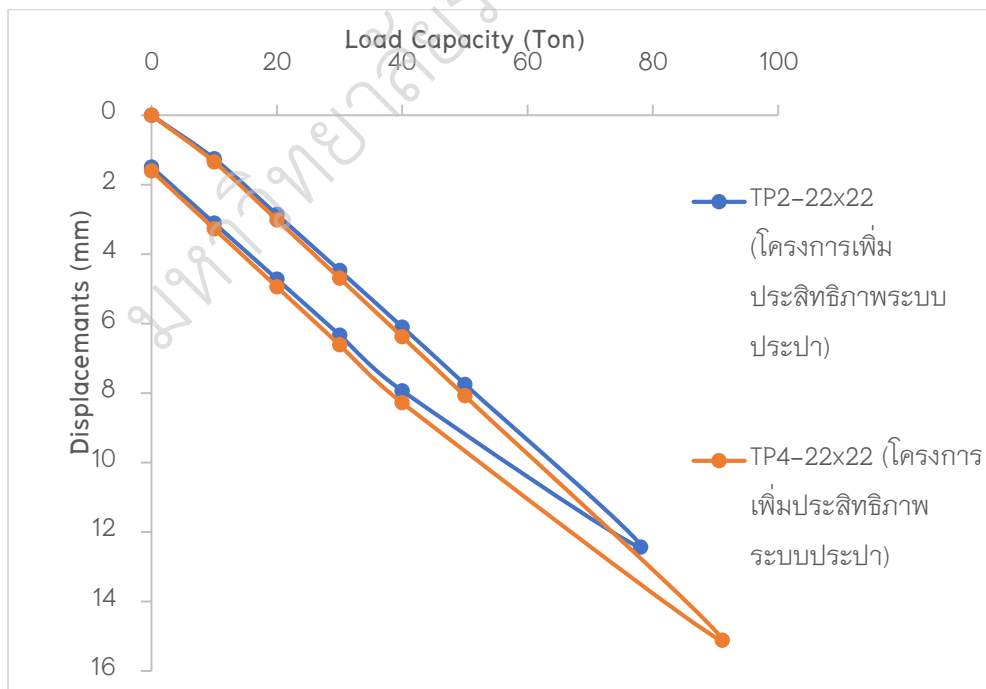
ภาพประกอบ 9 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย



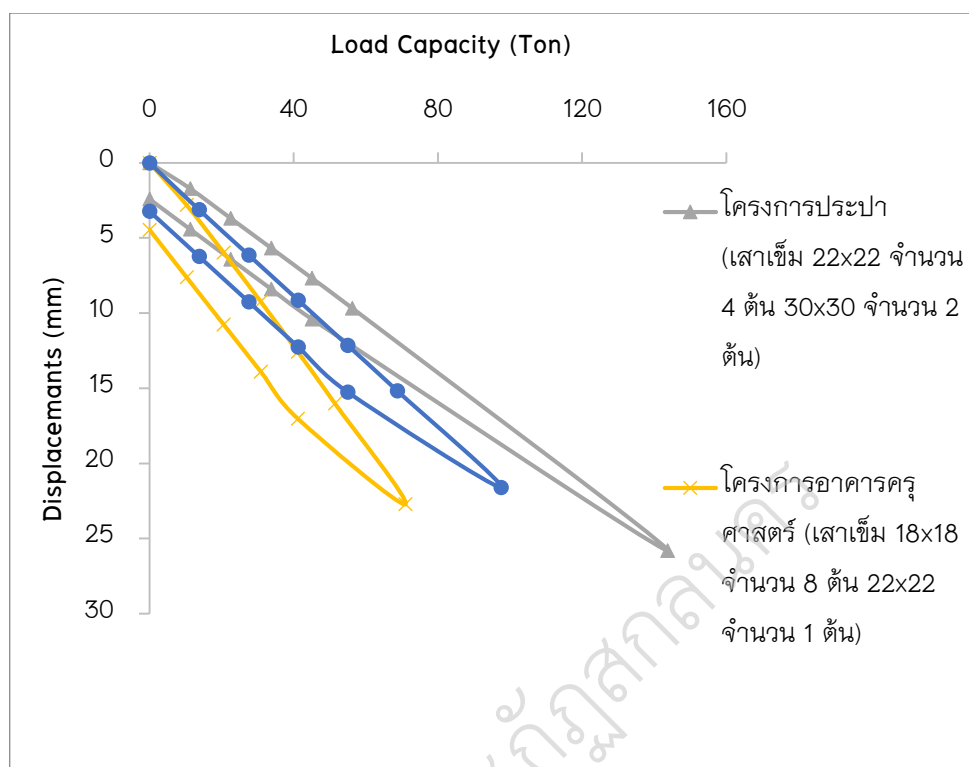
ภาพประกอบ 10 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนนครศาสตร์



ภาพประกอบ 11 การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการจำลอง
ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา
และโครงการขยายห้องเรียน



ภาพประกอบ 12 การทรุดตัวของเสาเข็มมีการทรุดของเสาเข็มแตกต่างกันเมื่อการฝังตัวของเสาเข็มต่างกัน



ภาพประกอบ 13 การทรุดตัวของเสาเข็มเฉลี่ย 3 โครงการ

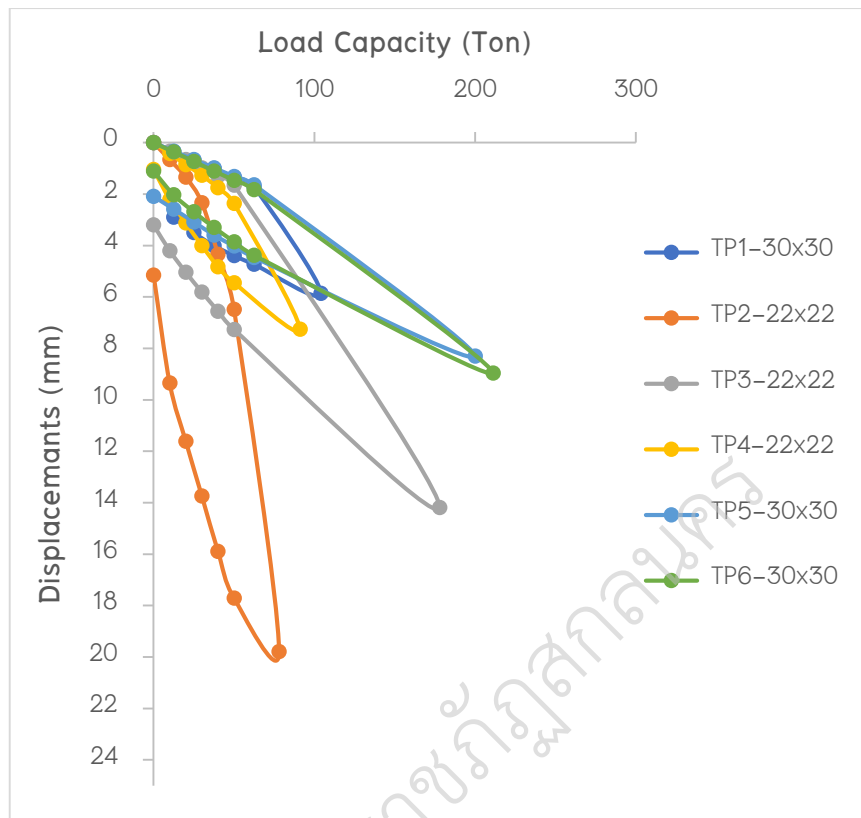
3. ผลการวิเคราะห์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี

พลศาสตร์

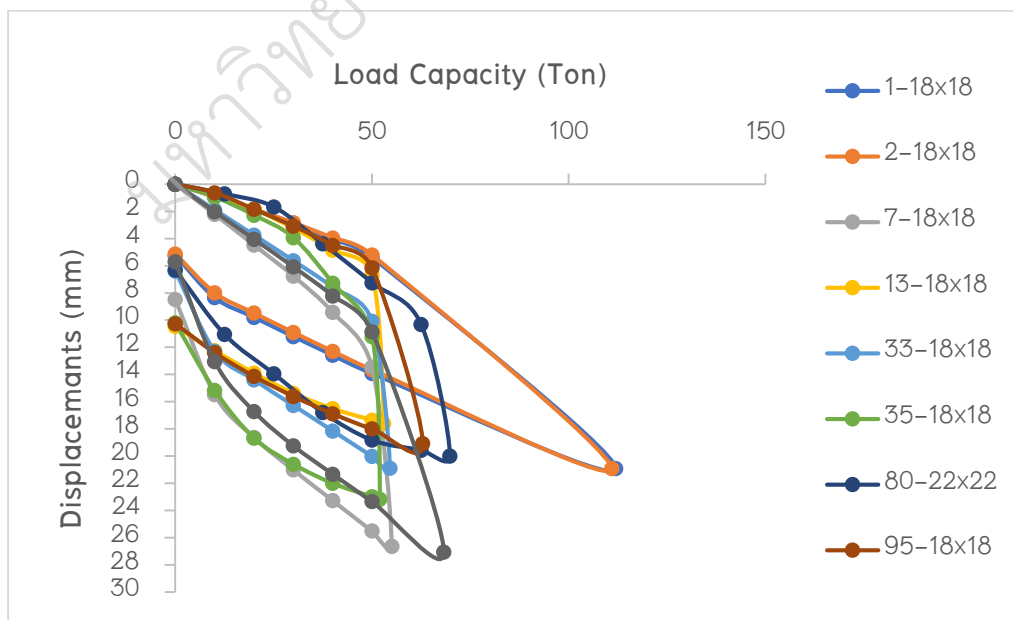
ในงานวิจัยนี้ การทดสอบโดยใช้วิธีพลศาสตร์เป็นการทดสอบแบบ Re-Strike Driving Test โดยทดสอบหลังจากที่เสาเข็มถูกตอกแล้วและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา ตั้งแต่ 7 ถึง 28 วัน เพื่อให้ดินรอบเสาเข็มคืนสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนแรกเริ่มต้น ด้วยการติดตั้งเกจวัดความเร่งและความเครียดที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มทดสอบ โดยมี ระยะห่างจากหัวเสาเข็มลงมาอย่างน้อย 1.5 เท่าของขนาดเสาเข็ม จากนั้นปรับเทียบ สัญญาณให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ในขั้นตอนถัดไป ให้แรงโดยปล่อยตุ้มเหล็กตกลงบนหัว เสาเข็มที่มีแผ่นกันกระแทกรองรับ พอมิพลังงานในการตอกเพียงพอ สัญญาณจากเกจวัด ความเร่งและความเครียดจะถูกแสดงและบันทึกไว้ในเครื่อง PDA เมื่อได้ข้อมูลนี้แล้วจะ นำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Case Pile Wave Analysis Method (CAPWAP) เพื่อหาค่ากำลังรับ น้ำหนักบรรทุกที่ถูกต้องของเสาเข็ม ในการทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุก สูงสุดของเสาเข็ม ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี CAPWAP ทำให้รู้ผลของน้ำหนักบรรทุกและค่า การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม ภาพประกอบ 13, 14 และ 15 แสดงรายละเอียดค่าการทรุดตัวของ

เสาเข็มที่ค่าร้อยละต่าง ๆ ของน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัย จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 โครงการ พบว่า เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกลงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มลดลง โดยมีการคืนตัวคงค้างของเสาเข็มเกิดขึ้นเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกจนหมดซึ่งสอดคล้องกับ (ทรงฤทธิ์ พุทธลา, 2566)

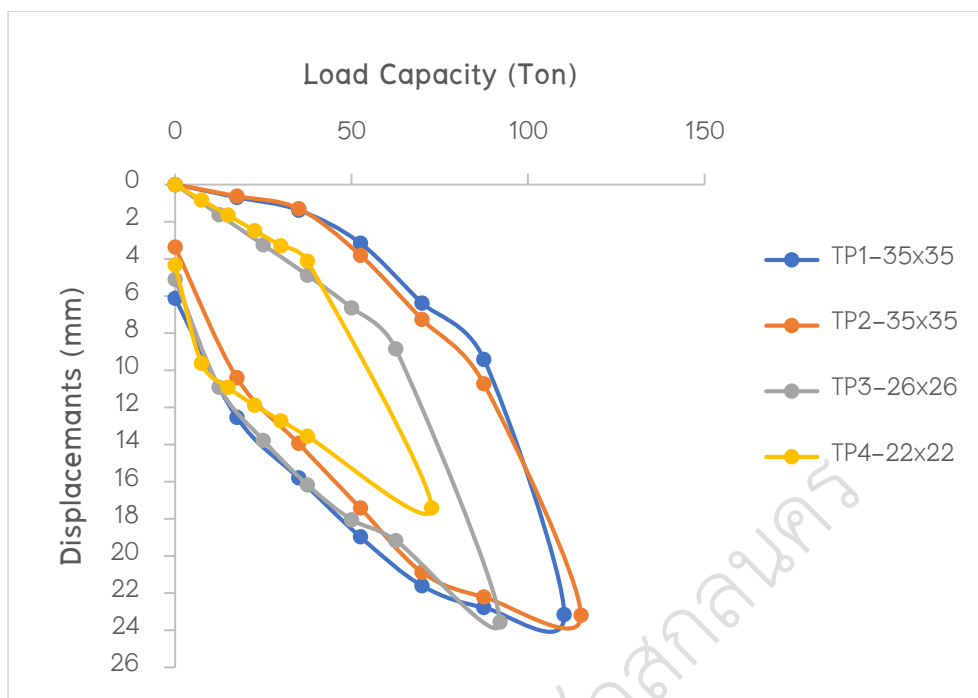
นอกจากนี้ยังพบว่า ในโครงการก่อสร้างที่มีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่สูงกว่า ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ที่ร้อยละน้ำหนักบรรทุกเดียวกันจะมีค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่น้อยกว่า โครงการก่อสร้างที่มีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ต่ำกว่า ในการทดลองยัง พบว่าการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ 3.25 ค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีพลศาสตร์สูงกว่าค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการคำนวณจากสูตรการตอกของ Hiley เหลือที่ร้อยละ 41.94 ในขณะที่โครงการที่กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ 3.00 ค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีพลศาสตร์สูงกว่าค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการคำนวณจากสูตรการตอกของ Hiley เหลือที่ร้อยละ 11.75 และนอกจากนี้ยังสังเกต พบว่า การกำหนดน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ 15.00 และ 25.00 ตันต่อตัน เมื่อเสาเข็มมีขนาด และความยาวเท่ากัน กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ 3.00 เท่ากัน ค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีพลศาสตร์สูงกว่าค่าน้ำบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการคำนวณจากสูตรการตอกของ Hiley เหลือที่ร้อยละ 5.65 และ 38.11 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกำหนดน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม รวมถึงผลต่อค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อมีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley และน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ต่างกัน



ภาพประกอบ 14 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย



ภาพประกอบ 15 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครูศาสตร์



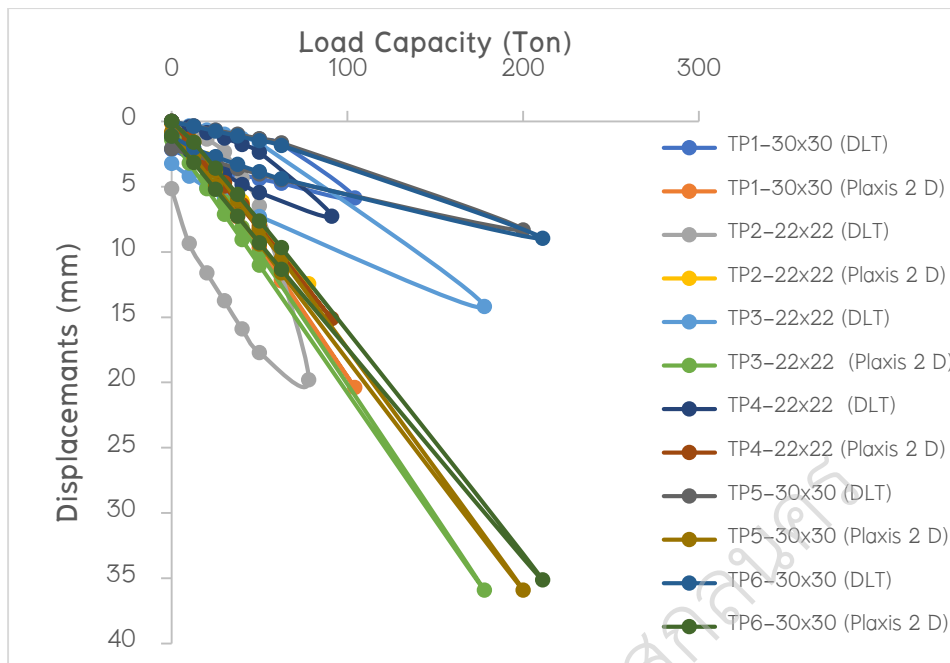
ภาพประกอบ 16 การรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารเรียน
ประถมศึกษาและโครงการขยายห้องเรียน

4. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

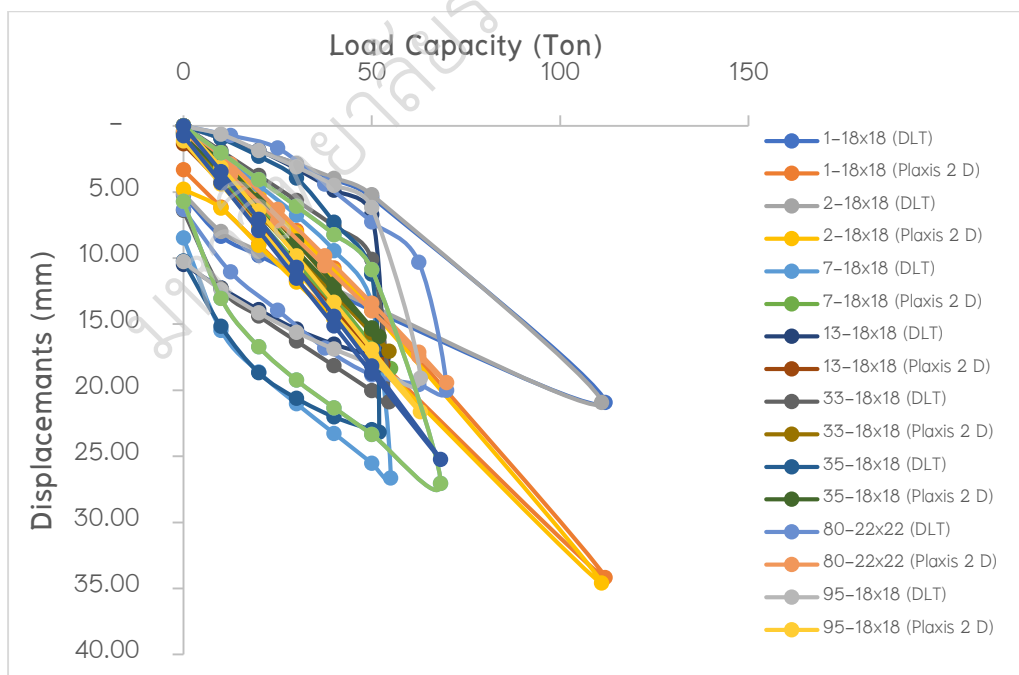
โปรแกรม PLAXIS 2D และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี พลศาสตร์

การนำผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ทำการเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม และเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดการทำงานเสาเข็มในโครงการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ภาพประกอบ 16, 17 และ 18 แสดงรายละเอียดในการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มที่ค้ำน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ จากการเปรียบเทียบพบว่า การให้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกลงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมีแนวโน้มลดลงด้วย โดยมีการคืนตัวคงค้างของเสาเข็มเกิดขึ้นเหมือนกันในทั้งสองกรณี อย่างไรก็ตามการคืนตัวคงค้างของเสาเข็มจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D มีค่าคืนตัวคงค้างน้อยกว่าการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ในทุกตัวอย่าง นอกจากนี้จาก

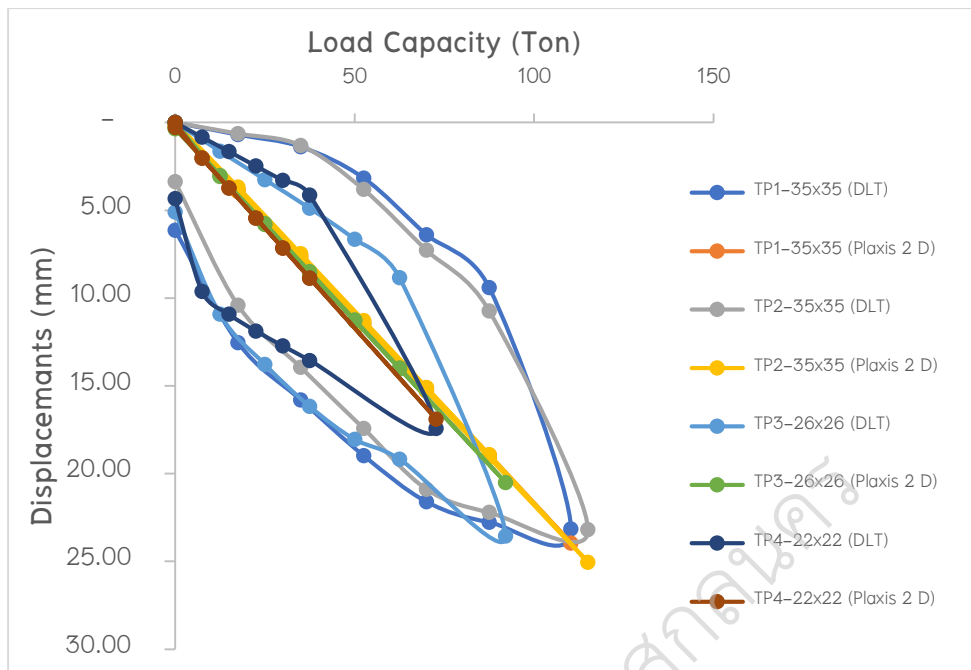
การเปรียบเทียบยังพบว่า ในโครงการก่อสร้างที่มีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ 3.25 นั้นค่าการทรุดจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D มีค่ามากกว่าการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ ทั้งนี้เป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่า การกำหนดอัตราส่วนปลอดภัยที่สูงขึ้นจะเพิ่มความปลอดภัยให้กับโครงการ นอกจากนี้ยังพบว่าที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ เมื่อนำมาจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ค่าทรุดตัวที่ได้ นั้นสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด จากค่าทรุดตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์อาจมีความเหมาะสมในการประเมินค่าทรุดตัวของเสาเข็มในกรณีที่ใช้อัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่สูงของโครงการก่อสร้าง และในโครงการก่อสร้างที่มีการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ 3.00 ค่าการทรุดจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำกว่านั้นอาจไม่มีผลต่อความแม่นยำของการประเมินค่าทรุดตัวของเสาเข็มในบางกรณี แต่ก็ควรพิจารณาว่าค่าทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันนั้นมีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสูตรการตอกของ Hiley ที่ใช้ของโครงการหรือไม่ อีกทั้งยังต้องพิจารณาความเหมาะสมของการใช้วิธีการทดสอบและการจำลองของโครงการก่อสร้างแต่ละโครงการด้วย



ภาพประกอบ 17 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์
และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพ
ระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย



ภาพประกอบ 18 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์
และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอน
ครูศาสตร์



ภาพประกอบ 19 การเปรียบเทียบรับน้ำหนักและพฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์
และโปรแกรม PLAXIS 2D โครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา
และโครงการขยายห้องเรียน

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในบทวิจัยนี้เป็นการสรุป อภิปรายผล และนำเสนอข้อเสนอแนะจากผลการวิเคราะห์การคำนวณการตอกเสาเข็มตามสูตรของ Hiley การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และสรุปผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D กับ การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้:

ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

พบว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทำให้การทรุดตัวเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อมีการปลดน้ำหนักบรรทุก การทรุดตัวจะลดลง แต่ยังคงมีการคืนตัวคงค้างของเสาเข็มหลังจากน้ำหนักถูกปลดจนหมด และยังพบอีกว่า ผลข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ในขณะที่ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม และตำแหน่งการตอกเสาเข็มนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแม่นยำของการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการจำลองน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D กับ การทดสอบการรับน้ำหนักวิธีพลศาสตร์

พบว่าผลการทรุดตัวจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D นั้นมีค่าการทรุดตัวที่สูงกว่าการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธี

พลศาสตร์อย่างชัดเจน ในโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย และโครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ ส่วนโครงการก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษาและโครงการขยายห้องเรียนมีค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่รับได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้ง 3 โครงการ การคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's ที่อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 3.00 เหมาะสมในการกำหนดเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับทุกขนาดหน้าตัด และความยาวของเสาเข็ม

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

ผู้วิจัยขอแนะนำเสนอแนวปฏิบัติสำหรับการนำผลวิจัยไปใช้ ดังนี้

1.1 ชั้นดินในบริเวณโครงการก่อสร้างเดียวกันมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มและการออกแบบเสาเข็มนั้น มีความจำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดินมาคำนวณ ดังนั้น ในโครงการก่อสร้างที่มีงบประมาณเพียงพอควรเจาะสำรวจชั้นดินเพิ่มเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นควรทำการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบร่วมด้วย

1.2 การตอกเสาเข็มด้วยวิธี Drop hammer สำหรับโครงการก่อสร้างภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร และโครงการภายนอกที่มีชั้นดินใกล้เคียงกัน ในกรณีของโครงการก่อสร้างขนาดเล็กที่ไม่ถึงงบประมาณเพียงพอในการเจาะสำรวจชั้นดิน แนะนำให้ใช้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.00 สำหรับคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในครั้งต่อไป

ผู้วิจัยขอแนะนำเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป ดังนี้

2.1 เพื่อให้ผลการวิจัยมีความน่าเชื่อถือ ควรทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือที่สุด ใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบโดย

วิธีพลศาสตร์ หากเป็นไปได้การทดสอบควรใช้ตัวอย่างเดียวกันในการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ และวิธีการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ หรือใช้ตัวอย่างที่อยู่ใกล้เคียงกันและมีผลการตอกที่ใกล้เคียงกันในการทดลอง

2.2 เพื่อให้ผลการวิจัยมีความน่าเชื่อถือและครอบคลุม ควรเพิ่มการเจาะสำรวจชั้นดินอย่างเพียงพอเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งจะช่วยให้การสร้างแบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และควรจำลองการตอกเสาเข็ม แบบ Pile driving ร่วมด้วย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง, กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ. (2557). *คู่มือการทดสอบการสำรวจดิน*. กรุงเทพฯ: กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- ชลดา กาญจนกุล, ทักษกร พรบุญยานนท์ และธนันท์ ชูบุญการ. (2565). *การวิเคราะห์กำลังรับแรงของฐานรากเสาเข็มฝังลึกในดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์*. เข้าถึงได้จาก <https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1272/1132>.
- ทรงฤทธิ์ พุทธลา และคณะ. (2566). การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 8(1), 21-29.
- ทินกร ทานา และสยาม ยิ้มศิริ. (2563). ความแม่นยำของการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการคำนวณ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25. เข้าถึงได้จาก <https://conference.thaince.org/index.php/ncce25/article/view/610/259>.
- เทิดศักดิ์ เลไธสง และพงศกร พวงชมพู. (2564). การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินโดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข. *วารสารวิจัย มข (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 21(1), 77-87.
- ปิยะ รัตนสุวรรณ. (2561). *ปฐพีกลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็ม แอนด์ เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์
- วัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์, ปัญชาน์ ต่อกิตติกุล และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ. (2564). การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทดสอบกับสูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทราย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26. เข้าถึงได้จาก <https://conference.thaince.org/index.php/ncce26/article/view/778/537>.
- ศิริสิทธิ์ ภิรมยาภรณ์. (2552). *พฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามเมื่อทดสอบแรงในแนวแกน*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ASTM International. (2022). *ASTM D1586*. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.

B P Naveen S Vishruth T G Sitharam. (2011). NUMERICAL SIMULATION OF VERTICALLY LOADED PILES. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*.

Bowles. (1997). *Foundation analysis and design*, 5th Edition. The Mcgraw Hill Inc.

E.J. Bowles. (1997). *Foundation analysis and design*, 5th Edition. The Mcgraw Hill Inc.

M.J. Tomlinson. (2001). *Foundation design and construction*, 7th Edition. Great Britain: Pearson Education.

Paravita Sri Wulandaria & Daniel Tjandra. (2015). *Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D*. Euro Asia Civil Engineering.

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ก

การเจาะสำรวจชั้นดินในการวิจัย

ภาพการเจาะสำรวจชั้นดิน



ภาพประกอบ 20 การเจาะสำรวจชั้นดินโครงการเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา



ภาพประกอบ 21 การเจาะสำรวจชั้นดินโครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์

ตัวอย่างจากการทำ Boring และ STP



วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร

ข้อมูลจากการทำ BORING และ SPT

โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัย

หลุมเจาะที่ BH -1

วันที่ 4 มิ.ย. 64

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร

โดย แผนกวิชาการก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร

เริ่มเวลา 9.30 น.

เสร็จเวลา 20.00 น.

DEPTH	SAMPLE	ATTERBERG LIMIT %				GROUP SYMBOL	PENETROMETER	SPECIFIC GRAVITY	U.C-STRENGTH	STANDARD	UNIT WEIGHT		GRAIN SIZE ANALYSIS				
		LL	PL	PI	MC						WET	DRY	4	10	40	100	200
1.00-1.45	SS-1	24.16	15.68	8.48	8.44	SC				5	1.948	-	80.71	61.26	43.80	31.29	21.53
2.00-2.45	SS-2	19.40	13.72	5.68	8.08	CL-ML				8	-	-	100.00	100.00	96.90	71.57	56.51
3.00-3.45	SS-3	21.00	13.63	7.37	7.18	CL				28	1.948	1.818	100.00	100.00	96.70	72.90	55.08
4.50-4.95	SS-4	23.70	13.58	10.12	10.40	CL				28	2.024	1.833	100.00	100.00	94.30	74.10	60.95
6.00-6.45	SS-5	23.70	15.10	8.60	10.92	CL				55	2.141	1.931	99.08	95.56	95.20	75.79	60.56
7.50-7.95	SS-6	23.42	14.11	9.31	10.11	CL				32	2.141	1.931	87.77	78.74	65.10	53.33	44.09
9.00-9.45	SS-7	20.50	12.14	8.36	11.91	CL				38	-	-	93.58	92.92	89.10	61.90	50.63
10.50-10.95	SS-8		NP		14.87	SM				22	2.206	1.920	100.00	99.51	94.20	56.40	43.94
12.00-12.45	SS-9	19.00	12.26	6.74	14.73	SM-SC				16	-	2.206	100.00	99.32	90.20	50.71	37.81
13.50-13.95	SS-10	17.70	11.56	6.14	15.15	SM-SC				21	-	-	98.94	98.42	96.80	78.38	35.81
15.00-15.45	SS-11		NP		16.46	SM				>110	-	-	100.00	100.00	97.00	48.53	25.56
16.50-16.95	SS-12		NP		16.46	SM				>110	-	-	96.38	95.24	90.10	40.12	23.12

ภาพประกอบ 22 Boring และ STP โครงการเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา



วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร

ข้อมูลจากการทำ BORING และ SPT

โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครูศาสตร์

หลุมเจาะที่ BH -1

วันที่ 25 ธ.ค. 64

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร

โดย แผนกวิชาการก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร

เริ่มเวลา 10.30 น.

เสร็จเวลา 18.00 น.

DEPTH	SAMPLE	ATTERBERG LIMIT %				GROUP SYMBOL	PENETROMETER	SPECIFIC GRAVITY	U.C-STRENGTH	STANDARD	UNIT WEIGHT		GRAIN SIZE ANALYSIS				
		LL	PL	PI	MC						WET	DRY	4	10	40	100	200
1.00-1.45	SS-1		NP		7.74	ML				6	-	-	100.00	100.00	96.80	72.28	61.00
2.00-2.45	SS-2		NP		11.41	SM				5	2.136	1.912	100.00	99.46	95.20	54.01	40.99
3.00-3.45	SS-3		NP		24.42	ML				6	2.469	1.984	100.00	100.00	96.70	68.85	54.67
4.50-4.95	SS-4		NP		15.19	ML				8	-	-	100.00	100.00	99.40	67.36	50.69
6.00-6.45	SS-5		NP		15.93	ML				7	2.158	1.861	100.00	100.00	98.50	67.74	52.66
7.50-7.95	SS-6		NP		12.93	SM				5	2.372	2.100	100.00	100.00	99.10	63.67	43.35
9.00-9.45	SS-7		NP		15.72	SM				5	-	-	82.52	81.44	77.20	48.72	35.07
10.50-10.95	SS-8		NP		15.65	SM				8	-	-	93.35	92.48	90.40	63.08	44.25
12.00-12.45	SS-9		NP		15.92	SM				12	-	-	100.00	100.00	95.00	64.68	42.28
13.50-13.95	SS-10		NP		15.43	SM				20	-	-	100.00	100.00	96.70	68.90	48.20
15.00-15.45	SS-11		NP		11.72	ML				42	-	-	100.00	100.00	99.20	71.20	52.94
16.50-16.95	SS-12		NP		15.24	SM				110	-	-	100.00	100.00	97.00	62.20	50.79
18.00-18.45	SS-13		NP		14.77	ML				115	2.233	1.946	100.00	100.00	97.00	68.78	51.95

ภาพประกอบ 23 Boring และ STP โครงการก่อสร้างอาคารครูศาสตร์

ตัวอย่างจากการทำ Boring Log



ภาพประกอบ 24 Boring log โครงการก่อสร้างอาคารครูศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเสาเข็ม และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

การคำนวณความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

รายการคำนวณความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร

Qall required ไม่น้อยกว่า = 20.00 ตัน/ตัน

เลือกใช้เสา □ 0.18x0.18 เมตร

Pile Top = -1.00 เมตร

Pile Tip = -14.00 เมตร

Qult = Qf+Qe-Wp

Qall = [(Qf+Qe)/F.S.]-Wp

ระดับ -1.00 ถึง -14.00 เมตร

Navg = 8.20 Blows/ft

$\sigma'_{vo'} (7.50) = 2.136 \times 2.50 + 1.15 \times 5.00 = 11.09 \text{ ตัน/ม}^2$

Cn = 0.967

Ncorr = 0.967 x 8.20 = 7.90 Blows/ft

$\phi_{use} = 29.40^\circ$

Kstan ϕ = 0.509096246

Qf = $\sigma'_{vo'} \cdot Kstan\phi \cdot AS = 11.09 \times 0.509096246 \times 4 \times 0.18 \times 13.00 = 52.84 \text{ ตัน}$

ระดับ -14.00 เมตร

$\sigma'_{vo'} (14.00) = 2.136 \times 2.50 + 1.15 \times 11.50 = 18.56 \text{ ตัน/ม}^2$

Cn = 0.795

Ncorr = 0.795 x 20.00 = 15.90 Blows/ft

$\phi_{use} = 32.00^\circ$

Nq = 14.00

Qe = $\sigma'_{vo'} \cdot Nq \cdot Ap = 18.56 \times 14.00 \times 0.18 \times 0.18 = 8.41 \text{ ตัน}$

Wp = $0.18 \times 0.18 \times 2.40 \times 13.00 = 1.01 \text{ ตัน}$

Qult = $52.84 + 8.41 - 1.01 = 60.24 \text{ ตัน/ตัน}$

Qall = $((52.84 + 8.41)/2.50) - 1.01 = 23.49 \text{ ตัน/ตัน} > 20.00 \text{ ตัน/ตัน OK}$

ใช้เข็ม □ 0.18x 0.18x 14.00 เมตร



(นายไชยวัฒน์ วิญญายงค์)

วิศวกรโยธา สย.13515

ภาพประกอบ 25 ตัวอย่างรายการคำนวณความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

การคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตรของ Hiley

รายการคำนวณการตอกเสาเข็ม			
ขนาดสึเหลี่ยมตัน S - 0.22x 0.22x 13.00 เมตร			
โครงการ :	ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครูศาสตร์	ออกแบบโดย	วิชาญ แทนหิน
	ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร		
	อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร		
ผู้รับเหมา :	หจก.ว.วิชัยทัศน์ก่อสร้าง	วัน,เดือน,ปี	มกราคม 11,2565

Formula	Hiley's Formula	F.S= 3.00
	$R = \frac{WhZ + W+n \frac{2}{w}}{S+0.01C/2 W+w}$	
เมื่อ	$R =$	Ultimate bearing capacity เป็น ตัน
	$\frac{W+n \frac{2}{w}}{W+w} =$	Efficiency Factor "e"
	$W =$	น้ำหนักของค้อนเป็น ตัน
	$w =$	น้ำหนักของเข็มเป็น ตัน
	$n =$	Coefficient of restitution = 0.25
	$h =$	ในกรณีเสาเข็มคอนกรีตตอกด้วยลูกตุ้มปล่อยรองด้วยกระสอบ
	$Z =$	ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็น เมตร
	$=$	Equipment Loss Factor
	$=$	1 สำหรับ Falling hammer
	$=$	0.80 Drop hammer with Friction winch
	$S =$	ระยะที่เสาเข็มจมเป็น เมตร/ครั้ง
	$C =$	Temporary Compression = $C_1 + C_2 + C_3$
	$C_1 =$	การยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L_2 เป็น ม. = $\frac{1.8RL_2}{A}$
	$C_2 =$	การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กยาว L (ม.) = $\frac{0.72RL}{A}$
	$C_3 =$	การยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม = $\frac{3.60 R}{A}$
	$A =$	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กเป็น ตร.ซม.

W (ตัน)	h (ม.)	Q_s (ตัน)	FS.	Q_u (ตัน)	L (ม.)	w (ตัน)	A (ตร.ซม.)	L_2 (ม.)	n
5.00	0.50	25	3	75	13	1.51008	484	0.1	0.25
e	C_1 (ซม.)	C_2 (ซม.)	C_3 (ซม.)	C (ซม.)	0.01C/2	Z	S (ซม.)	Last 10 Blows (ซม.)	
0.783	0.02789256	1.45041322	0.56	2.04	0.01018079	0.50	0.29	2.86	

สรุป ค่าเฉลี่ยจาก 10 ครั้งสุดท้ายได้ไม่มากกว่า 0.29 ซม./ครั้ง ผู้คำนวณ.....
หรือค่าการทรุดตัว 10 ครั้งสุดท้ายต้องได้ไม่มากกว่า 2.86 ซม.



ภาพประกอบ 26 ตัวอย่างรายการคำนวณการตอกเสาเข็มด้วยสูตร Hiley

 มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุพรรณบุรี 680 ม. 110 นิคม ๒ ต.ราชพฤกษ์ อ.เมืองฯ จ.สุพรรณบุรี 47000 หมายเลขทะเบียนและตรวจสอบงานก่อสร้าง โทร. 042-870107										บันทึกการตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก										
โครงการ: ก่อสร้างอาคารเรียน ๓๐๖๓๓๓๓๓										สัญญาเลขที่: 8/25 65										
สถาปนิกผู้ออกแบบ: ธีรภัทร ธีรภัทร																				
เจ้าของโครงการ: ธีรภัทร ธีรภัทร																				
ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง:										ผู้รับจ้างก่อสร้าง:										
มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุพรรณบุรี 680 ม. 110 นิคม ๒ ต.ราชพฤกษ์ อ.เมืองฯ จ.สุพรรณบุรี 47000 หมายเลขทะเบียนและตรวจสอบงานก่อสร้าง โทร. 042-870107										น.จ.ท.ว.วิชัย วัฒนกิจ										
ลำดับ	ชนิดของ เสาเข็ม	ขนาด หน้าตัด	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว	ขนาด ความยาว
53	15x15	396-354	35.1	6-1-15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
54	15x15	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
55	15x15	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
56	15x15	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
57	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
58	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
59	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
60	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
61	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
62	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
63	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
64	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
65	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
66	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
67	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
68	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
69	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
70	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
71	22x22	396-354	35.1	6-3-65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

สถานะ: ☐ เสร็จสิ้นโครงการ ☐ วิศวกรผู้ออกแบบ ☐ ผู้รับเหมางาน
☐ หน่วยงานตรวจสอบและตรวจสอบงานก่อสร้าง ☐ สถาปนิกผู้ออกแบบ ☐ อื่นๆ

วิศวกร: ธีรภัทร ธีรภัทร
 วันที่: 28/7/2565

ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างบันทึกการตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก



ภาพประกอบ 28 การตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก



ภาพประกอบ 29 การตอกเสาเข็ม

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
680 ม.11ก นิคมข. ต.สาครบุรี อ.เมือง จ.นครนายก 47000
หมายเลขออกใบและตราว่า ๑๑๐๖-๖๖๖๖๖๖๖๖ โทร 042-870197

บันทึกการทดลองเขียน

โครงการ: โครงการพัฒนาศักยภาพครูผู้สอน

สถานที่ดำเนินการ: ส.ราชภัฏวไลยอลงกรณ์

ชื่อของโครงการ: ส.ราชภัฏวไลยอลงกรณ์

สัญญาฉบับนี้: 8/2565

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
๑๑๐ ม.11ก นิคมข. ต.สาครบุรี อ.เมือง จ.นครนายก 47000
หน่วยงานต้นแบบและตราว่า ๑๑๐๖-๖๖๖๖๖๖๖๖ โทร 042-870197

ผู้รับจ้างจัดทำงาน: นายณัฐพล นิลทิพย์

ผู้เขียนบันทึก: _____ วันที่: 2-3-65

วิเคราะหผู้รับจ้าง: _____ วันที่รับทำ: _____

เขียนโดย: 1/1

แก้ไขโดย: _____

แปลตามจริง

รายละเอียด	ส.ราชภัฏ	รายละเอียด	
แบบแปลน	DD1 338	แปลนอาคาร	
ประมาณค่า	๕ ล้าน ๖๖๖	จำนวนผู้จ้าง	๕ คน
การควบคุมงาน	13 คน	จำนวนผู้จ้าง	32A คน
การควบคุมงาน	๕๐๐ ๖๖๖-๖๖๖	จำนวนผู้จ้าง	๕๐ คน
วันที่ทำ	๖๖-๖-๖๖	จำนวนผู้จ้าง	
วันที่ทำ	๖๖-๖-๖๖	จำนวนผู้จ้าง	
วันที่ทำ	๖๖-๖-๖๖	จำนวนผู้จ้าง	
วันที่ทำ	๖๖-๖-๖๖	จำนวนผู้จ้าง	

Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb
ส.ร. 1	2	ส.ร. 17	13	ส.ร. 33
ส.ร. 2	2	ส.ร. 18	22	ส.ร. 34
ส.ร. 3	2	ส.ร. 19	26	ส.ร. 35
ส.ร. 4	2	ส.ร. 20	22	ส.ร. 36
ส.ร. 5	4	ส.ร. 21		ส.ร. 37
ส.ร. 6	5	ส.ร. 22		ส.ร. 38
ส.ร. 7	5	ส.ร. 23		ส.ร. 39
ส.ร. 8	5	ส.ร. 24		ส.ร. 40
ส.ร. 9	5	ส.ร. 25		ส.ร. 41
ส.ร. 10	5	ส.ร. 26		ส.ร. 42
ส.ร. 11	5	ส.ร. 27		ส.ร. 43
ส.ร. 12	5	ส.ร. 28		ส.ร. 44
ส.ร. 13	5	ส.ร. 29		ส.ร. 45
ส.ร. 14	5	ส.ร. 30		ส.ร. 46
ส.ร. 15	5	ส.ร. 31		ส.ร. 47
ส.ร. 16	5	ส.ร. 32		ส.ร. 48

รายละเอียด

Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb	Drive No. 30 Cb
ส.ร. 1	2	ส.ร. 17	13	ส.ร. 33
ส.ร. 2	2	ส.ร. 18	22	ส.ร. 34
ส.ร. 3	2	ส.ร. 19	26	ส.ร. 35
ส.ร. 4	2	ส.ร. 20	22	ส.ร. 36
ส.ร. 5	4	ส.ร. 21		ส.ร. 37
ส.ร. 6	5	ส.ร. 22		ส.ร. 38
ส.ร. 7	5	ส.ร. 23		ส.ร. 39
ส.ร. 8	5	ส.ร. 24		ส.ร. 40
ส.ร. 9	5	ส.ร. 25		ส.ร. 41
ส.ร. 10	5	ส.ร. 26		ส.ร. 42
ส.ร. 11	5	ส.ร. 27		ส.ร. 43
ส.ร. 12	5	ส.ร. 28		ส.ร. 44
ส.ร. 13	5	ส.ร. 29		ส.ร. 45
ส.ร. 14	5	ส.ร. 30		ส.ร. 46
ส.ร. 15	5	ส.ร. 31		ส.ร. 47
ส.ร. 16	5	ส.ร. 32		ส.ร. 48

หมายเหตุ :

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

รวมงานโดย: _____

() _____

บริษัทผู้รับจ้าง: _____

วันที่: 2-3-65

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ส่วนนี้ ☐ สำหรับโครงการ ☐ สำหรับโครงการ

ภาพประกอบ 30 บันทึกเสาสีเขียวก่อนตอก

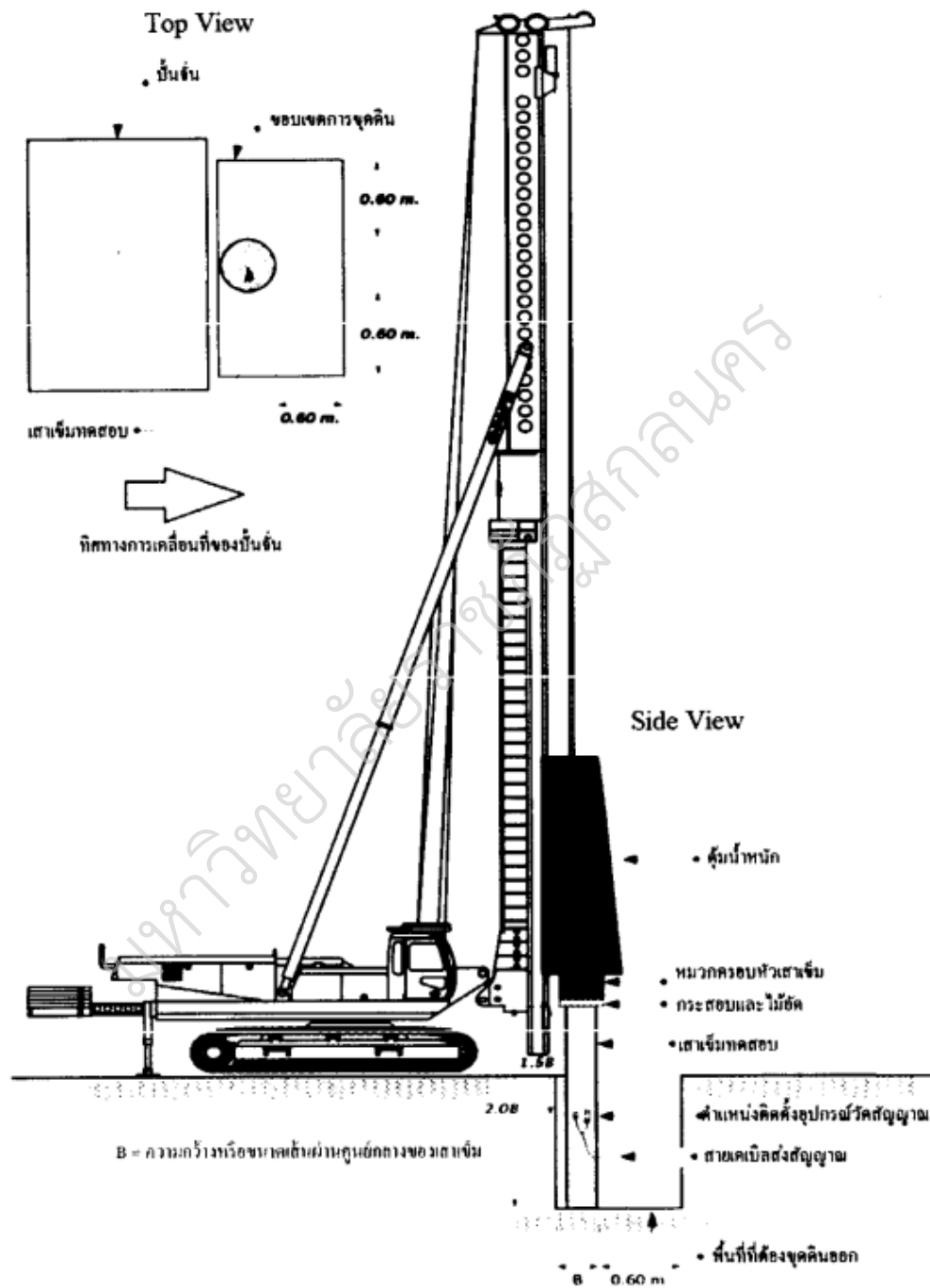
ภาคผนวก ค

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม

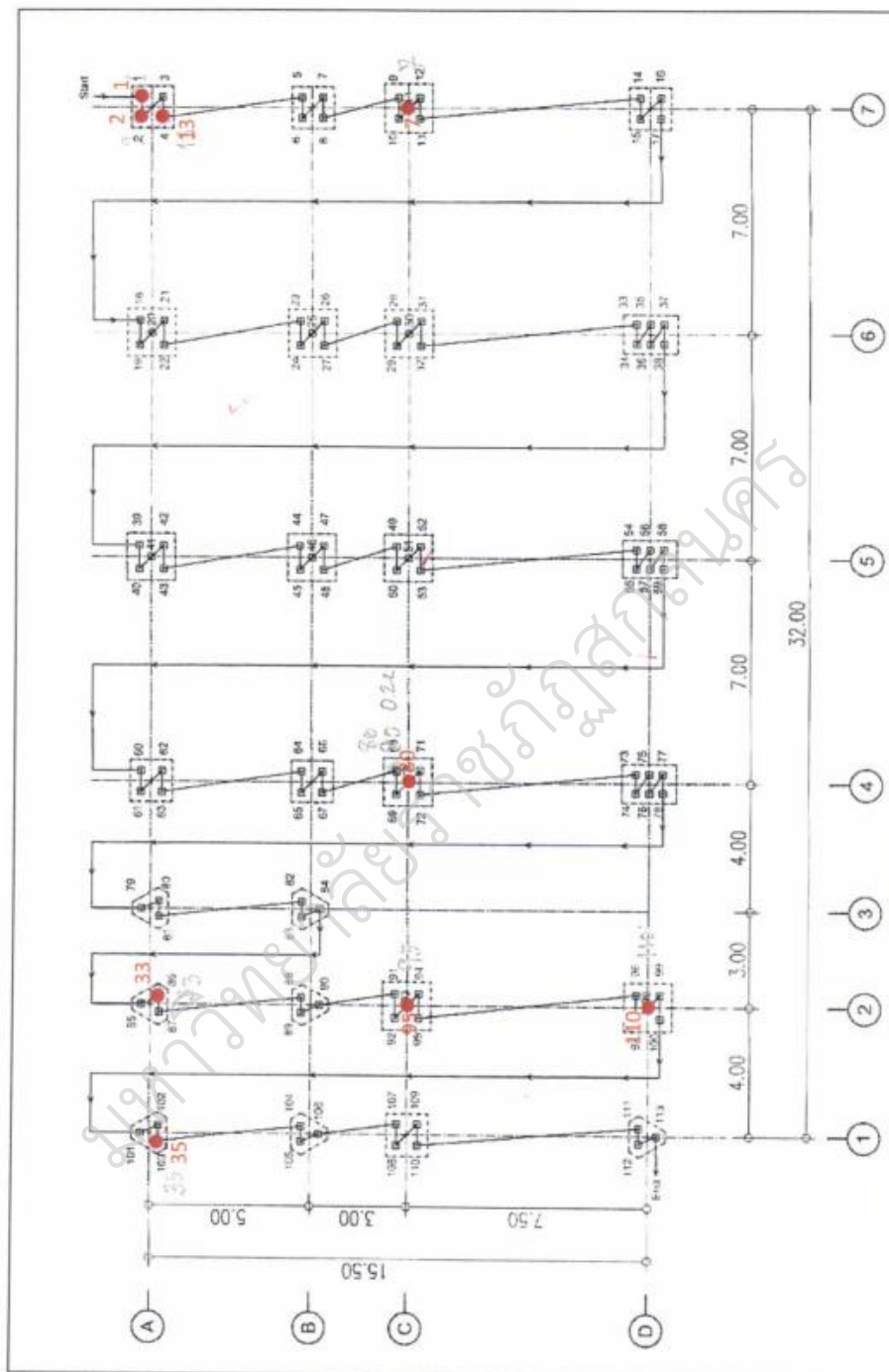


ภาพประกอบ 31 เครื่องทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม

การเตรียมหน้างานสำหรับการทดสอบ



ภาพประกอบ 32 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ



ผังแสดงตำแหน่งทดสอบเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์

ภาพประกอบ 33 ผังแสดงตำแหน่งทดสอบเสาเข็มโครงการก่อสร้างอาคารครุศาสตร์



ภาพประกอบ 34 การทดสอบเสาเข็ม

Dynamic Load Test

อาคารปฏิบัติการกลอนครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

650328 SNRU Training BD.; File: 1
 SQ PILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co.,Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55
 CAPWAP (R) 2014-3
 T T (29-Mar-2022)

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity:			111.96; along Shaft		34.14; at Toe		77.82 tons	
Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages	Depth Below Grade	Ru tons	Force in Pile tons	Sum of Ru tons	Unit Resist. (Depth) tons/m	Unit Resist. (Area) tons/m ²	Quake mm
	m	m						
				112.0				
1	1.0	0.6	3.89	108.1	3.89	6.10	8.47	2.414
2	2.1	1.7	2.90	105.2	6.79	2.80	3.88	2.414
3	3.1	2.7	1.63	103.5	8.42	1.57	2.18	2.414
4	4.2	3.7	0.73	102.8	9.15	0.70	0.98	2.414
5	5.2	4.8	0.34	102.5	9.49	0.33	0.46	2.414
6	6.2	5.8	0.28	102.2	9.77	0.27	0.37	2.414
7	7.3	6.9	0.35	101.8	10.12	0.34	0.47	2.414
8	8.3	7.9	0.51	101.3	10.63	0.49	0.68	2.414
9	9.3	8.9	0.87	100.5	11.50	0.84	1.16	2.414
10	10.4	10.0	1.57	98.9	13.07	1.51	2.10	2.414
11	11.4	11.0	2.71	96.2	15.78	2.61	3.63	2.414
12	12.4	12.0	3.97	92.2	19.75	3.83	5.31	2.414
13	13.5	13.1	4.67	87.5	24.42	4.50	6.25	2.414
14	14.5	14.1	4.33	83.2	28.75	4.17	5.80	2.414
15	15.6	15.2	3.20	80.0	31.95	3.08	4.28	2.414
16	16.6	16.2	2.19	77.8	34.14	2.11	2.93	2.340
Avg. Shaft			2.13			2.11	2.93	2.409
Toe			77.82				2401.86	1.000
Soil Model Parameters/Extensions					Shaft	Toe		
Smith Damping Factor					1.31	0.08		
Case Damping Factor					1.41	0.20		
Damping Type					Viscous	Viscous		
Unloading Quake			(% of loading quake)		100	30		
Reloading Level			(% of Ru)		100	100		
Soil Plug Weight			(tons)		0.219			
CAPWAP match quality			=	3.68	(Wave Up Match) ; RSA = 0			
Observed: Final Set			=	5.000 mm;	Blow Count	=	200 b/m	
Computed: Final Set			=	6.003 mm;	Blow Count	=	167 b/m	
Transducer			F3 (M045) CAL:	92.4; RF: 1.00;	F4 (M580) CAL:	148.6; RF: 1.00		
			A1 (63848) CAL:	1051; RF: 1.00;	A2 (54839) CAL:	940; RF: 1.00		
max. Top Comp. Stress			=	0.4 tons/cm ² (T=	25.2 ms, max= 1.000 x Top)			
max. Comp. Stress			=	0.4 tons/cm ² (Z=	1.0 m, T= 25.2 ms)			
max. Tens. Stress			=	-0.00 tons/cm ² (Z=	1.0 m, T= 3.6 ms)			
max. Energy (EMX)			=	1.57 tons-m; max.	Measured Top Displ. (DMX)=17.819 mm			

ภาพประกอบ 35 ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม

Dynamic Load Test

อาคารปฏิบัติการสอนวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

650328 SNRU Training BD.; File: 1
 SQ PILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co.,Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55
 CAPWAP(R) 2014-3
 T T (29-Mar-2022)

EXTREMA TABLE

File Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force tons	min. Force tons	max. Comp. Stress tons/cm ²	max. Tens. Stress tons/cm ²	max. Trnsfd. Energy tons-m	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.0	130.7	-0.1	0.4	-0.00	1.57	1.5	17.161
2	2.1	126.3	-0.1	0.4	-0.00	1.36	1.4	16.267
3	3.1	123.2	-0.0	0.4	-0.00	1.21	1.4	15.409
4	4.2	121.4	-0.0	0.4	-0.00	1.12	1.3	14.575
5	5.2	120.3	-0.0	0.4	-0.00	1.05	1.3	13.754
6	6.2	119.5	-0.0	0.4	-0.00	1.00	1.2	12.937
7	7.3	118.8	-0.0	0.4	-0.00	0.95	1.1	12.124
8	8.3	118.3	-0.0	0.4	-0.00	0.90	1.0	11.314
9	9.3	117.5	-0.1	0.4	-0.00	0.85	0.9	10.507
10	10.4	116.2	-0.1	0.4	-0.00	0.79	0.8	9.706
11	11.4	113.8	-0.0	0.4	-0.00	0.73	0.7	8.917
12	12.4	109.6	-0.0	0.3	-0.00	0.66	0.6	8.147
13	13.5	103.5	-0.0	0.3	-0.00	0.59	0.5	7.406
14	14.5	96.3	-0.0	0.3	-0.00	0.51	0.5	6.696
15	15.6	89.5	-0.0	0.3	-0.00	0.45	0.5	6.013
16	16.6	84.4	-0.0	0.3	-0.00	0.39	0.5	5.349
Absolute	1.0			0.4			(T =	25.2 ms)
	1.0				-0.00		(T =	3.6 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	118	117	115	113	111	109	107	105	103	102
RX	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
RU	118	117	115	113	111	109	107	105	103	102
RAU =	20 (tons);		RA2 =		118 (tons)					

Current CAPWAP Ru = 112 (tons); Corresponding J(RP) = 0.35; J(RX) = 0.85

VMX	TVP	VT1*2	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS	KEB
m/s	ms	tons	tons	tons	mm	mm	mm	tons-m	tons	tons/mm
1.4	15.30	46	92	125	17.819	4.999	5.000	1.68	147	78

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth	Area	E-Modulus	Spec. Weight	Perim.						
m	cm ²	tons/cm ²	tons/m ³	m						
0.0	324.0	392.0	2.403	0.72						
16.6	324.0	392.0	2.403	0.72						
Toe Area	324.0	cm ²								
Segmnt	Dist.	Impedance	Imped.	Tension	Compression	Perim.	Wave	Soil		
Number	B.G.		Change	Slack	Slack	Eff.	Speed	Plug		
	m	tons/m/s	%	mm	mm		m	tons		
1	1.0	31.75	0.00	0.00	0.000	-0.00	0.000	0.72	4000.0	0.000

ภาพประกอบ 36 ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม

Dynamic Load Test

อาคารปฏิบัติการกลนครูศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

650328 SNRU Training BD.; File: 1
 SQ FILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co., Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55
 CAPWAP (R) 2014-3
 T T (29-Mar-2022)

CAPWAP ANNOTATIONS

QS	UN	CS	LS	JS	SS	OSP	SK	MS	PS
2.414	1.000	1.000	1.000	1.412	1.313	0	0.000	0.000	0.014
QT	TG	CT	LT	JT	ST	OP	BT	MT	PL
1.000	0.000	0.300	1.000	0.196	0.080	0	0.000	0.000	0.000
RSA	PI								
0	0.020								

TV	AC	T1	T2	A12	T3	T4	A34
15.3	-0.03	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00

Transducer	ID	CAL	RF
F3	W045	92.4	1.000
F4	M580	148.6	1.000
A1	63848	1051	1.000
A2	54839	940	1.000

Since the data was adjusted through PDA-S,
 no other data adjustment parameters available.

FE	M_BLct	C_BLct	CI	BT	HQ	FR	J_Rx	J_Rs
16.2	200.0	166.6	0.720	0.032	3.68	20000	0.09	0.04

Added Quake	E-Modulus Multiplier	Cut-off	Toe Quake and Damping Optn	Uplift Frictn Reduct. Factr
0.00	1.00	0.00	0	0.80

Added Impedance
 None

Added Damping
 None

Damping Multipliers
 All ones

Capacity Reduction Factors
 All ones

ภาพประกอบ 37 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาเข็ม

650328 SNRU Training BD.; File: 1
 SQ FILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co.,Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55
 CAPWAP (R) 2014-3
 T T (29-Mar-2022)

STATIC ANALYSIS

Monotonic D-Toe, E-P R-Toe				
Step No.	Top Load tons	Top Disp. mm	Toe Load tons	Toe Disp. mm
0	0.0	0.000	0.0	0.000
2	4.9	0.458	2.4	0.030
4	9.8	0.916	4.7	0.060
6	14.7	1.375	7.1	0.091
8	19.5	1.833	9.4	0.121
10	24.4	2.291	11.8	0.151
12	28.9	2.744	14.1	0.181
14	32.9	3.191	16.5	0.212
16	36.4	3.630	18.8	0.242
18	39.8	4.065	21.2	0.272
20	43.1	4.497	23.5	0.302
22	46.4	4.927	25.9	0.332
24	49.7	5.354	28.2	0.363
26	52.9	5.779	30.6	0.393
28	56.1	6.201	32.9	0.423
30	59.2	6.619	35.3	0.453
32	62.3	7.033	37.6	0.484
34	65.4	7.443	40.0	0.514
36	68.3	7.849	42.3	0.544
38	71.3	8.251	44.7	0.574
40	74.2	8.649	47.0	0.604
42	77.1	9.043	49.4	0.635
44	79.9	9.432	51.7	0.665
47	84.1	10.009	55.3	0.710
50	87.9	10.548	58.6	0.756
53	91.4	11.041	61.6	0.801
56	94.6	11.492	64.3	0.846
59	97.4	11.903	66.8	0.892
63	100.7	12.390	69.7	0.952
68	104.1	12.903	72.7	1.028
74	107.0	13.378	75.3	1.118
87	110.2	13.983	77.8	1.315
115	111.1	14.521	77.8	1.738
146	111.7	15.061	77.8	2.206
174	111.9	15.510	77.8	2.629
188	111.9	15.727	77.8	2.841
195	112.0	15.834	77.8	2.947
199	112.0	15.895	77.8	3.007
201	112.0	15.925	77.8	3.037
202	112.0	15.941	77.8	3.052
237	112.0	16.470	77.8	3.581
272	112.0	16.999	77.8	4.110
307	112.0	17.527	77.8	4.639
342	112.0	18.056	77.8	5.168
377	112.0	18.585	77.8	5.697
412	112.0	19.114	77.8	6.225

ภาพประกอบ 38 ตัวอย่างกราฟพลทดสอบเสาเข็ม

Dynamic Load Test

อาคารปฏิบัติการสอนครูศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

650328 SNRU Training BD.; File: 1
 SQ PILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co.,Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55
 CAPWAP (R) 2014-3
 T T (29-Mar-2022)

STATIC ANALYSIS

Monotonic D-Toe, E-P R-Toe				
Step No.	Top Load tons	Top Disp. mm	Toe Load tons	Toe Disp. mm
447	112.0	19.643	77.8	6.754
482	112.0	20.172	77.8	7.283
508	112.0	20.565	77.8	7.676
521	112.0	20.761	77.8	7.872
527	112.0	20.852	77.8	7.963
530	112.0	20.897	77.8	8.008
532	112.0	20.927	77.8	8.039
536	107.1	20.469	75.5	8.008
538	102.2	20.011	73.1	7.978
540	97.3	19.553	70.8	7.948
542	92.4	19.094	68.4	7.918
544	87.6	18.637	66.1	7.888
546	83.1	18.183	63.7	7.857
548	79.1	17.736	61.4	7.827
550	75.5	17.297	59.0	7.797
552	72.2	16.862	56.7	7.767
554	68.8	16.430	54.3	7.736
556	65.5	16.000	52.0	7.706
557	63.9	15.786	50.8	7.691
559	60.7	15.360	48.4	7.661
561	57.5	14.937	46.1	7.631
563	54.3	14.517	43.7	7.601
565	51.2	14.101	41.4	7.570
567	48.1	13.689	39.0	7.540
569	45.1	13.281	36.7	7.510
571	42.1	12.877	34.3	7.480
573	39.2	12.477	32.0	7.449
575	36.3	12.081	29.6	7.419
577	33.5	11.690	27.3	7.389
579	30.7	11.303	24.9	7.359
582	26.6	10.734	21.4	7.313
585	22.8	10.209	18.2	7.268
588	19.5	9.732	15.3	7.223
591	16.4	9.294	12.6	7.177
595	12.9	8.772	9.5	7.117
599	9.8	8.319	6.8	7.057
604	6.8	7.849	4.1	6.981
611	3.9	7.368	1.6	6.875
626	1.5	6.844	0.6	6.739
654	0.7	6.316	0.6	6.739
685	0.2	5.784	0.6	6.739
719	0.0	5.247	0.6	6.739

ภาพประกอบ 39 ตัวอย่างกราฟผลทดสอบเสาเข็ม

650328 SNRU Training BD.; Pile: 1
 SQ PILE 0.18; Blow: 2
 Khonkaen Soil Engineering Co., Ltd.

Test: 28-Mar-2022 11:55

CAPWAP(R) 2014-3

T T (29-Mar-2022)

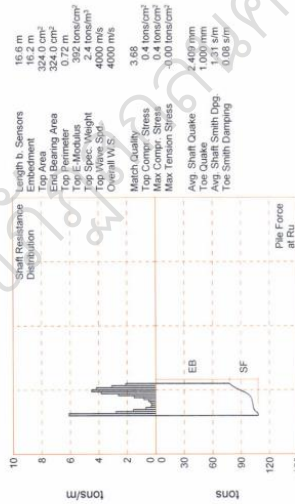
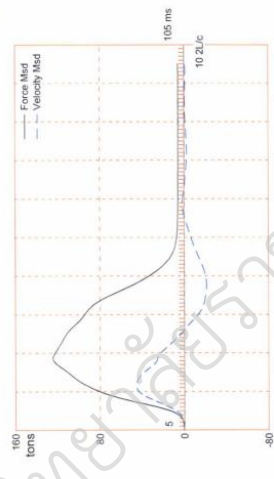
Segmnt	Dist.	Impedance	Imped.	Tension	Compression	Perim.	Wave	Soil
Number	B.G.	tons/m/s	Change	Slack	Slack	Eff.	Speed	Plug
	m		%	mm	mm		m/s	tons
2	2.1	31.75	0.00	0.00	0.000	-0.00	0.000	0.72
3	3.1	31.75	0.00	0.00	0.000	-0.00	0.000	0.72
16	16.6	31.75	0.00	0.00	0.000	-0.00	0.000	0.72

Wave Speed: Pile Top 4000.0, Elastic 4000.0, Overall 4000.0 m/s

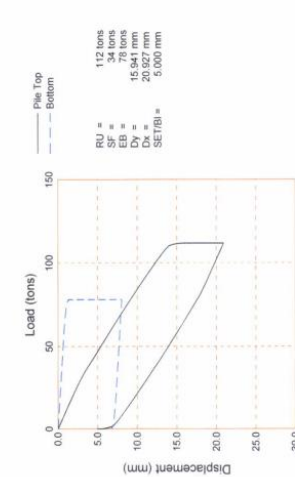
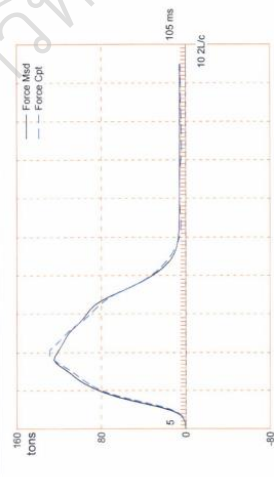
Pile Damping 2.00 %, Time Incr 0.259 ms, 2L/c 8.3 ms

Total volume: 0.538 m³; Volume ratio considering added impedance: 1.000

28-Mar-2022
 CAPWAP(R) 2014-3



650328 SNRU Training BD.; Pile: 1; SQ PILE 0.18; Blow: 2 (Test: 28-Mar-2022 11:55)
 Khonkaen Soil Engineering Co., Ltd.

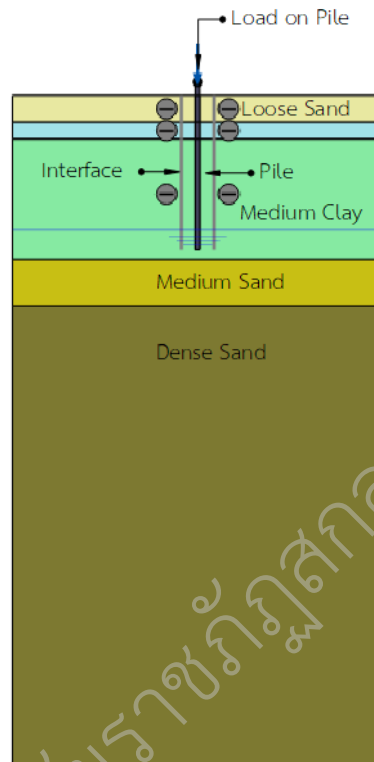


ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างกราฟพลทดสอบเสาเข็ม

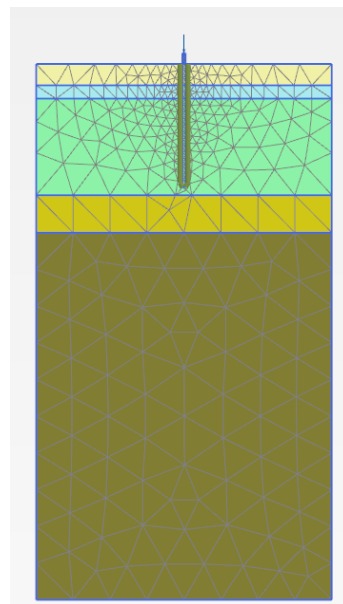
ภาคผนวก ง

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

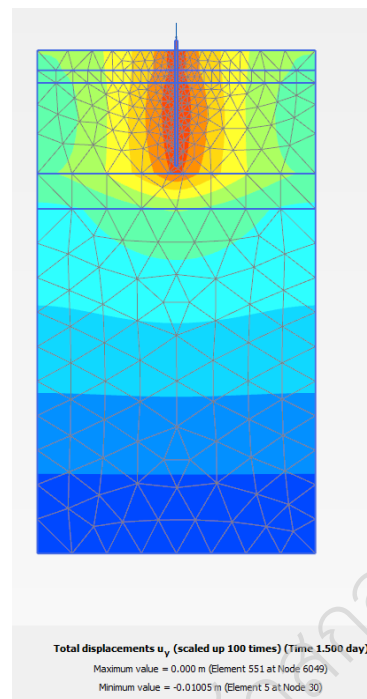
การจำลองทางคณิตศาสตร์โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา



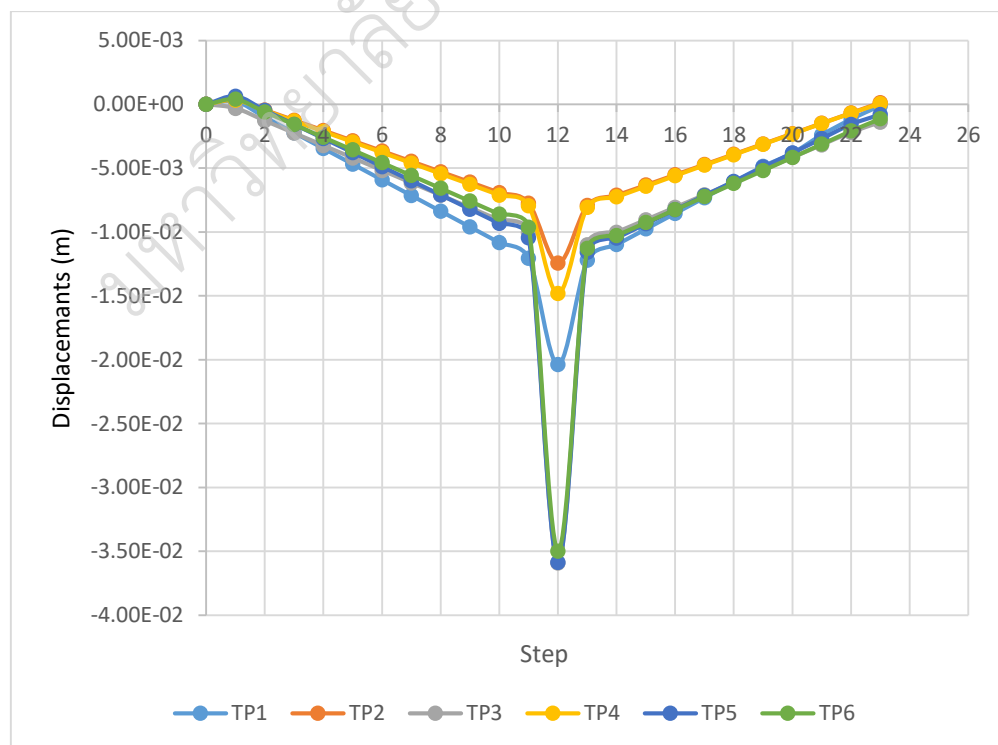
แบบจำลองชั้นดิน เสาค้ำที่ฝังในชั้นดิน



แบบจำลองการสร้าง Mesh

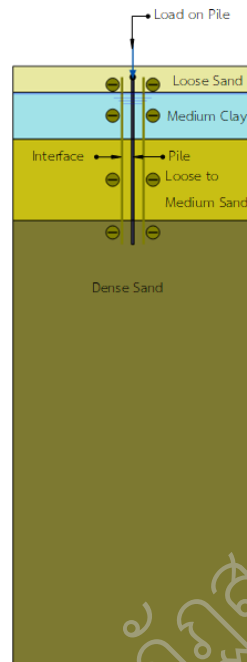


การเสียรูปของ Mesh เมื่อรับน้ำหนัก

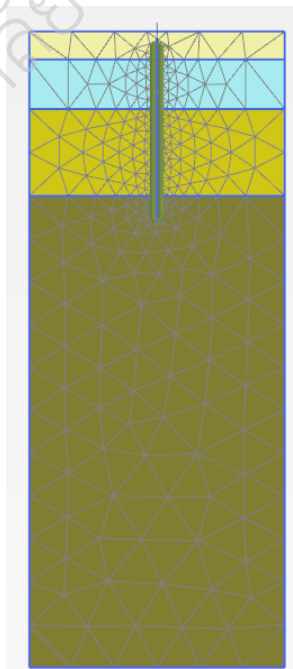


ภาพกราฟน้ำหนักกับการหดตัวของเสาเข็ม

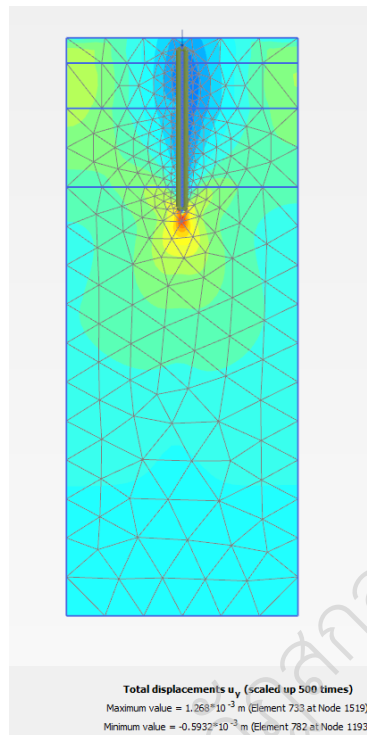
การจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์



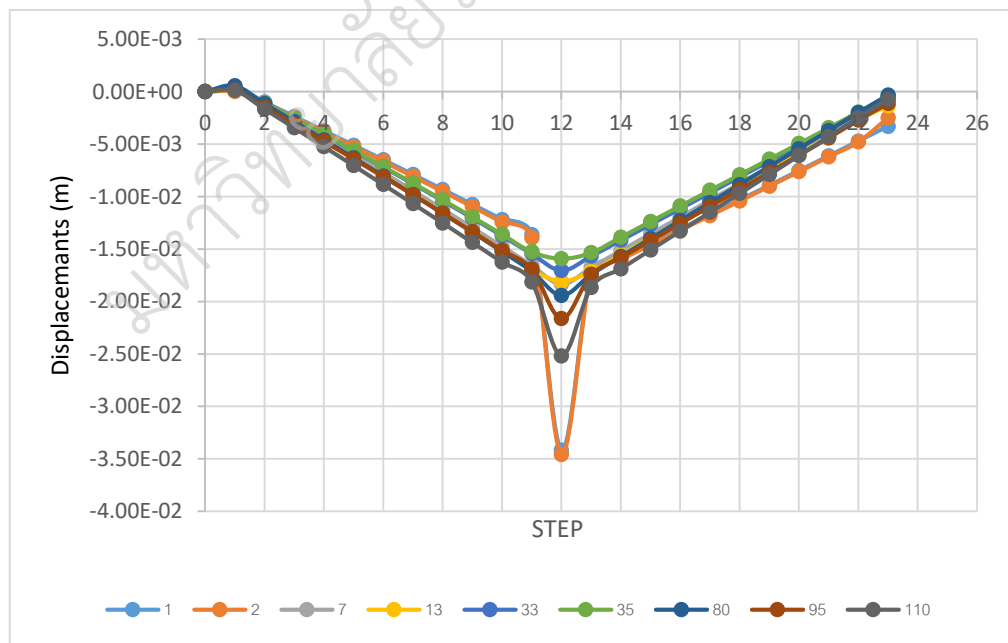
แบบจำลองชั้นดิน เสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน



แบบจำลองการสร้าง Mesh

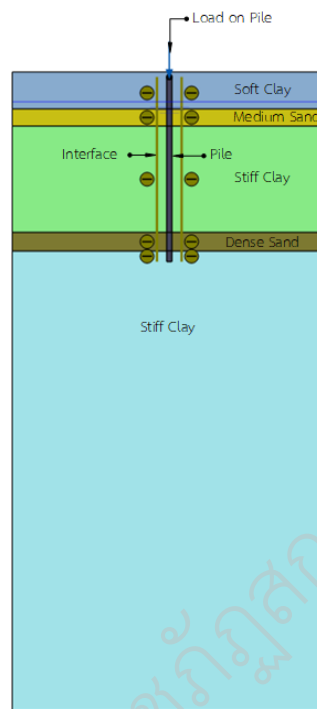


การเสียรูปของ Mesh เมื่อรับน้ำหนัก

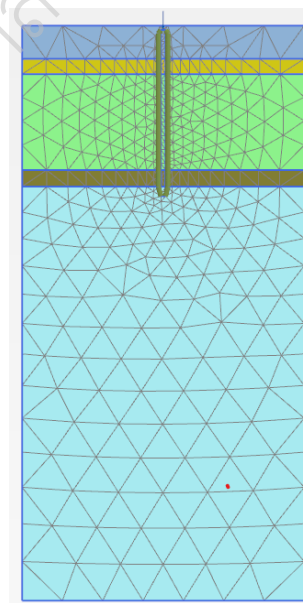


กราฟน้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

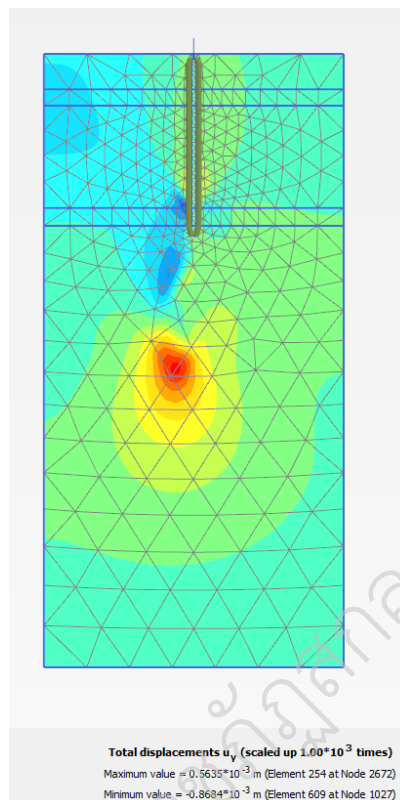
การจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา



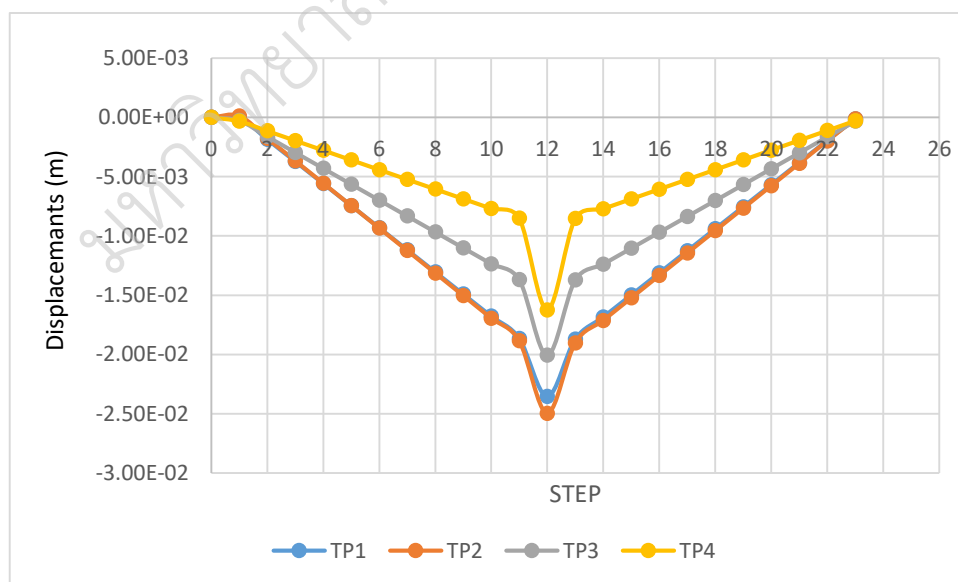
แบบจำลองชั้นดิน เสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน



แบบจำลองการสร้าง Mesh



การเสียรูปของ Mesh เมื่อรับน้ำหนัก



ภาพกราฟน้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

ผลการวิเคราะห์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

Top Disp (mm) Dynamic load test														
%	0%	50%	100%	150%	200%	250%	Max	250%	200%	150%	100%	50%	0%	
Load														
Pile	ก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา													
TP1	0	0.34	0.68	1.01	1.35	1.72	5.86	4.73		4.39	4.00	3.50	2.90	2.14
TP2	0	0.66	1.34	2.33	4.34	6.48	19.79	17.71		15.89	13.74	11.61	9.35	5.15
TP3	0	0.33	0.65	0.98	1.30	1.65	14.18	7.27		6.55	5.81	5.04	4.20	3.20
TP4	0	0.42	0.85	1.27	1.75	2.36	7.26	5.45		4.82	4.00	3.12	2.21	1.04
TP5	0	0.33	0.66	0.98	1.31	1.64	8.31	4.46		4.02	3.59	3.08	2.58	2.09
TP6	0	0.36	0.73	1.10	1.46	1.83	8.95	4.38		3.85	3.29	2.69	2.03	1.11
Pile	ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์													
1	0	0.93	1.88	2.87	4.09	5.39	20.93	13.93		12.59	11.21	9.80	8.35	5.25
2	0	0.93	1.86	2.84	3.96	5.20	20.93	13.64		12.29	10.90	9.48	7.99	5.13
7	0	2.22	4.48	6.76	9.43	13.46	26.65	25.52		23.27	21.02	18.63	15.48	8.47
13	0	0.84	1.84	3.24	4.86	6.70	17.61	17.36		16.51	15.38	13.90	12.25	10.47
33	0	1.88	3.75	5.63	7.59	10.09	20.88	20.03		18.15	16.28	14.39	12.29	6.39
35	0	0.94	2.28	3.93	7.29	11.21	23.18	22.99		22.01	20.60	18.68	15.16	10.21
80	0	0.72	1.67	4.39	7.25	10.32	19.99	19.57		18.83	16.80	13.94	11.05	6.32
95	0	0.63	1.85	3.09	4.49	6.16	19.08	18.00		16.89	15.61	14.14	12.40	10.27
110	0	2.03	4.05	6.08	8.22	10.86	27.06	23.35		21.33	19.24	16.72	13.05	5.70
Pile	ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา													
TP1	0	0.69	1.38	3.16	6.39	9.41	23.16	22.77		21.60	18.97	15.80	12.53	6.13
TP2	0	0.63	1.30	3.81	7.27	10.73	23.19	22.21		20.88	17.42	13.94	10.40	3.37
TP3	0	1.63	3.25	4.88	6.65	8.84	23.55	19.17		18.05	16.17	13.77	10.91	5.10
TP4	0	0.83	1.65	2.48	3.30	4.13	17.42	13.55		12.72	11.88	10.92	9.62	4.33

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม
PLAXIS 2D และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

Top Disp (mm)compair														
%	0%	50%	100%	150%	200%	250%	250%	200%	150%	100%	50%	0%	Max	
Load														
Pile	ก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปา													
TP1	0	0.34	0.68	1.01	1.35	1.72	4.73	4.39	4.00	3.50	2.90	2.14	5.86	DLT
	0	2.24	4.69	7.14	9.60	12.06	12.22	9.76	7.31	4.85	2.40	0.12	20.38	P2D
TP2	0	0.66	1.34	2.33	4.34	6.48	17.71	15.89	13.74	11.61	9.35	5.15	19.79	DLT
	0	1.25	2.86	4.47	6.10	7.74	7.93	6.33	4.72	3.11	1.49	0.12	12.43	P2D
TP3	0	0.33	0.65	0.98	1.30	1.65	7.27	6.55	5.81	5.04	4.20	3.20	14.18	DLT
	0	2.26	4.21	6.16	8.10	10.05	11.00	9.05	7.10	5.14	3.19	1.40	35.91	P2D
TP4	0	0.42	0.85	1.27	1.75	2.36	5.45	4.82	4.00	3.12	2.21	1.04	7.26	DLT
	0	1.34	3.01	4.69	6.38	8.08	8.28	6.61	4.94	3.27	1.60	0.02	15.12	P2D
TP5	0	0.33	0.66	0.98	1.31	1.64	4.46	4.02	3.59	3.08	2.58	2.09	8.31	DLT
	0	1.58	3.80	6.01	8.24	10.48	11.61	9.39	7.16	4.94	2.70	0.80	35.90	P2D
TP6	0	0.36	0.73	1.10	1.46	1.83	4.38	3.85	3.29	2.69	2.03	1.11		DLT
													8.95	
	0	1.59	3.59	5.59	7.61	9.66	11.33	9.29	7.25	5.20	3.13	1.13	35.13	P2D
ก่อสร้างอาคารปฏิบัติการสอนครุศาสตร์														
1	0	0.93	1.88	2.87	4.09	5.39	13.93	12.59	11.21	9.80	8.35	5.25	20.93	DLT
	0	2.37	5.12	7.91	10.75	13.64	17.24	14.49	11.72	8.94	6.14	3.31	34.18	P2D
2	0	0.93	1.86	2.84	3.96	5.20	13.64	12.29	10.90	9.48	7.99	5.13	20.93	DLT
	0	2.46	5.24	8.08	10.97	13.93	17.41	14.61	11.83	9.03	6.21	4.79	34.59	P2D
7	0	2.22	4.48	6.76	9.43	13.46	25.52	23.27	21.02	18.63	15.48	8.47	26.65	DLT
	0	2.70	6.00	9.44	12.96	16.54	16.75	13.56	10.35	7.13		0.63	18.36	P2D
													3.90	
13	0	0.84	1.84	3.24	4.86	6.70	17.36	16.51	15.38	13.90	12.25	10.47	17.61	DLT
	0	3.07	6.33	9.77	13.34	16.98	17.13	13.95	10.76	7.55	4.30	1.35	18.07	P2D
33	0	1.88	3.75	5.63	7.59	10.09	20.03	18.15	16.28	14.39	12.29	6.39	20.88	DLT
	0	2.61	5.65	8.79	12.05	15.45	15.67	12.66	9.65	6.62		0.55	17.04	P2D
													3.59	
35	0	0.94	2.28	3.93	7.29	11.21	22.99	22.01	20.60	18.68	15.16	10.21	23.18	DLT
	0	2.57	5.60	8.72	11.95	15.28	15.37	12.40	9.42	6.44		0.46	15.93	P2D
													3.45	
80	0	0.72	1.67	4.39	7.25	10.32	19.57	18.83	16.80	13.94	11.05	6.32	19.99	DLT
	0	2.87	6.31	9.82	13.40	17.12	17.42	14.00	10.58	7.16		0.34	19.43	P2D
													3.73	
95	0	0.63	1.85	3.09	4.49	6.16	18.00	16.89	15.61	14.14	12.40	10.27	19.08	DLT
	0	3.11	6.41	9.83	13.35	16.91	17.45	14.20	10.95	7.69	4.41	1.13	21.64	P2D
110	0	2.03	4.05	6.08	8.22	10.86	23.35	21.33	19.24	16.72	13.05	5.70	27.06	DLT
	0	3.45	7.06	10.70	14.40	18.17	18.71	15.12	11.53	7.92	4.31	0.75	25.24	P2D

ก่อสร้างอาคารเรียนประถมศึกษา														
TP1	0	0.69	1.38	3.16	6.39	9.41	22.77	21.60	18.97	15.80	12.53	6.13	23.16	DLT
	0	3.78	7.56	11.35	15.13	18.94	19.05	15.27	11.49	7.71		0.20	23.95	P2D
											3.93			
TP2	0	0.63	1.30	3.81	7.27	10.73	22.21	20.88	17.42	13.94	10.40	3.37	23.19	DLT
	0	3.67	7.47	11.27	15.08	18.92	19.08	15.28	11.48	7.69	3.89	0.13	25.04	P2D
TP3	0	1.63	3.25	4.88	6.65	8.84	19.17	18.05	16.17	13.77	10.91	5.10	23.55	DLT
	0	3.01	5.76	8.50	11.24	13.98	14.03	11.29	8.55	5.81		0.36	20.51	P2D
											3.07			
TP4	0	0.83	1.65	2.48	3.30	4.13	13.55	12.72	11.88	10.92		4.33	17.42	DLT
											9.62			
	0	2.03	3.74	5.44	7.14	8.85	8.88	7.16	5.44	3.73	2.01	0.29	16.89	P2D

ภาคผนวก จ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย



“วิจัย นวัตกรรม พลิกโฉมการ
พัฒนาท้องถิ่นสู่ “สังคมก้าวหน้า
เศรษฐกิจสร้างมูลค่าอย่างยั่งยืน”



งานประชุมวิชาการระดับชาตินานาชาติ "ราชภัฏวิจัย ครั้งที่ ๗"

The 7th Rajabhat University National and International
Research and Academic - Conference

E-PROCEEDING

วันที่ 14 – 16 พฤศจิกายน 2566

ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จังหวัดสกลนคร
November 14 -16 2023

at Sakon Nakhon Rajabhat University, Thailand

การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถังเก็บน้ำระบบฐานรากแบบเสาเข็ม A study of Load-Bearing Behavior of Water Storage Tank on Piles Foundation

พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว, ภาคิน ลอยเจริญ,
และทรงฤทธิ์ พุทธิลา*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มถังเก็บน้ำที่มีเสาเข็มวางอยู่บนชั้นดินเหนียวและชั้นดินทราย จำลองให้ถังเก็บน้ำรับน้ำหนักบรรทุกจากการเพิ่มระดับน้ำในถังจนถึงสภาวะน้ำเต็มถัง และมีการลดระดับความจุของน้ำในถังขณะใช้งาน โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ใช้ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลการตอกเสาเข็มและมิติขนาดถังเก็บน้ำในการสร้างแบบจำลอง โดยกำหนดลักษณะของชั้นดิน ด้วยแบบจำลองแบบ Mohr-coulomb ที่มีลักษณะการระบายน้ำสำหรับดินทราย ในส่วนของถังน้ำและเสาเข็มกำหนดให้มีคุณสมบัติของวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และมีแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดิน ทำการวิเคราะห์โดยให้แรงแนวดิ่งกับถังน้ำที่สภาวะระดับน้ำที่มีความจุของถังร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 และลดระดับน้ำลงที่ความจुर้อยละ 75, 50, 25, และ 0 ตามลำดับ นำเสนอผลวิเคราะห์จากการวิจัยในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักโครงสร้างกับน้ำหนักบรรทุกทุก และการทรุดตัวของเสาเข็ม และทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีพลศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบ ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D สามารถทำนายพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มถังเก็บน้ำได้สอดคล้องกับการใช้งานและยังพบว่าผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ให้ค่าการทรุดตัวน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วย PLAXIS 2D

คำสำคัญ: ฐานรากเสาเข็ม; พฤติกรรมการรับน้ำหนักของถังเก็บน้ำ; กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

Abstract

This research aims to study the load-bearing behavior of water tanks with piles placed on clay and sand layers. Models the water tank to receive a load from increasing the water level in the tank until the tank is full. Furthermore, there is a reduction in the water capacity level in the tank while in use. By creating mathematical models with PLAXIS 2D program that uses soil exploration drilling data. Pile driving data and water tank size dimensions in model construction. Create a mathematical model with the PLAXIS 2D program by determining the characteristics of the soil layer. With the Mohr-coulomb model with drainage characteristics for sandy soils, the water tank and pile must have linear elastic material properties. Moreover, there is friction on the contact surface between the pile and the soil. Analyzes were performed by applying vertical load to a water tank at water levels with a tank capacity of 0, 25, 50, 75, and 100 percent and reducing the water level to 75, 50, 25, and 0 percent capacity, respectively. Presenting the analysis results from research in the form of graphs of the relationship between the load of structure, the load of water and the settlement of the pile. Furthermore, test the dynamic methods for comparison. The results showed that the mathematical model using the PLAXIS 2D program could predict the load-bearing behavior of water storage tank piles consistent with usage. It was also found that the dynamic method test results gave a lower settlement value than the analysis with PLAXIS 2D.

Keywords: Pile foundation; Load-capacity behavior of storage tanks; Load capacity of the piles

1. บทนำ

สาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำประปานั้นมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของผู้คนในสังคมที่จะขาดเสียไม่ได้ น้ำประปาที่มีคุณภาพได้มาตรฐานตามเกณฑ์นั้นจะผ่านระบบการผลิตน้ำประปาโดยเริ่มตั้งแต่การสูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติผ่านขบวนการเติมสารเคมีทำการฆ่าเชื้อ ปรับปรุงความเป็นกรดด่างให้เหมาะสม ทำให้เกิดการตกตะกอน ผ่านการกรอง แล้วรวบรวมสำรองก่อนที่จะนำไปแจกจ่ายต่อไป (เขาว์ ตะลันเตียะ สวรรรัตน์ กรอสรากุล และอาจารย์ปรีกษา, 2561) ในระบบผลิตน้ำประปานั้นจะต้องมีถังเก็บน้ำไว้เก็บน้ำประปาจากการผลิต ถึงถังเก็บน้ำส่วนมากนิยมสร้างเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยตำแหน่งถังจะมีระดับที่อยู่ต่ำที่สุดเนื่องจากกระบวนการผลิตอาศัยหลักการของกลศาสตร์ของไหล (สาคร, 2564) ซึ่งทำให้โครงสร้างบางส่วนถูกก่อสร้างอยู่ใต้ดิน ในการสร้างถังเก็บน้ำใต้ดินนั้นจะต้องพิจารณาให้ดีเกี่ยวกับความเสี่ยงในการรั่วซึมจากการแตกร้าวของถังน้ำเนื่องจากพฤติกรรมการใช้งานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลหลายส่วนมาประกอบเพื่อใช้ออกแบบโครงสร้าง ซึ่งการเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring log) ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 (ASTM International, 2022) นั้นเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญ ต่อการคำนวณเพื่อออกแบบโครงสร้างของถังเก็บน้ำ ให้เป็นตามมาตรฐานและหลักวิศวกรรม เพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าว และการรั่วซึม ซึ่งเป็นปัญหาซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำประปาได้เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของถังเก็บน้ำ ซึ่งในการออกแบบระบบฐานรากของถังเก็บน้ำโดยส่วนใหญ่เน้นการวิเคราะห์ที่จะจำลองสภาวะการใช้งานที่คาดว่าจะอยู่ในสภาวะวิกฤตที่สุดในด้านต่าง ๆ เช่น แรงดันดินด้านข้างสูงสุด การรับน้ำหนักบรรทุกทุกขณะน้ำเต็มถัง แรงดันใต้ถังในขณะมีน้ำท่วมเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยจะนำมาคำนวณออกแบบ แต่ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงขั้นตอนในการใช้งานจริง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้างประเภทนี้ กล่าวคือขณะใช้งานจะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำอยู่ตลอดเวลา ซึ่งถังเก็บน้ำจะรับน้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ หลายรอบน้ำหนักเหล่านี้จะส่งไปยังเสาเข็มโดยตรง อันนั้นการทำความเข้าใจพฤติกรรมของถังเก็บน้ำขณะใช้งานเป็นเรื่องลำบากและต้องใช้งบประมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงเห็นความสำคัญจึงใช้กรณีศึกษาจากโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยฯ ที่ตั้งอยู่ในมหาวิทยาลัยราชภัฏสุทธานคร โดยถังเก็บน้ำเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกว้าง 20 x 20 เมตร และมีความลึก 4 เมตร มีระบบฐานรากฐานแบบลึกที่เสาเข็มที่ได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (ทรงฤทธิ์ พุทธิลา และคณะ, 2566) ซึ่งในการออกแบบกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัย 343.23 กิโลนิวตัน/ตัน อัตราส่วนพลอดภัยที่ 2.50 การก่อสร้างควบคุมการตอกเสาเข็มโดยใช้สูตรการตอกเสาเข็มของ Hiley's อัตราส่วนพลอดภัยที่ 3.25 ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load test) อัตราส่วนพลอดภัยที่ 2.50 และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการรับน้ำหนัก

งานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองของถังเก็บน้ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้งานถังเก็บน้ำที่มีระบบฐานรากเสาเข็มที่ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวและชั้นดินทราย โดยการจำลองเป็นการจำลองเพิ่มของระดับน้ำที่ความจุของถังจากร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 และลดระดับน้ำลงที่ร้อยละ 75, 50, 25, และ 0 การจำลองถังเก็บน้ำแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมและให้ผลการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ (เทิดศักดิ์ เลโทสง และพชร พวงชมพู, 2564) วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของถังเก็บน้ำขณะใช้งาน โดยทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของการคำนวณค่าการทรุดตัวกับผลของการตอกเสาเข็มโดยใช้สูตรการตอกเสาเข็มของ Hiley's อัตราส่วนพลอดภัยที่ 3.25 และผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของถังเก็บน้ำที่ใช้ระบบฐานรากแบบเสาเข็มที่ระดับความจุที่แตกต่างกันโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งใช้พารามิเตอร์ของดินที่ได้จากผลการเจาะสำรวจชั้นดิน
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากโปรแกรม PLAXIS 2D กับ ผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์จากเสาเข็มตอกด้วยสูตร Hiley's

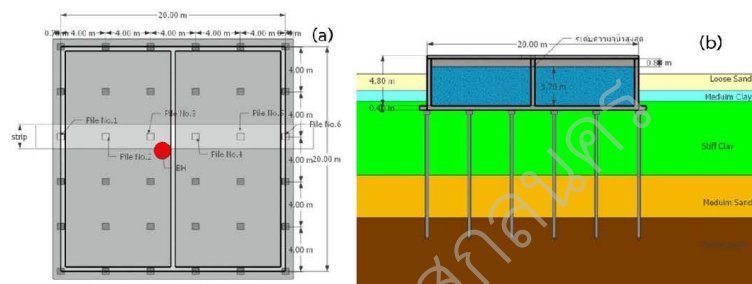
3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของถังเก็บน้ำที่มีระบบฐานรากแบบเสาเข็มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของถังเก็บน้ำด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม PLAXIS 2D เปรียบเทียบกับการทรุดตัวจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์และขณะใช้งานจริง โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

3.1 กำหนดแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์

3.1.1 ถังเก็บน้ำและลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินที่ก่อสร้าง

ตามลักษณะโครงสร้างถังเก็บน้ำและระบบฐานรากในโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยฯ ที่ตั้งอยู่ในมหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ มีโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กมีระบบฐานรากแบบเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมตัน (มอก. 396-2549) ขนาด 0.30 x 0.30 เมตร มีแปลนดังภาพ 1 (a) เป็นตำแหน่งที่ใช้ในการจำลองรูปตัดขวางดังภาพที่ 1 (b) แสดงให้เห็นถึงการเรียงตัวของชั้นดินบริเวณก่อสร้าง



ภาพ 1 (a) แปลนแสดงตำแหน่งเสาเข็มของถังเก็บน้ำ และ (b) ภาพตัดขวางโครงสร้างถังเก็บน้ำ

บริเวณก่อสร้างได้จากเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring log) ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 มีชั้นดินประกอบด้วยชั้นทรายหลวมหนาประมาณ 1.60 เมตร ชั้นดินเหนียวแน่นปานกลางหนาประมาณ 1.00 เมตร ชั้นดินเหนียวหนาประมาณ 7.20 เมตร ชั้นทรายแน่นปานกลางหนาประมาณ 2.90 เมตร และชั้นที่ลึกลงไปเป็นชั้นทรายแน่นมีระดับน้ำใต้ดินหลังการเจาะสำรวจ 1 วัน ที่ลึก 8 เมตร จากผิวดินคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน ซึ่งชั้นดินแต่ละชั้นจะมีค่า Standard Penetration (SPT) ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลผลการทดสอบจากการเจาะสำรวจชั้นดิน

Depth (m)	Soil Description	Standard Penetration (Blows)
0.00 – 1.60	Clayey coarse red medium (SC)	5
1.60 – 2.60	Clay and silt very sand red medium (CL-ML)	8
2.60	Silt clay with fine sand red and brown very stiff to hard (CL)	28
3.00 – 5.00	Silt clay with fine sand red and brown very stiff to hard (CL)	28
5.00 – 7.00	Silt clay with fine sand red and brown very stiff to hard (CL)	55
8.00	Silt clay with fine sand red and brown very stiff to hard (CL)	32
9.80	Silt clay with fine sand red and brown very stiff to hard (CL)	38
9.80 – 11.20	Silty fine Sand brown dish light gray medium (SM)	22
11.20 – 12.60	Clayey silty fine Sand and brown light gray medium (SM-CM)	16
12.60	Silty fine Sand dark red very dese (SM)	21
12.60 – 16.00	Silty fine Sand dark red very dese (SM)	> 110
16.95	Silty fine Sand dark red very dese (SM)	> 111

3.1.2 การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของถังเก็บน้ำด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

โปรแกรม PLAXIS 2D เป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์การเสียรูปและความมีเสถียรภาพในโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีวิทยาแบบ 2 มิติ โดยมีขั้นตอนการป้อนข้อมูลที่ง่ายในการจำลองเริ่มจากการกำหนดแนวทางการจำลองโมเดล วิเคราะห์ข้อมูลดิน ป้อนข้อมูล ตรวจสอบผลลัพธ์ความเป็นไปได้ของพฤติกรรม การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการจากการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณที่ทำการก่อสร้างถังเก็บน้ำของโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพระบบประปาภายในมหาวิทยาลัยฯ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงตามตาราง 2 ในการจำลองชั้นดินทุก ๆ ชั้นจะถูกจำลองพฤติกรรมด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb (MCM) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตถูกจำลองพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Model) ประเภทแบบจำลองเป็นแบบ Plane strain ขอบเขตการจำลองกว้าง 110 เมตร ลึก 40 เมตร โดย Mesh ถูกแบ่งเป็น Medium องค์ประกอบ

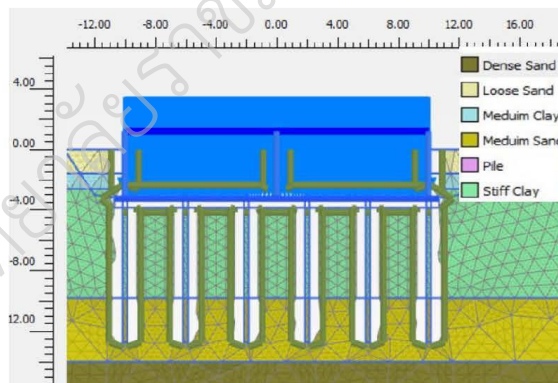
(Elements) เป็นลักษณะสามเหลี่ยมซึ่งมีโหนดภายใน 15 โหนด จำนวนองค์ประกอบโดยประมาณ 3,126 ชิ้น 26,422 โหนด ดังแสดงในภาพ 2 ในการจำลองน้ำหนักที่กระทำกับถังเก็บน้ำจะเป็นการจำลองน้ำหนักร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 และลดระดับน้ำลงที่ความจรร้อยละ 75, 50, 25, และ 0 ตามลำดับ

3.2 ทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

ซึ่งในหลักการพิจารณาเลือกเสาเข็มต้นที่มีผลการรายงานค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่มีค่าสูงสุดในการทดสอบ ซึ่งจะเป็นตำแหน่งเสาเข็มต้นที่ 6 ดังแสดงในภาพ 1 โดยจะได้ค่า Pile driving analyzer (PDA) และนำมาวิเคราะห์ด้วย Case pile wave analysis program (CAPWAP) (Moayed, 2017)

ตาราง 2 คุณสมบัติของเสาเข็มและดินแต่ละชั้น ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

Materials	Drainage Type	Parameters Linear Elastic / Unit					
		γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	v	C (kN/m ²)	ϕ (deg)
Pile	Non-Porous	24.00	24.00	27.70×10^6	0.17	-	-
Tank	Non-Porous	24.00	24.00	22.90×10^6	0.17	-	-
Loose Sand	Drained	16.00	18.00	15×10^3	0.30	-	30
Medium Clay	Undrained	17.00	19.00	31×10^3	0.35	48.25	-
Stiff Clay	Undrained	18.00	20.00	69×10^3	0.40	144.75	-
Medium Sand	Drained	19.63	21.63	22.425×10^3	0.32	-	35
Dense Sand	Drained	20.00	22.00	44.85×10^3	0.37	-	38

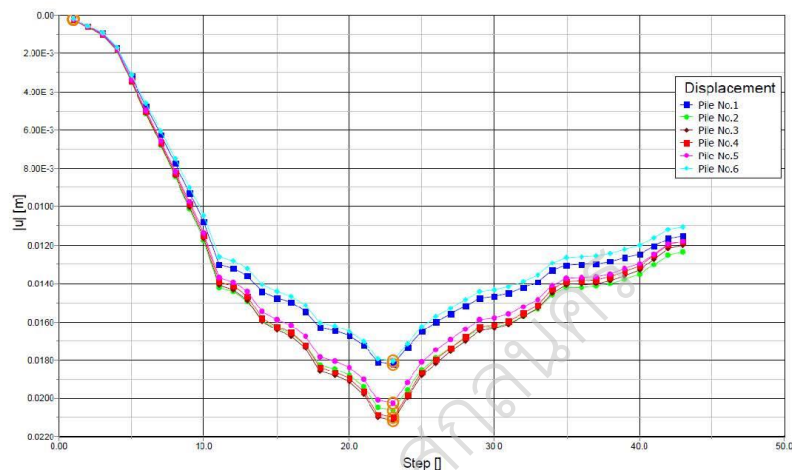


ภาพ 2 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างถังเก็บน้ำ และรูปแบบ Medium mesh

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยอาศัยคุณสมบัติของดินจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินเพื่อหาค่าการทรุดตัวของ Mesh ที่ปลายเสาเข็ม ผลการวิจัยพบว่า การจำลองการให้น้ำหนักที่ระดับร้อยละความจุน้ำในถังที่แตกต่างกัน โดยเมื่อระดับร้อยละความจุเพิ่มขึ้น ค่าการทรุดตัวของถังเก็บน้ำจะแปรผันตามระดับร้อยละความจุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่เพิ่มระดับน้ำในถังร้อยละ 25, 50, 75, และ 100 มีค่าการทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 13.59, 15.68, 17.77, และ 19.87 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงแนะนำคือไม่เกิน 25 มิลลิเมตร และเมื่อลดระดับความจุของน้ำในถังร้อยละ 75, 50, 25, และ 0 จะพบว่าการเกิดการคืนตัว (Rebound) เท่ากับ 17.79, 15.70, 13.62, และ 11.76 มิลลิเมตร ยิ่งไปกว่านั้น ค่าการคืนตัวกลับเมื่อไม่มีน้ำในถังคิดเป็นร้อยละ 41 ของความจุน้ำร้อยละ 100 ค่าดังกล่าวแสดงตามภาพ 3 และตาราง 3 ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับการทรุดตัวของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ตามมาตรฐาน ASTM D 1143-07



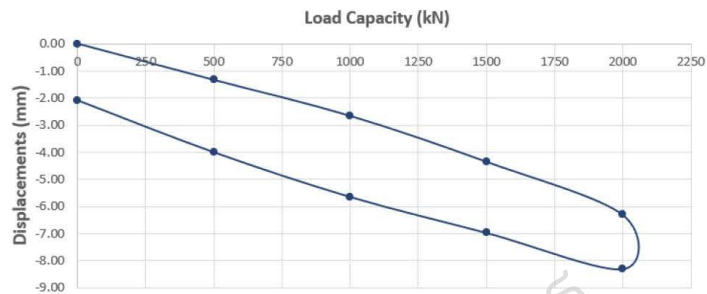


ภาพ 3 ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มถึงเก็บน้ำจากการจำลองการใช้งานที่ระดับความจุร้อยละที่แตกต่างกัน

ตาราง 3 ค่าการทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มที่ระดับร้อยละความจุต่าง ๆ จากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

State	Capacity % (kN)	Piles displacements (mm)					
		Pile No.1	Pile No.2	Pile No.3	Pile No.4	Pile No.5	Pile No.6
1	0 (0)	0	0	0	0	0	0
2	25 (36.29)	-13.02	-14.23	-14.10	-13.88	-13.70	-12.61
3	50 (72.59)	-14.73	-16.36	-16.46	-16.26	-15.88	-14.40
4	75 (108.89)	-16.44	-18.49	-18.81	-18.63	-18.06	-16.19
5	100 (145.18)	-18.15	-20.63	-21.17	-21.01	-20.25	-17.98
6	75 (108.89)	-16.45	-18.51	-18.83	-18.65	-18.07	-16.20
7	50 (72.59)	-14.75	-16.38	-16.48	-16.28	-15.90	-14.42
8	25 (36.29)	-13.04	-14.26	-14.13	-13.92	-13.73	-12.63
9	0 (0)	-11.52	-12.37	-12.04	-11.81	-11.79	-11.04

4.2 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ ของเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นขนาด 0.30 x 0.30 เมตร ความยาว 12 เมตร ซึ่งเป็นเข็มต้นหมายเลข 6 ตามแปลนในภาพ 1 (a) ผลการทดสอบเสาเข็มทำให้ทราบความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยเป็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แรงต้านของดินรอบเสาเข็มตลอดความยาวมีค่าเท่ากับ 794.34 กิโลนิวตัน และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 1274.86 กิโลนิวตัน ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load Capacity) ขณะทดสอบอยู่ที่ 1961.53 กิโลนิวตัน โดยพบว่ามีการทรุดตัวสูงสุดที่ 8.31 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าทรุดตัวที่เกิดขึ้นไม่เกิน 25 มิลลิเมตร และมีค่าการคืบตัวที่ 2.09 มิลลิเมตร แสดงตามภาพ 4

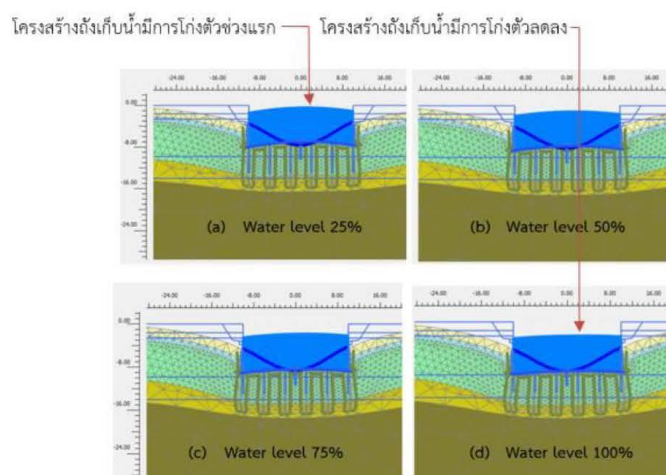


ภาพ 4 ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (TP-5) จากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์

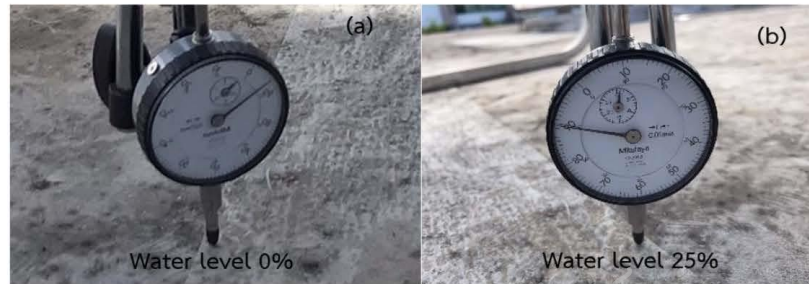
5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย พบว่า พฤติกรรมการทรุดตัวของระบบฐานรากเสาเข็มของถังเก็บน้ำที่ระดับความจุที่ต่างกันจากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D นั้นมีพฤติกรรมการทรุดตัวที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงของถังเก็บน้ำในแต่ละช่วงระดับความจุของถัง กล่าวคือ การทรุดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากดินใต้ฐานเมื่อรับแรงกดจะดันฐานลงทำให้เกิดการโก่งที่บนฝาดังซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การเกิดรอยร้าวของโครงสร้างได้ (Asati, 2016)

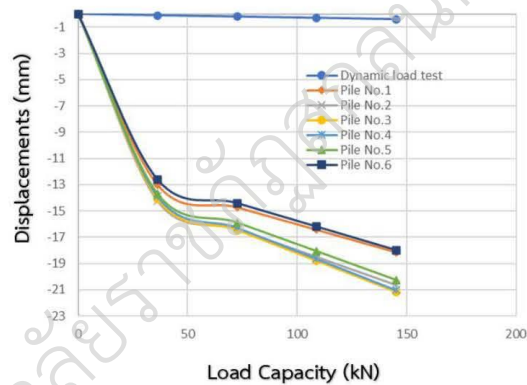
การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากโปรแกรม PLAXIS 2D กับผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ที่ทำการทดสอบเสาเข็มตอกด้วยสูตร Hiley's ผลการทรุดตัวและการคั่นตัวของเสาเข็มจากการจำลองจากโปรแกรมมีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยวิธีวิธีพลศาสตร์ อย่างชัดเจน อภิปรายผลการวิจัย พฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากระบบเสาเข็มของถังเก็บน้ำที่ระดับความจุที่ต่างกันโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งใช้พารามิเตอร์ของดินที่ได้จากผลการเจาะสำรวจชั้นดิน พบว่าการทรุดตัวที่ระดับความจุที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการทรุดตัวที่สูงกว่าการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเสาเข็มต้นริมทั้ง 2 ข้างจะเกิดการทรุดตัวน้อยกว่าเสาเข็มช่วงกลางถังเก็บน้ำ ผลจากการเพิ่มระดับความจุน้ำในถังเป็นการทำให้เกิดการรับน้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ ตลอดการใช้งานจากภาพที่ 5 จะเห็นพฤติกรรมของถังเก็บน้ำกล่าวคือ ดินใต้ถังเก็บน้ำจะถูกดันออกด้านข้างเมื่อน้ำหนักกดทับเพิ่มขึ้น และจะสังเกตได้ว่าโครงสร้างถังเก็บน้ำมีการโก่งตัวช่วงแรกของการเพิ่มความจุ น้ำ ดังภาพ 5 (a) และ (b) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อชั้นดินอ่อนรับน้ำหนักสูงสุดที่ความจุถัง ดังภาพ 5 (c) และ (d) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยการวัดที่บริเวณด้านบนฝาดังถังเก็บน้ำดังแสดงในภาพ 6 จะเห็นได้ว่าหากต้องการคำนวณการออกแบบที่ประหยัด และมีความเหมาะสม ดังนั้นจำนวนเสาเข็มจึงเป็นสิ่งสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่นำมาพิจารณา (Wulandari, 2015)



ภาพ 5 พฤติกรรมการทรุดตัวของถังเก็บน้ำจากการจำลองเมื่อรับน้ำหนักที่ระดับความจุต่าง ๆ



ภาพ 6 การวัดค่าทรุดตัวของถังเก็บน้ำเมื่อรับน้ำหนักที่ระดับความจุ้น้ำเริ่มต้น (a) และร้อยละ 25 (b)



ภาพ 7 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของถังการจำลองด้วย PLAXIS 2D กับการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากโปรแกรม PLAXIS 2D กับผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ที่ทำการทดสอบเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's ภาพ 7 แสดงให้เห็นถึงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มทั้ง 6 ต้น ในช่วงที่นำมาวิเคราะห์เทียบกับวิธีพลศาสตร์ผลการจำลองกับการทดสอบมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก (Sarma, 2016) ทั้งนี้เนื่องจากจากการทดสอบแบบพลศาสตร์มีการส่งพลังงานที่ไปยังเสาเข็มโดยการกระแทกลงไปอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากการจำลองที่มีการเพิ่มน้ำหนักขึ้นจนเต็มความจุ้น้ำ และลดลงตามการใช้งานจริงซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับวิธีการทดสอบแบบสถิตย์ศาสตร์ ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ที่กำหนดค่าการทรุดตัวทั้งหมดของเสาเข็มจากรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แล้วปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 25 มิลลิเมตร แล้วคลายน้ำหนักบรรทุกจนหมดปล่อยทิ้งไว้โดยไม่รับน้ำหนักอีก 24 ชั่วโมงต้องไม่เกิน 6 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าน้ำหนักคงค้างของการจำลองมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนด แต่จะเห็นว่าผลจากการทดสอบเสาเข็มด้วยสูตร Hiley's อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 3.25 นั้นส่งผลให้การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์มีค่าค่อนข้างสูง และยังสามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อสนับสนุนความเชื่อมั่นสำหรับการใช้สูตรการออกแบบ (Seo, 2023)

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. การออกแบบรับถังเก็บน้ำควรใช้สูตร Hiley's อัตราส่วนปลอดภัย ไม่น้อยกว่า 3.25 เท่า
2. ในการออกแบบถังเก็บน้ำนั้นควรพิจารณาถึงการโก่งตัวเนื่องจากการใช้งานมาคำนวณออกแบบด้วย
3. โครงสร้างถังเก็บน้ำควรมีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีสถิตย์ศาสตร์ (Static load test)

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของถังเก็บน้ำประกอบด้วย
2. เพิ่มจำนวนของหลุมเจาะทดสอบชั้นดินเพื่อให้ข้อมูลมีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น

3. ในทางปฏิบัติการตอกเสาเข็มนั้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากที่จะควบคุมให้ความยาวเสาเข็มไปหยั่งในชั้นดินแข็งที่ระดับความลึกเท่ากันทุกต้น ฉะนั้นควรใช้ข้อมูลความยาวที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์ จะได้ทราบถึงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น และควรนำการรับแรงของดินได้ต้องถึงเก็บน้ำมาพิจารณาด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่รวมไปถึงข้อมูลรายละเอียดในการก่อสร้างของมหาวิทยาลัยฯ ตลอดจนทั้งให้ทุนในการศึกษา และสนับสนุนเครื่องมือเพื่อการศึกษาในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- A. N., Kadu, M. S., & Asati, S. R. Asati. (2016). Seismic Analysis and Optimization of RC Elevated Water Tank Using Various Staging Patterns. *International Journal Of Engineering Research And Application*.
- ASTM International. (2022). *ASTM D1586. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*.
- H., Mosallanezhad, M., & Nazir, R. Moayedli. (2017). Evaluation of maintained load test (MLT) and pile driving analyzer (PDA) in measuring bearing capacity of driven reinforced concrete piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 150 – 154.
- K. Sarma. (2016). Load-displacement behaviour of skirted raft foundations on sand using PLAXIS 2D. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 258871.
- P. S., & Tjandra, D. Wulandari. (2015). Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D. *Procedia Engineering*, 125 (หน้า 363 – 367). Indonesia: Elsevier Ltd.
- S., Chung, M., Kim, J. H., & Choi, C. Seo. (2023). Practical method for pile construction management using non-contact pile penetration movement measuring device and pile driving formulas: A case study. *Smart Geotechnics for Smart Societies*, 2117 – 2123.
- เชาว์ ตะสันเทียม สอนารัตน์ กรอสรากุล และอาจารย์ที่ปรึกษา. (2561). การศึกษากระบวนการผลิตและคุณภาพน้ำประปาในพื้นที่ตำบลธารปราสาท อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา. *มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- ทรงฤทธิ์ พุทธิลา และคณะ. (2566). การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*.
- เทิดศักดิ์ เล็กโสม และพงศกร พวงชมพู. (2564). การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินโดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข. *วารสารวิจัย มข*.
- สาคร อินทะชัย. (2564). *กลศาสตร์ของไหล (FLUID MACHANICS)*. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.



งานประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ "ราชภัฏวิจัย ครั้งที่ ๗"

The 7th Rajabhat University National and International Research and Academic- Conference



“ วิจัย นวัตกรรม พลิกโฉมการ
พัฒนาท้องถิ่นสู่ “สังคมก้าวหน้า
เศรษฐกิจสร้างมูลค่าอย่างยั่งยืน”



ประวัติย่อของผู้วิจัย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พรพิทักษ์ คล่องแคล่ว
วัน เดือน ปีเกิด	วันเสาร์ ที่ 3 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ.2522
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	91/79 ซอยโยธิน ถนนเลี้ยวเมือง ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร 47000
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2541	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
พ.ศ. 2545	ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2545	บริษัทก่อสร้างเอกชน
พ.ศ. 2551	พนักงานในสถาบันอุดมศึกษา ตำแหน่งวิศวกรโยธาปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จังหวัดสกลนคร