

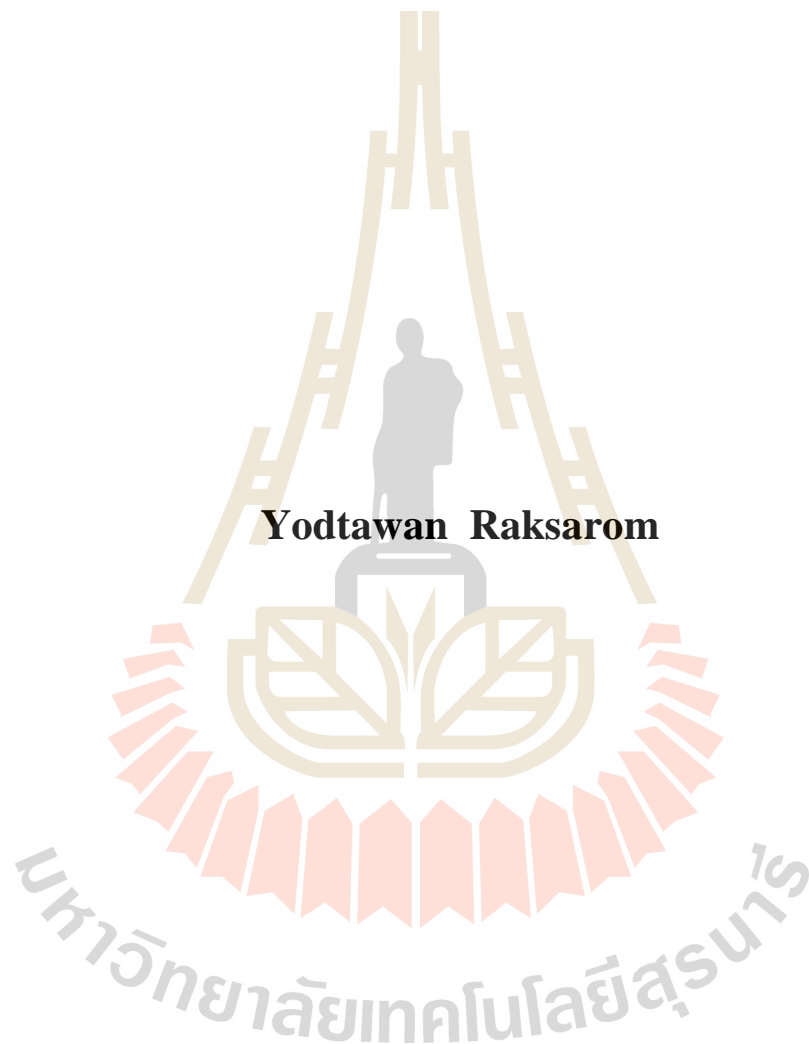
การวิเคราะห์การทрудตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธี  
ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ



นายยอดตะวัน รักษาภรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**ANALYSIS OF MAT SETTLEMENT FOR HIGH-RISE  
BUILDING WITH 3D FEM**



**Yodtawan Raksarom**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Civil, Transportation  
and Geo-resources Engineering  
Suranaree University of Technology**

**Academic 2019**

การวิเคราะห์การถอดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธี  
ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.สมโพธิ อยู่ไว)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.นัตร์ชัย โชติชอุยางกูร)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ยอดตะวัน รักษาภรณ์ : การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (ANALYSIS OF MAT SETTLEMENT FOR HIGH-RISE BUILDING WITH 3D FEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นแสง, 141 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการวิจัยพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่ (mat) สำหรับอาคารสูง โดยใช้ข้อมูลแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน, ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาด 1000 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร และผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนถึงสิ้นสุดการก่อสร้าง พบว่าการทรุดตัวของ mat มีลักษณะเป็นรูปถ้วยโดยการทรุดตัวเกิดที่ส่วนกลางของฐานมากที่สุด ค่าการทรุดตัวของ mat สูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบประมาณ 6 เท่า งานวิจัยจึงได้ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม PLAXIS 3D วิเคราะห์หาค่า Young's modulus โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวจากผลการทดสอบเสาเข็มพบว่าค่าที่ได้้นั้นต่ำกว่าการวิเคราะห์หาค่าโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานราก ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงค่าสติเฟนสของเสาเข็มสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง โดยพบว่าค่าสติเฟนสของเสาเข็มแต่ละต้นจะมีค่าที่ไม่เท่ากันซึ่งมีค่าน้อยที่บริเวณกลางฐานราก และมากขึ้นในบริเวณขอบของฐานราก และควรเพิ่ม modulus of subgrade reaction ได้ฐานรากสำหรับการจำลองใน ETABS เพื่อให้ฐานรากสามารถช่วยเสาเข็มในการรองรับแรงจากโครงสร้างอาคารสูง และในงานวิจัยได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการทรุดตัวและโมเมนต์คัตใน mat โดยใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS กับ PLAXIS 3D พบว่าการจัดเรียงเสาเข็มโดยมีการแปรผันความยาวเสาเข็มสำหรับกรณี que ที่ศึกษาสามารถลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันภายใน mat ได้มากที่สุดเท่ากับ 40.8% และลดโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นใน mat ได้มากที่สุดเท่ากับ 56.3% ทำให้การก่อสร้างฐานรากเสาเข็มแผ่มีความประหยัดมากขึ้น



YODTAWAN RAKSAROM : ANALYSIS OF MAT SETTLEMENT FOR  
HIGH-RISE BUILDING WITH 3D FEM. THESIS ADVISOR : ASST.  
PROF. PORNPOT TANSENG, Ph.D., 141 PP.

YOUNG'S MODULUS/ SETTLEMENT/3D FEM/ DIFFERENTIAL  
SETTLEMENT/ BENDING MOMENT/ STIFFNESS

This thesis presents results of the research on behavior of mat foundation of a high-rise building. The force from super structures, pile load test on bored pile of 1000 mm and 1500 mm, and settlement monitoring from starting of construction until the end of the construction were recorded and analyzed. The settlement character of mat is dish shape with maximum settlement at about center of the mat. The observed settlement is about 6 time higher than the settlement from single pile load test at the design load. Therefore, the research focuses on back analysis procedure to obtain appropriate Young's modulus by using 3D FEM program PLAXIS 3D which the data from the pile load test results was found that the obtained values were lower than the back analysis by foundation settlement. This research studied the stiffness of piles for the analysis of high-rise building structures. It was found that the stiffness of each pile were unequal, which were low at the middle of the mat and more around the edges of the mat and modulus of subgrade reaction should be added below the mat for simulations in ETABS. Hence, the mat can help the piles to support the load from the superstructure. the research studied the effects of the pile configuration per settlement and bending moment in mat by using join analysis between structural analysis programs ETABS and PLAXIS 3D. It was found that the pile configuration which variable pile length can reduce the differential settlement within mat as much as

40.8% and reduce the bending moment in mat as much as 56.3% which makes the foundation construction more economical.



School of Civil Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature ยอดตะวัน จันทะชัย

Advisor's Signature ค.ศ.ค.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ถ้าปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมโพธิ อยู่ไว ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชคิชฐรังษกร กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ยอดตะวัน รักษาภรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>2 ปรีทรรสนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	5
2.1.1 การศึกษาระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	5
2.1.2 หลักการของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	5
2.1.3 ปฏิสัมพันธ์ของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	8
2.1.4 พฤติกรรมระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	16
2.1.4.1 ลักษณะการรับน้ำหนักของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	17
2.1.4.2 ผลกระทบเนื่องจากจำนวนเสาเข็มและน้ำหนักที่กระทำ	18
2.1.4.3 ผลกระทบเนื่องจากความหนาของฐานราก	20
2.1.4.4 ผลกระทบเนื่องจากระดับของน้ำหนักที่กระทำ	21
2.1.5 การวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	24

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.5.1	ประเภทของการวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่	26
2.2	อิทธิพลเนื่องจากการจัดวางตำแหน่งของเสาเข็ม	27
2.3	อิทธิพลต่อฐานรากแผ่เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็ม	32
2.4	อิทธิพลเนื่องจากระบบฐานรากเสาเข็มแผ่มีความยาวเสาเข็มไม่เท่ากัน	37
2.5	งานวิจัยที่ได้มีการวิเคราะห์และตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่	42
2.6	ทฤษฎีไฟไนท์อีลิเมนต์	55
2.6.1	การคำนวณหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล	55
2.6.2	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล	57
2.6.3	การคำนวณวิเคราะห์หน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงรวม	58
2.6.4	โมดูลัสของดิน (Soil modulus)	58
2.6.5	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength; $S_u$ )	62
2.6.6	ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง $E_u/S_u$ สำหรับการวิเคราะห์	63
2.6.7	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิต ( $K_o^{total}$ )	65
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	68
3.1	ข้อมูลและผลการเจาะสำรวจดิน	70
3.2	ข้อมูลของโครงการที่วิจัย	70
3.2.1	ลักษณะอาคารและแรงกระทำต่อ mat	70
3.2.2	ข้อมูลและผลการทดสอบเสาเข็ม	71
3.2.3	ข้อมูลการทรุดตัวของ mat	73
3.3	การวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร	74
3.4	กรณีศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มโดย PLAXIS 3D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน	74

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	กรณีศึกษาการเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ solid element และ embedded beam โดย PLAXIS 3D	75
3.4.2	กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ area springs และ point springs โดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน	75
3.4.2.1	ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ uniform loading	75
3.4.2.2	ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ core-edge loading	76
3.5	อิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการทรุดตัวและโมเมนต์ค้ดใน mat	79
3.6	พฤติกรรมทรุดตัวของ mat เนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างอาคารสูง	84
3.6.1	การ iteration โดยการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง โดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D	84
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัย</b>	<b>90</b>
4.1	ข้อมูลและผลการทดสอบดิน	90
4.2	ผลการวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร	91
4.3	ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสาเข็ม โดย PLAXIS 3D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน	97
4.3.1	ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาการเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ solid element และ embedded beam โดย PLAXIS 3D	97
4.3.2	ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ area springs และ point springs โดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน	98
4.3.2.1	ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ uniform loading	98
4.3.2.2	ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ core-edge loading	99
4.4	ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มต่อแรงในโครงสร้าง	100
4.5	ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวของ mat เนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างอาคารสูง	104

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D โดยกระบวนการ iteration.....	104
5 บทสรุป.....	115
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	115
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต.....	116
รายการอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการเจาะสำรวจดินทั้งหมด 3 หลุม.....	120
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	141

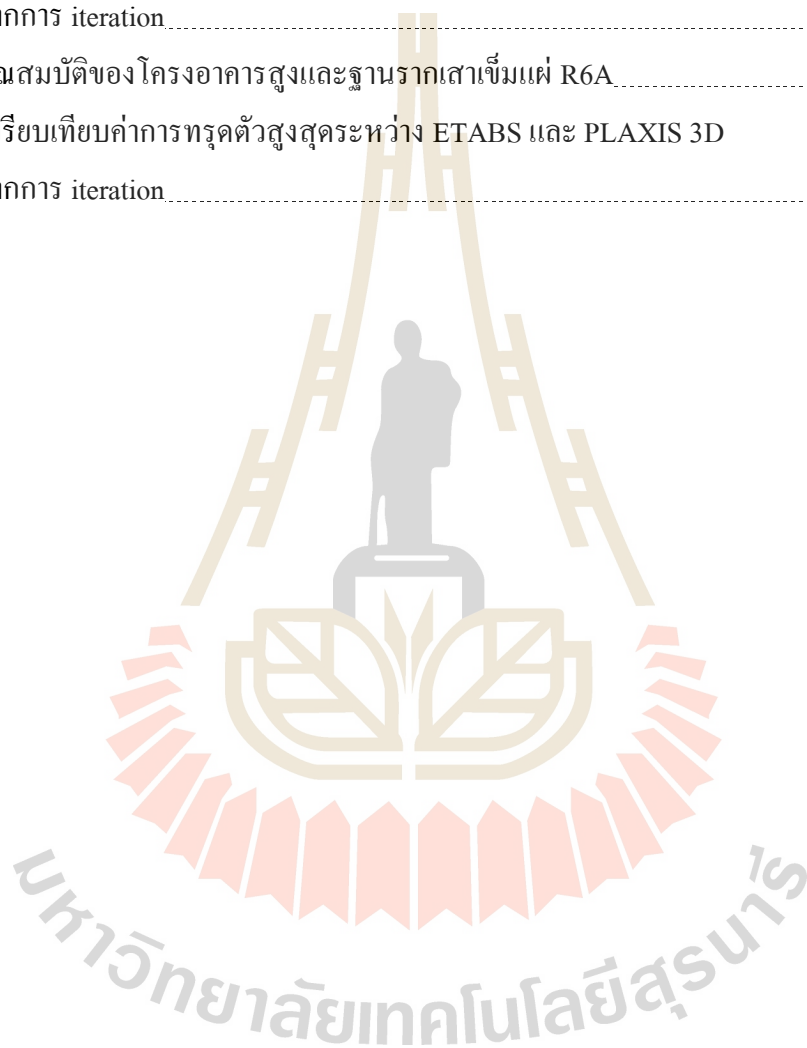


## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....10
2.2	ตารางแสดงข้อมูลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่และระบบฐานรากเสาเข็มแบบดั้งเดิม.....24
2.3	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....27
2.4	สรุปผลการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์ที่เป็นบวกน้อยที่สุดภายใต้รูปแบบน้ำหนักกระทำแต่ละประเภท.....32
2.5	สรุปค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์.....33
2.6	ข้อมูลของฐานรากเสาเข็มแผ่.....33
2.7	ความยาวเสาเข็มของทั้ง 3 ประเภท.....34
2.8	ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....37
2.9	การทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อทดสอบและการทรุดตัวของอาคาร.....43
2.10	สมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์.....45
2.11	แสดงแรงกระทำที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเสาเข็มเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 1.....48
2.12	สรุปน้ำหนักของขั้นตอนการก่อสร้างชั้นใต้ดิน.....52
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า $S_u$ ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ.....61
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า $S_u$ ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ.....61
3.1	แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มแผ่.....71
3.2	คุณสมบัติของ โครงอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณี S1A.....81
3.3	คุณสมบัติของ โครงอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรณี R4A.....81
3.4	กรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำอธิบาย.....82
4.1	สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง.....90
4.2	ค่า Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว.....92
4.3	Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat.....96

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสูงสุดระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration.....	107
4.5 คุณสมบัติของ โครงอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแม่ R6A.....	109
4.6 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสูงสุดระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration.....	112



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กระเปาะแรงดันของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว และกระเปาะแรงดันของเสาเข็มกลุ่ม..... 3
1.2	พฤติกรรมทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากการซ้อนทับ ของการทรุดตัวของเสาเข็ม..... 3
2.1	การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มระหว่างวิธีการออกแบบ Convention Approach และ Creep Pilling..... 7
2.2	ลักษณะการทรุดตัวของฐานรากระหว่าง Unpiled raft กับ Piled raft..... 7
2.3	หลักการออกแบบโดยการใช้เสาเข็มมาช่วยลดค่าการทรุดตัวของฐานราก..... 8
2.4	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและฐานรากเสาเข็มแผ่..... 9
2.5	Yield surfaces ของพฤติกรรม elastoplastic และ principal stress ในระนาบ p-t..... 10
2.6	แบบจำลองการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแผ่..... 11
2.7	น้ำหนักและการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่จำนวนเสาเข็ม 13 ต้น..... 11
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง piled raft coefficient กับ the total load..... 12
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง distribution pile load และ the skin friction along the pile shaft..... 13
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง settlement reduction กับ the total piled raft coefficient..... 15
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง settlement reduction กับ the total pile length..... 15
2.12	รูปแบบฐานรากเสาเข็มแผ่ที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 17
2.13	ความสัมพันธ์ของ Load – Settlement Curve..... 18
2.14	ผลกระทบเนื่องจากจำนวนเสาเข็มและประเภทของน้ำหนักที่กระทำ..... 19
2.15	ผลกระทบของความหนาฐานในระบบฐานรากเสาเข็มแผ่..... 20
2.16	ผลกระทบของระดับน้ำหนักที่กระทำในระบบฐานรากเสาเข็มแผ่..... 21
2.17	ลักษณะ โครงสร้างอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่ของตึก Messe Turm..... 22
2.18	ลักษณะการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของตึก Messe Turm Tower..... 23
2.19	ลักษณะซ้อนทับการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม..... 24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ลักษณะทั่วไปของฐานรากเสาเข็มแผ่.....	25
2.21 รูปแบบฐานรากและประเภทน้ำหนักกระทำ.....	28
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง normalized differential settlement กับ raft-soil stiffness ratio.....	29
2.23 normalized bending moment per unit length ในแนวรูปตัดขวางตลอดแกน x.....	30
2.24 normalized bending moment per unit length โดยภาพตัดขวางขนานกับแกน x.....	31
2.25 ลักษณะของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	34
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับความทรุดตัวเฉลี่ย.....	35
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับความทรุดตัวที่แตกต่างกัน.....	36
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับ โมเมนต์ค้ดสูงสุด.....	36
2.29 ตำแหน่งของจุดติดตั้ง Settlement plate ใน Section ก-ก ของแบบ โครงสร้างปรับ สภาพการทรุดตัวของสะพานคลองปลัดเปรียง กม.6+402.....	38
2.30 การทรุดตัวของหน่วยแบริงบริเวณคลองปลัดเปรียงที่เกิดขึ้น ในระยะเวลา 9.8 เดือน หลังการก่อสร้าง.....	38
2.31 แบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวของสะพานคลองปลัดเปรียง กม.6+402.....	39
2.32 การทรุดตัวของหน่วยแบริงที่เกิดขึ้นในเวลา 17.3 ปี ของหน่วยแบริงบริเวณ คลองปลัดเปรียง.....	40
2.33 ลักษณะ โครงสร้างอุโมงค์และลักษณะฐานรากเสาเข็มแผ่.....	41
2.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กับค่าการทรุดตัวจากการตรวจในสนาม.....	42
2.35 เส้นชั้นการทรุดตัวของอาคาร ไทปิง tower A และ tower B ซึ่งมีลักษณะเป็น รูปถ้วยที่มีการทรุดบริเวณฐานกลางอาคารสูงกว่าที่ขอบอาคารवादใหม่ จากงานเดิม.....	43
2.36 ลักษณะของฐานรากเสาเข็ม น้ำหนักกระทำเสาเข็มต่อดัน และ ปริมาณเสาเข็ม ในฐานรากของอาคาร โรงงาน พระประแดง.....	44
2.37 การทรุดตัวของฐานราก E-1 และ A-2.....	44
2.38 ประเภทของแรงกระทำที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.39 Load-settlement curve จาก Pile load test.....	47
2.40 ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำ ประเภทที่ 1.....	47
2.41 ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำ ประเภทที่ 2.....	48
2.42 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำ ประเภทที่ 1.....	49
2.43 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 2.....	49
2.44 ภาพตัดขวางของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่.....	50
2.45 ค่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่.....	51
2.46 ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในการตรวจวัดและลักษณะฐานรากของอาคาร.....	52
2.47 ผลการตรวจผลแรงดันดินใต้ฐานราก.....	53
2.48 ผลการวิเคราะห์การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดระหว่างเสาเข็มกับฐานราก.....	53
2.49 เปรียบเทียบการทำนายการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ล่วงหน้า 2 ปี กับผลการ ตรวจวัดหลังจากการก่อสร้าง.....	54
2.50 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแพทของตึก Burj Khalifa ภายใต้ น้ำหนักบรรทุก 80% ของน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด.....	55
2.51 ค่าประมาณ Modulus multiplier ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ.....	59
2.52 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ ผลด้วย FEM.....	60
2.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสการเฉือนกับความเครียดเฉือน.....	64
2.54 โมดูลัสเฉือนของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter เมื่อ (a) สำหรับดินเหนียวอ่อน (b) สำหรับดินเหนียวแข็ง.....	65
2.55 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $m$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $K_0$ และ OCR กับค่าดัชนี พลาสติก.....	67
2.56 แรงดันน้ำในดินกรุงเทพฯ.....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 69
3.2	ผัง mat, ตำแหน่งเสาเข็ม, ตำแหน่งของ column wall และ core wall..... 71
3.3	ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร..... 72
3.4	ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร..... 73
3.5	ตำแหน่งจุดตรวจวัดการทรุดตัวที่ติดตั้งไว้ชั้นล่างสุดของอาคาร..... 73
3.6	เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat จากการตรวจวัดโดยสร้างอาคารครบ จำนวน 51 ชั้นเมื่อวันที่ 16/08/2560..... 73
3.7	ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มทำการก่อสร้างจนถึง 5 เดือนหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง..... 74
3.8	แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่นกรณี S1A โดยวิธีแบบ plate on area springs รองรับแรงกระทำแบบ uniform loading..... 76
3.9	แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่นกรณี S1A โดยวิธีแบบ plate on point springs รองรับแรงกระทำแบบ uniform loading..... 76
3.10	ขั้นตอนการจำลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ area springs และ point springs..... 78
3.11	แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่นกรณี R4A โดยวิธีแบบ plate on area springs รองรับแรงกระทำแบบ core-edge loading..... 78
3.12	แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่นกรณี R4A โดยวิธีแบบ plate on point springs รองรับแรงกระทำแบบ core-edge loading..... 79
3.13	แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูงโดย ETABS และแบบจำลอง ฐานรากเสาเข็มแผ่น โดย PLAXIS 3D..... 81
3.14	การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B..... 83
3.15	การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ R4A, R4B, R5A, และ R5B..... 84
3.16	แบบจำลองอาคารสูงรองรับโดยฐานรากแผ่นที่จำลองเสาเข็มด้วยสปริง ในการวิเคราะห์แรงกระทำต่อ mat โดย ETABS..... 86
3.17	แรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ที่กระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D..... 87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 กระบวนการ Iteration โดยแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับ โครงสร้าง โดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D.....	88
4.1 รูปตัดชั้นดิน, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล.....	90
4.2 ผลการวิเคราะห์ห้กลับจากแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดิน โดยใช้ผลการทดสอบ เสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร.....	92
4.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแผ่โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D.....	93
4.4 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ห้กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะของ โครงการ.....	94
4.5 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่างๆจากแบบจำลองใน PLAXIS 3D โดยใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ห้กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะของ โครงการ.....	94
4.6 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่างๆ จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D ที่สอดคล้อง กับค่าทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดในการทำวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหา Young's modulus ของชั้นดิน.....	96
4.7 โมเมนต์ค้ดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A ระหว่างการจำลองเสาเข็ม แบบ embedded beam และ solid element.....	97
4.8 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A ระหว่างการจำลอง เสาเข็มแบบ embedded beam และ solid element.....	98
4.9 โมเมนต์ค้ดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A.....	99
4.10 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A.....	99
4.11 โมเมนต์ค้ดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A.....	100
4.12 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A.....	100
4.13 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B.....	101
4.14 โมเมนต์ค้ดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B.....	101



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การแอนตัวของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B.....	102
4.16 โมเมนต์คัตใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B.....	103
4.17 การทรุดตัวที่ต่างกันของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B.....	103
4.18 โมเมนต์คัตสูงสุดใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B.....	104
4.19 การแอนตัวของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A.....	106
4.20 โมเมนต์คัตใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A.....	106
4.21 แนวโน้มค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นใน mat ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration.....	107
4.22 แบบจำลอง Full model ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A โดยจำลอง โครงสร้างอาคารสูงที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS.....	108
4.23 การจัดวาง core wall และ column ในรูปแบบที่ R4A.....	108
4.24 การจัดวาง core wall และ column wall ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A.....	109
4.25 แรงกระทำและโมเมนต์คัตทุกแนวแกนที่โคนเสาจาก ETABS กระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D.....	111
4.26 การแอนตัวของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A.....	111
4.27 โมเมนต์คัตใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A.....	112
4.28 แนวโน้มค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นใน mat ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration.....	112
4.29 แบบจำลอง Full model ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A โดยจำลอง โครงสร้างอาคารสูงที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS 3D.....	113
4.30 แรงดันดิน Effective normal stress ใต้ฐานรากโดย PLAXIS 3D.....	114

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$Wn$	=	ปริมาณความชื้น
$LL$	=	ขีดจำกัดเหลว
$PL$	=	ขีดจำกัดพลาสติก
$PI$	=	ดัชนีความเหนียวของดิน
$E_u$	=	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ
$E'$	=	โมดูลัสของดินแบบระบายน้ำ
$S_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
$q_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด
$\epsilon$	=	อัตราส่วนปัวซอง
$w'$	=	ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน
$t'_{vo}$	=	หน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวตั้ง
$X$	=	หน่วยน้ำหนักดิน
$M$	=	Modulus multiplier
$K$	=	สติเฟนสของเสาเข็ม
$P$	=	แรงที่หัวเสาเข็ม
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของฐานราก
$t$	=	ความเค้นตั้งฉาก
$v$	=	ความเครียดตั้งฉาก
$u$	=	ค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม
$L_0$	=	ความยาวเริ่มต้น
$E$	=	โมดูลัสของยังส์
$G_s$	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
$\Gamma_{KPP}$	=	Pile Raft Coefficient
$S_{sf}$	=	Settlement of Shallow Foundation

# บทที่ 1

## บทนำ

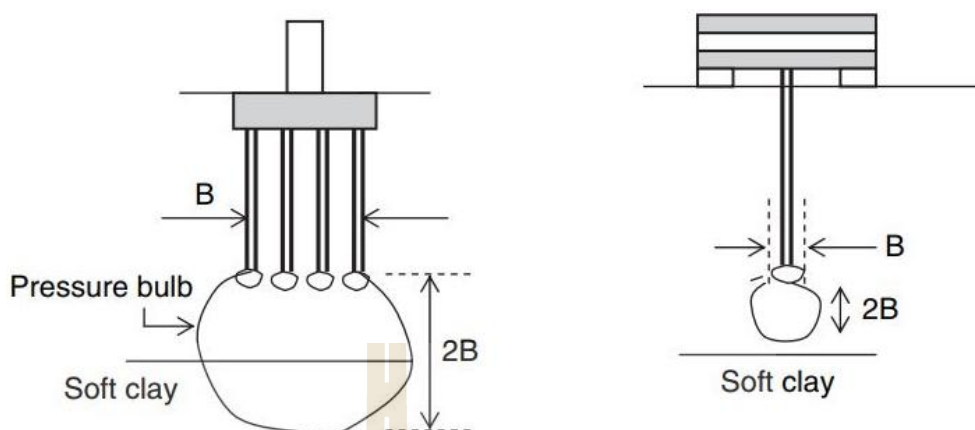
### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการออกแบบและก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลก้าวหน้าไปจากอดีตเป็นอย่างมาก ซึ่งความต้องการรูปทรงอาคารที่มีความโดดเด่นและเป็นเอกลักษณ์ ทำให้สถาปนิกออกแบบอาคารให้มีความซับซ้อนและมีความสูงมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีการออกแบบโครงสร้างถูกพัฒนาเพื่อรองรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้นด้วย สำหรับเทคโนโลยีการก่อสร้างเสาเข็มก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้รองรับน้ำหนักบรรทุกของอาคาร จนกระทั่งในปัจจุบันสามารถเจาะเสาเข็มใช้งานเส้นผ่านศูนย์กลาง 1800 มิลลิเมตร ให้ลึกได้ถึง 92 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้ 6300 ตัน ในชั้นดินกรุงเทพฯ ในขณะที่การออกแบบโครงสร้างและการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มได้รับการพัฒนาไปมากแล้ว แต่สำหรับการออกแบบฐานรากแล้ววิศวกรยังคงนิยมใช้การคำนวณโดยอาศัยการคำนวณอย่างง่ายที่สมมุติให้ฐานรากมีความแข็งแรง (rigid) และคำนวณแรงในเสาเข็มด้วยวิธีสมดุลของแรงแบบสถิตย์ (static equilibrium) แต่พฤติกรรมจริงของฐานรากเมื่อรับแรงนั้นไม่ได้มีความแข็งแรงอย่างที่สมมุติไว้ และสามารถเสียรูปได้เมื่อรับแรง โดยเฉพาะฐานรากที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนาของฐานค่อนข้างมาก ดังนั้นวิศวกรโครงสร้างบางส่วนจึงได้จำลองพฤติกรรมการเสียรูปของฐานราก โดยใช้สปริงที่มีการยุบตัวได้แทนเสาเข็ม โดยทั่วไปวิศวกรผู้ทำการวิเคราะห์มักใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยคิดจากการยุบตัวของเสาเข็มที่วัดได้เมื่อเสาเข็มรับแรงกดทดสอบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ  $K = P_{design} / \delta$  ซึ่งโดยปกติการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบสูงในชั้นดินกรุงเทพฯ จะมีการทรุดตัวประมาณไม่เกิน 6 มิลลิเมตร จากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกตามที่ออกแบบไว้แล้วพบว่า การทรุดตัวมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ทำให้ต้องย้อนกลับมาพิจารณาว่าการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบเสาเข็มนั้นไม่น่าจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งได้มีผู้ทำวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของอาคารไว้หลายท่าน ซึ่งได้ยกตัวอย่างมาให้เห็น ได้แก่ ชานินทร์ (2528) ได้บันทึกการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อก่อสร้างเสร็จ พบว่ามีการทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบถึง 60 เท่า Tanseng (2017) ได้รายงานว่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของอาคารสูง 50 ชั้น ในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่ามีการทรุดตัวสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุก

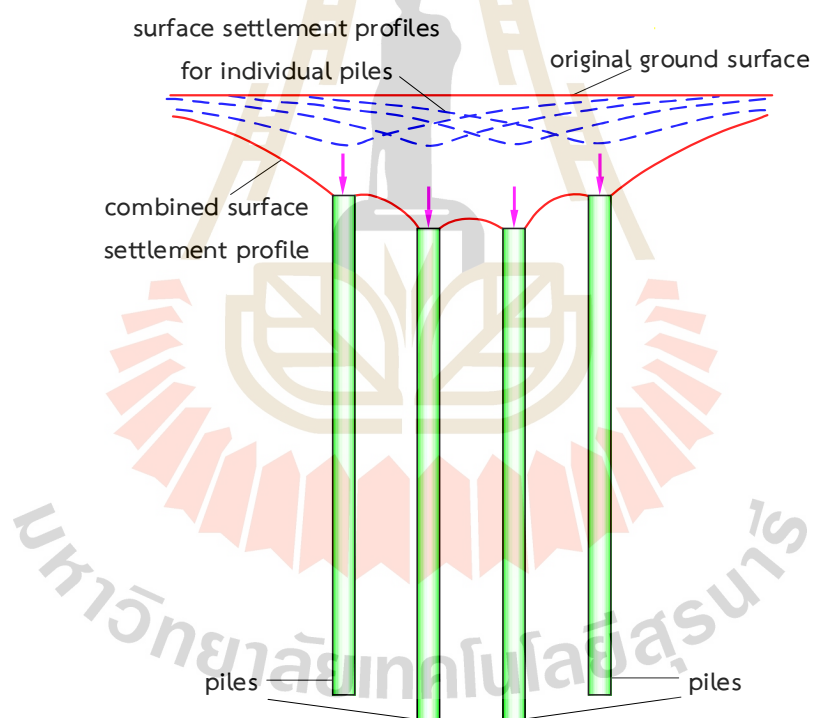
ออกแบบอยู่ 5.2 เท่า Gendy (2018) ได้วิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ด้วยโปรแกรม ELPLA โดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงของตึก Burj Khalifa พบว่าค่าการทรุดตัวต่ำกว่าค่าการทรุดตัวจากผลการตรวจวัดในระหว่างก่อสร้างเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 8.6 เท่า ซึ่งจากผลการตรวจวัดของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่รองรับอาคารสูงจากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาฐานรากเกิดการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุด ซึ่งการทรุดตัวมีลักษณะเป็นรูปถ้วย เหตุผลที่การทรุดตัวของเสาเข็มอาคารสูงสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบนั้น Rajapakse (2007) ได้อธิบายเหตุผลว่าการทดสอบเสาเข็มที่เป็นเสาเข็มเดี่ยวทำให้เกิดกระเปาะแรงดันดินเล็กกว่ากระเปาะแรงดันของเสาเข็มกลุ่มที่เกิดจากการซ้อนทับของแรงดันดินจากเสาเข็มเดี่ยว กระเปาะแรงดันดินที่ใหญ่ขึ้นนี้ส่งอิทธิพลลงไปในชั้นดินลึกกว่า ดังรูปที่ 1.1 Fleming (1992) ยังได้อธิบายถึงการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มบริเวณส่วนกลางของฐานรากเสาเข็มกลุ่มเกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ดังรูปที่ 1.2

จากงานวิจัยและหลักฐานที่กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าวิธีการออกแบบที่มีแนวคิดหากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกันแล้วจะมีการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันนั้นไม่เป็นจริง โดยฐานรากจะมีการทรุดตัวแบบเสาเข็มกลุ่มซึ่งเกิดการซ้อนทับของหน่วยแรงทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มนั้นสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว และทำให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วยขึ้น และการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงเพื่อใช้ในการจำลองเสาเข็มเป็นสปริงนั้นทำให้ได้ค่าคงที่ของสปริงที่สูงเกินกว่าความเป็นจริงอันนำไปสู่ผลการโค้งของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งการวิเคราะห์ที่ได้การทรุดตัวของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริงนี้ทำให้แรงในโครงสร้างส่วนบนของอาคารผิดไปจากความเป็นจริงด้วย

งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงแบบแผ่ โดยอาศัยผลการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบและผลการวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Finite element) และได้ใช้ผลการวิเคราะห์กลับในการหาแนวทางที่จะทำให้ฐานรากเสาเข็มแผ่มีการทรุดตัวที่แตกต่างลดลง ซึ่งจะทำให้การออกแบบเป็นไปอย่างปลอดภัยและประหยัด และศึกษาถึงค่าสถิติเฟนสของเสาเข็มสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงโดยการ (iteration analysis) โดยใช้ ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D



รูปที่ 1.1 กระจายแรงดันของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและกระจายแรงดันของเสาเข็มกลุ่ม  
(Rajapakse, 2007)



รูปที่ 1.2 พฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว (Fleming, 1992)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาสตีเฟนสของดินจากการวิเคราะห์ห้กลับด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D โดยใช้ข้อมูลการออกแบบของโครงการ, ข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม, และการทรุดตัวของฐานรากแผ่ที่ตรวจวัดได้ในระหว่างการก่อสร้าง
2. เพื่อหาค่าสตีเฟนสของสปริงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงที่จำลองฐานรากเสาเข็มด้วยสปริง
3. เพื่อศึกษารูปแบบการจัดเรียง, การจัดความยาวของเสาเข็ม ที่ทำให้การทรุดตัวที่แตกต่างกัน และแรงในฐานรากแผ่มีค่าต่ำสุดโดยวิธี parametric study กับโปรแกรม PLAXIS 3D ร่วมกับโปรแกรม ETABS

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลโครงการก่อสร้างอาคารสูง 51 ชั้นในซอยสุขุมวิท 24 และใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb ที่มีการระบายน้ำชนิด Undrained type B ซึ่งใช้สตีเฟนสประสิทธิภาพ และกำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ
2. ในการทำ parametric study ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างส่วนบนที่วางอยู่บนสปริงแบบอีลาสติกโดยโปรแกรม ETABS และใช้โปรแกรม PLAXIS 3D สำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทำนายถึงพฤติกรรมทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจากผลการตรวจวัดในสนามมากยิ่งขึ้น และสามารถใช้เป็นกรณีศึกษาในการประยุกต์ใช้ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มแผ่สำหรับอาคารสูงได้

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

##### 2.1.1 การศึกษาระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

ในปัจจุบันการออกแบบฐานรากเสาเข็มแผ่สำหรับอาคารสูงในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่ยังคงออกแบบให้เสาเข็มให้มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเดียวกัน แต่พฤติกรรมจริงของฐานรากเสาเข็มแผ่เกิดการแอ่นตัวบริเวณตรงกลางฐานรากมากที่สุด ทำให้เกิดปัญหาตามคือ การทรุดตัวที่แตกต่างกันมีค่ามาก ทำให้มีโมเมนต์คดในฐานราก เกิดขึ้นสูง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงต่างๆภายในโครงสร้างอาคารสูง ได้แก่ พื้น คาน เสา และอาจพบปัญหาเรื่องการแตกร้าวตามมา

จากปัญหาดังกล่าวนี้ ในอดีตได้มีการศึกษาและวิจัยปัญหาและผลกระทบดังกล่าวในต่างประเทศและภายในประเทศ ผลการศึกษาในอดีตบางส่วน สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาและสามารถพัฒนาแนวทางไปใช้ทำการการวิเคราะห์และออกแบบได้อย่างปลอดภัยและช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก โดยงานวิจัยที่กล่าวถึงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่ได้แก่ พฤติกรรมของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ในต่างประเทศและภายในประเทศ จะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

##### 2.1.2 หลักการของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

ในปัจจุบันได้มีแนวคิด ในการใช้เสาเข็มช่วยลดการทรุดตัวหรือการทรุดตัวที่แตกต่างกัน และนำกำลังแบกทาน (Bearing Capacity) ของดินที่อยู่ใต้ฐานราก (Raft) มาช่วยรับน้ำหนักจากโครงสร้าง จึงทำให้ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ใช้เสาเข็มน้อยกว่าระบบฐานรากเสาเข็มทั่วไปเมื่อรับน้ำหนักที่เท่ากัน ซึ่งทำให้ประหยัด ปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับฐานราก ซึ่งการใช้เสาเข็มเสริมฐานรากแบบแผ่คือหลักการของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

Randolph (1994) ได้ทำการแบ่งแนวคิดของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ ออกเป็นประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้เสาเข็มให้ฐานรากเป็น 3 แบบได้แก่

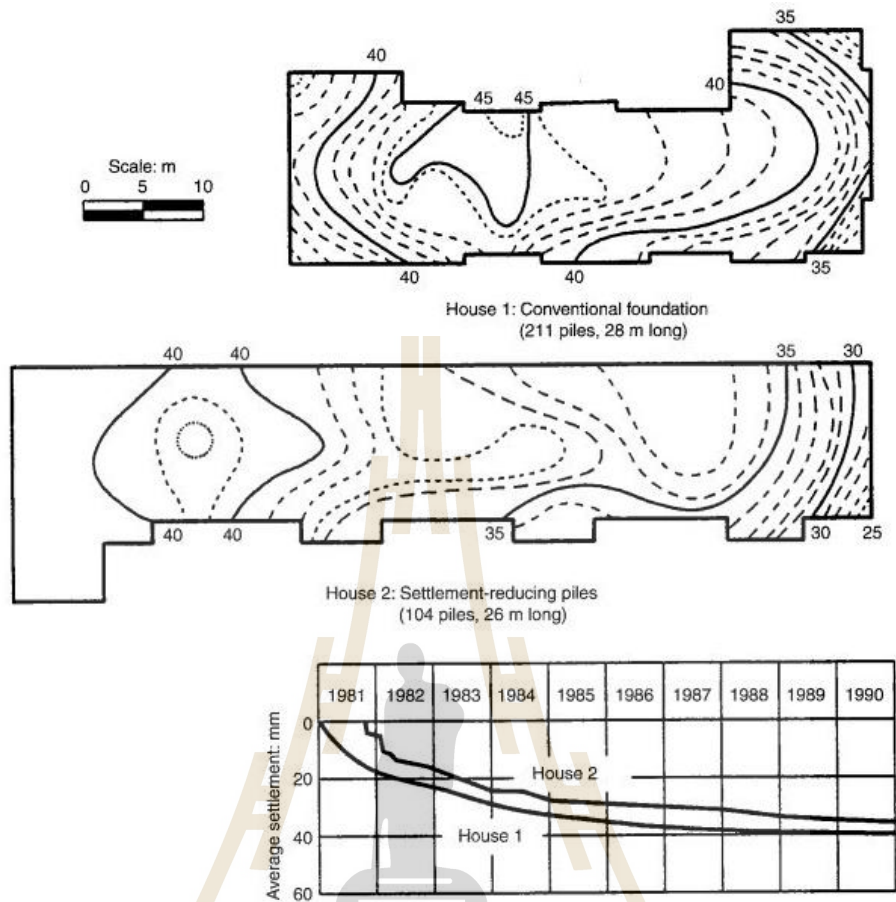
1. แบบ Convention Approach : วิธีแบบดั้งเดิมในการใช้ฐานรากเสาเข็ม โดย



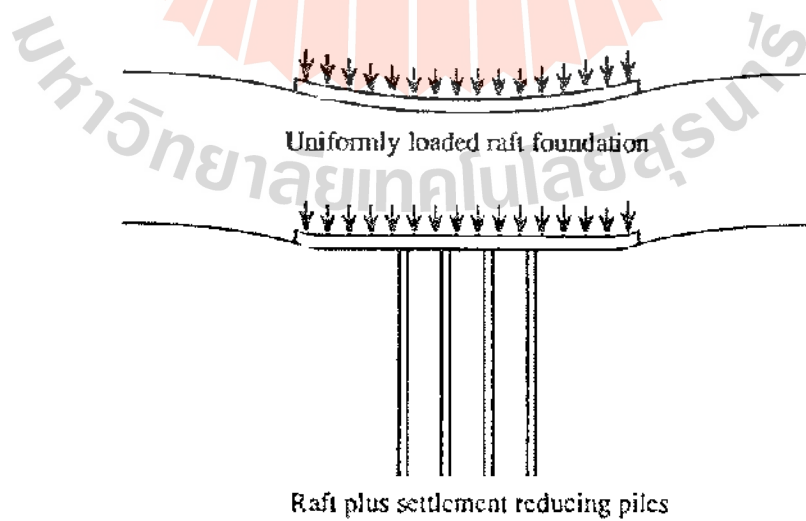
เสาเข็มจะถูกออกแบบให้รองรับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อฐานราก แทนการใช้รากแผ่ที่จะรับน้ำหนักกระทำทั้งหมดได้อย่างมีอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำ

2. แบบ Creep Pilling : เสาเข็มจะถูกออกแบบให้รับน้ำหนักค่อนข้างสูง ในขณะที่ฐานรากรับน้ำหนักอยู่ในช่วง Working load จะเริ่มมีการ Creep เกิดขึ้นโดยปกติแล้วจะเริ่มเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักได้ 70-80% ของกำลังต้านทานสูงสุด สำหรับในกรณีที่เสาเข็มต้องรับน้ำหนักภายนอกจนถึงค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มเองนั้น จะเรียกเสาเข็มลักษณะนี้ว่าเสาเข็มลดการทรุดตัว (Settlement Reducing Pile) เสาเข็มจะถูกใช้เพื่อเป็นตัวช่วยลดแรงกระทำโดยตรงต่อผิวดินใต้พื้นคอนกรีต (Contact Pressure) โดยในงานวิจัยของ Randolph โดยได้อ้างถึง Hansbo (1993) ได้รวบรวมกรณีศึกษาของฐานรากของอาคารพักอาศัยที่ประเทศ สวีเดน ที่คล้ายคลึงกันซึ่งถูกรองรับโดยเสาเข็ม โดยในกรณีแรกเป็นการใช้การคำนวณโดยวิธีแบบดั้งเดิม เสาเข็มมีค่าความปลอดภัยเป็น 3 เท่าของน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม กรณีที่สองเป็นการออกแบบโดยหลักการ creep pile ซึ่งเสาเข็มจะถูกออกแบบให้ลดการทรุดตัว ซึ่งมีค่าความปลอดภัยของเสาเข็มเป็น 1.25 เท่าของน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม จากผลการตรวจวัดโดยเส้นชั้นของการทรุดตัว ดังรูปที่ 2.1 พบว่าในกรณี House 1 มีเสาเข็มน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของกรณี House 2 แต่กลับมีขนาดของการทรุดตัวที่น้อยกว่า ซึ่งกรณีศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบโดยใช้กำลังของเสาเข็มอย่างเต็ม ประสิทธิภาพจะทำให้พื้นฐานรากช่วยเสาเข็มในการรองรับแรงบางส่วนได้ ทำให้การใช้ฐานรากเสาเข็มแผ่มีประสิทธิภาพสูงและช่วยลดต้นทุนอย่างมาก

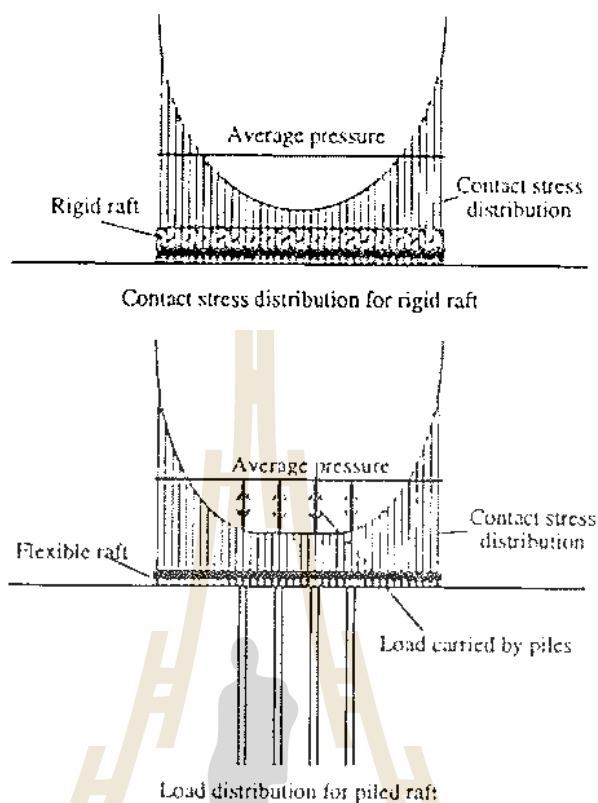
3. แบบ Differential Settlement Control : เสาเข็มใช้เพื่อลดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเสาเข็มจะถูกก่อสร้างได้ฐานรากในด้านขนาด, ความยาวและตำแหน่งที่เหมาะสมโดยเสาเข็มจะถูกใช้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากกว่าลดการทรุดตัวทั้งหมด ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งเปรียบเทียบโดยใช้หลักการที่ไม่ซับซ้อนในการออกแบบโดยนำเสาเข็มมาช่วยลดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในฐานรากที่รับน้ำหนักกระทำเป็นแรงกระจายตัวสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าฐานรากแผ่จะมีลักษณะการแอ่นตัวคล้ายรูปถ้วย แต่เมื่อใช้ฐานรากแผ่ร่วมกับเสาเข็มช่วยลดการทรุดตัวทำให้ฐานรากมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันลดลง และทำให้โมเมนต์ดัดในฐานรากลดลง



รูปที่ 2.1 การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มระหว่างวิธีการออกแบบ Convention Approach และ Creep Pilling (Randolph, 1994)



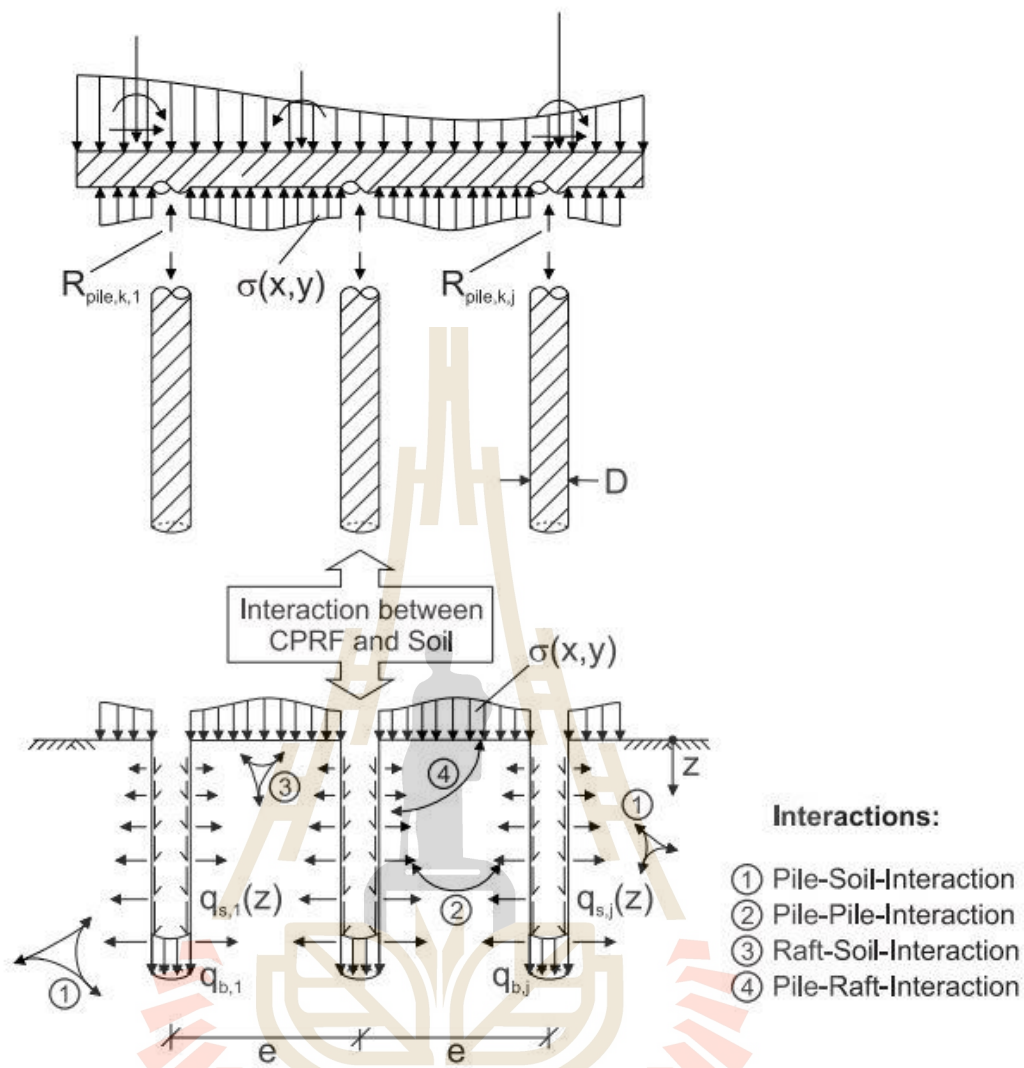
รูปที่ 2.2 ลักษณะการทรุดตัวของฐานรากระหว่าง Unpiled raft กับ Piled raft (Randolph, 1994)



รูปที่ 2.3 หลักการออกแบบ โดยการใช้เสาเข็มช่วยลดค่าการทรุดตัวของฐานราก (Randolph, 1994)

### 2.1.3 ปฏิสัมพันธ์ของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

Katzenbach (1998) กล่าวว่า การมีส่วนร่วมกันรับน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับดินได้ฐาน จากการที่มีฐานรากแผ่อยู่บนเสาเข็มซึ่งมักจะสัมผัสกับผิวดินโดยตรง ดังนั้นฐานแผ่จึงมีส่วนร่วมในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อฐานรากด้วย โดยกำลังต้านทานทั้งหมดของฐานรากเสาเข็มแผ่ขึ้นอยู่กับค่าการทรุดตัวและค่ากำลังต้านทานทั้งหมดของเสาเข็มรวมกับค่ากำลังต้านทานด้านฐานราก ซึ่งค่ากำลังต้านทานได้ฐานรากมีผลจากค่าการทรุดตัวที่ขึ้นอยู่กับแรงดันดินใต้ฐานราก ดังนั้นการทรุดตัวของฐานรากแบบฐานรากเสาเข็มแผ่จึงมีความซับซ้อนเนื่องจากการมีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) ซึ่งต้องใช้หลักการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดพอเนื่องจากมีองค์ประกอบหลายส่วน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างดินและฐานรากเสาเข็มแผ่ (Katzenbach, 2013)

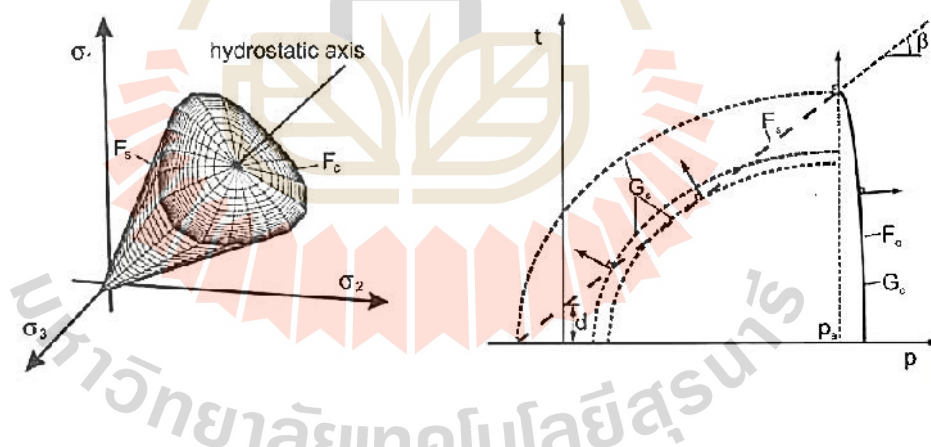
ข้อได้เปรียบสำหรับการใช้ฐานรากเสาเข็มแผ่ ได้แก่ สามารถลดการทรุดตัว, การทรุดตัวที่แตกต่างกัน, การเอียงของฐานราก, เพิ่มความมั่นคงทั้งหมดของฐานรากเสาเข็มแผ่, สามารถรองรับน้ำหนัก สามารถป้องกันการออกเนื่องจากการขุด, สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกขนาดใหญ่และให้กำลังต้านทานสูง

Katzenbach (1998) ได้ทำการวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ โดยการจำลองเสาเข็มให้มีพฤติกรรมแบบ linear-elastic ซึ่งจะพิจารณาฐานรากให้มีความแข็งแรงมาก rigid วางบนชั้นดินที่มีพฤติกรรมแบบ elastoplastic ดังรูปที่ 2.5 และการจัดวางรูปแบบของเสาเข็ม pile configuration ดังรูปที่ 2.6 โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่า Young's modulus จะเพิ่มขึ้นแบบ linearly ตามระดับความลึกของโมเดลจากระดับผิวดิน

ตารางที่ 2.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Katzenbach, 1998)

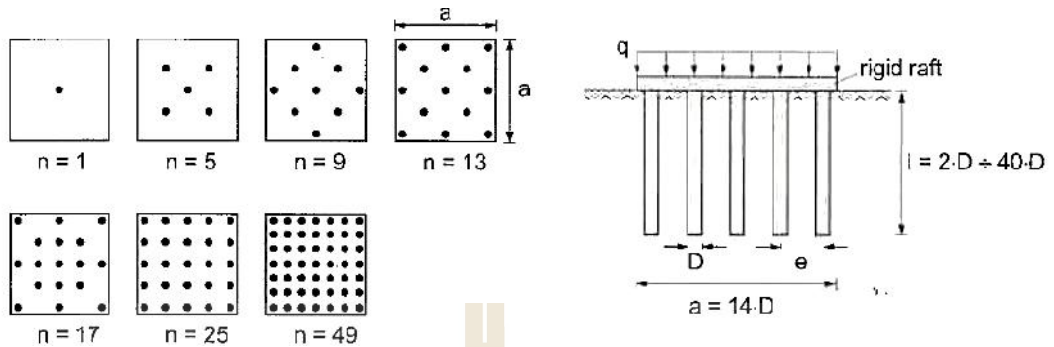
Term	Symbol	Unit	Soil	Piles
Young's modulus	E	MPa	$14.5 + 1.75 \cdot z$	30000
Poisson's ratio	$\nu$	-	0.25	0.2
Coefficient of earth pressure at rest	$K_0$	-	0.5	-
Slope of yield surface $F_s$ in the p-t-plane	$\beta$	$^\circ$	37.67	-
Intersection of yield surface $F_s$ with the t-axis	d	kPa	42.43	-
Shape parameter of yield surface $F_s$	K	-	0.795	-
Shape parameter of yield surface $F_c$	R	-	0.1	-
Buoyant unit weight	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	10	15



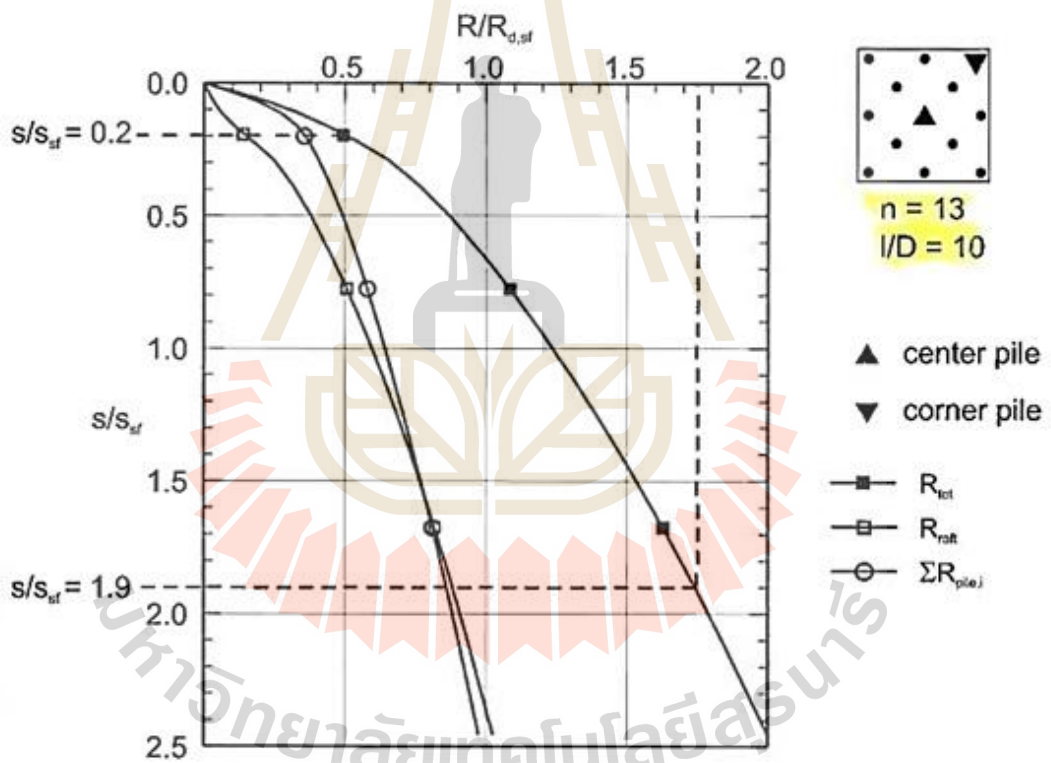
รูปที่ 2.5 Yield surfaces ของพฤติกรรม elastoplastic และ principal stress ในระนาบ p-t

(Katzenbach, 1998)





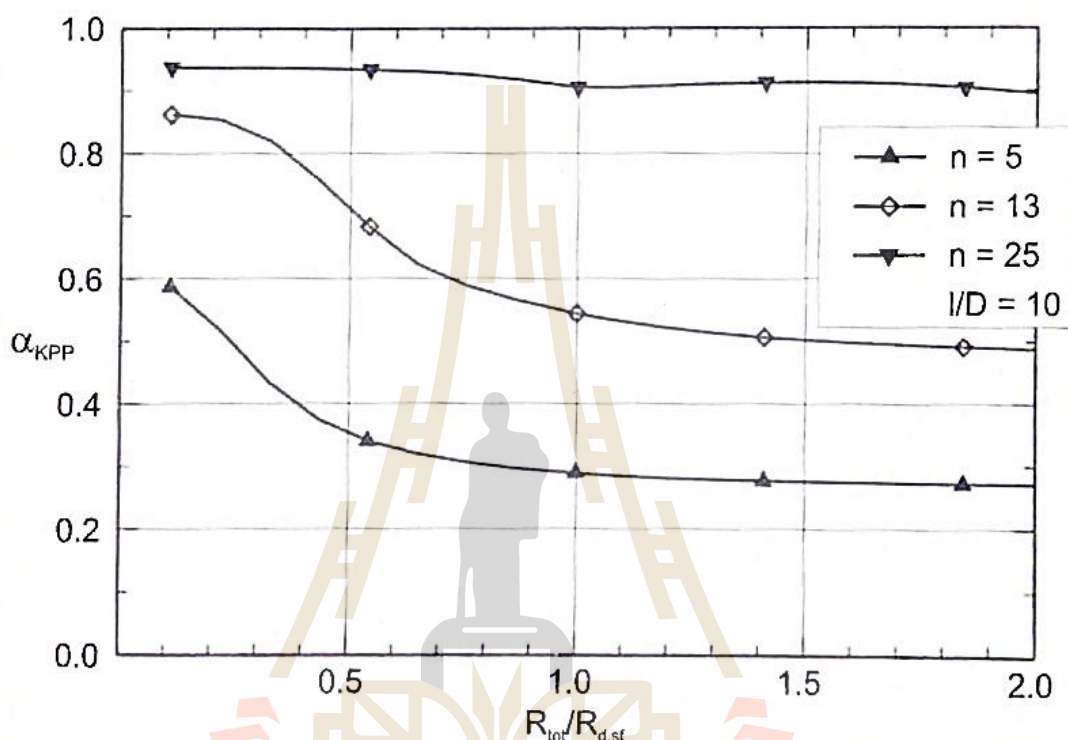
รูป 2.6 แบบจำลองการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแผ่ (Katzenbach, 1998)



รูปที่ 2.7 น้ำหนักกระทำและการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่มีจำนวนเสาเข็ม 13 ต้น (Katzenbach, 1998)

จากพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการที่เสาเข็มและฐานรากช่วยกันรองรับน้ำหนักกระทำ โดยน้ำหนักกระทำทั้งหมดส่วนใหญ่จะถูกรองรับโดยเสาเข็มและเมื่อน้ำหนักกระทำและการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ฐานรากทำหน้าที่ช่วย

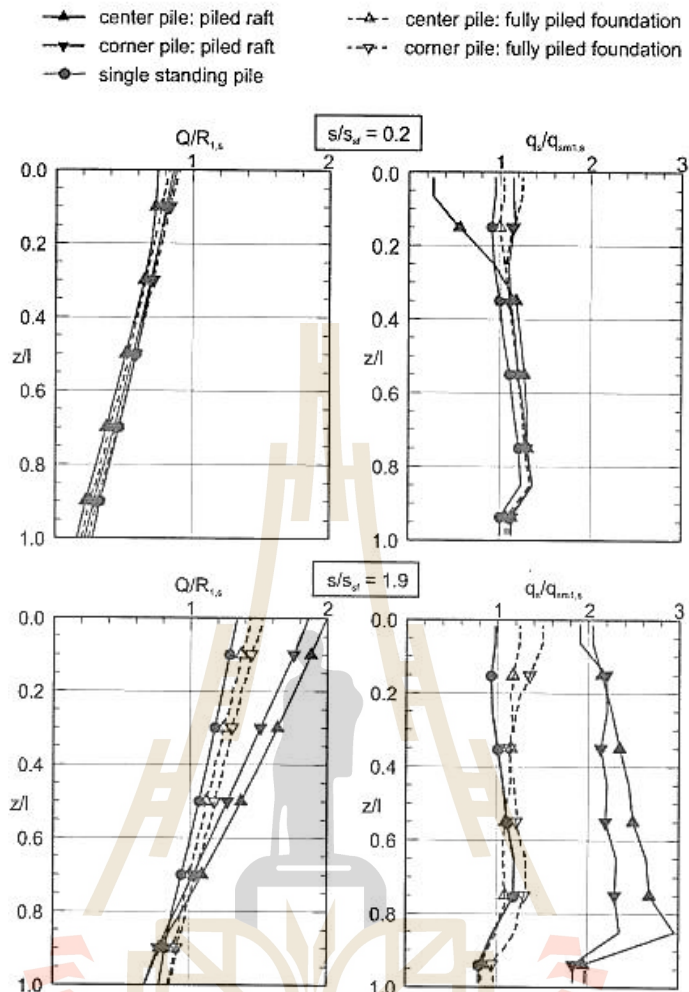
เสาเข็มในการรองรับน้ำหนักกระทำมากขึ้น และการใช้จำนวนเสาเข็มน้อยมีผลทำให้สัมประสิทธิ์ของฐานรากเสาเข็มแผ่ลดลง และเมื่อน้ำหนักกระทำทั้งหมดเพิ่มขึ้นในกรณีที่จำนวนเสาเข็มมาก ฐานรากเสาเข็มแผ่จะมีค่าสัมประสิทธิ์คงที่ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง piled raft coefficient กับ the total load (Katzenbach, 1998)

สำหรับการทรุดตัวน้อย ( $s / s_{sf} = 0.2$ ) pile load distribution และ skin friction distribution จะมีความคล้ายคลึงกันในทุกกรณีทั้งเสาเข็มบริเวณที่ขอบและบริเวณตรงกลางของฐานรากเสาเข็มแผ่ ฐานรากเสาเข็มกลุ่มและกรณีเสาเข็มเดี่ยว โดยแรงเสียดทานของเสาเข็มมีค่าต่ำ โดยจะมีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของดินกับเสาเข็มมีค่ามากหรือน้อย มากไปกว่านั้นน้ำน้ำหนักกระทำที่ส่งผ่านฐานรากมีค่าน้อยมากทำให้ความเค้นครากในดินไม่เพิ่มขึ้น สำหรับการทรุดตัวมาก ( $s / s_{sf} = 1.9$ ) pile load distribution และ skin friction distribution ในกรณีของฐานรากเสาเข็มแผ่ทั้ง 2 กรณีจะมีค่ามากกว่ากรณีเสาเข็มบริเวณที่ขอบและบริเวณตรงกลางของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม และกรณีเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากฐานรากช่วยในการรองรับแรงกระทำมากเป็นหลัก ดังรูปที่ 2.9 ทำให้ความเค้นของดินเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น





รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง distribution pile load และ the skin friction along the pile shaft (Katzenbach, 1998)

สัมประสิทธิ์การทรุดตัวของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังสมการที่ 2.1 โดย  $s / s_{sf}$  เป็นฟังก์ชันกับ the pile raft coefficient  $\Gamma_{KPP}$  และ total scaled pile length  $n(l/ D)$  ในกรณีที่  $R_{tot} / R_{d,sf} = 1.0$  ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่การใช้จำนวนเสาเข็ม, ความยาวเสาเข็ม, ขนาดเสาเข็ม, ขนาดของฐานราก, และค่าพารามิเตอร์ของดินกับฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของฐานรากเสาเข็มแผ่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 โดยจะมีพฤติกรรมเป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีแรงดันดินใต้ฐานรากเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.0 และจะมีพฤติกรรมเป็นแบบฐานรากแผ่เมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.0

$$\Gamma_{KPP} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s)}{R_{total,k}(s)} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\Gamma_{KPP}$  = Pile Raft Coefficient

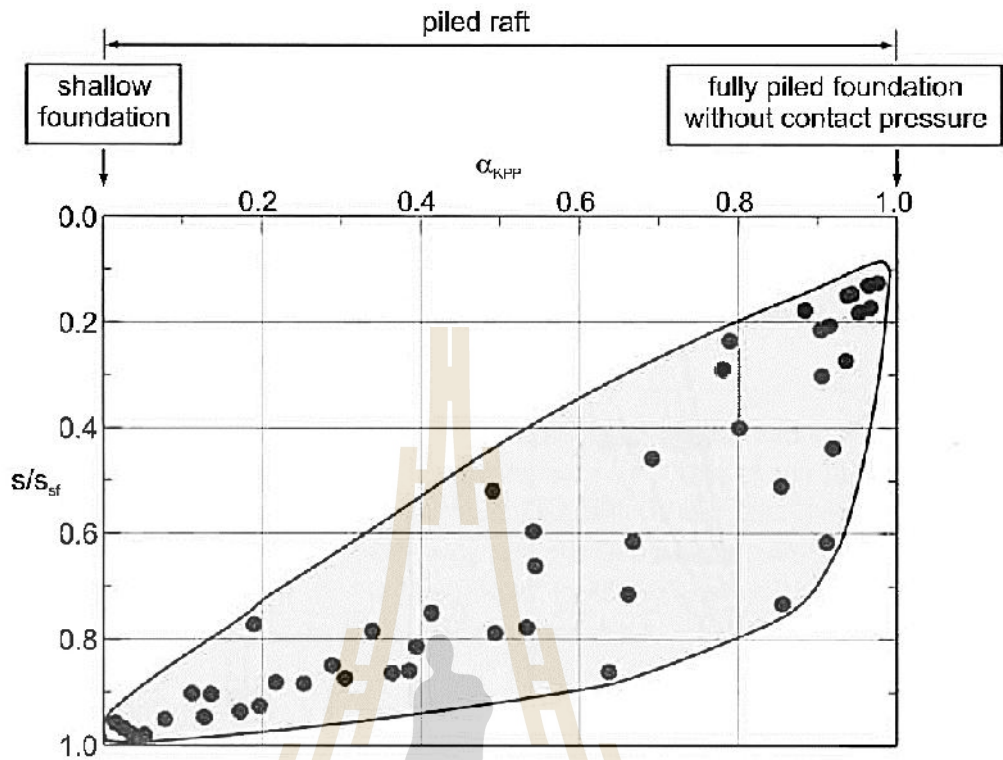
$\sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s)$  = Summation of Piles Resistance

$R_{total,k}(s)$  = Total Piled-Raft Foundation Resistance

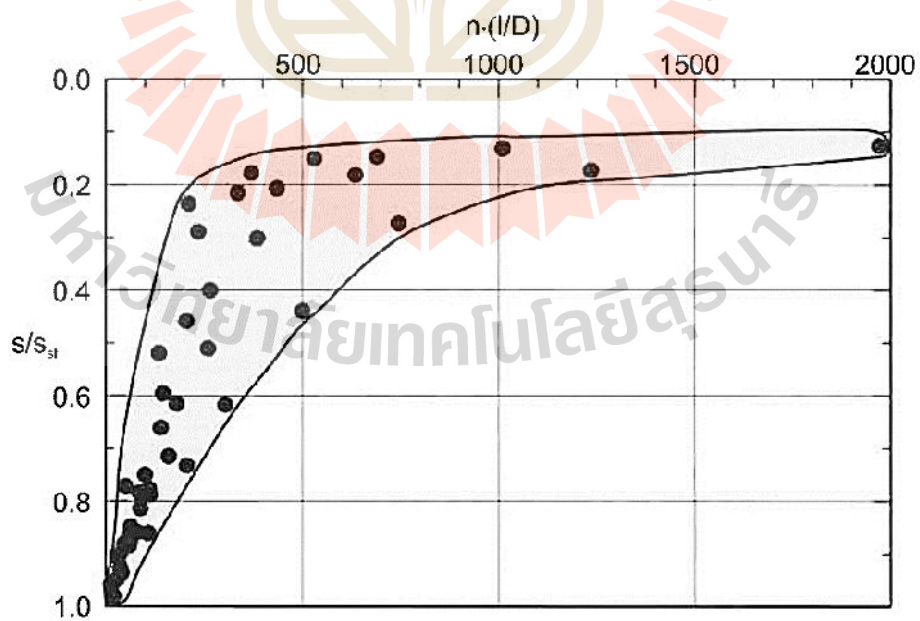
$R_{total,k}(s) = \sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s) + R_{raft,k}(s)$

$R_{raft,k}(s)$  = Raft Resistance

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 เมื่อพิจารณา piled raft coefficient ที่มีค่าเท่ากับ 0.4 ถึง 0.7 จะมีค่า settlement reduction ประมาณ 55% และเมื่อเพิ่ม total pile length  $n(l/D)$  จาก 0 ถึง 500 จะมีค่า settlement reduction อยู่ระหว่าง 55% ถึง 85% และเมื่อเพิ่ม total pile length  $n(l/D)$  เท่ากับ 2000 จะสามารถลดขนาดการทรุดตัวได้ประมาณ 90%



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง settlement reduction กับ the total piled raft coefficient (Katzenbach, 1998)

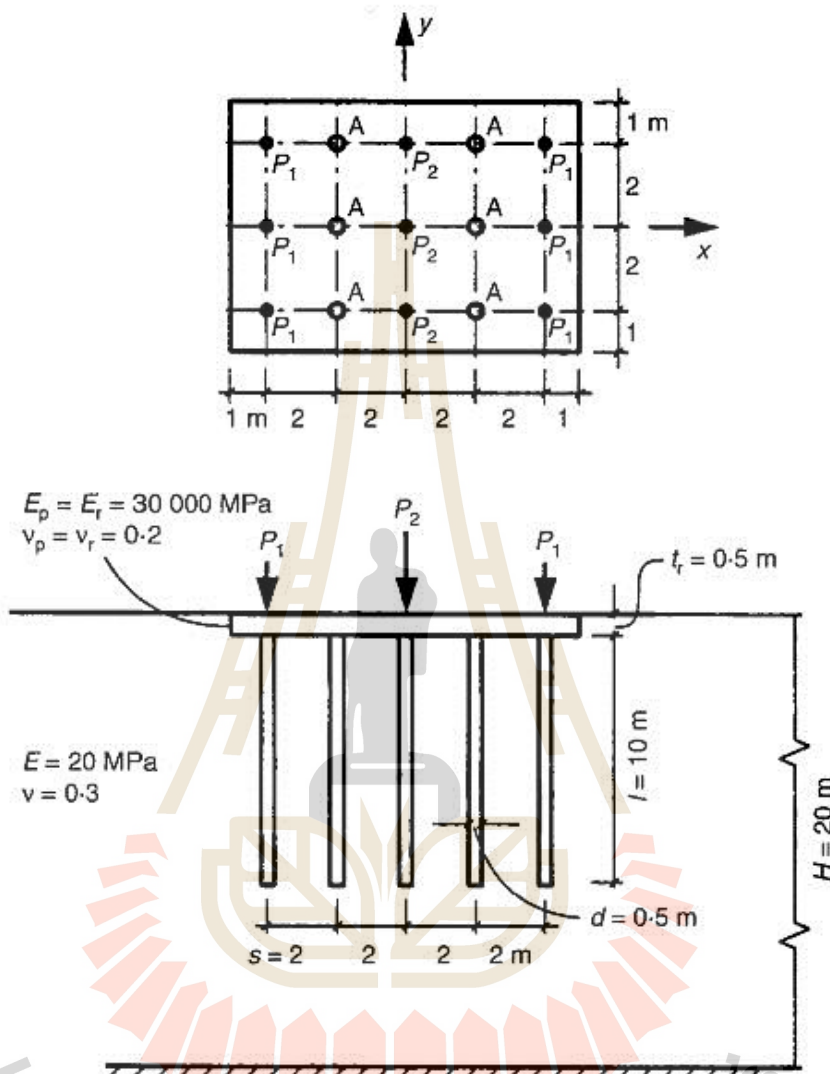


รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง settlement reduction กับ the total pile length (Katzenbach, 1998)

#### 2.1.4 พฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่

เนื่องจากระบบฐานรากเสาเข็มแผ่จะเป็นระบบฐานรากที่มีขนาดใหญ่ มีส่วนประกอบและรายละเอียดของระบบหลายอย่างเช่น จำนวนเสาเข็ม, ความหนา, ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม, และลักษณะของแรงที่มากระทำเป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฐานรากย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมซึ่ง Poulos (2001) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ศึกษาในกรณีต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.12 พบว่าการเพิ่มจำนวนของเสาเข็มในระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ไม่เป็นทางเลือกที่ดีในการออกแบบฐานรากเสาเข็มแผ่ ส่วนความหนาของฐานจะมีผลต่อการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์ดัดภายในฐานราก หากความหนาของฐานรากมากขึ้นจะสามารถลดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันลงได้แต่จะให้โมเมนต์ดัดภายในฐานจะมากขึ้น และความหนาของฐานรากจะมีผลต่อการถ่ายน้ำหนัก หรือการทรุดตัวสูงสุดน้อยมาก ส่วนในการควบคุมการทรุดตัวประเภทการทรุดตัวที่แตกต่างกันจะสามารถทำได้โดยการจัดวางตำแหน่งของเสาเข็มเพื่อให้สัมพันธ์กับจำนวนเสาเข็มน้อยที่สุด และกระจายทั่วบริเวณใต้ฐานราก ส่วนของประเภทน้ำหนักที่กระทำจะมีผลต่อระบบฐานรากเสาเข็มแผ่จะมีความสำคัญต่อการทรุดตัวประเภทการทรุดตัวที่แตกต่างกัน และ โมเมนต์ดัดภายในฐานราก แต่จะไม่มีผลต่อการทรุดตัวสูงสุด และการส่งถ่ายน้ำหนักระหว่างฐานรากกับเสาเข็ม

Bearing capacity of raft = 0.3 MPa  
 Load capacity of each pile = 0.873 MN (compression)  
 = 0.786 MN (tension)

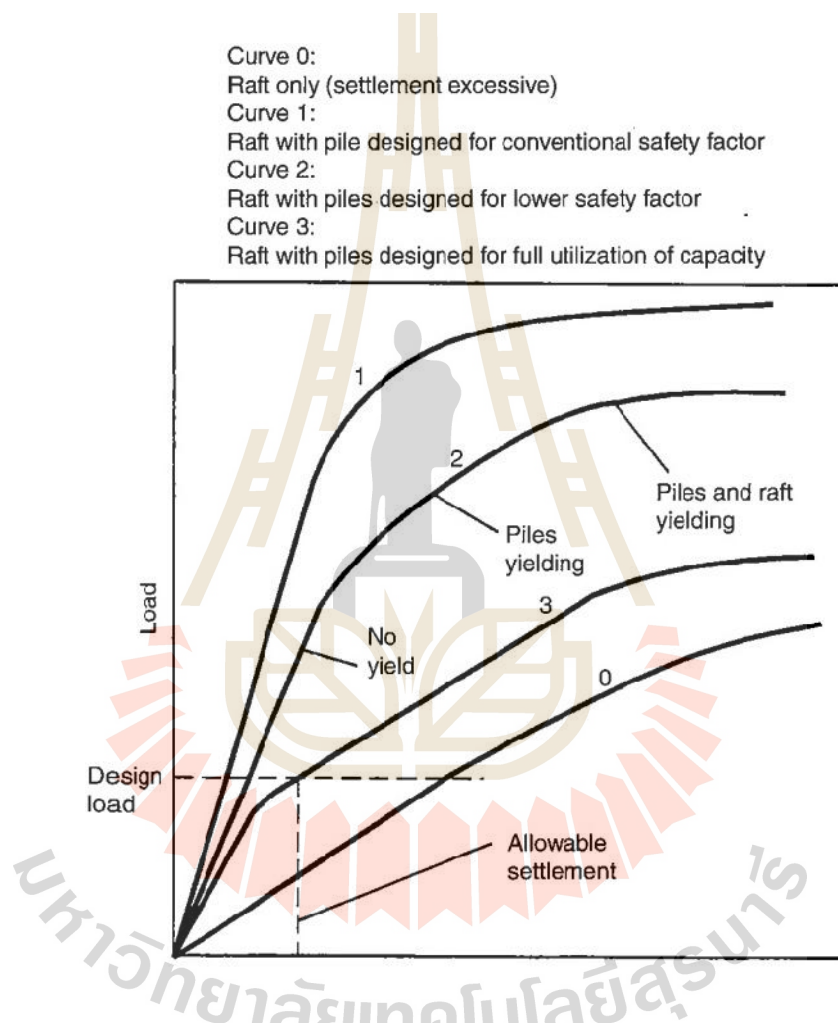


รูปที่ 2.12 รูปแบบฐานรากเสาเข็มแผ่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Poulos, 2001)

2.1.4.1 ลักษณะการรับน้ำหนักของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการทรุดตัวของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังรูปที่ 2.13 เป็น โดย Curve 0 แสดงถึงพฤติกรรมของฐานรากแผ่ที่ไม่มีเสาเข็มรองรับ ซึ่งในกรณีนี้มีปริมาณการทรุดตัวจะเกินกว่าที่กำหนด Curve 1 แสดงถึงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่โดยที่เสาเข็มจะมีการออกแบบใช้ค่าความปลอดภัยที่สูง จึงทำให้มีการทรุดตัวน้อยมาก และน้ำหนักที่กระทำจะอยู่ในช่วงของเส้นตรง Curve 2 แสดงถึงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่

โดยที่เสาเข็มจะมีการออกแบบใช้ค่าความปลอดภัยที่ต่ำ จึงทำให้มีค่าการทรุดตัวที่มากกว่า Curve 1 แต่มีขนาดน้อยกว่าปริมาณการทรุดตัวที่ยอมให้ Curve 3 แสดงถึงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่นที่ใช้กำลังของเสาเข็มเต็มประสิทธิภาพหรือไม่มีค่าความปลอดภัย โดยกำลังของฐานรากเสาเข็มในระบบนี้จะนำกำลังส่วนฐานรากมาช่วยเสริมในการรับน้ำหนักที่ออกแบบ จึงทำให้ประหยัดกว่าวิธีการออกแบบที่แสดงโดย Curve 1, 2 และ 3



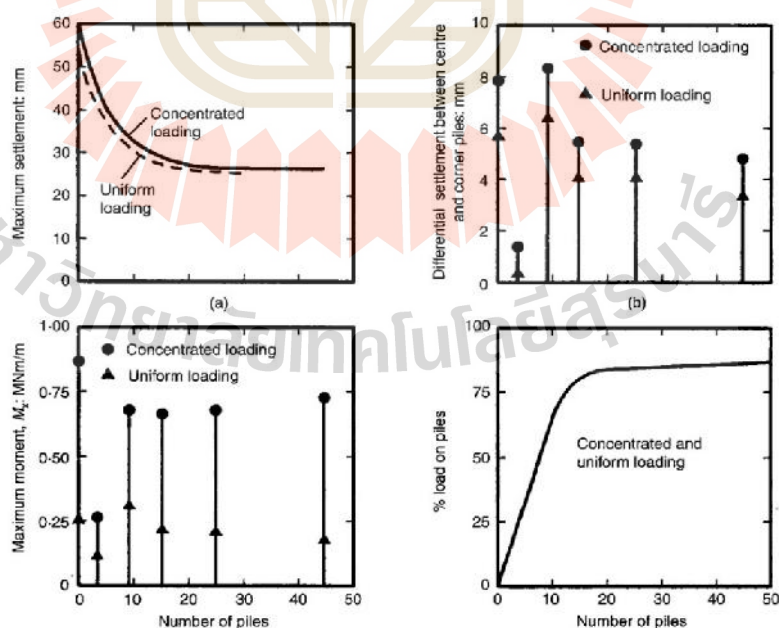
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของ Load – Settlement Curve (Poulos, 2001)

#### 2.1.4.2 ผลกระทบเนื่องจากจำนวนเสาเข็มและน้ำหนักที่กระทำ

จำนวนเสาเข็มจะมีผลกระทบต่อปริมาณการทรุดตัวสูงสุด, การทรุดตัวที่แตกต่างกัน และโมเมนต์ดัดสูงสุด จากลักษณะของฐานราก มีความหนาของฐาน 0.5 เมตร และรับน้ำหนัก 2 ประเภทคือ Concentrated Loading และ Uniform Loading มีผลดังนี้



1. ปริมาณการทรุดตัวสูงสุดจะลดลงเมื่อจำนวนเสาเข็มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเสาเข็มมีจำนวนมากกว่า 20 ต้นจะมีปริมาณการทรุดตัวสูงสุดคงที่ ดังรูปที่ 2.14 a
2. ในกรณีที่จำนวนเสาเข็มน้อย ปริมาณการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักประเภท Concentrated Loading จะมากกว่าที่เกิดจากน้ำหนักประเภท Uniform Loading ดังรูปที่ 2.14 b
3. เมื่อพิจารณาการทรุดตัวที่แตกต่างกันจะมีปริมาณน้อยเมื่อใช้จำนวนเสาเข็ม 3 ต้น ตำแหน่งของเสาเข็มจะอยู่บริเวณตรงกลางฐานรากจึงทำให้เกิดการทรุดตัวสูงสุดมาก แต่การทรุดตัวที่แตกต่างกันเกิดขึ้นน้อย สำหรับการทรุดตัวที่แตกต่างกันจะมีปริมาณมากเมื่อใช้จำนวนเสาเข็มทั้งหมด 9 ต้น สาเหตุเกิดจากส่วนขอบของฐานเกิดการยกตัว จึงทำให้การทรุดตัวที่แตกต่างกันเกิดขึ้นมาก ดังรูปที่ 2.14 b
4. เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ส่งถ่ายลงสู่เสาเข็ม (Percentage of load carried by the pile) จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนเสาเข็ม เมื่อจำนวนเสาเข็มเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ส่งถ่ายลงสู่เสาเข็มก็จะมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อมีจำนวนเสาเข็มเกิน 15 ต้น ดังรูปที่ 2.14 d
5. สำหรับแรงคัดสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักประเภท Concentrated Loading มีค่าแรงคัดสูงสุดมากกว่าที่เกิดจากน้ำหนักประเภท Uniform Loading ดังรูปที่ 2.14 c



รูปที่ 2.14 ผลกระทบเนื่องจากจำนวนเสาเข็มและประเภทของน้ำหนักที่กระทำ (Poulos, 2001)



### 2.1.4.3 ผลกระทบเนื่องจากความหนาของฐานราก

จากรูปที่ 2.15 แสดงถึงผลกระทบเนื่องจากความหนาของฐานรากโดยใช้น้ำหนักประเภท Concentrated Loading มีผลดังนี้

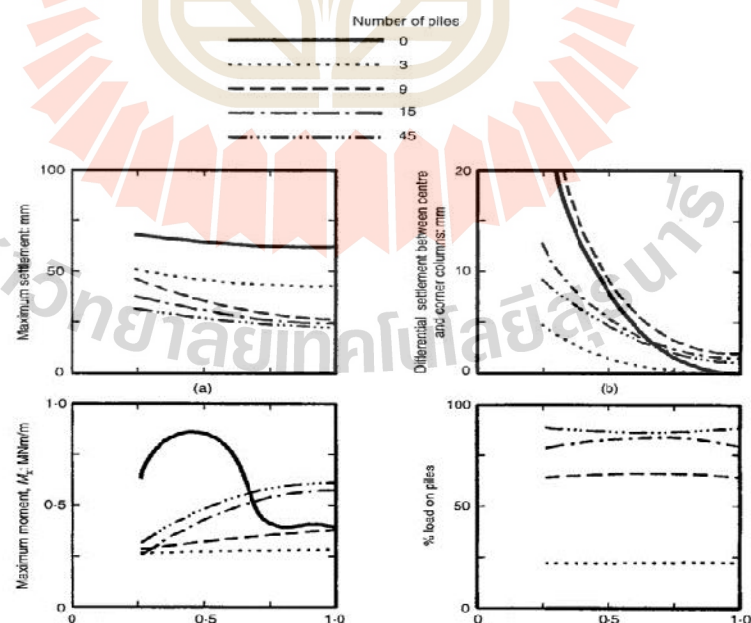
1. ปริมาณการทรุดตัวสูงสุดจะลดลงเมื่อความหนาของฐานรากเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.15 a เมื่อพิจารณาถึงจำนวนเสาเข็มที่ 9, 15 และ 45 ต้น และความหนา 1 เมตร จะมีปริมาณการทรุดตัวสูงสุดที่แตกต่างกันน้อย

2. เมื่อความหนาของฐานรากเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการทรุดตัวที่แตกต่างกันจะลดลง ดังรูปที่ 2.15 b

3. เมื่อความหนาของฐานรากเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้โมเมนต์คัตสูงสุดเพิ่มมากขึ้น และสำหรับในกรณีที่มีเสาเข็มที่ไม่มีเสาเข็มจะมีพฤติกรรมไม่เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.15 c

4. สำหรับกรณีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่เสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของฐานจะพบว่า เมื่อจำนวนเสาเข็มจาก 3 ถึง 9 ต้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มมีค่าที่แตกต่างกันมาก ดังรูปที่ 2.15 d

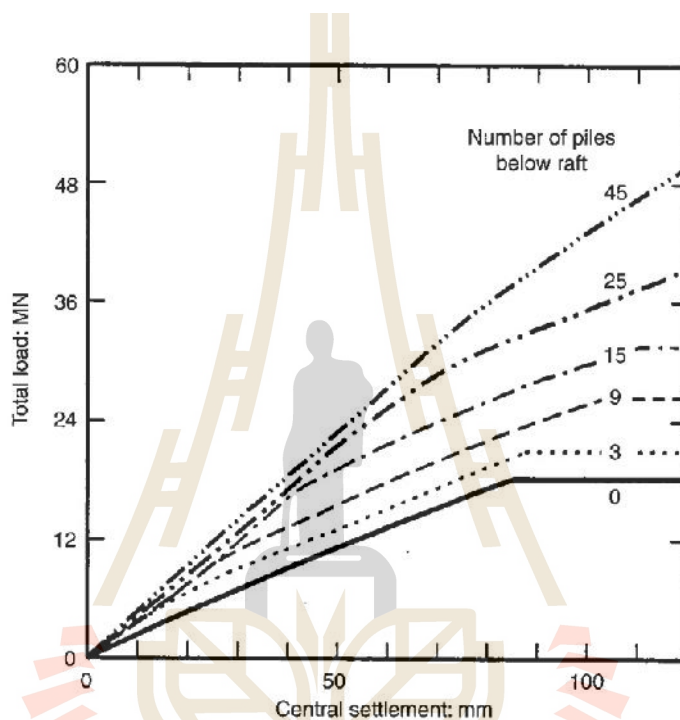
ความหนาของฐานรากจะมีผลต่อปริมาณการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นภายในฐานราก แต่จะมีผลต่อปริมาณการทรุดตัวสูงสุดและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มน้อยมาก



รูปที่ 2.15 ผลกระทบของความหนาฐานรากในระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ (Poulos, 2001)

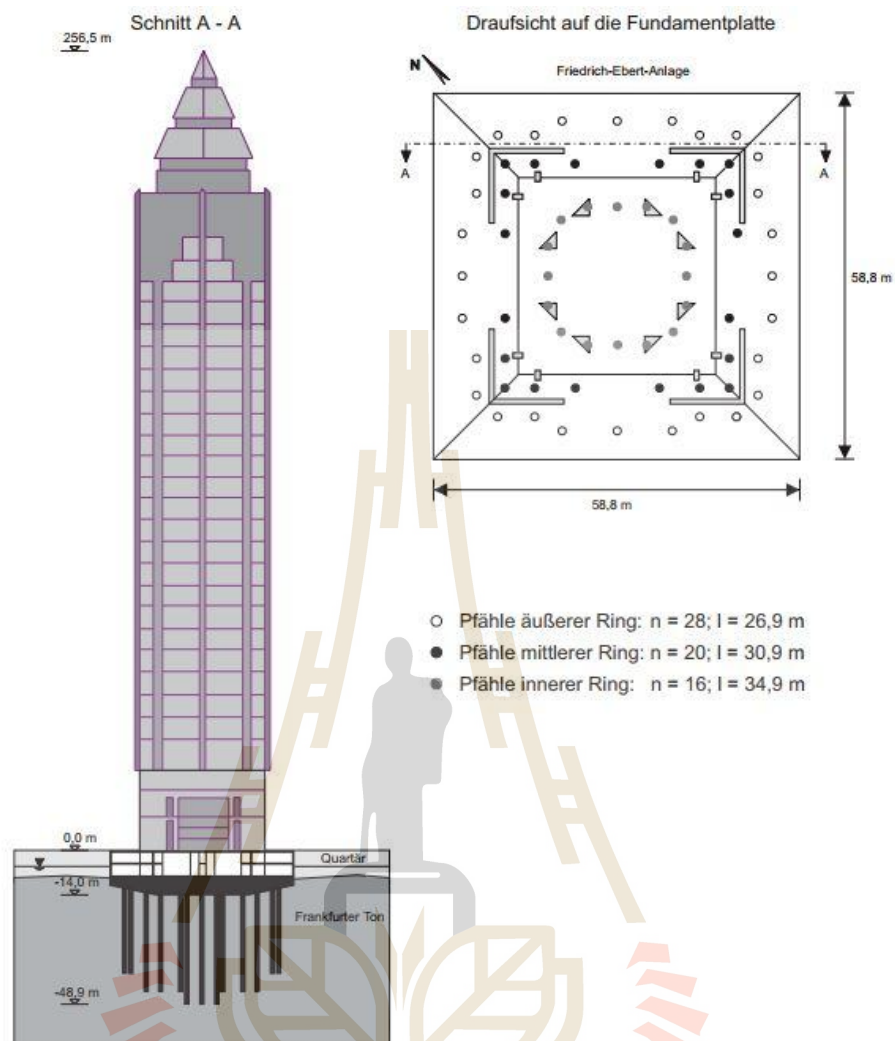
#### 2.1.4.4 ผลกระทบเนื่องจากระดับของน้ำหนักระทำ

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงผลการคำนวณ Load – Settlement Curve สำหรับระบบฐานรากเสาเข็มแผ่โดยการแปรผันตามจำนวนเสาเข็มพบว่าการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของน้ำหนักระทำเพิ่มขึ้น และทำให้ทราบถึงขอบเขตกำลังของเสาเข็มกลุ่ม เพื่อนำไปออกแบบหาจำนวนเสาเข็มที่น้อยที่สุดและลดปริมาณการทรุดตัวสูงสุด



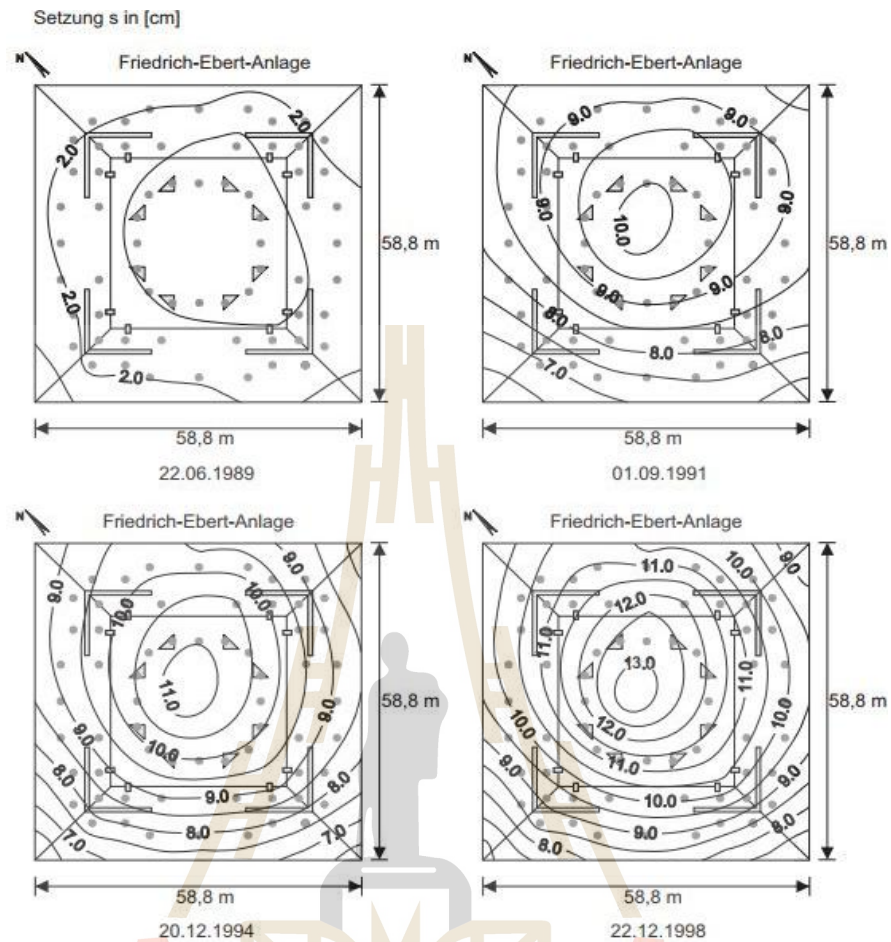
รูปที่ 2.16 ผลกระทบของระดับน้ำหนักระทำในระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ (Poulos, 2001)

Reul (2000) ได้รายงานพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของอาคาร Messe Turm Tower ในเมืองแฟรงก์เฟิร์ต ประเทศเยอรมันนี โดยตึกมีความสูง 256 เมตร สร้างบนฐานรากเสาเข็มแผ่ที่มีความหนามากที่สุดบริเวณส่วนกลางฐานราก 6 เมตร และลดเหลือ 3 เมตร ที่บริเวณขอบฐานราก รองรับโดยเสาเข็มจำนวน 64 ต้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เมตร ความยาวของเสาเข็มอยู่ระหว่าง 26.9-34.9 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็มอยู่ระหว่าง 3.5-6 เมตร ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะ โครงสร้างอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่ของตึก Messe Turm (Reul, 2000)

โดยฐานรากได้มีการติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจวัดการทรุดตัว จากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ตลอดระยะเวลา 9 ปี ดังรูปที่ 2.18 พบว่าการทรุดตัวเกิดขึ้นในบริเวณกลางฐานรากมากที่สุด โดยมีลักษณะการทรุดตัวกลายเป็นรูปถ้วย ซึ่งสาเหตุนี้สอดคล้องกับหลักการที่อธิบายไว้โดย Fleming (2008) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเสาเข็มกลุ่ม เมื่อเสาเข็มต้นหนึ่งมีการทรุดตัวจะทำให้เกิดการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มในบริเวณรอบข้างไปพร้อมกันในรูปแบบของ Superposition ดังรูปที่ 2.19 ส่งผลให้ฐานรากเสาเข็มกลุ่มเกิดการทรุดตัวมากกว่าการทรุดตัวจากการทดสอบเสาเข็ม

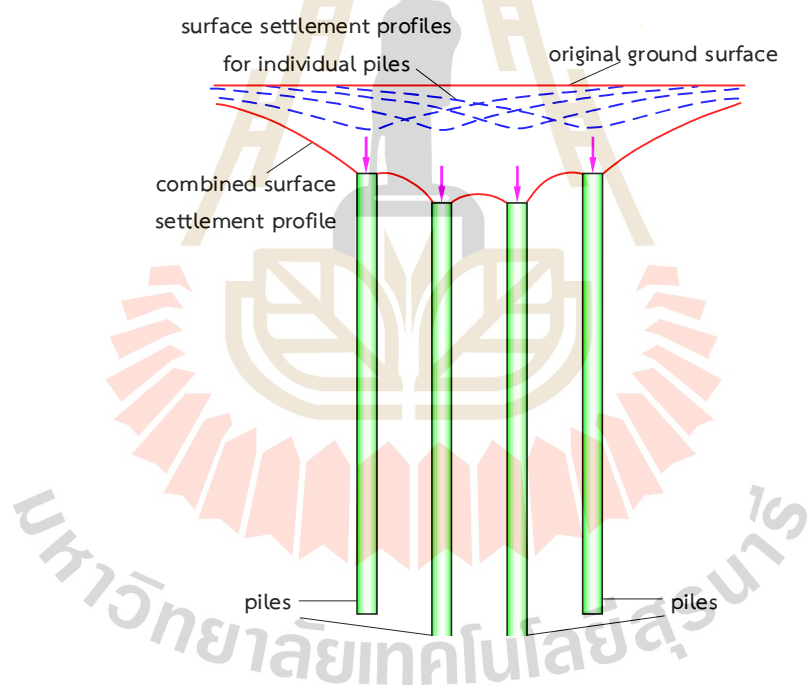


รูปที่ 2.18 ลักษณะการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของตึก Messe Turm Tower (Reul, 2000)

Tamaro (1996) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบและการทำงานของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยได้เปรียบเทียบกรณีฐานรากอาคารสูงระหว่างตึก Messe Turm และ Commerz Bank ซึ่งใช้หลักการออกแบบของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่และฐานรากเสาเข็มแบบดั้งเดิมตามลำดับ โดยข้อมูลของทั้งสองอาคารสรุป ดังตารางที่ 2.2 จากการเปรียบเทียบพบว่าระบบฐานรากเสาเข็มแผ่มีจำนวนเสาเข็มที่น้อยกว่าการออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีดั้งเดิมอยู่ประมาณครึ่งหนึ่ง และผลจากการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากมีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์อย่างมาก ทำให้ฐานรากและโครงสร้างอาคารสูงมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ใช้ในการออกแบบ แต่สำหรับผลการวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีแบบดั้งเดิมของตึก Commerz Bank นั้นให้ค่าการทรุดตัวที่สูงกว่าผลการตรวจวัดมาก

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อมูลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่และระบบฐานรากเสาเข็มแบบดั้งเดิม (Tamaro, 1996)

Quantity	Messe Turm Tower	Commerz Bank
Total load (MN)	1880	1300
Effective pressure (kPa)	470	550
Base area (m <sup>2</sup> )	3457	2150
Bottom of excavation (m)	-14	-7
Number of piles	64	111
Pile diameter (m)	1.3	1.8 (upper 25 m) 1.5 (below 25 m)
Pile length (m)	26.9–34.9	45
Predicted settlement (mm)	150–200	60–70
Measured settlement (mm)	115	19
Raft thickness (m)	6 (to 3 at edge)	4.45 beneath cores 2.5 between cores

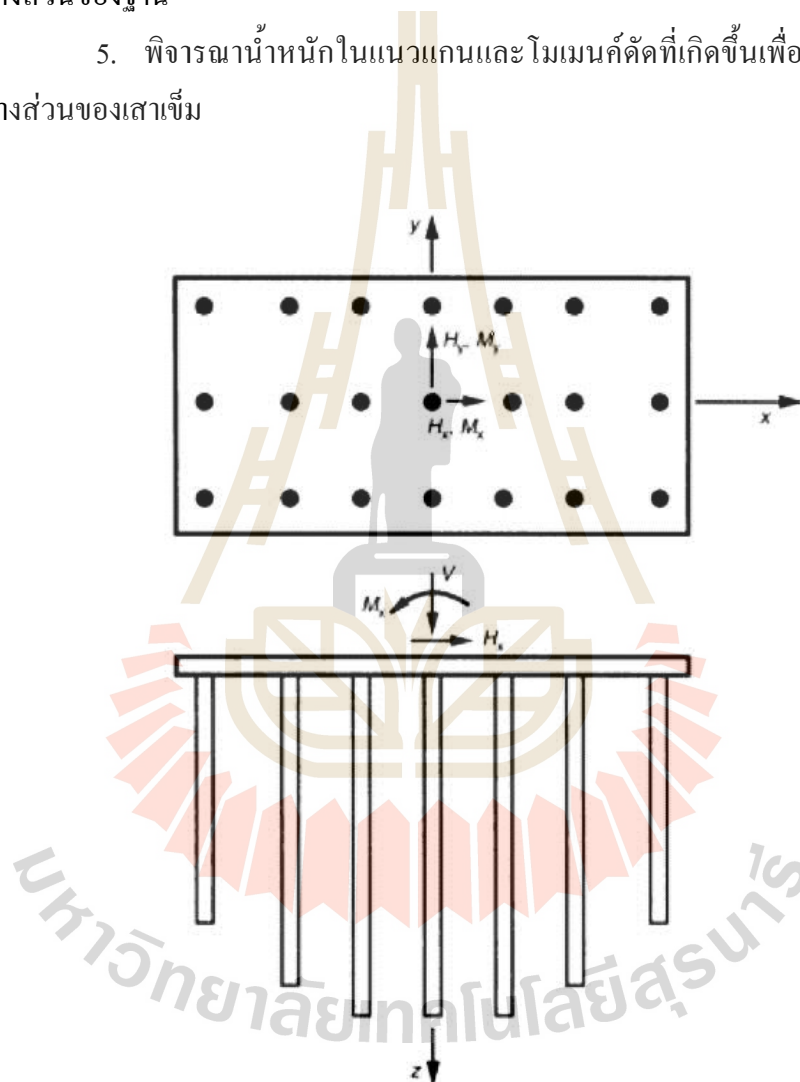


รูปที่ 2.19 ลักษณะซ้อนทับการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม (Fleming, 2008)

### 2.1.5 การวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

Poulos, H. G. (2001) ได้อธิบายถึงสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังรูปที่ 2.20 และขั้นตอนของการออกแบบมีดังนี้

1. พิจารณากำลังสูงสุดของฐานรากที่ใช้สำหรับรับแรงในแนวตั้ง แนวนอนและแรงคัตที่กระทำต่อฐานราก
2. พิจารณาปริมาณการทรุดตัวสูงสุดที่อาจจะเกิดขึ้น
3. พิจารณาปริมาณการทรุดตัวที่แตกต่างในฐานรากที่อาจจะเกิดขึ้น
4. พิจารณาโมเมนต์คัตและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างส่วนของฐาน
5. พิจารณาน้ำหนักในแนวแกนและโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างส่วนของเสาเข็ม



รูปที่ 2.20 ลักษณะทั่วไปของฐานรากเสาเข็มแผ่ (Hemsley, 2000)

กระบวนการในการออกแบบระบบฐานรากเสาเข็มแผ่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การประเมินความเป็นไปได้ในการเลือกใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่และประเมินจำนวนเสาเข็มที่ต้องการ



2. การประเมินลักษณะของเสาเข็มที่จะนำมาใช้ในระบบฐานราก
3. การหาปริมาณหรือจำนวนเสาเข็มที่ประหยัด, ตำแหน่งเสาเข็ม, รูปร่าง, ปริมาณการทรุดตัว, แรงค้ำและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในส่วนของฐาน และ โมเมนต์ค้ำและแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม

### 2.1.5.1 ประเภทของการวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่

1. การวิเคราะห์อย่างง่าย วิธีการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้จะทำการจำลองลักษณะปัญหาจริงของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนให้ง่ายต่อการวิเคราะห์มากที่สุด โดยอ้างอิงผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลการทดสอบจากสนาม ได้แก่ การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มโดยวิธี Modified theory of elasticity ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ Poulos & Davis (1980)
2. การวิเคราะห์แบบประมาณโดยใช้คอมพิวเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้แม้จะเป็นการประมาณ แต่มักใช้วิธีทางตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหา จึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ ข้อสังเกตของการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้ คือมักจะแทนเสาเข็มด้วยสปริงที่มีค่าสติเฟนสของสปริงที่เหมาะสมผ่านการวิเคราะห์ปฏิกริยาระหว่างเสาเข็ม (Pile to Pile Interaction) มาก่อน แล้วนำค่าค่าคงที่ของสปริงที่ได้มาทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขของการสมดุล (Equilibrium Condition) โดยฐานรากแผ่ อาจถูกแทนที่และวิเคราะห์เป็นไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element) ซึ่งเรียกว่า Plate on Spring Approach
3. การวิเคราะห์แบบละเอียดโดยใช้คอมพิวเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้มักจะจำลองปัญหาใกล้เคียงกับสภาพตามธรรมชาติ และการแก้ปัญหาด้วยวิธีการทางตัวเลขอย่างเต็มรูปแบบ ดังนั้นทรัพยากรของคอมพิวเตอร์จึงมักเป็นตัวแปรสำคัญของการวิเคราะห์ ข้อสังเกตของการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้ คือ ทั้งฐานแผ่และเสาเข็มจะถูกทำการวิเคราะห์พร้อมกันภายใต้เงื่อนไขของการสมดุล (Equilibrium Condition) และความสอดคล้องของการเคลื่อนที่ (Compatibility) ทำให้สามารถศึกษาผลของการมีปฏิกริยาระหว่างดินกับโครงสร้าง (Soil Structure Interaction) ได้อย่างเต็มรูปแบบ โดยได้ยกตัวอย่างมาหนึ่งวิธี ได้แก่ วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (Three-Dimensional Finite Element Method) โดยวิธีนี้ทั้งฐานรากแผ่, เสาเข็ม และดิน จะถูกแทนที่ด้วยอีลิเมนต์ ที่มีพฤติกรรมในสามมิติจึงสามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มแผ่ (Pile Raft Foundation) ได้ค่อนข้างสอดคล้องกับพฤติกรรมจากผลการตรวจวัดมากที่สุด



## 2.2 อิทธิพลเนื่องจากการจัดวางตำแหน่งเสาเข็ม

Randolph (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของระบบฐานรากเสาเข็มแผ่ เนื่องจากการแปรผัน ตำแหน่งการจัดวางเสาเข็ม, จำนวนเสาเข็ม, ความยาวเสาเข็ม และอัตราส่วนความแข็งแรงระหว่างดินกับฐานราก (raft-soil stiffness ratio) ภายใต้แรงกระทำแบบไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ โดยดินมีพฤติกรรมแบบ elastoplastic และพิจารณาพฤติกรรมดินแบบระยะยาวด้วย drained shear parameter  $c'$  และ  $W'$  โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2.3 และค่าสถิติของดินเหนียวคำนวณจากการวิเคราะห์กลับจากชั้นดินใน Frankfurt ซึ่งเป็นวิธีแบบ empirical โดย Reul (2000) ดังสมการที่ 2.2

$$E = 45 + \left( \tanh\left(\frac{z-30}{15}\right) + 1 \right) 0.7z \quad (2.2)$$

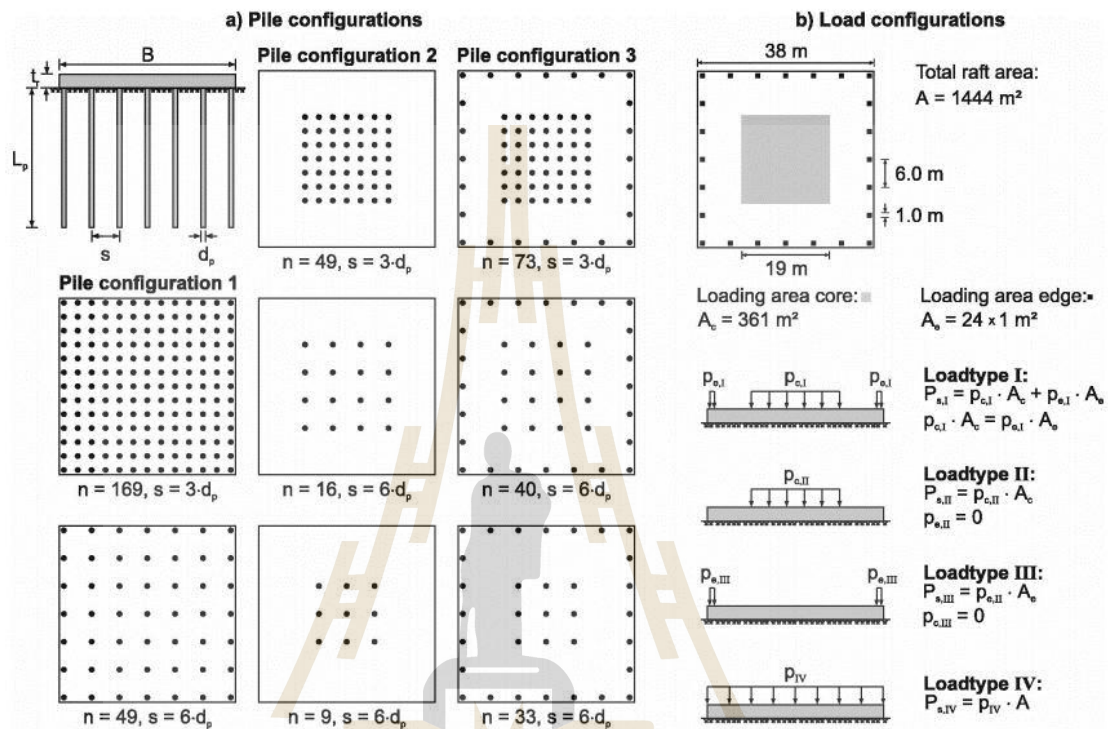
ตารางที่ 2.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Randolph, 2004)

Parameter	Soil	Raft	Piles	
$E_s, E_r, E_p$	MPa	Eq. (1)	34,000	30,000
$\nu_s, \nu_r, \nu_p$	—	0.15	0.2	0.2
$\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	9	15	15
$K_0$	—	0.72 $0 \leq z < 25^a$ 0.57 $z \geq 25^a$	—	—
$\phi'$	°	20	—	—
$c'$	kPa	20	—	—
$K$	—	0.795	—	—
$R$	—	0.1	—	—

<sup>a</sup> $z$  = meters below surface of tertiary layers.

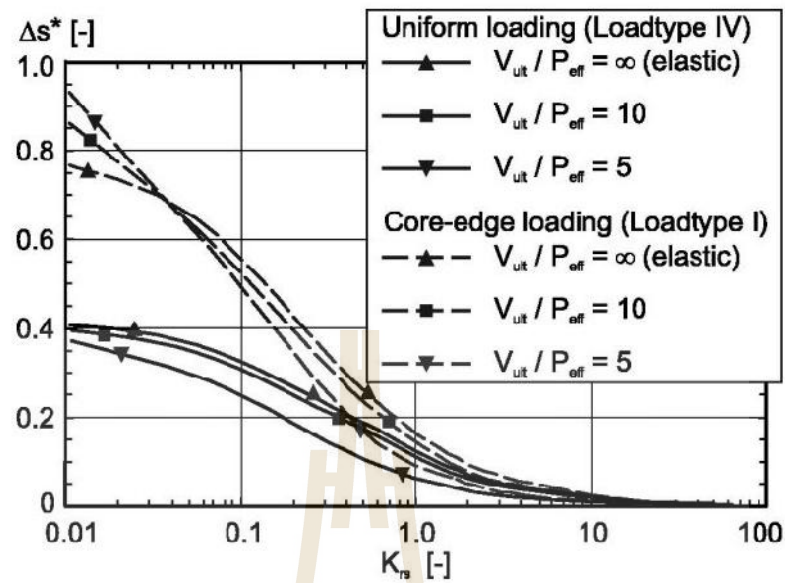
ลักษณะของฐานรากและการจัดวางเสาเข็ม ได้ทำการศึกษาลักษณะพิเศษของฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 38 เมตร โดยมีรูปแบบของการจัดวางเสาเข็ม 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.21a ซึ่งประเภทการจัดวางตำแหน่งเสาเข็มแบบที่ 1 จะมีเสาเข็มกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดใต้ฐานราก การจัดวางตำแหน่งเสาเข็มแบบที่ 2 จะมีเสาเข็มเฉพาะในบริเวณกลางของฐานรากได้ core loading การจัดวางตำแหน่งเสาเข็มแบบที่ 3 จะมีเสาเข็มในบริเวณกลางของฐานรากได้ core loading และมีบริเวณขอบของฐานราก ซึ่งฐานรากทุกประเภทนี้มีจำนวนเสาเข็มอยู่

ระหว่าง 9 ถึง 169 ต้น ความยาวเสาเข็มเท่ากับ 10 และ 50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มมีขนาดคงที่เท่ากับ 1 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็มอยู่ที่ 3 และ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม



รูปที่ 2.21 รูปแบบฐานรากและประเภทน้ำหนักกระทำ (Randolph, 2004)

ลักษณะของน้ำหนักกระทำ จากรูปที่ 2.21 b แสดงให้เห็นรูปแบบของแรงกระทำที่ได้นำมาพิจารณาทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ น้ำหนักกระทำประเภทที่ 1 น้ำหนักกระทำครึ่งหนึ่งจะถ่ายลงบริเวณตรงกลาง และแรงอีกครั้งจะถ่ายลงบริเวณขอบของฐานราก ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องความเป็นจริงโดยทั่วไปแล้วสำหรับอาคารสูงบริเวณส่วนกลางจะมีความแรงแรงมากเนื่องจากมีปล่องลิฟต์และโถงบันได และมีเสาอยู่บริเวณขอบของอาคาร น้ำหนักกระทำประเภทที่ 2 และ 3 เป็นแรงกระทำบริเวณส่วนกลางของฐานรากและบริเวณส่วนขอบของฐานรากตามลำดับ และน้ำหนักกระทำประเภทที่ 4 เป็นแรงกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของฐานราก

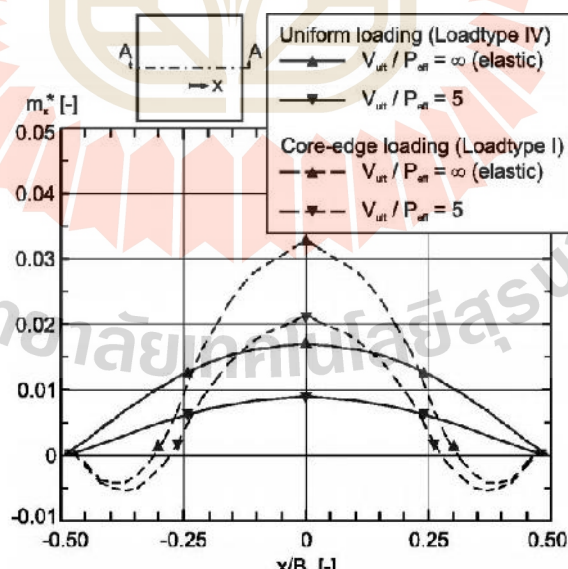


รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง normalized differential settlement กับ raft-soil stiffness ratio (Randolph, 2004)

- เมื่อ
- $V_{ult}$  = ultimate capacity of vertically loaded unpiled raft
  - $P_{eff}$  = effective applied load caused by superstructure and raft
  - $U_S$  = differential settlement defined as differential between center and midsidesettlement
  - $S_r$  = differential settlement unpiled raft
  - $U_S^*$  = normalized differential settlement
  - $$= \frac{U_S}{S_r}$$
  - $K_{rs}$  = raft-soil stiffness ratio
  - $$= 5.57 \frac{E_r}{E_s} \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_r^2} \left(\frac{B}{L}\right)^{0.5} \left(\frac{t_r}{L}\right)^3$$
  - $m_x^*$  = normalized bending moment per unit length
  - $$= \frac{m}{P_S}$$
  - $m$  = bending moment per unit length
  - $P_S$  = load caused by superstructure

ระบบฐานรากแผ่ จากรูปที่ 2.22 พบว่า normalized differential settlement จะมีขนาดลดลงจนกลายเป็นศูนย์เมื่อขนาดของ raft-soil stiffness ratio เพิ่มขึ้น ในกรณีฐานรากแพรองรับน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอในประเภทที่ 4 การที่ normalized differential settlement มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม load level เนื่องจากบริเวณดินใต้ขอบของฐานรากเกิดการเสีรูปถาวรมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณตรงกลางของฐานราก นำไปสู่การลดลงของ normalized differential settlement แต่ทำให้ average settlement เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสีรูปถาวร สำหรับน้ำหนักกระทำในบริเวณขอบและส่วนกลางของฐานราก ภายใต้น้ำหนักกระทำประเภทที่ 1 มีความแปรปรวนเมื่อ raft-soil stiffness ratio มีขนาดน้อยกว่า 0.04 ส่งผลให้ขนาดของ normalized differential settlement เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม load level ทำให้การเสีรูปถาวรในบริเวณขอบของฐานรากไม่ได้รับอิทธิพลเนื่องจาก raft-soil stiffness ratio ที่มีค่าน้อยทำให้ฐานรากมีความ flexible เกิดการเสีรูปในบริเวณตรงกลางฐานรากมากที่สุด ในน้ำหนักกระทำกระทำแบบไม่สม่ำเสมอนี้ทำให้เกิด normalized differential settlement ที่มีขนาดสูงกว่าน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอในประเภทที่ 1

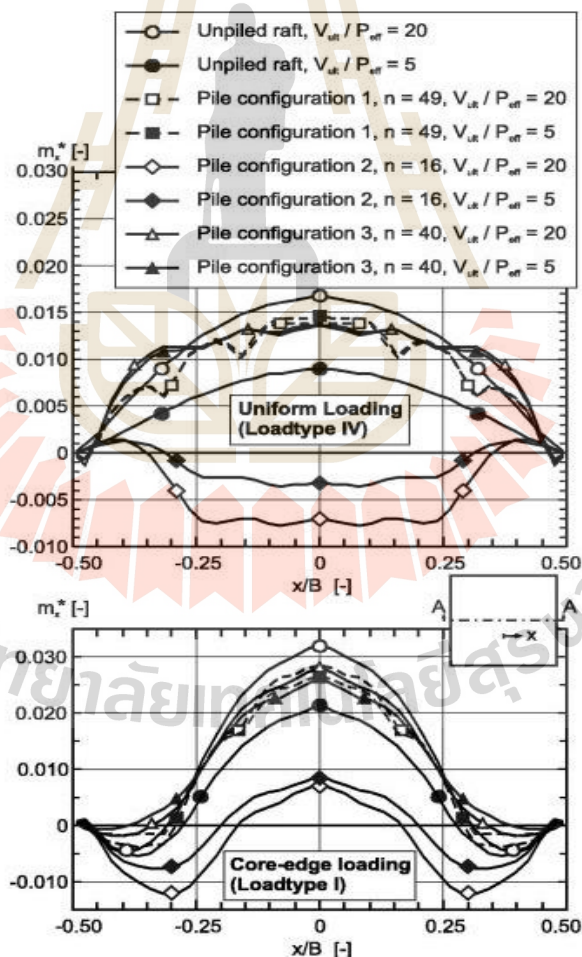
เมื่อพิจารณา Normalized bending moment per unit length กระทำในหน้าตัด A-A ในทิศทางขนาดกกับแกน x ภายใต้น้ำหนักกระทำประเภทที่ 1 และ 4 โดย raft-soil stiffness ratio เดียวกัน จากรูปที่ 2.23 พบว่าภายใต้น้ำหนักกระทำประเภทที่ 4 เมื่อเพิ่ม load level จะทำให้ negative bending moment per unit length มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.23 normalized bending moment per unit length ในแนวรูปตัดขวางตลอดแกน x

(Randolph, 2004)

สำหรับ Normalized bending moment per unit length ของฐานรากโดยภาพตัดขวาง A-A ภายใต้น้ำหนักกระทำประเภทที่ 1 และ 4 โดยพิจารณาจัดวางตำแหน่งของเสาเข็มทุกประเภท เปรียบเทียบกับกรณีฐานรากแผ่ โดย raft-soil stiffness ratio เดียวกัน ดังรูปที่ 2.24 พบว่าภายใต้แรงกระทำประเภทที่ 4 เสาเข็มกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนใต้ฐานราก พบว่าไม่สามารถช่วยลดโมเมนต์คดซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับฐานรากแผ่ แต่ในการจัดวางตำแหน่งเสาเข็มประเภทที่ 2 มีเสาเข็มเฉพาะในบริเวณกลางของฐานรากได้ core loading นั้นฐานรากเสาเข็มเกิดการแอ่นตัวในทิศทางกลับรูปเห็ด และมีขนาดของโมเมนต์ที่เป็นลบ (negative bending moment) สูงเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรากแผ่ และภายใต้แรงกระทำประเภทที่ 1 การจัดวางตำแหน่งเสาเข็มประเภทที่ 3 สามารถลดโมเมนต์ที่เป็นลบและสำหรับการจัดวางตำแหน่ง เสาเข็มประเภทที่ 2 ส่งผลให้โมเมนต์ที่เป็นลบสูงเมื่อเทียบกับฐานรากแผ่



รูปที่ 2.24 normalized bending moment per unit length โดยภาพตัดขวางขนานกับแกน x

(Randolph, 2004)



จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าการใช้รูปแบบการจัดวางตำแหน่งเสาเข็มประเภทที่ 2 นั้นสามารถนำไปใช้กับประเภทของน้ำหนักระทำได้หลากหลายรูปแบบมากที่สุด และสามารถวิเคราะห์การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์ที่เป็นบวกได้มีค่าต่ำที่สุดในทุกกรณีที่ได้ทำการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 2.4 สรุปผลการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์ที่เป็นบวกน้อยที่สุดภายใต้รูปแบบน้ำหนักระทำแต่ละประเภท (Randolph, 2004)

Load tpe	Load level $V_{ult}/P_{eff}$	Differential Settlement	Positive Bending Moment
1	20	p2, n=16, Lp=30 m, tr=1 m, 0 mm	p2, n=49, Lp=50 m, tr=3 m, 0.199 MNm/m
	5	p2, n=16, Lp=30 m, tr=3 m, 2 mm	p2, n=49, Lp=50 m, tr=3 m, 0.760 MNm/m
2	20	p2, n=49, Lp=50 m, tr=3 m, 7 mm	p3, n=73, Lp=50 m, tr=1 m, 0.640 MNm/m
	5	p2, n=49, Lp=50 m, tr=3 m, 25 mm	p2, n=49, Lp=50 m, tr=1 m, 2.828 MNm/m
3	20	-	p3, n=33, Lp=30 m, tr=3 m, 0.183 MNm/m
	5	-	p3, n=33, Lp=50 m, tr=3 m, 0.488 MNm/m
4	20	p3, n=73, Lp=50 m, tr=1 m, 0 mm	p1, n=169, Lp=50 m, tr=1 m, 0.065 MNm/m
	5	p2, n=49, Lp=10 m, tr=1 m, 1 mm	p2, n=49, Lp=50 m, tr=3 m, 0.273 MNm/m

### 2.3 อิทธิพลต่อฐานรากแผ่เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็ม

Mali (2020) ได้ทำการศึกษาฐานรากเสาเข็มแผ่ในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำและรูปแบบของฐานรากที่แตกต่างกันด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ โดยดินมีพฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic โดยใช้ทฤษฎีของ Mohr-Coulomb ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งภายในระยะเวลาสั้นโดยไม่เกิดการอัดตัวคาน้ำ โดยสรุปค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2.5 และ 2.6



ตารางที่ 2.5 สรุปค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mali, 2020)

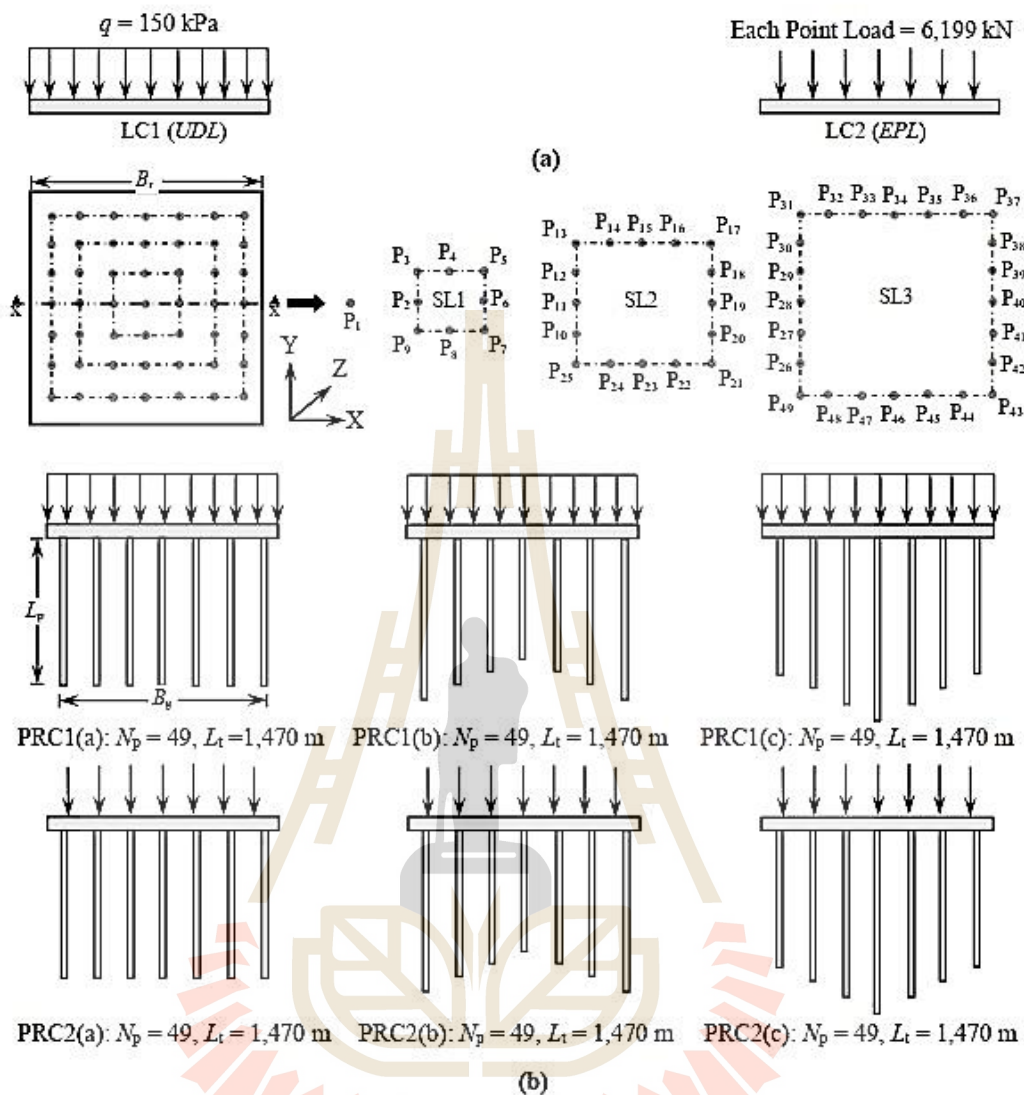
Material	Properties	Unit	Value
Soil	Unsaturated unit weight, $\gamma_{\text{unsat}}$	kN/m <sup>3</sup>	16
	Young's modulus, $E_s$	MPa	25 (Soft clay) 82 (Stiff clay)
	Poisson's ratio, $\nu_s$	-	0.495
	Angle of internal friction, $\phi$	°	0
	Undrained cohesion	kPa	25 (Soft clay) 80 (Stiff clay)
Raft	Young's modulus, $E_r$	GPa	25
	Poisson's ratio, $\nu_r$	-	0.25
Pile	Young's modulus, $E_p$	GPa	25
	Poisson's ratio, $\nu_p$	-	0.25

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลของฐานรากเสาเข็มแผ่ (Mali, 2020)

Parameters	Unit	Value
Raft width, $B_r$	m	45
Raft width, $L_r$	m	45
Raft thickness, $t_r$	m	0.5, 1, 1.5, 2*
Number of piles	-	49
Pile length, $L_p$	m	30*
Pile spacing, $S_p$	m	3*, 4, 5, 6, 7
Width of pile group, $B_g$ (Corresponding to each $S_p$ )	m	19, 25, 31, 37, 43
Pile diameter, $d_p$	m	1

\* Indicates standard value if not varied.

จากรูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของแรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มแผ่โดยมีแรงทั้งแรงกระจายตัว สม่่าเสมอกับแรงกระทำแบบจุด ตารางที่ 2.7 อธิบายถึงลักษณะของการแปรผันความยาวของเสาเข็มโดยมีทั้งหมดสามประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 ความยาวเสาเข็มเท่ากัน, ประเภทที่ 2 ความยาวเสาเข็มแบบ W-Shaped และประเภทที่ 3 ความยาวเสาเข็มแบบ V-Shaped

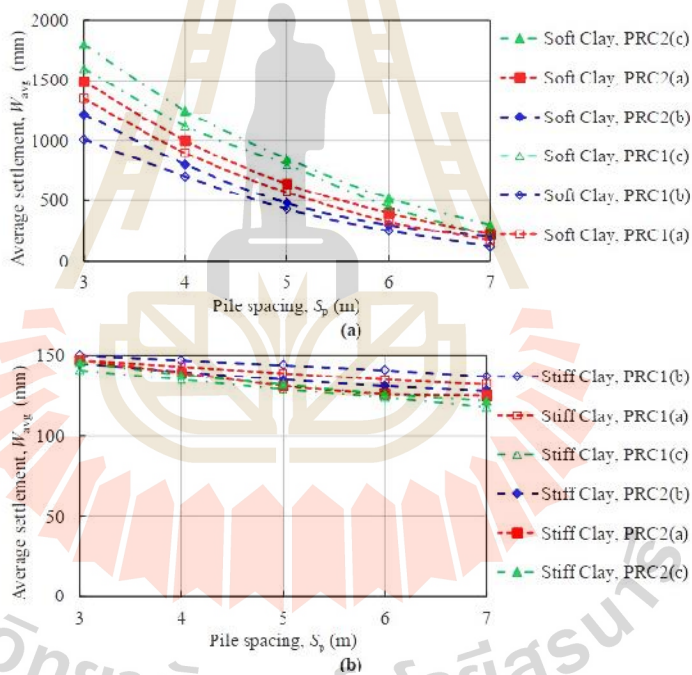


รูปที่ 2.25 ลักษณะของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mali, 2020)

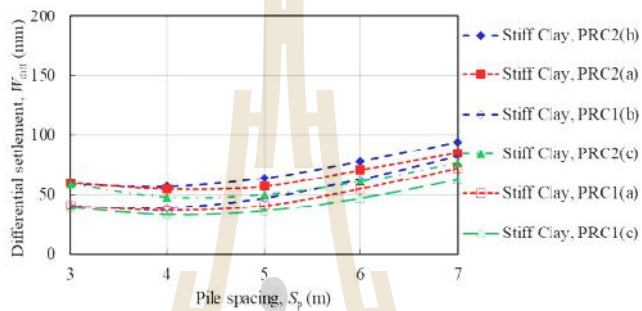
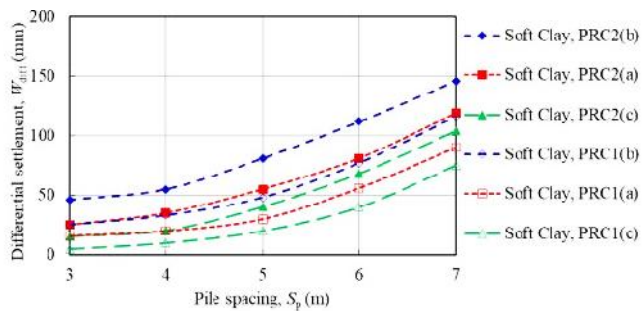
ตารางที่ 2.7 ความยาวเสาเข็มของทั้ง 3 ประเภท (Mali, 2020)

Name and no. of piles, $N_p$	Pile length, $L_p$ (m)		
	PRC with uniform pile lengths	PRC with "W"-shaped pile lengths	PRC with "V"-shaped pile lengths
$P_1$ (1 pile)		$L_{1W} = 24.46$	$L_{1V} = 37.19$
$P_2$ - $P_9$ (8 piles)	30	$L_{2-9W} = 1.1 L_{1W} = 26.91$	$L_{2-9V} = L_{1V}/1.1 = 33.81$
$P_{10}$ - $P_{25}$ (16 piles)		$L_{10-25W} = 1.1 L_{2-9W} = 29.60$	$L_{10-25V} = L_{2-9V}/1.1 = 30.74$
$P_{26}$ - $P_{43}$ (24 piles)		$L_{26-43W} = 1.1 L_{10-25W} = 32.56$	$L_{26-43V} = L_{10-25V}/1.1 = 27.94$

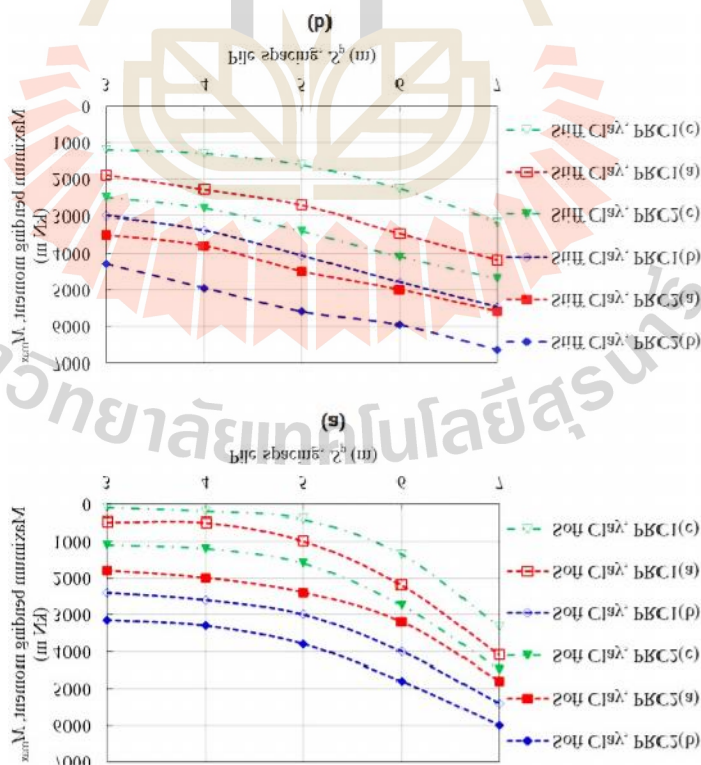
จากผลการวิเคราะห์ของฐานรากเสาเข็มแฉะ ดังรูปที่ 2.26 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็ม ในทั้งสองกรณีสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง จะส่งผลให้ฐานรากเกิดการทรุดตัวเฉลี่ยมีค่าลดลง แต่เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 2.27 พบว่าการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็ม ในทั้งสองกรณีสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง จะส่งผลให้ฐานรากเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันมีค่าเพิ่มขึ้น และแสดงให้เห็นว่าการจัดความยาวเสาเข็มแบบ v-shaped นั้นให้ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันต่ำที่สุดและการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็มในทั้งสองกรณีสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง จะส่งผลให้ฐานรากเกิดโมเมนต์ดัดในฐานรากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากขึ้น โดยฐานรากมีความโค้งแอ่นเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นว่าการใช้ความยาวเสาเข็มแบบ v-shaped นั้นทำให้ฐานรากเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดลดลงมากที่สุด



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับความทรุดตัวเฉลี่ย (Mali, 2020)



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับความทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Mali, 2020)



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับโมเมนต์ดัดสูงสุด (Mali, 2020)

## 2.4 อิทธิพลเนื่องจากระบบฐานรากเสาเข็มแผ่มีความยาวเสาเข็มไม่เท่ากัน

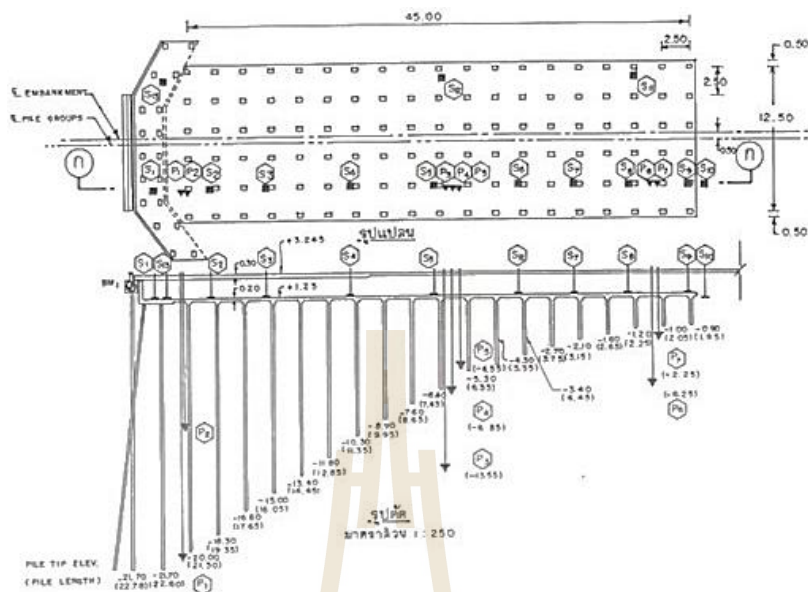
ทินกร (2528) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวที่สะพานคลองปลัดเปรียง บนทางหลวงสายบางนา-บางพระกง เป็นเวลา 9.8 เดือน โดยลักษณะโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กยึดหัวเสาเข็มหนา 0.2 เมตร ความยาวประมาณ 45 เมตร วางอยู่บนเสาเข็มซึ่งช่วงที่ยาวที่สุดติดกับคอสะพานยาว 22.78 เมตร และสั้นที่สุด 1.95 เมตร ในส่วนปลายของหน่วยแบริง โดยใช้เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.22 x 0.22 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2.5 เมตร ดินถมคันทางมีความสูงประมาณ 2 เมตร ดังรูปที่ 2.29 เนื่องจากไม่มีผลการทดสอบเสาเข็มในบริเวณที่ศึกษาจึงใช้ผลการทดสอบในบริเวณข้างเคียง โดยแบ่งเป็น 2 ระยะ โดยระยะแรกจะเป็นบริเวณคอสะพานและระยะต่อมาเป็นบริเวณคันทาง ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

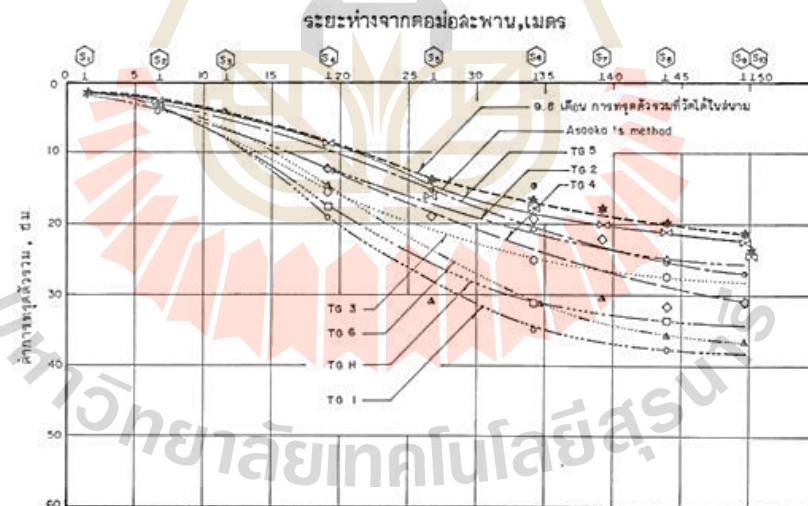
ระยะทางการตรวจวัดการทรุดตัว	ลักษณะเสาเข็ม	ผลการทดสอบเสาเข็ม
ระยะทางครึ่งแรก	1 0.26x0.26x21.00m	5.5 mm at 60 ton test load
ระยะทางครึ่งหลัง	0.20x0.20x14.00m	4 mm at 7 ton test load

จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 2.30 ทินกร (2528) เสนอการปรับระดับช่วงความยาวเสาเข็ม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยในช่วงแรกนั้นเป็นช่วงที่ติดกับสะพานควรพิจารณาให้ค่อนข้าง Rigid ซึ่งยอมให้การทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมาก โดยไม่จำเป็นต้องมีความยาวเสาเข็มหยั่งถึงชั้นเดียวกันกับเสาเข็มของตอม่อสะพาน แต่ต้องหยั่งถึงชั้นดินแข็งหรือชั้นทราย ช่วงที่สองเป็นช่วง Transition การออกแบบในช่วงนี้จำเป็นต้องให้เกิดการทรุดตัวที่เหมาะสมอย่างมากเนื่องจากเป็นช่วงที่เชื่อมระหว่างช่วงที่เป็น Rigid กับ Flexible และในช่วงที่สามเป็นช่วงที่ควรให้หน่วยแบริงนั้นเกิดการทรุดตัวไปพร้อมกับคันทางได้อย่างราบรื่นจึงเป็นช่วงที่มีความยาวเสาเข็มสั้นที่สุด





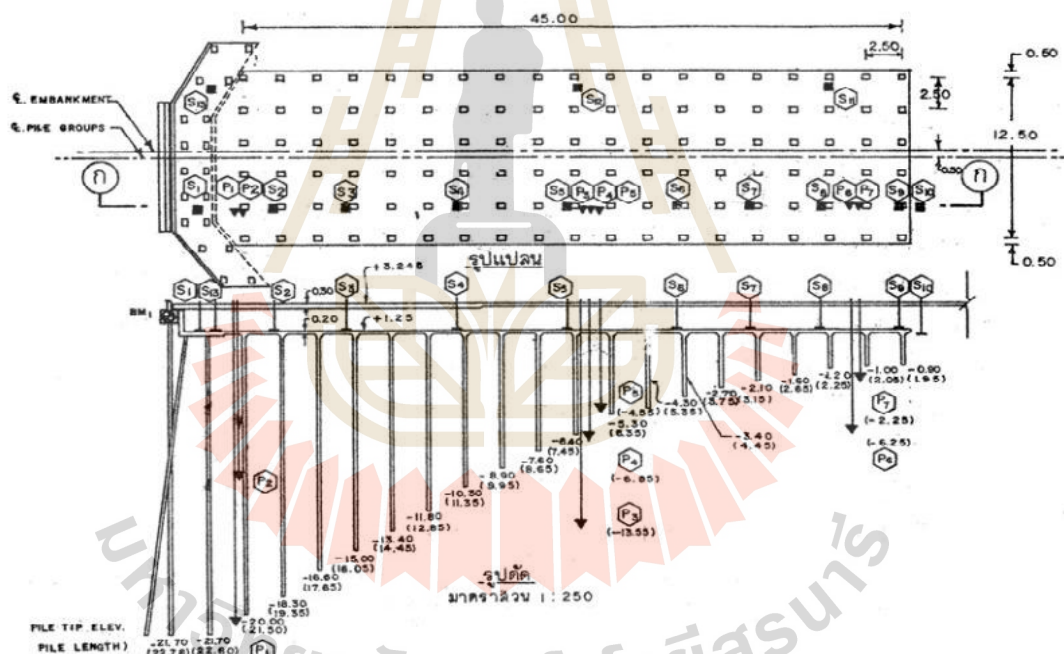
รูปที่ 2.29 ตำแหน่งของจุดติดตั้ง Settlement plate ใน Section ก-ก ของแบบโครงสร้างปรับปรุงภาพการทรุดตัวสะพานคลองปลัดเปรียง กม.6+402 (ทินกร, 2528)



รูปที่ 2.30 การทรุดตัวของหน่วยเบริงบริเวณคลองปลัดเปรียงที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 9.8 เดือน หลังการก่อสร้าง (ทินกร, 2528)

วรวิทย์ (2546) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การทรุดตัวของหน่วยเบริงบริเวณคอสะพานด้วยวิธีทางตัวเลขโดยการพิจารณาหน่วยเบริงเป็นระบบฐานรากเสาเข็มแบบ 2 มิติ และหาผลเฉลย

ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) ที่สะพานคลองปลัดเปรียง บนทางหลวงสายบางนา-บางพระกมมีความยาวทั้งสิ้น 55 กิโลเมตร ที่ถูกสร้างมาเป็นเวลาประมาณ 17.3 ปี และนำข้อมูลการทรุดตัวที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายปริมาณการทรุดตัวลักษณะ โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กยึดหัวเสาเข็มหนา 0.2 เมตร ความยาวประมาณ 45 เมตร วางอยู่บนเสาเข็มซึ่งช่วงที่ยาวที่สุดติดกับคอสะพานยาว 22.78 เมตร และสั้นที่สุด 1.95 เมตร ในส่วนปลายของหน่วยแบร์ริง โดยใช้เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.22 x 0.22 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2.5 เมตร ดินถมคันทางมีความสูงประมาณ 2 เมตร ดังรูปที่ 2.31 จากผลการวิเคราะห์ของพบว่าคันทางส่วนต่อเนื่องมีผลต่อการทรุดตัวในช่วงปลายของหน่วยแบร์ริง โดยจะพยายามจุดให้เสาเข็มในช่วงนี้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นเพื่อเชื่อมต่อการทรุดตัวที่สูงกว่าของตัวคันทางเอง

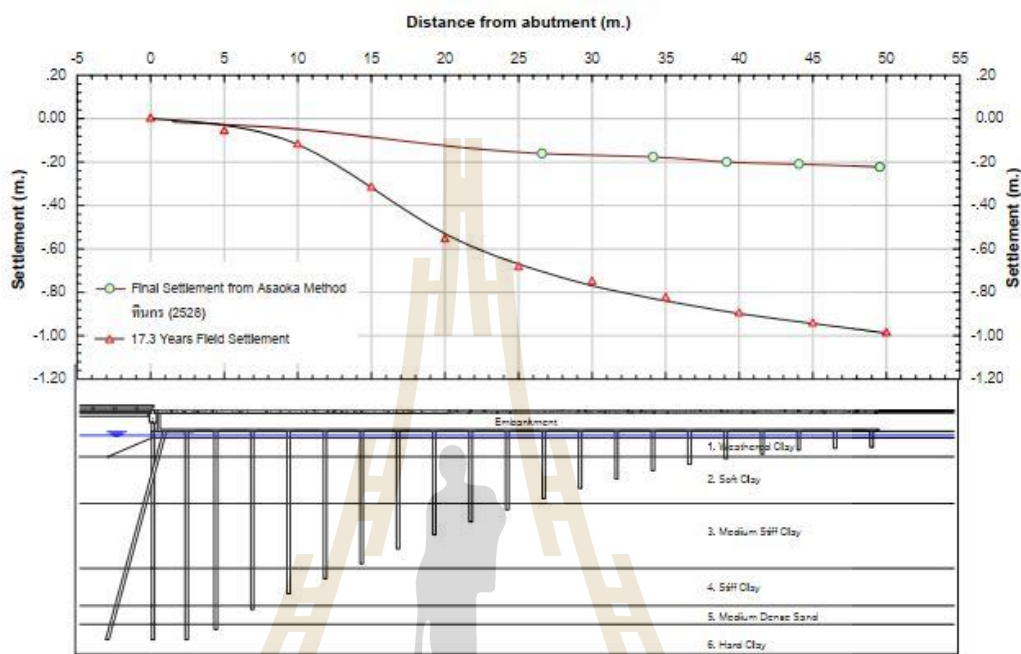


รูปที่ 2.31 แบบ โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวสะพานคลองปลัดเปรียง กม.6+402 (ทินกร, 2528)

โดยปัจจัยที่เกิดการทรุดตัวมากจากรูปที่ 2.32 จากผลงานวิจัยของของ นพดล (2542) พบว่าการทรุดตัวทั้งหมดของแผ่นดิน (Total Land Subsidence) เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯ เป็นผลทำให้การยุบตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) รวมกับ ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ประมาณร้อยละ 40-60% ซึ่งเมื่อพิจารณาบริเวณคลองปลัดเปรียงทำให้สามารถประมาณได้ว่า



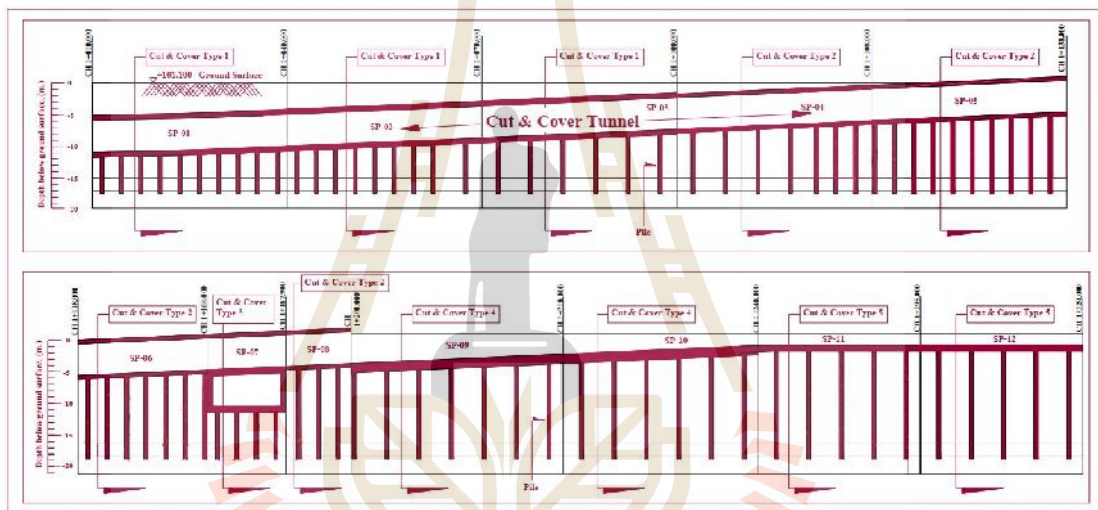
ตลอดระยะเวลา 17.3 ปี หลังจากการก่อสร้าง การสูบน้ำบาดาลในระดับลึกทำให้ชั้นดินเหนียวเหนือชั้น Medium Dense Sand ขึ้นมาเกิดการยุบตัวรวมกันประมาณ 21-31 เซนติเมตร



รูปที่ 2.32 การทรุดตัวของหน่วยแบริงที่เกิดขึ้นในเวลา 17.3 ปี ของหน่วยแบริงบริเวณคลองปลัดเปรียง (วรวิทย์, 2546)

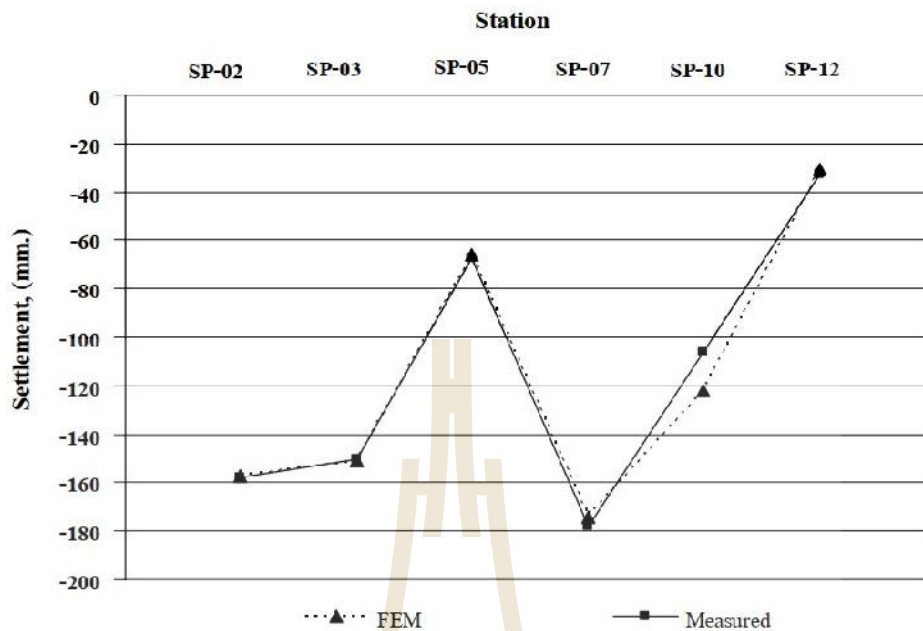
จากการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มและแผ่นพื้นคอนกรีต พบว่าในช่วงที่เป็นเสาเข็มยาว น้ำหนักกระทำบนแผ่นพื้นคอนกรีตส่วนใหญ่จะถูกรับเอาไว้โดยเสาเข็มและถ่ายลงสู่ดินแข็งในระดับลึก มีพฤติกรรมค่อนข้างมาทางด้านฐานรากแบบ Free Standing Pile Group ส่วนบริเวณที่มีเสาเข็มสั้นน้ำหนักส่วนเกินจากกำลังต้านทานของเสาเข็มจะถูกรับเอาไว้โดยแผ่นพื้นคอนกรีตในรูปแบบแรงดันที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับพื้นคอนกรีต ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเสาเข็มสั้นลงจนใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจากพื้นคอนกรีตทำให้มีพฤติกรรมค่อนข้างมาทางด้าน (Raft Foundation) และได้มีข้อเสนอแนะในการออกแบบหน่วยหน่วยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นช่วงที่ทรุดตัวน้อย เสาเข็มควรมีความยาวขงอยู่ในชั้นดินแข็งกับเข็มต่อม่อสะพาน และการลดหลั่นความยาวเสาเข็มในช่วงทรุดตัวน้อยควรทำอย่างค่อยเป็นค่อยไปสู่ชั้นดินอ่อนเล็กน้อย, ส่วนที่สองเป็นช่วงเชื่อมต่อการทรุดตัว และส่วนสุดท้ายเป็นช่วงที่เกิดการทรุดตัวมาก

นรากร (2546) ได้ทำการศึกษาการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่กรณีเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกไม่เพียงพอจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงิน โดยวิธีการถมกลับจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่อยู่บนฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยทำการเก็บข้อมูลการทรุดตัวในระหว่างทำการก่อสร้างและหลังทำการก่อสร้างเป็นเวลาประมาณ 25 เดือน และนำข้อมูลการทรุดตัวที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้ในการคาดคะเนปริมาณการทรุดตัว โดยลักษณะโครงสร้างของอุโมงค์ เป็นโครงสร้างประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ มีความยาวประมาณ 30 เมตร โดยจุดเริ่มต้นของอุโมงค์จะอยู่ชั้นดินเหนียวอ่อนและมีระดับความลึกเริ่มต้นที่ -11.694 เมตร จนถึงระดับผิวดิน โดยอุโมงค์มีความชัน 4.2-4.5 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ลักษณะโครงสร้างอุโมงค์และลักษณะฐานรากเสาเข็มแผ่ (นรากร, 2546)

จากผลการวิเคราะห์ของการทรุดตัวของอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 2.34 พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับสภาพการทรุดตัวจริงในสนาม โดยบริเวณ SP02, SP03 และ SP07 จะมีค่าการทรุดตัวเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณ SP05, SP10 และ SP12 เนื่องจากเสาเข็มมีความสั้นทำให้ดินบริเวณนี้ต้องรับกำลังแบกทานมากมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) อยู่ระหว่าง 1.4-1.6 ซึ่งทำให้มี Serviceability requirement ไม่เพียงพอ จากพฤติกรรมดังกล่าวพบว่าอุโมงค์แห่งนี้ใช้จำนวนและความยาวเสาเข็มในการรองรับน้ำหนักไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับค่าการทรุดตัวจากการตรวจในสนาม  
(นรากร, 2546)

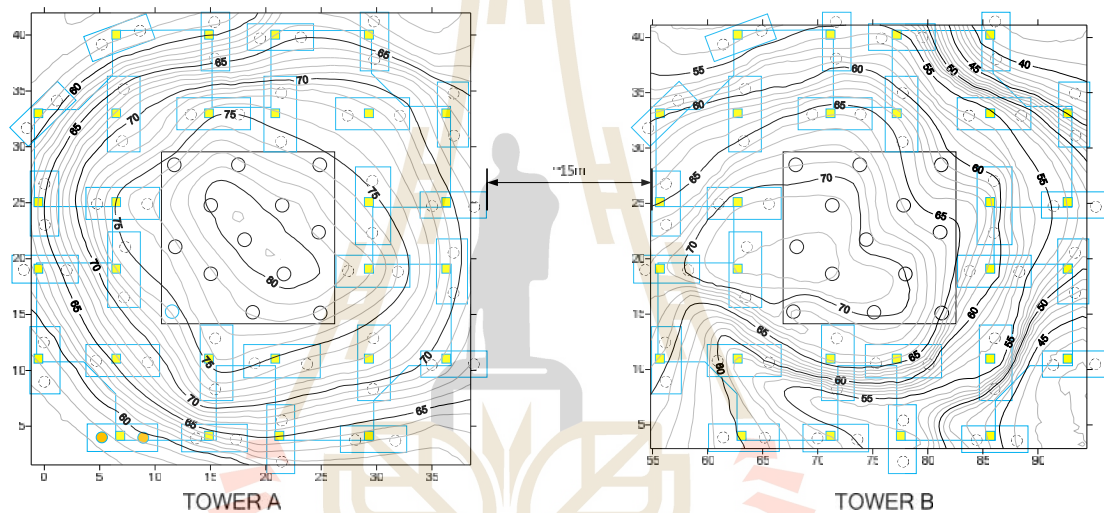
นรากร (2521) สรุปว่าฐานรากเสาเข็มแผ่จะมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักโดยเสาเข็มจะทำหน้าที่รับน้ำหนักก่อนดินที่อยู่ใต้ฐานรากจนกระทั่งถึงจุดกำลังประลัยของเสาเข็ม เนื่องจากเสาเข็มมี สติฟเนสมากกว่าดินที่อยู่ใต้ฐานราก และน้ำหนักที่เกินความสามารถของเสาเข็มจะถูกส่งถ่ายให้แก่ดินที่อยู่ใต้ฐานรากรับแรงแบกทานต่อไป

## 2.5 งานวิจัยที่ได้มีการวิเคราะห์และตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่

ชานินทร์ (2528) ได้บันทึกการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อก่อสร้างเสร็จ พบว่ามีการทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบถึง 60 เท่า สำหรับอาคารธนาคารกรุงเทพ สำนักงานใหญ่ซึ่งใช้เสาเข็มแบบ barrette 0.8mx2.0m tip -30m สำหรับอาคารไทปิง ซึ่งใช้เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5m tip -32m การ ทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบเป็น 10.7 เท่า ดังตารางที่ 2.9 โดยการทรุดตัวของอาคารไทปิง tower A และ tower B มีลักษณะเป็นรูปถ้วย (dish shape) ที่การทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ส่วนกลางของอาคาร และการทรุดตัวจะลดลงบริเวณขอบของอาคาร ดังรูปที่ 2.35

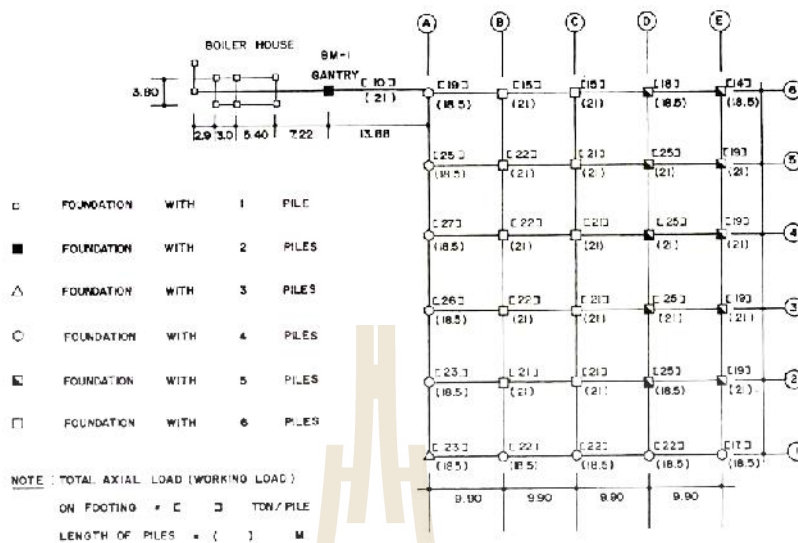
ตารางที่ 2.9 การทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อทดสอบและการทรุดตัวของอาคาร (ชานินทร์, 2528)

โครงการ	การทรุดตัว	
	ทดสอบที่น้ำหนักบรรทุก ออกแบบ	การทรุดตัวของฐานราก เมื่อสร้างเสร็จ
ธนาคารกรุงเทพ สำนักงานใหญ่	2.5mm at 635 ton	150mm
อาคารไทปิง tower A	9mm at 1100 ton	96mm
อาคารไทปิง tower B	9mm at 1100 ton	96mm

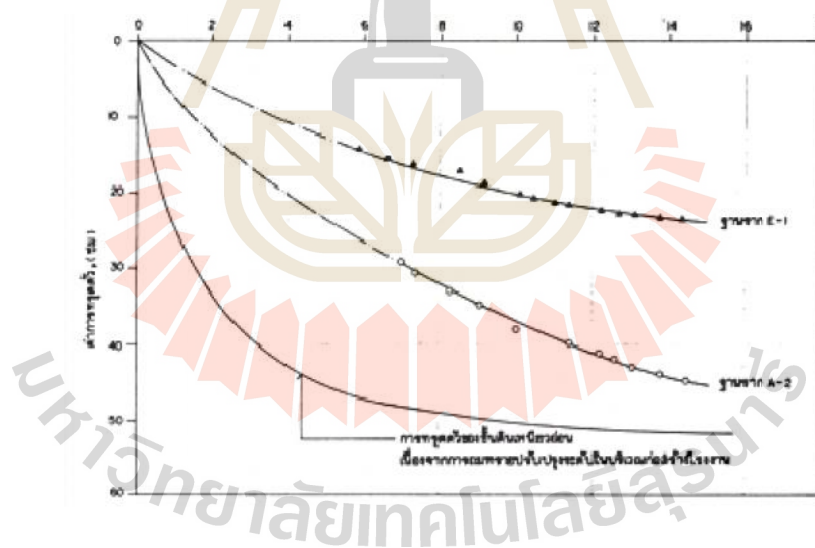


รูปที่ 2.35 เส้นชั้นการทรุดตัวของอาคารไทปิง tower A และ tower B ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปกล้วยที่มี  
การทรุดบริเวณฐานกลางอาคารสูงกว่าที่ขอบอาคารวาดใหม่จากงานเดิมของ (ชานินทร์,  
2528)

ปทุม (2529) ได้ศึกษาวิจัยการคาดคะเนการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มในชั้นดินเหนียว  
กรุงเทพฯของอาคารโรงงาน โดยลักษณะโครงสร้างเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นเดียว เนื่องจาก  
บริเวณก่อสร้างมีลักษณะเป็นลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา เพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมได้มีการถมทรายปรับ  
ระดับ สูงจากระดับผิวดินเฉลี่ย 1.50 เมตร ฐานรากเป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่มมีจำนวนเสาเข็มอยู่  
ระหว่าง 1-6 ต้น เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.25 x 0.25 เมตร มีความยาว  
เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 18.50-21.00 เมตร ทำการก่อสร้างโดยการตอกผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนและ  
ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง โดยมีตำแหน่งของฐานรากเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ลักษณะของฐานรากเสาเข็ม นำหนักกระทำเสาเข็มต่อดัน และ ปริมาณเสาเข็มในฐานรากของอาคาร โรงงาน พระประแดง (ปทุม, 2529)



รูปที่ 2.37 การทรุดตัวของฐานราก E-1 และ A-2 (ปทุม, 2529)

จากรูปที่ 2.37 แสดงถึงผลจากการตรวจวัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามของฐานราก E-1 นั้นมีค่าสูงกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบโดยมีอัตราส่วนถึง 60 เท่า และพบว่าจากการวิเคราะห์ความสามารถรับน้ำหนักของฐานราก อาคาร โรงงาน พบว่าฐานรากบางส่วนไม่สามารถรับน้ำหนักกระทำได้นี้เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกจร



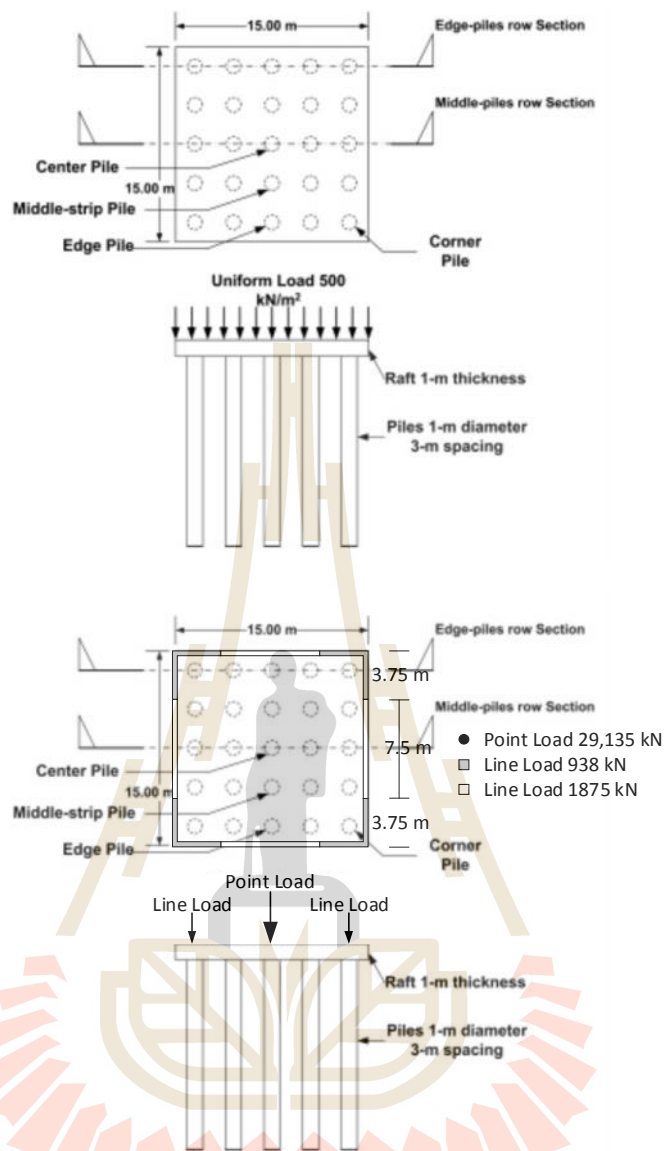
ซึ่งรวมผลของแรงกดลงในเสาเข็ม โดยผู้ออกแบบไม่ได้คำนึงถึงผลของแรงกดในเสาเข็ม และผลของการใช้ load/pile ของฐานรากแต่ละฐานรากไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดการ Redistribution ของน้ำหนักกระทำต่อฐานราก เนื่องจากการวิบัติของฐานรากอันอื่น ดังนั้นอัตราการทรุดตัวของฐานราก E-1 อาจไม่ได้เกิดจากน้ำหนักกระทำจากน้ำหนักโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุกจรและแรงกดในเสาเข็ม ของฐานราก E-1 เพียงอย่างเดียว ซึ่งการ Redistribution จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของฐานรากใกล้เคียงฐานราก E-1

Amornfa (2012) ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ระบบฐานรากเสาเข็มแผ่โดยการเปรียบเทียบระหว่างวิธีแผ่นบางบนสปริง (Plate on spring) กับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ ซึ่งเป็นวิธีที่จะสามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและดิน โดยคุณสมบัติชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2.10 สำหรับฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กใช้แบบจำลองเป็น linear elastic โดยใช้ค่า Poisson' ratio เป็น 0.2 และค่า Young's modulus เป็น 28 MPa และ 26 MPa ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณาประเภทของน้ำหนักกระทำต่อฐานรากเสาเข็มแผ่ทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ แรงกระทำแบบสม่ำเสมอบนฐานราก และแรงกระทำเป็นเส้นในบริเวณขอบของฐานราก และมีแรงกระทำแบบจุดที่บริเวณส่วนกลางของฐานราก ดังรูปที่ 2.38

ตารางที่ 2.10 สมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Amornfa, 2012)

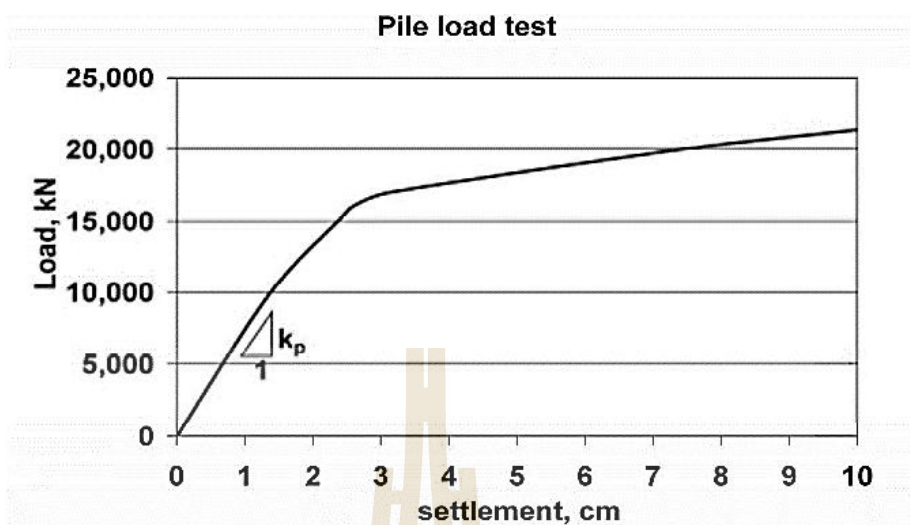
Material	Depth (m)	$E_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	w (degree)	$S_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
Soft to medium clay	0-15	3,000	0.495	15.2	-	20
Stiff clay	15-25	40500	0.495	18.4	-	90
1 <sup>st</sup> sand	25-35	80000	0.3	19.4	35.8	-
Hard clay	35-45	150000	0.495	19.8	-	300
2 <sup>nd</sup> sand	45-55	200000	0.25	20.1	36.2	-



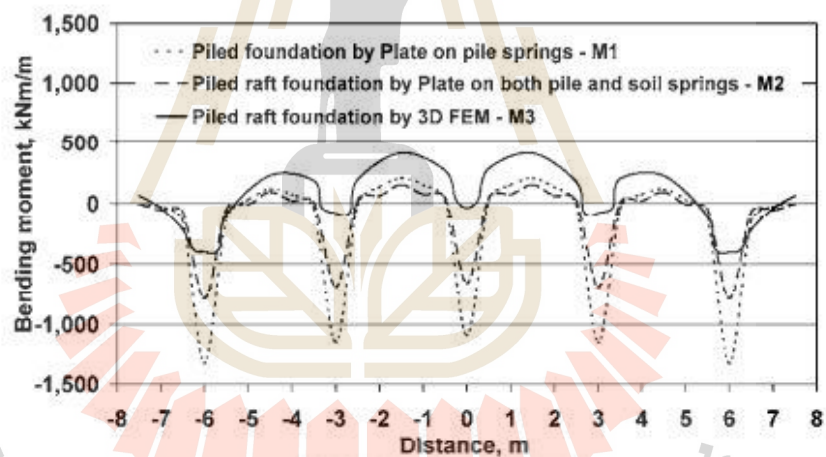


รูปที่ 2.38 ประเภทของแรงกระทำที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Amornfa, 2012)

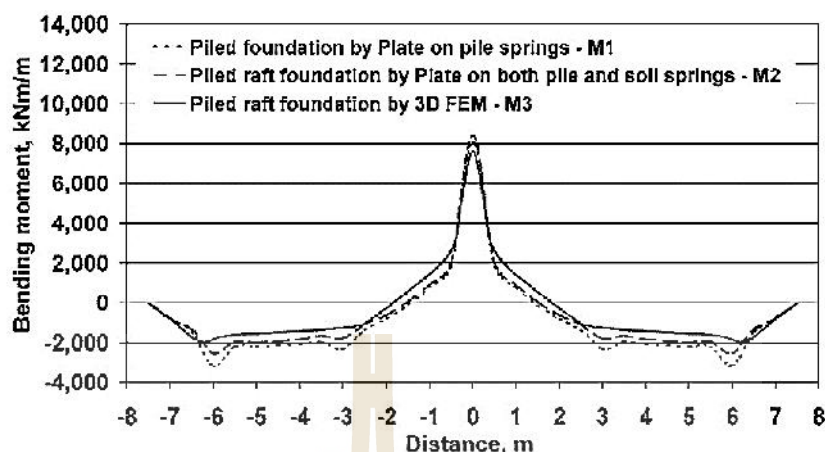
โดยในการออกแบบฐานรากเสาเข็ม โดยวิธีแผ่นบางบนสปริง นั้นจะพิจารณาให้เสาเข็มมีค่าคงที่ของสปริงที่เท่ากันทุกต้น ซึ่งค่าคงที่ของสปริงนี้ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกตลอดภัยของเสาเข็มด้วยวิธี static pile load test ซึ่งเสาเข็มมีค่าสติเฟนสเท่ากับ 680,678 kN/m ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 Load-settlement curve จาก Pile load test (Amornfa, 2012)



รูปที่ 2.40 ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 1 (Amornfa, 2012)

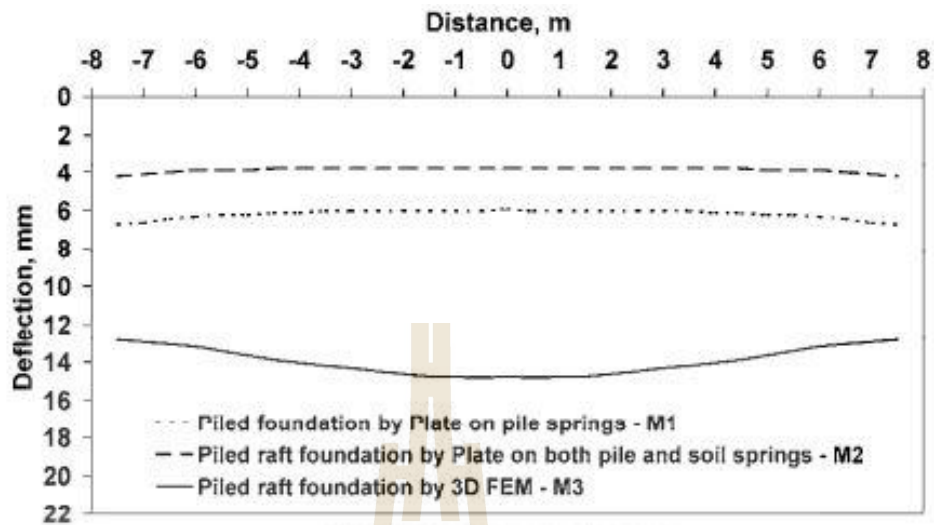


รูปที่ 2.41 ค่าโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 2 (Amornfa, 2012)

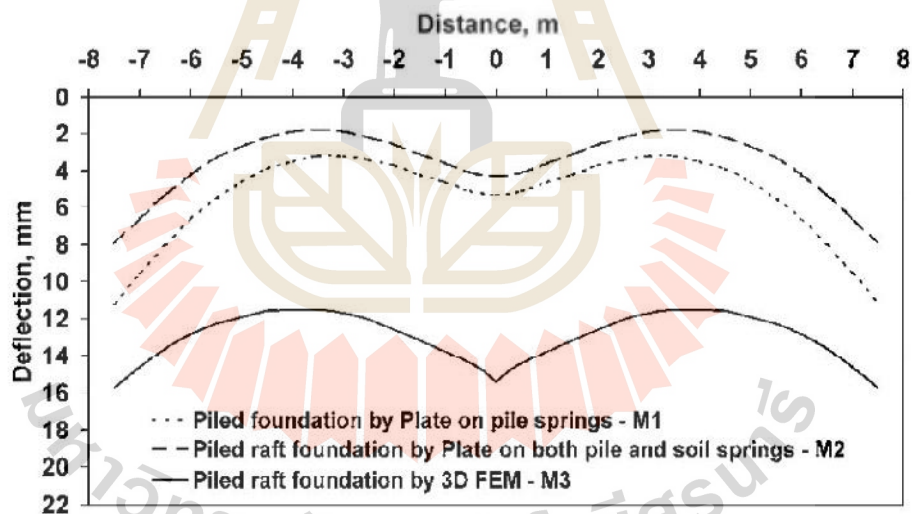
จากดังรูปที่ 2.40 และ 2.41 ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำทั้งสองประเภทนี้ พบว่าวิธีแผ่นบางบนสปริงนั้นเกิดโมเมนต์ที่เป็นลบที่บริเวณหัวเสาเข็มค่อนข้างสูงเนื่องจากสปริงมีลักษณะเป็นจุดที่ไม่สามารถกำหนดให้สปริงมีพื้นที่เท่ากับเสาเข็มได้และมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของฐานรากเสาเข็มและในกรณีเพิ่ม soil springs ให้กับฐานรากทำให้สามารถรับแรงจากเสาเข็มบางส่วนโดยแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มมีประมาณ 77% ของน้ำหนักกระทำทั้งหมดและที่เหลือประมาณ 23% เป็นการถ่ายแรงลงสู่ฐานรากโดยตรงส่งผลให้โมเมนต์ที่เป็นลบมีค่าลดลง ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงแรงกระทำที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเสาเข็มเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 1 (Amornfa, 2012)

Method of analysis	Load on pile, kN (Factor of safety)				% Load shared by piles
	Corner pile	Edge pile	Middle-strip pile	Center pile	
Conventional	4500 (2.50)	4500 (2.50)	4500 (2.50)	4500 (2.50)	100.00
Piled foundation by Plate on pile springs – M1	4748 (2.37)	4527 (2.18)	4322 (2.60)	4296 (2.62)	100.00
Piled raft foundation by Plate on both pile and soil springs – M2	2904 (3.87)	2825 (3.98)	2737 (4.11)	2735 (4.11)	62.37
Piled raft foundation by 3D FEM – M3	3734 (3.01)	3624 (3.10)	3194 (3.52)	3218 (3.50)	76.87



รูปที่ 2.42 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 1 (Amornfa, 2012)

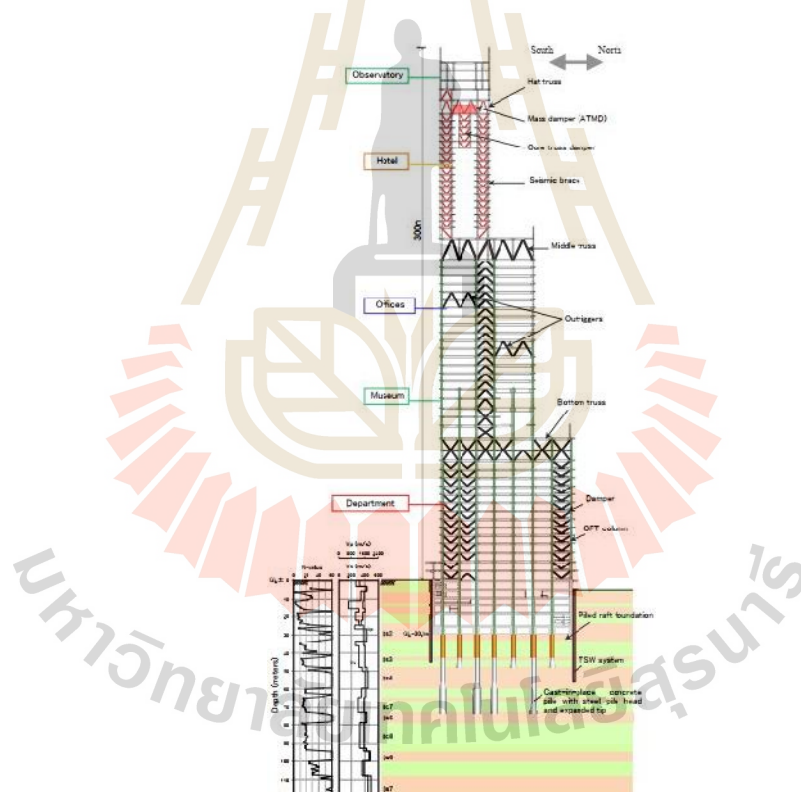


รูปที่ 2.43 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณกลางของฐานรากเนื่องจากแรงกระทำประเภทที่ 2 (Amornfa, 2012)

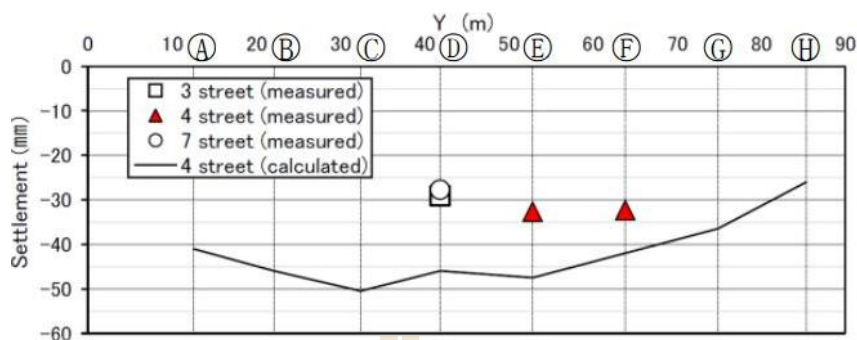
จากผลการทรุดตัวจากรูปที่ 2.42 และ 2.43 พบว่ากราฟมีพฤติกรรมทรุดตัวของของฐานรากเสาเข็มแผ่โดยวิธีไฟในท้อลิเมนต์แบบสามมิติมีการแอ่นตัวตรงกลางมากที่สุดซึ่งเป็นอิทธิพลที่เกิดขึ้นในเสาเข็มกลุ่ม และในการแอ่นตัวตรงกลางนี้จะทำให้ค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อให้มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับความจริง

มากที่สุด จึงได้ทำการเสนอแนวทางการวิเคราะห์วิธีแผ่นบางบนสปริง ให้มีสอดคล้องมากยิ่งขึ้นในการปรับลดค่าสติเฟนสของสปริงของเสาเข็มให้มีค่าต่ำลงโดยมีค่าต่ำที่สุดในบริเวณกลางฐานราก และมีค่ามากขึ้นบริเวณขอบของฐานราก นอกจากนี้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ แสดงให้เห็นว่าในเสาเข็มแต่ละต้นนั้น ไม่ได้รองรับแรงกระทำทั้งหมดและเสาเข็มแต่ละต้นนั้นเกิดแรงกระทำและการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเสาเข็มจึงมีค่าสติเฟนสของสปริงที่ไม่เท่ากัน

Hirakawa (2016) ได้ทำการศึกษาการทรุดตัวและการแบ่งถ่ายแรงของฐานรากเสาเข็มแผ่ของตึกสูง 300 เมตร ในเมืองโอซาก้า ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 2.44 โดยการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มแผ่แบบ top-down method ที่มีชั้นใต้ดิน 4 ชั้น โดยฐานรากวางบนชั้นทรายลึกถึง -30.5 เมตรจากระดับผิวดิน และเสาเข็มหยั่งบนชั้นดินทรายแน่นมากที่ระดับ -70 เมตร และได้เก็บข้อมูลผลการตรวจการทรุดตัวของฐานรากและการแบ่งถ่ายน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับฐานราก



รูปที่ 2.44 ภาพตัดขวางของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ (Hirakawa, 2016)



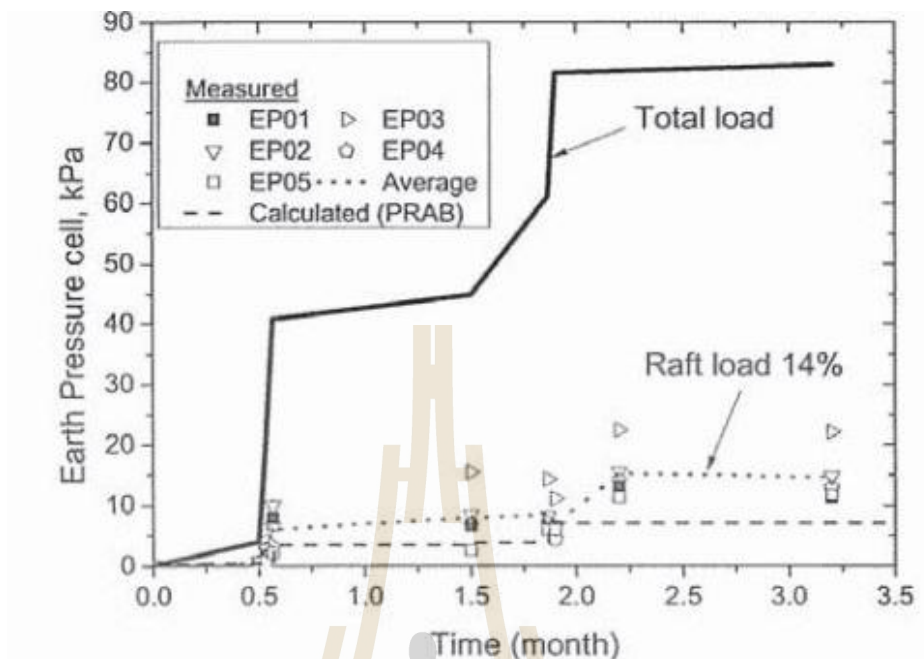
รูปที่ 2.45 ค่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ (Hirakawa, 2016)

จากผลการตรวจวัดการทรุดตัวโดยวัดที่โคนเสาชั้นฐานราก ดังรูปที่ 2.45 พบว่าเมื่อตึกมีน้ำหนักบรรทุกอย่างน้อย 90% ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบโดย working load ซึ่งมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 30-33 มิลลิเมตร โดยฐานรากเกิดการทรุดตัวที่บริเวณส่วนกลางมากที่สุด และมีลักษณะการทรุดตัวเป็นรูปถ้วย และจากการตรวจวัดการถ่าน้ำหนักโดยวัดจากแรงในแนวแกนที่โคนเสาของชั้นฐานรากได้ 73.1 เมกะนิวตัน และน้ำหนักของฐานรากแบบ tributary area เท่ากับ 8 เมกะนิวตัน รวมกันได้ 81.1 เมกะนิวตัน และผลการตรวจวัดแรงดันดินใต้ฐานรากได้ 27 เมกะนิวตัน ดังนั้นทำให้สามารถคำนวณแรงกระทำที่หัวเสาเข็มได้เท่ากับ 54.1 เมกะนิวตัน ซึ่งจากผลการตรวจวัดชี้ให้เห็นว่าฐานรากแผ่สามารถช่วยเสาเข็มในการรับน้ำหนักได้ถึง 33 % ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

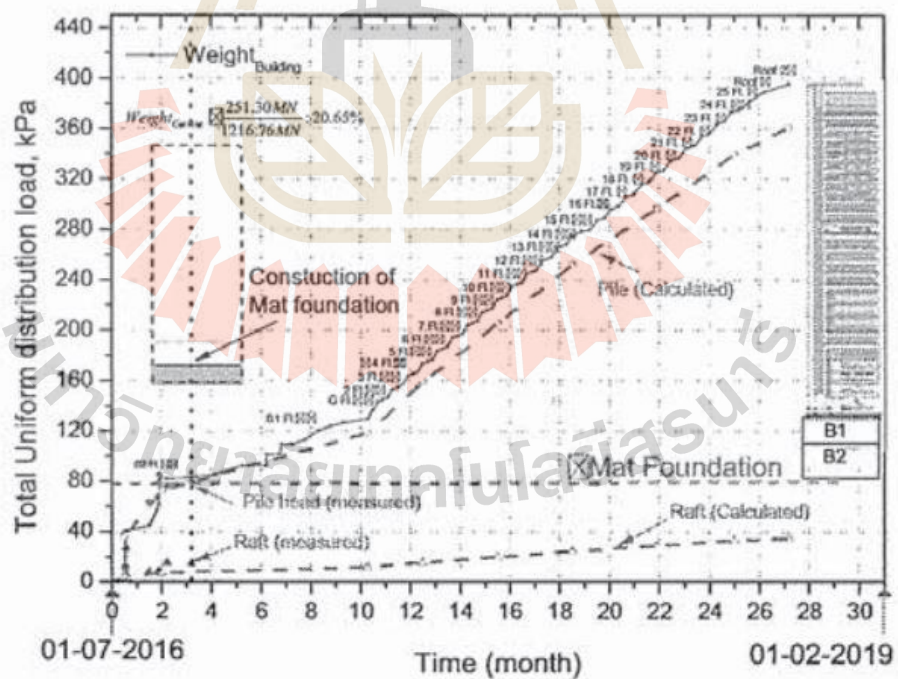
Kongpop (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับน้ำหนักกระจายตัวใต้ฐานรากแผ่ในชั้นดินกรุงเทพฯ ของการก่อสร้างอาคารนวมินทร์บพิตร 84 พรรษา โรงพยาบาลศิริราชซึ่งอาคารสูง 124.25 เมตร จำนวน 24 ชั้น โดยใช้หลักการออกแบบฐานรากเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 มีชั้นใต้ดิน 2 ชั้น ลึก -15.65 เมตร จากระดับผิวดิน โดยมีพื้นที่ 3079 m<sup>2</sup> และได้มีการตรวจวัดข้อมูลในระหว่างการก่อสร้าง โดยตำแหน่งของอุปกรณ์ในการตรวจวัดและลักษณะฐานรากของอาคาร ดังรูปที่ 2.46





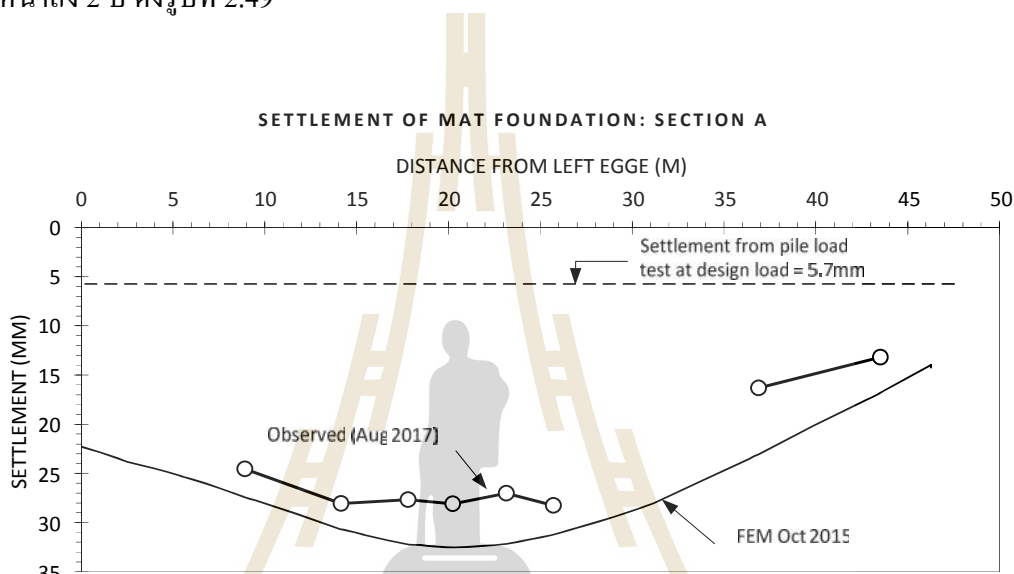


รูปที่ 2.47 ผลการตรวจผลแรงดันดินใต้ฐานราก (Kongpop, 2017)



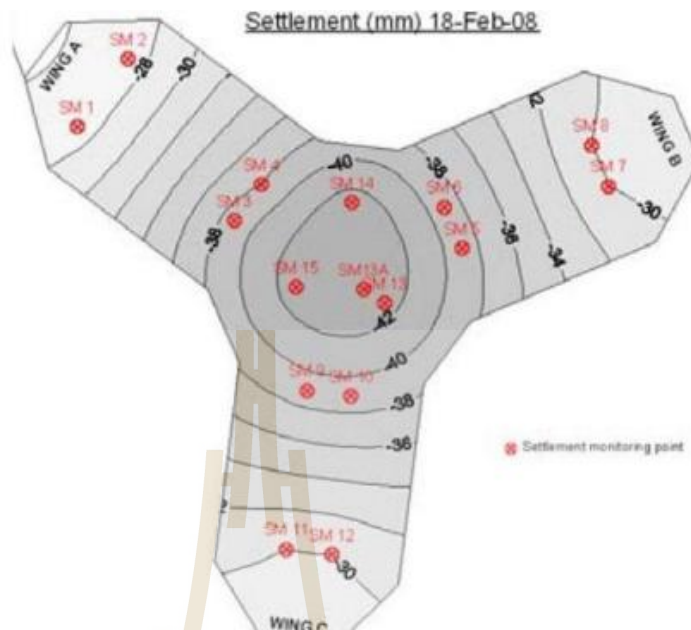
รูปที่ 2.48 ผลการวิเคราะห์การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดระหว่างเสาเข็มกับฐานราก (Kongpop, 2017)

Tanseng (2017) ได้รายงานว่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของอาคารสูง 50 ชั้น ในชั้นดินกรุงเทพฯมีการทรุดตัวสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบอยู่ 5.2 เท่า และการทรุดตัวนี้สอดคล้องกับการทำนายการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ก่อนที่จะมีการก่อสร้างอาคาร ดังนั้นการทรุดตัวของฐานรากอาคารจึงไม่ได้เป็นการทรุดตัวที่ผิดปกติหรือเป็นการทรุดตัวที่เกิดจากความบกพร่องของเสาเข็มแต่อย่างใด เนื่องจากได้ทำการวิเคราะห์และทำนายไว้ล่วงหน้าถึง 2 ปี ดังรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 เปรียบเทียบการทำนายการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ล่วงหน้า 2 ปี กับผลการตรวจวัดหลังจากการก่อสร้าง (Tanseng, 2017)

Gendy (2018) ได้วิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ด้วยโปรแกรม ELPLA โดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงของตึก Burj Khalifa ที่มีความสูงประมาณ 829.8 เมตร จำนวน 163 ชั้น และใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแพรงรับน้ำหนักของอาคาร โดยฐานรากแพรงหนา 3.7 เมตร เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร จำนวน 192 ต้น ยาวประมาณ 47.45 เมตร พบว่าเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 30 เมกะนิวตัน หัวเสาเข็มเกิดการทรุดตัวประมาณ 5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าการทรุดตัวต่ำกว่าค่าการทรุดตัวจากผลการตรวจวัดในระหว่างก่อสร้างเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 8.6 เท่า โดยฐานรากเกิดการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุดเท่ากับ 43 มิลลิเมตร และเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันเท่ากับ 14 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแพะของตึก Burj Khalifa ภายใต้น้ำหนักบรรทุก 80% ของน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด (Gendy, 2018)

## 2.6 ทฤษฎีไฟไนต์อีลิเมนต์

### 2.6.1 การคำนวณโดยหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล

แบบจำลองของวัสดุที่ใช้ใน PLAXIS 3D Tunnel เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราหน่วยแรงประสิทธิผล (Stress rate,  $\{\dot{\sigma}'\}$ ) และอัตราความเครียด (Strain rate,  $\{\dot{V}'\}$ ) ดังสมการที่ 2.3

$$\{\dot{\sigma}'\} = [M]\{\dot{V}'\} \quad (2.3 \text{ a})$$

$$\{\dot{\sigma}'\} = \{\dot{\sigma}'_{xx}, \dot{\sigma}'_{yy}, \dot{\sigma}'_{zz}, \dot{\sigma}'_{xy}, \dot{\sigma}'_{yz}, \dot{\sigma}'_{xz}\}^T \quad (2.3 \text{ b})$$

$$\{\dot{V}'\} = \{\dot{V}'_{xx}, \dot{V}'_{yy}, \dot{V}'_{zz}, \dot{X}'_{xy}, \dot{X}'_{yz}, \dot{V}'_{xz}\}^T \quad (2.3 \text{ c})$$

เมื่อ  $\{\dot{\sigma}'\}$  คือ Effective stress rate

$\{\dot{V}'\}$  คือ Strain rate

[M] คือ Material stiffness matrix

เมื่อใช้กฎของฮุก (Hooke's Law) สำหรับพฤติกรรมแบบ Isotropic and linear elastic จะมีความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ ดังสมการที่ 2.4

$$\begin{Bmatrix} \tau'_{xx} \\ \tau'_{yy} \\ \tau'_{zz} \\ \tau'_{xy} \\ \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\epsilon')(1+\epsilon')} \begin{bmatrix} 1-\epsilon' & \epsilon' & \epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon' & 1-\epsilon' & \epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon' & \epsilon' & 1-\epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\epsilon' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\epsilon' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\epsilon' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_{xx} \\ \dot{v}_{yy} \\ \dot{v}_{zz} \\ \dot{v}_{xy} \\ \dot{v}_{yz} \\ \dot{v}_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $E'$  คือ Effective Young's modulus

$\epsilon'$  คือ Effective Poisson's ratio

Worth (1985) กล่าวว่า การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี Elastoplastic ถือว่าเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เนื่องจากวัสดุโดยทั่วไปมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Elastoplastic material คือมีการเคลื่อนตัวทั้งในสภาวะ Elastic และที่สภาวะ Plastic ดังสมการที่ 2.5

$$\{V\} = \{V^e\} + \{V^p\} \quad (2.5 a)$$

$$\{\dot{V}\} = \{\dot{V}^e\} + \{\dot{V}^p\} \quad (2.5 b)$$

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus กับ Stiffness modulus อื่นๆ เช่น Shear modulus ( $G$ ), Bulk modulus ( $K$ ) และ Oedometer modulus ( $E_{oed}$ ) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.6

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6a)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.6b)$$



$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (2.6c)$$

### 2.6.2 การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล

การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำด้วยหน่วยแรงประสิทธิผล ทำได้โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ประสิทธิผล ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้เป็นการพิจารณาพฤติกรรมและแรงดันน้ำในดินแยกออกจากกัน แต่จะอยู่รวมกันในขอบเขตของปัญหาที่ทำกรวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ แบบนี้จะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวเนื่องจากการทดสอบของดินเหนียวมักจะหาค่าพารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงรวม ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงประสิทธิผลจะได้มาจากการแปลงค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงรวมตามสมการที่ 2.7

$$E = \frac{2(1-\nu')}{3} E_u \quad (2.7)$$

เมื่อ	$E$	คือ	Effective Young's modulus
	$E_u$	คือ	Undrained Young's modulus
	$\nu'$	คือ	Drained Poisson's Ratio

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ของ Hook's Law แทนค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่เป็น Elastic จะได้ดังสมการที่ 2.8 และเมื่ออินทิเกรตสมการ 2.4 จะได้สมการที่ 2.9 ในรูปของเมตริกซ์

$$\{\mathbf{T}'\} = [D^e]\{\mathbf{V}^e\} = [D^e](\{\mathbf{V}\} - \{\mathbf{V}^p\}) \quad (2.8)$$

เมื่อ	$[D^e]$	คือ	Stiffness Matrix
-------	---------	-----	------------------

$$\begin{Bmatrix} \dot{V}_{xx}^e \\ \dot{V}_{yy}^e \\ \dot{V}_{zz}^e \\ \dot{X}_{xy}^e \\ \dot{X}_{yz}^e \\ \dot{X}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon' & -\epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon' & 1 & -\epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon' & -\epsilon' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T}'_{xx} \\ \mathbf{T}'_{yy} \\ \mathbf{T}'_{zz} \\ \mathbf{T}'_{xy} \\ \mathbf{T}'_{yz} \\ \mathbf{T}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$



ดังนั้น จะสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดัง

สมการ 2.10

$$\begin{Bmatrix} \dot{V}_{xx}^e \\ \dot{V}_{yy}^e \\ \dot{V}_{zz}^e \\ \dot{X}_{xy}^e \\ \dot{X}_{yz}^e \\ \dot{X}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon' & -\epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon' & 1 & -\epsilon' & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon' & -\epsilon' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\tau}'_{xx} - \dot{\tau}'_w \\ \dot{\tau}'_{yy} - \dot{\tau}'_w \\ \dot{\tau}'_{zz} - \dot{\tau}'_w \\ \dot{\tau}'_{xy} \\ \dot{\tau}'_{yz} \\ \dot{\tau}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

### 2.6.3 การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงรวม

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอัตราหน่วยแรงรวม (Total stress rate,  $\dot{\tau}'$ ) กับอัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Poisson's ratio,  $\epsilon_u$ ) ดังสมการที่ 2.11

$$\begin{Bmatrix} \dot{V}_{xx}^e \\ \dot{V}_{yy}^e \\ \dot{V}_{zz}^e \\ \dot{X}_{xy}^e \\ \dot{X}_{yz}^e \\ \dot{X}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_u & -\epsilon_u & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon_u & 1 & -\epsilon_u & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon_u & -\epsilon_u & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\epsilon_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\tau}'_{xx} \\ \dot{\tau}'_{yy} \\ \dot{\tau}'_{zz} \\ \dot{\tau}'_{xy} \\ \dot{\tau}'_{yz} \\ \dot{\tau}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

ในเชิงทฤษฎี  $\epsilon_u$  จะมีค่าเท่ากับ 0.5 เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ดังนั้น ในการสมมุติพฤติกรรมดังกล่าวจึงใช้ค่า  $\epsilon_u = 0.495$  เมื่อ  $E=E_u$  และ  $W = W_u = 0$

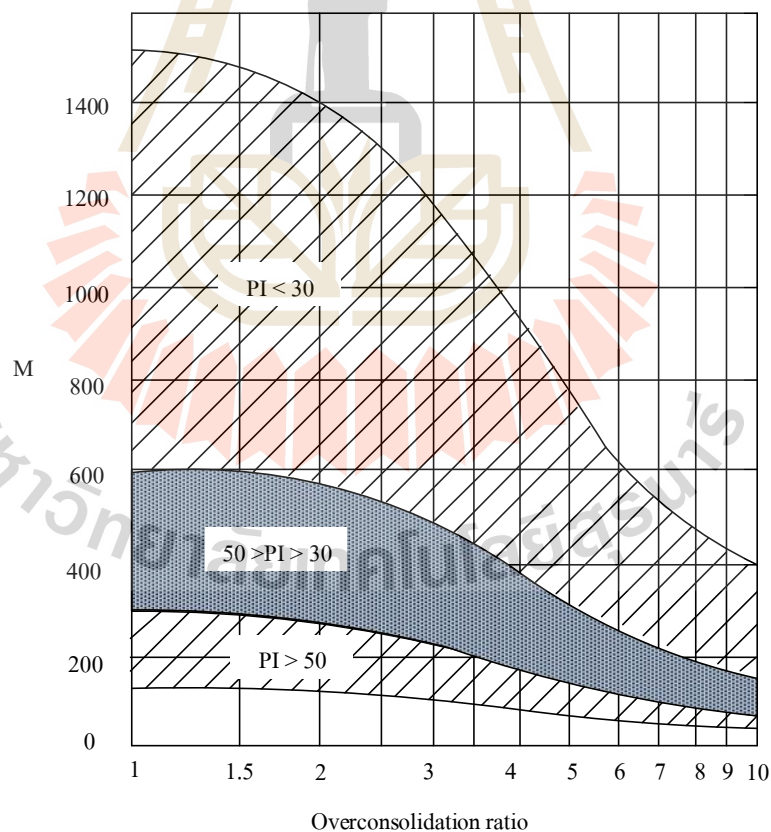
### 2.6.4 โมดูลัสของดิน (Soil modulus)

โมดูลัสของดินเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวิเคราะห์ด้วย FEM ที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน โดยค่าโมดูลัสของดินมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาค่าโมดูลัสของดินอยู่ในเทอมของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบ Empirical ได้ดังสมการที่ 2.12

$$E_u = M \times S_u \quad (2.12)$$

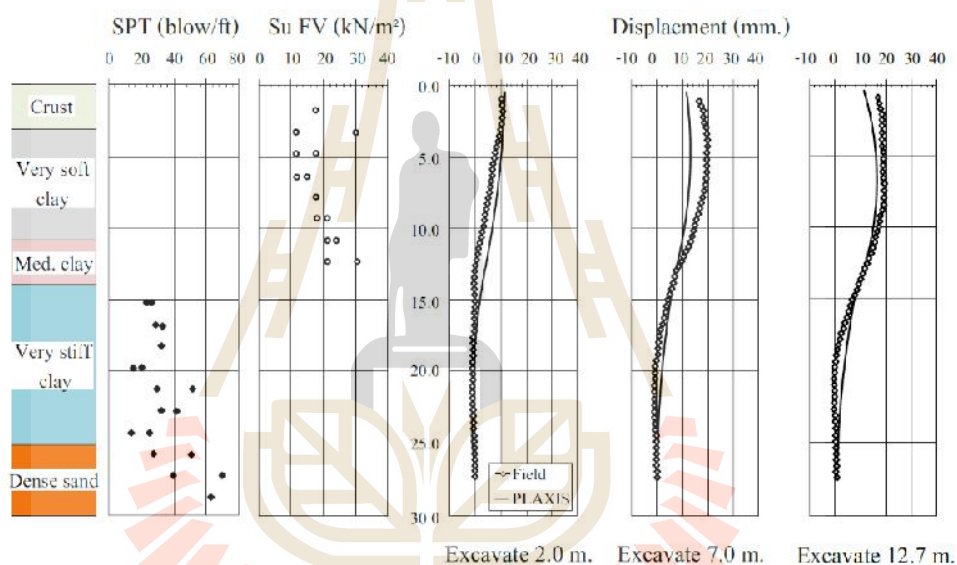
เมื่อ	$E_u$	คือ	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำในช่วง Elastic ก่อนที่จะถึงสภาพ Plastic yielding
	$M$	คือ	Modulus multiplier
	$S_u$	คือ	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

โดยค่า  $E_u$  นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดิน ระดับของหน่วยแรงเฉือนก่อนถึงจุด Yield และหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ  $OCR$  ของดินเหนียว และ  $M$  ขึ้นอยู่กับชนิดของการก่อสร้าง และลักษณะของโครงสร้าง โดย Duncan and Buchighani (1976) แนะนำค่า  $M$  ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 600-1000 สอดคล้องกับค่าประมาณความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_u$  กับ  $S_u$  ของดินเหนียวที่มีคุณสมบัติ  $PI < 30$  เมื่อ  $OCR = 1$  ดังรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 ค่าประมาณ Modulus multiplier ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ  
(Duncan. and Buchighani., 1976)

Teparaksa et al. (1999) ได้อาศัยความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ทำการวิเคราะห์ห้กลับการเคลื่อนตัวด้านข้างเพื่อหาค่าสตีเฟนส์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดิน อาคารแห่งหนึ่งภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ท่าพระจันทร์ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS ซึ่งได้เสนอค่า  $E_u/S_u = 500$  และ  $2000$  สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและ ดินเหนียวแข็งตามลำดับ พบว่าให้ผลการเคลื่อนตัวตามที่ได้คาดคะเนเป็นอย่างดี ดังรูปที่ 2.52 เช่นเดียวกับโครงการ Dindang Underpass และ โครงการอาคาร Sathorn Complex ที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันด้านสิ่งแวดล้อมโดยรอบโครงการ



รูปที่ 2.52 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ผลด้วย FEM (Teparaksa W. et al., 1999)

นอกจากนี้ พงษ์ศิลป์ เดชะคุณวงศ์ (2553) ได้รวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า  $S_u$  ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและชั้นดินเหนียวแข็งที่มีผู้เสนอไว้ ดังตารางที่ 2.13 และ 2.14

ตารางที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า  $S_u$  ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 240-1200S_u$	Duncan and Buchighani	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI = 40-63%, OCR<3 (Tonyagate, 1978)
$E_u = 300-600S_u$	NAVFAC.DM.7.1 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI = 40-63% (Tonyagate, 1978) โดยนำ คุณสมบัติของดิน OCR<3 (Obchittikul, 1989) ค่า $30 < PI < 50\%$ และค่า $PI < 50\%$
$E_u = 500S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพง Flexible wall
$E_u = 2000S_u$	วันชัย (1999)	Back Analysis งานก่อสร้างโคะแพรมวลถล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 480S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้า ใต้ดินกรุงเทพฯ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 1000-1100S_u$	วันชัยและธีรพันธ์ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างโคะแพรมวลถล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 600-700S_u$ ( $E_u = 650-750S_u$ สำหรับ SCC )	นฤทธิ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับ การขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย

ตารางที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า  $S_u$  ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 250-500S_u$	Bjerrum (1964)	$S_u$ = Undrained shear strength unconfined compression test or Vane shear test
$E_u = 500S_u$	Cox (1973)	จากการทดสอบการทรุดตัวของดินในถนน ธนบุรี -ปากท่อ โดย $S_u$ คัดจากค่าเฉลี่ยของชั้น ดินอ่อนที่สุด
$E_u = 100-500S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	Buchighani (1976) OCR < 3 (Tonyagate, 1978) จากการทดสอบ $C_{kou} - T_0$ ตัวอย่างของถนนบางนา-บางปะกง

ตารางที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า  $S_u$  ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ต่อ)

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 125-300S_u$	Parnploy (1985)	$S_{u(FV1)}$ = Uncorrected Field Vane Shear Strength $S_u$ = ได้จากการทดสอบ Vane Shear Test
$E_u = 70-250S_{u(FV1)}$ $E_u = 100-150S_u$	Balasubramaniam บัณฑิต (2529)	เมื่อ $S_{u(FV2)}$ = corrected Field Vane Shear
$E_u = 42-162S_{u(FV1)}$	Brenner (1987)	Brenner (1987) เมื่อ PI=80%
$E_u = 150S_u$	Bergado et al. (1987)	Bangkok Clay เมื่อ PI>50% จากการศึกษาการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางพระก จากหน้าตัด 30จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 150S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Flexible wall
$E_u = 250-500S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Rigid wall
$E_u = 500S_u$	วันชัย (1999)	Back Analysis งานก่อสร้างไดอะแฟรมวอลล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 240S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 120-180S_u$	นฤทธิ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย

### 2.6.5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

สำหรับชั้นดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบ Field vane shear test ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ค่า  $S_u$  จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test,  $q_u$ ) หรือหาจากสมการความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า SPT-N กับ  $S_u$  ที่เสนอโดย วีระนันท์ ปิตุปกรณ (2526) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$S_u = 0.685N \text{ (ต้นต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง} \quad (2.13)$$

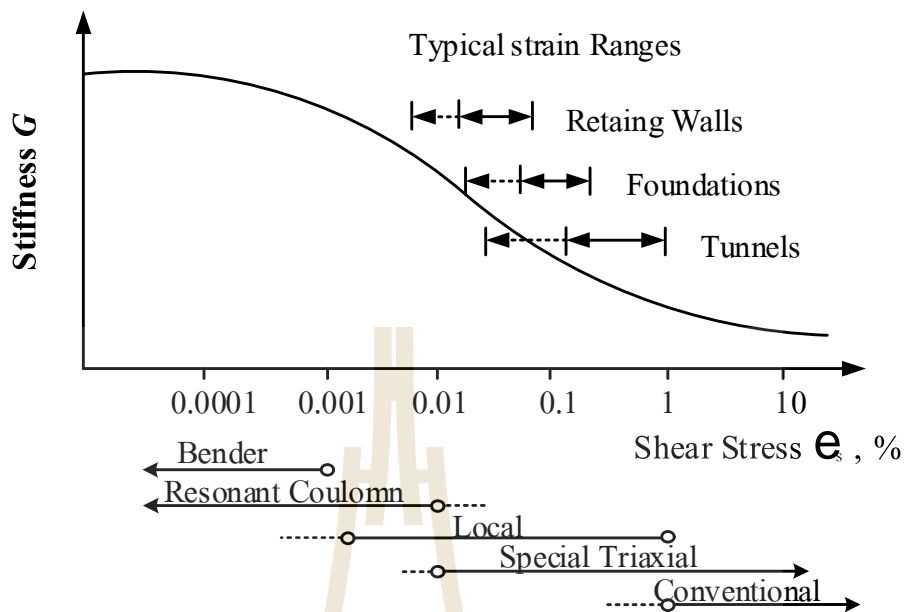
$$S_u = 0.520N \text{ (ต้นต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนครั้งของการตอกต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified soil classification และ ค่า SPT-N ที่ใช้เป็นค่าที่ทดสอบได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้

### 2.6.6 ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง $E_u/S_u$ สำหรับการวิเคราะห์

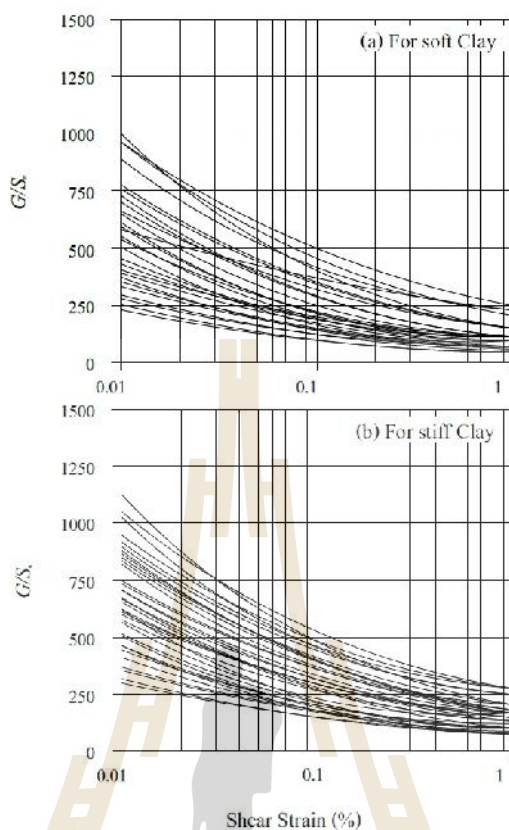
ค่า  $E_u/S_u$  ที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัว จำเป็นต้องใช้การคำนวณกลับของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ( Lateral movement ) จากโครงการที่ได้ทำการศึกษา (Case study) ต่าง ๆ ที่มีการติดตั้ง Inclinomter โดยค่า Young' modulus (  $E$  ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสการเฉือน (Shear modulus ;  $G$  ) ดังที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ 2.6 a ซึ่งค่า Shear modulus เป็นค่าที่ไม่คงที่ โดยจะขึ้นกับค่าระดับความเครียดนั้นๆ Mair (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสการเฉือนลดลงเมื่อค่า Shear strain เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างแต่ละชนิดก่อให้เกิดความเครียดเฉือนขึ้นไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.53 นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการปกติไม่สามารถใช้ระบุโมดูลัสการเฉือนในช่วงที่เกิดความเครียดเฉือนต่ำได้ เนื่องจากความละเอียดของเครื่องมือวัดช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับตัวอย่างทดสอบ และผลเนื่องจากการวัดการยุบตัวนอกตัวอย่าง โดยโครงสร้างที่จำกัดการเคลื่อนตัวเพื่อลดผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงจะเกิดความเครียดเฉือนที่ต่ำ ซึ่งโมดูลัสการเฉือนจะมีค่าสูงกว่าที่จะทดสอบได้โดยวิธีการทดสอบดินแบบปกติ





รูปที่ 2.53 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการเฉือนกับความเครียดเฉือน ( Mair, 1993 )

Teparaksa (1999) ได้รายงานผลการทดสอบสตีเฟนของดินโดยใช้ Self-Boring pressure meter ในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง ดังรูปที่ 2.54 a และ 2.54 b ซึ่งสามารถวัดค่าสตีเฟนในช่วงความเครียดเฉือนต่ำได้



รูปที่ 2.54 โมดูลัสเฉือนของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter เมื่อ (a) สำหรับดินเหนียวอ่อน (b) สำหรับดินเหนียวแข็ง ที่เสนอโดย (Teparaksa, 1999)

### 2.6.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิต ( $K_o^{total}$ )

ศิริมาส วิเศษศรี (2541) ได้แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม จะใช้ค่า  $K_o^{total}$  เนื่องจากการวิเคราะห์ในกรณี Total stress analysis ซึ่งจำเป็นต้องหาค่า  $\tau'_{vo}$  โดยไม่จำเป็นต้อง input ค่า  $u_o$  โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง  $K_o^{total}$  ในการวิเคราะห์หาได้จากสมการ  $K_o^{total}$  ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$K_o = \frac{\tau'_h}{\tau'_v} \quad (2.15)$$

$$K_o^{total} = \frac{\tau'_h}{\tau'_v} = \frac{K_o \tau'_{vo} + u}{\tau'_{vo} + u_o} \quad (2.16)$$

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบสถิต  $K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$  เป็นฟังก์ชันของค่า  $OCR$  โดยสามารถประเมินค่า  $K_o$  ด้วยสมการของ Ladd et al. (1977) ดังสมการที่ 2.17

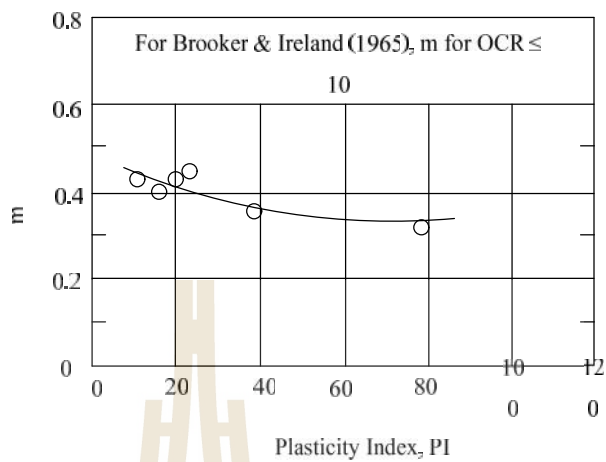
$$K_{o(OC)} = K_{o(NC)} OCR^m \quad (2.17)$$

เมื่อ	$K_{o(OC)}$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตของดินเหนียวอัดตัวแน่นเกินตัว (Overconsolidated clay)
	$K_{o(NC)}$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตของดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidated clay) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ใช้ค่าเท่ากับ $0.60 \pm 0.02$ ที่เสนอโดย Mohr และ Wang (1968)
	$m$	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับดัชนีพลาสติกของดิน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าดัชนีพลาสติกจากการทดสอบดินในโครงการซึ่งมีค่าเท่ากับ 35 จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $m$ ที่เสนอโดย Ladd et. al. (1977) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.55

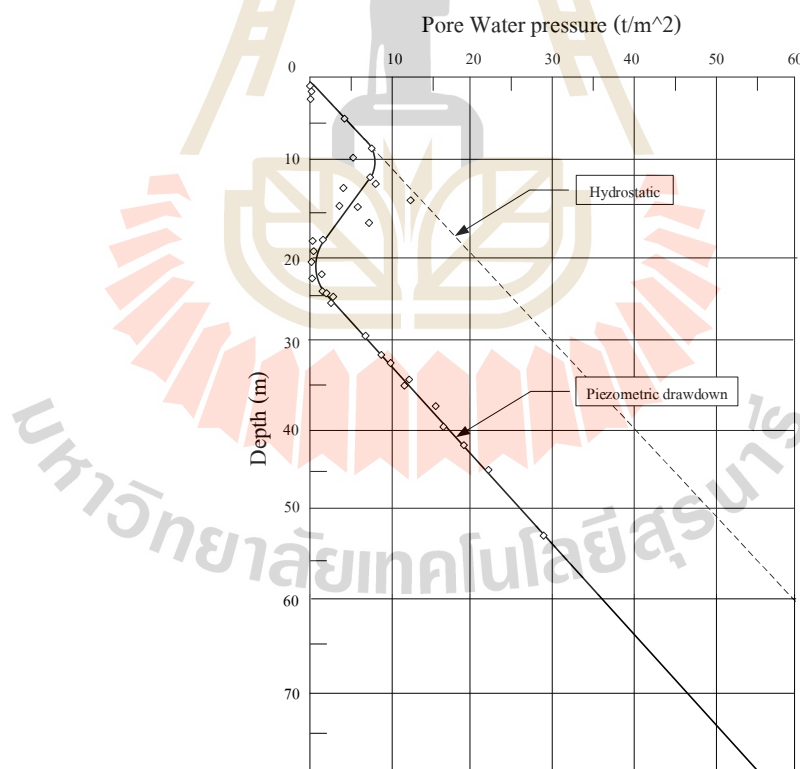
ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่จำกัด  $S_{u(UC)}$  สำหรับหาค่า  $\tau'_{vm}$  ดังสมการที่ 2.18

$$\tau'_{vm} = \frac{S_{u(UC)}}{0.22} \quad (2.18)$$

Teparaksa et al. (1999) ได้รายงานข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดิน (Pore water pressure) ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่มีการก่อสร้างในปี 2542 พบว่า ผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้ทำให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.56 โดยงานวิจัยนี้ใช้ Piezometric drawdown สำหรับการคำนวณแรงดันน้ำ



รูปที่ 2.55 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์  $m$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $K_o$  และ  $OCR$  กับค่าดัชนีพลาสติก (Ladd et al., 1977)



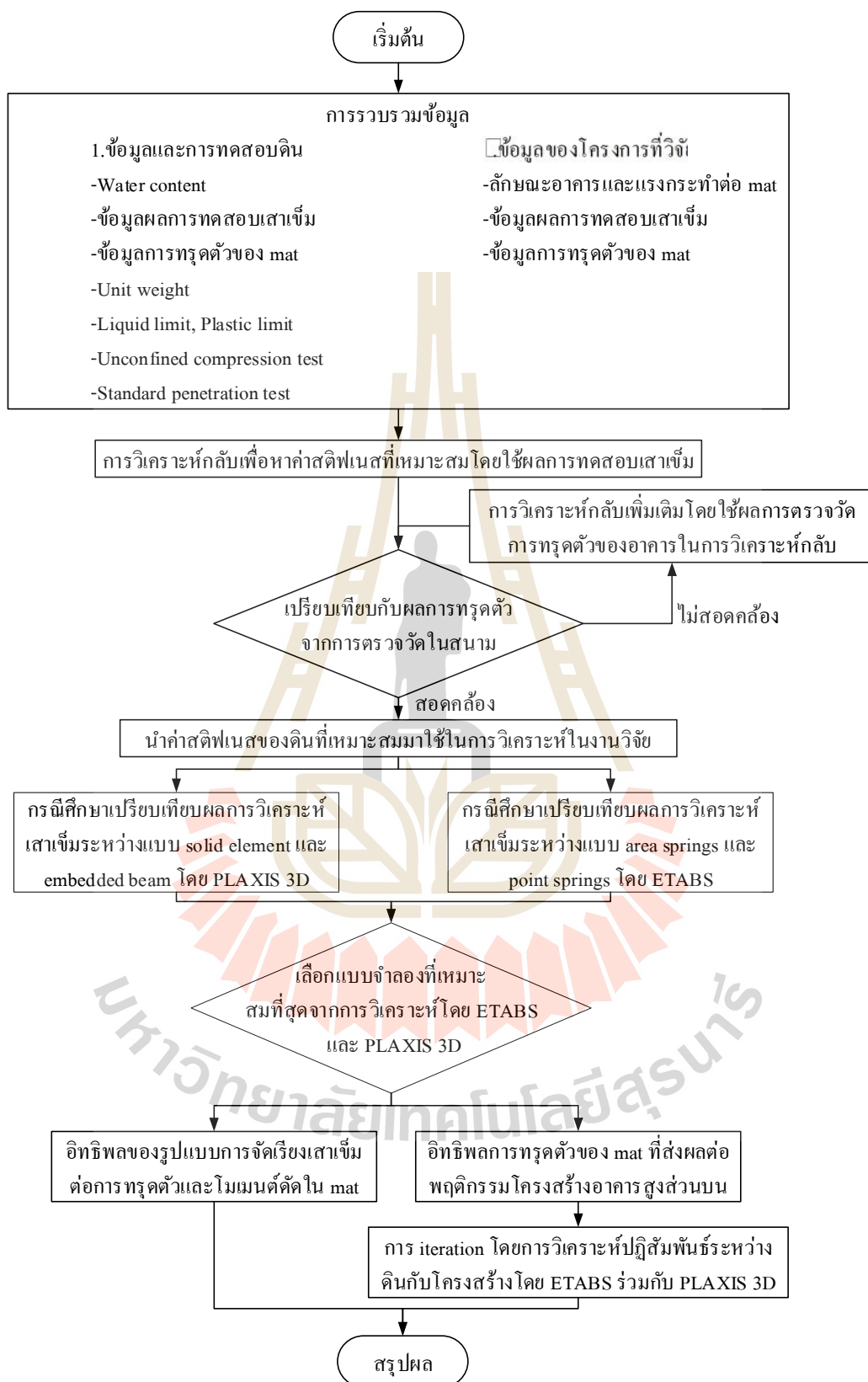
รูปที่ 2.56 แรงดันน้ำในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa et al., 1999)

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการออกแบบฐานรากอาคารสูงของโครงการก่อสร้างอาคาร 51 ชั้นในซอยสุขุมวิท 24 ที่ใช้ฐานรากเป็นฐานรากเสาเข็มแม่, ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินของโครงการ, ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มโครงการทั้งเสาเข็มเก่าและเสาเข็มที่ก่อสร้างใหม่ และได้เก็บข้อมูลการทรุดตัวของฐานรากอาคารโดยได้ตรวจวัดที่พื้นชั้น 1 ของอาคารเพื่อความสะดวกในการตรวจวัด จากนั้นทำการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ PLAXIS 3D การวิเคราะห์ห้กลับใช้ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มและทำการวิเคราะห์ห้โดยแปรผันค่า Young's modulus ที่ทำให้ได้การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำในแบบจำลอง FEM ใกล้เคียงกับการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบมากที่สุด เมื่อได้ค่า Young's modulus จากการวิเคราะห์ห้กลับแล้วนำไปใช้ในการจำลองฐานรากเสาเข็มแม่ของโครงการ โดยใช้น้ำหนักบรรทุกห้ที่ได้จากผู้ออกแบบโครงสร้าง โดยน้ำหนักบรรทุกห้ห้จะคิดเฉพาะ dead load และ superimposed dead load เพื่อให้สอดคล้องกับการทรุดตัวของอาคาร เนื่องจากในขั้นตอนการก่อสร้างอาคารนั้นยังไม่มี live load มากระทำกับอาคาร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำ parametric study โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เพื่อใช้ในการพิจารณาการจัดวางตำแหน่งของเสาเข็ม และพิจารณาการปรับความยาวเสาเข็มให้ mat มีการโก่งตัวห้ทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของ mat ลดลง ในงานวิจัยยังได้ทำการ iteration เพื่อคำนึงถึงอิทธิพลของสติฟเนสของโครงสร้างส่วนบนที่มีผลต่อการทรุดตัวของ mat ห้วิเคราะห์ห้โดยใช้ PLAXIS 3D โดยใช้สติฟเนสของสปริงห้ที่ได้จากการนำแรงห้ที่ได้จาก ETABS มาคำนวณการทรุดตัวและแรงในเสาเข็มแต่ละต้นด้วย PLAXIS 3D เพื่อให้ได้สติฟเนสของสปริงแต่ละต้นแล้ววิเคราะห์ห้แรงในองค์อาคารโดยใช้สติฟเนสของสปริงของเสาเข็มแต่ละต้นห้ที่ได้จากการจำลองใน PLAXIS 3D ซึ่งในงานวิจัยได้ครอบคลุมไปถึงผลของการใช้สปริงในขอบเขตพื้นที่เสาเข็ม (area spring) ห้ห้ทำให้การคำนวณแรงใน mat ตรงกับความเป็นจริงมากกว่าการใช้สปริงห้เป็นเพียงจุดต่อห้ที่ไม่มีพื้นที่ (node spring)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



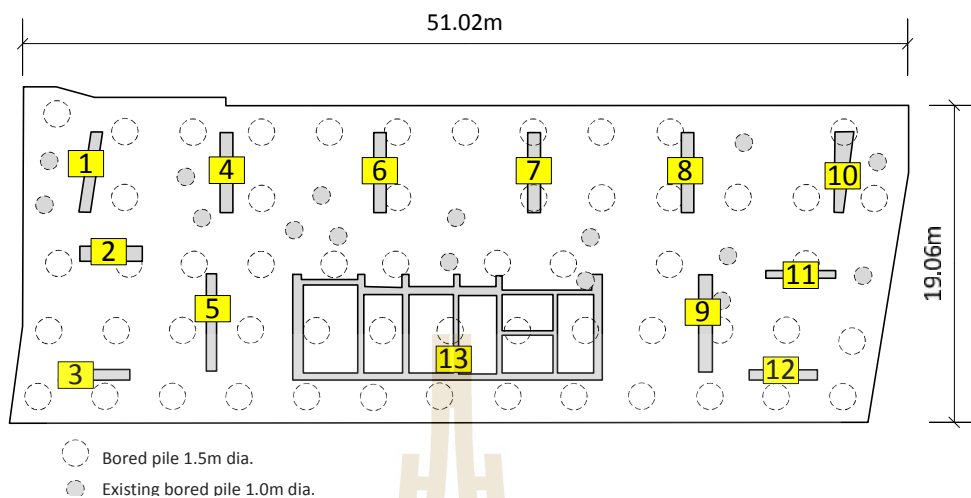
### 3.1 ข้อมูลและผลการเจาะสำรวจดิน

จากการรวบรวมข้อมูล โครงการนี้ได้มีการเจาะสำรวจโดยการใช้เครื่องจักรแบบ Rotary วิธีการเจาะในช่วง 1-2 เมตรแรก ใช้วิธีการเจาะโดย Auger และที่ระดับความลึกลงไปใช้วิธีเจาะแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ ขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำผสม Bentonite ใส่เพื่อป้องกันหลุมพัง การเก็บตัวอย่างดิน ได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพโดยใช้กระบอกบาง เก็บตัวอย่างในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง จากนั้นเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed) ในชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายโดยใช้กระบอกผ่าซีกแบบมาตรฐานพร้อมกับทำการทดสอบ Standard Penetration (SPT) และในงานวิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของอาคารทั้งหมด 3 หลุม ได้แก่ BH-01, BH-02, BH-05 ซึ่งหลุมเจาะ BH-02 อยู่ตรงตำแหน่งของอาคารมากที่สุด โดยผลการเจาะสำรวจดินแสดงในภาคผนวก ก

### 3.2 ข้อมูลของโครงการที่วิจัย

#### 3.2.1 ลักษณะอาคารและแรงกระทำต่อ mat

อาคารที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอาคารสูง 51 ชั้น มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง 51.02 เมตร ยาว 19.06 เมตร รองรับด้วยฐานราก mat หนา 2.50 เมตร วางบนเสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร โดยระดับหัวเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -5.60 เมตร และระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -56.00 เมตร จำนวน 56 ต้น ในอาคารนี้มีเสาเข็มเก่าที่ก่อสร้างไว้แล้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร จำนวน 16 ต้น โดยระดับหัวเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -5.60 เมตร และระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -50.00 เมตร โดยอาคารมีเสาที่มีลักษณะเป็นเหมือนกำแพง (column wall) และมีปล่องลิฟท์ที่เป็นกำแพงแกน (core wall) ดังรูปที่ 3.2 โดยแรงที่กระทำต่อ mat ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยผู้ออกแบบโครงสร้างส่วนบน ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ผัง mat, ตำแหน่งเสาเข็ม, ตำแหน่งของ column wall และ core wall

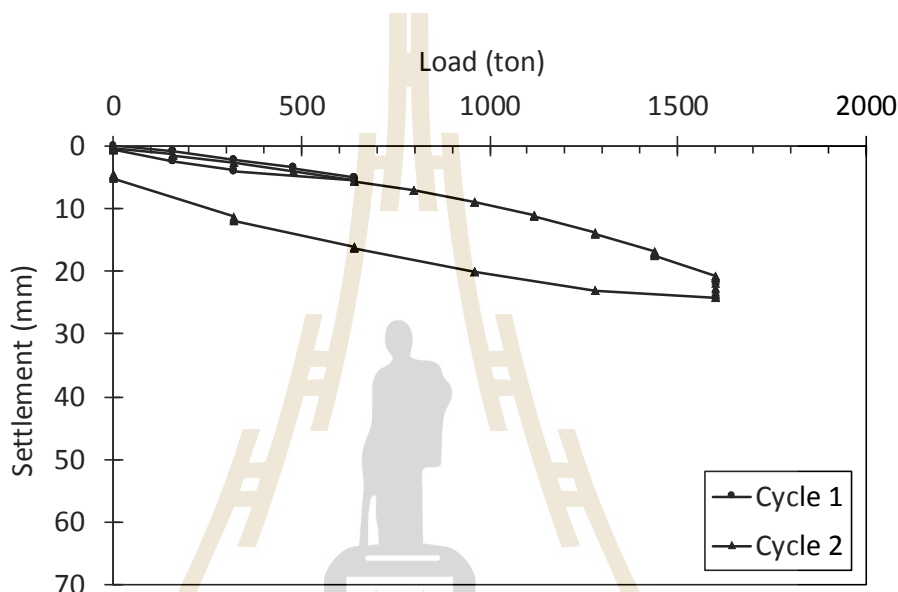
ตารางที่ 3.1 แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มแผ่

Column No.	DL+SDL (ton)	LL (ton)	Total Load (ton)
1	2015	334	2349
2	1665	252	1917
3	1378	156	1534
4	3224	588	3812
5	2093	278	2371
6	3483	629	4112
7	3540	598	4138
8	3154	548	3702
9	2854	391	3245
10	2339	432	2771
11	1407	220	1627
12	1312	154	1466
13	19487	2491	21978

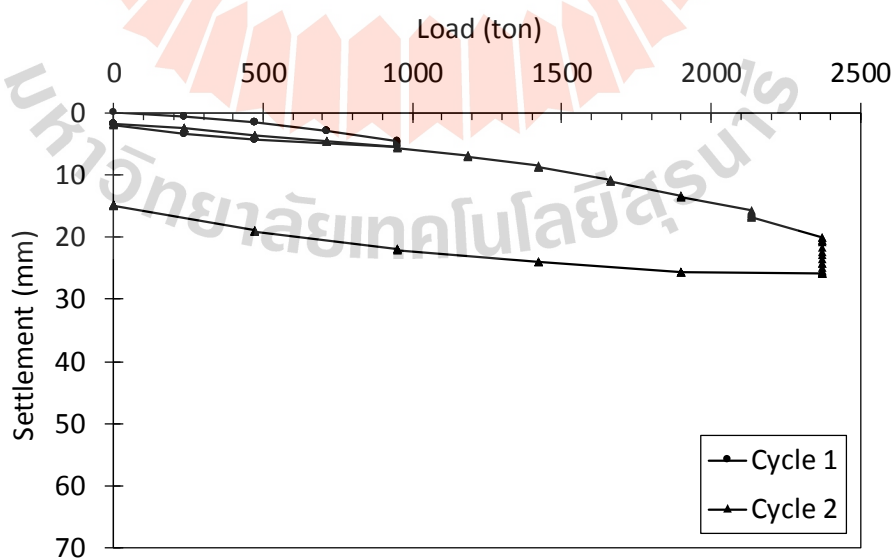
### 3.2.2 ข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม

ในโครงการนี้ได้ทำการทดสอบเสาเข็มเจาะด้วยวิธี Static Pile Load Test โดยเสาเข็มทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร โดยใช้มาตรฐาน

ของ ASTM D 1143/D 1143M-07 ทำการทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบและน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่า 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ผลการทดสอบเสาเข็มขนาด 1000 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 640 ตัน มีการทรุดตัว 5.50 มิลลิเมตร และทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 1600 ตัน ส่วนผลการทดสอบเสาเข็มขนาด 1500 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 950 ตัน มีการทรุดตัว 5.47 มิลลิเมตร และทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุก 2375 ตัน ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



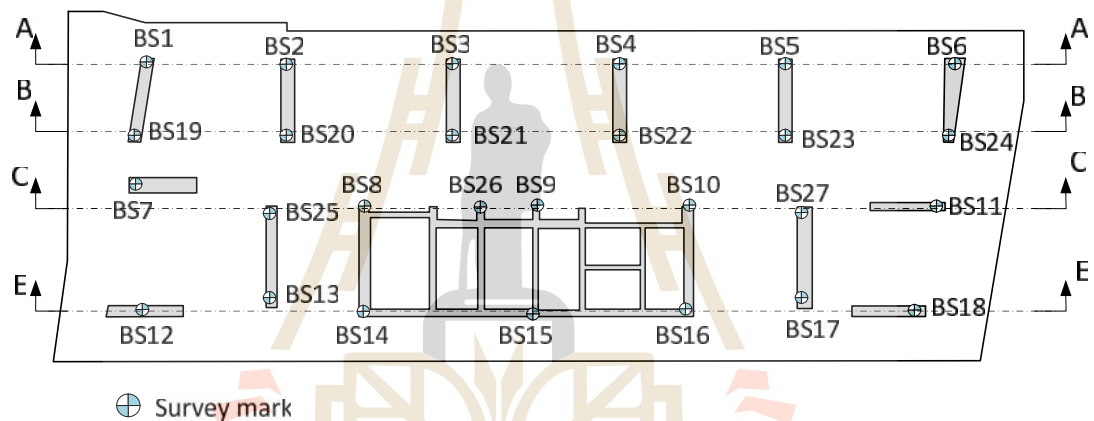
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร



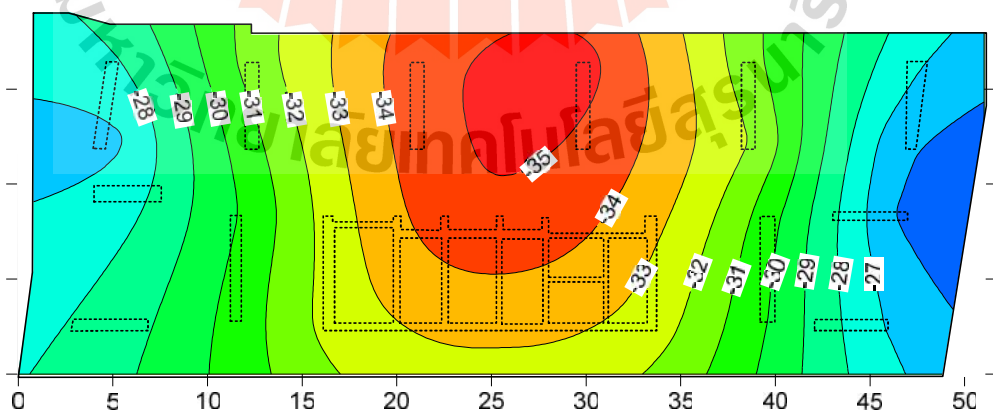
รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

### 3.2.3 ข้อมูลการทรุดตัวของ mat

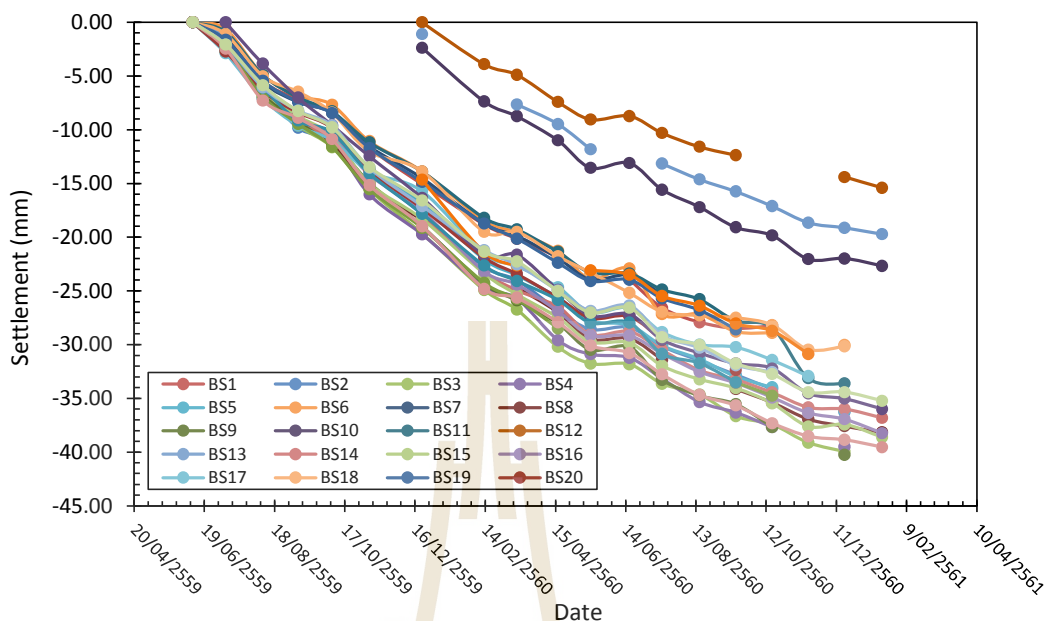
เพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานอาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกได้ติดตั้งจุดวัดการทรุดตัวไว้ที่เสาส่วนล่างที่ติดกับ mat ทั้งหมด 26 จุด ดังรูปที่ 3.5 โดยวัดการทรุดตัวของฐานด้วยกล้องระดับตั้งแต่เริ่มการก่อสร้างจนกระทั่งก่อสร้างอาคารได้เสร็จสิ้นถึงชั้นที่ 51 ดังรูปที่ 3.6 เป็นเส้นชั้นการทรุดตัวของ mat เมื่อสิ้นสุดการก่อสร้าง เห็นได้ว่าการทรุดตัวสูงสุดเป็น 35.0 มิลลิเมตรตรงกึ่งกลาง mat โดยขอบ mat มีการทรุดตัว 27.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปถ้วยเล็กน้อย คิดเป็นการทรุดที่แตกต่างกัน 7.5 มิลลิเมตร ซึ่งค่าทรุดตัวของอาคารที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงกว่าค่าทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบที่รับแรงกดเท่ากับน้ำหนักบรรทุกออกแบบประมาณ 6 เท่า และผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มทำการก่อสร้างจนถึง 5 เดือนหลังการก่อสร้าง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งจุดตรวจวัดการทรุดตัวที่ติดตั้งไว้ชั้นล่างสุดของอาคาร



รูปที่ 3.6 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat จากการตรวจวัดโดยสร้างอาคารครบจำนวน 51 ชั้น  
เมื่อวันที่ 16/08/2560



รูปที่ 3.7 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มทำการก่อสร้างจนถึง 5 เดือนหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง

### 3.3 การวิเคราะห์หักกลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร

งานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D ในการวิเคราะห์หักกลับการทรุดตัวเทียบกับผลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดจริงในสนาม โดยการแปรผันค่า Young's modulus ของดินซึ่งเป็นการวิเคราะห์หักกลับเพื่อหาค่า Young's modulus ที่เหมาะสมในการทำนายการทรุดตัวฐานรากเสาเข็มแผ่สำหรับอาคารสูง ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 4.2

### 3.4 กรณีศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มโดย PLAXIS 3D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน

สำหรับในส่วนนี้จำเป็นต้องศึกษาผลการวิเคราะห์ในแบบจำลองแต่ละรูปแบบเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับ การสร้างแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ และเหตุผลในการเลือกใช้แบบจำลองในแต่ละรูปแบบ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้เป็นกรณีศึกษาหรือพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนมากขึ้น และสามารถอธิบายพฤติกรรมจากการวิเคราะห์ของแบบจำลองได้อย่างถูกต้อง ดังกรณีศึกษาต่อไปนี้

### 3.4.1 กรณีศึกษาการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มระหว่างแบบ solid element และ embedded beam โดย PLAXIS 3D

กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A โดยจำลอง mat เป็นแบบ plate ฐานรากมีขนาดกว้าง 15 เมตร ยาว 15 เมตรหนา 1 เมตร และจำลองเสาเข็มระหว่างแบบ embedded beam และ solid element โดยหัวเสาเข็มมีระดับเท่ากับ -16 เมตร จากผิวดิน เสาเข็มมีความยาว 30 เมตร ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 3 เมตร จำนวน 25 ต้น โดยฐานรากรองรับน้ำหนักกระทำแบบ uniform loading เท่ากับ  $500 \text{ kN/m}^2$  โดยใช้คุณสมบัติของชั้นดินและฐานรากเสาเข็มจากงานวิจัยของ Amornfa (2012) ตารางที่ 2.10 เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

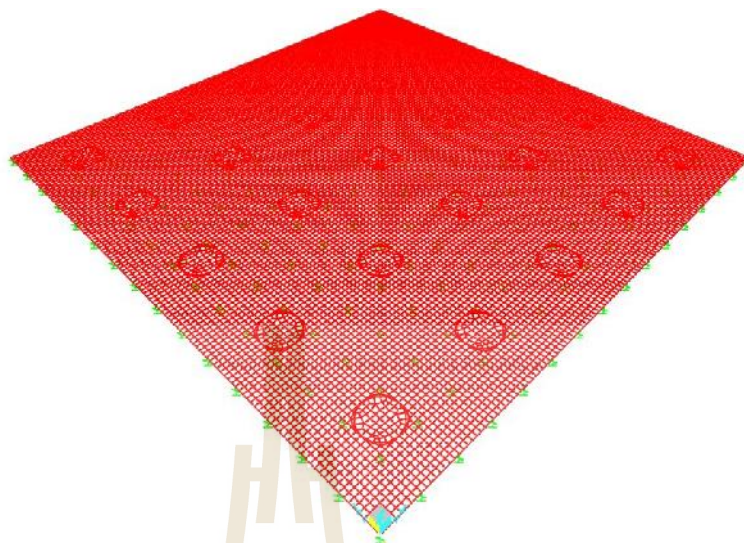
### 3.4.2 กรณีศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มระหว่างแบบ area springs และ point springs โดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน

สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนนี้เป็นการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่โดย SAP2000 และ ETABS เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการจำลองเสาเข็มแบบ area springs และ point springs โดยผลการวิเคราะห์แบ่งตามประเภทของน้ำหนักกระทำ ได้แก่ ประเภทของน้ำหนักกระทำแบบ uniform loading และ core-edge loading

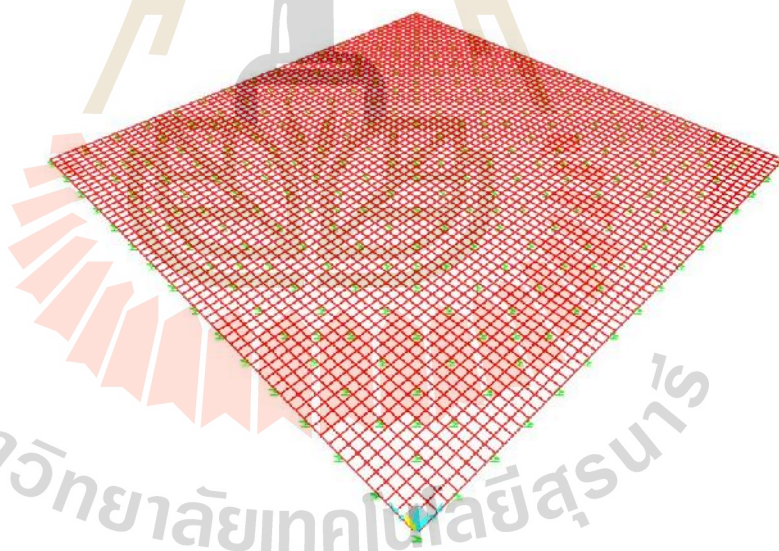
#### 3.4.2.1 ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ uniform loading

สำหรับการจำลองแรงกระทำแบบ uniform loading โดย PLAXIS กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A โดยจำลอง mat เป็นแบบ plate มีขนาดกว้าง 15 เมตร ยาว 15 เมตรหนา 1 เมตร โดยฐานรากรองรับน้ำหนักกระทำแบบ uniform loading เท่ากับ  $500 \text{ kN/m}^2$  จำลองเสาเข็มด้วย solid element หัวเสาเข็มมีระดับเท่ากับ -16 เมตร จากผิวดิน เสาเข็มมีความยาว 30 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็ม 3 เมตร จำนวน 25 ต้น โดยใช้คุณสมบัติของชั้นดินและฐานรากเสาเข็มจากงานวิจัยของ Amornfa (2012) ในตารางที่ 2.10 เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ จากนั้นนำค่าสถิติของสปริงที่หัวเสาเข็มและ modulus of subgrade reaction ที่ได้จากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D มาจำลองเสาเข็มใน SAP2000 โดยวิธี plate on springs ซึ่งจำลองฐานรากแบบ shell thin และจำลองเสาเข็มเปรียบเทียบระหว่างแบบ point springs และ area springs ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9





รูปที่ 3.8 แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่กรณี S1A โดยวิธีแบบ plate on area springs รองรับแรงกระทำแบบ uniform loading

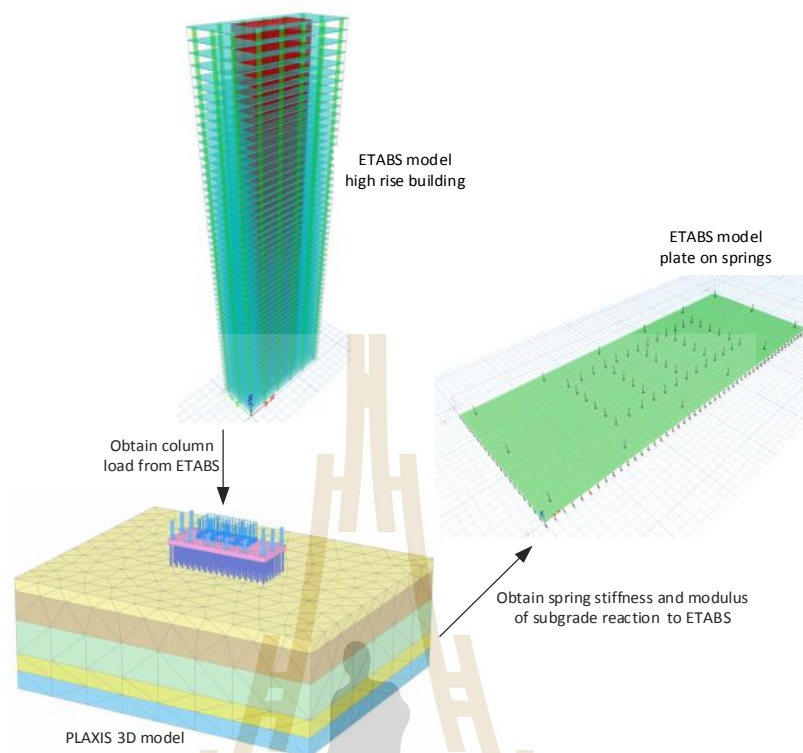


รูปที่ 3.9 แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่กรณี S1A โดยวิธีแบบ plate on point springs รองรับแรงกระทำแบบ uniform loading

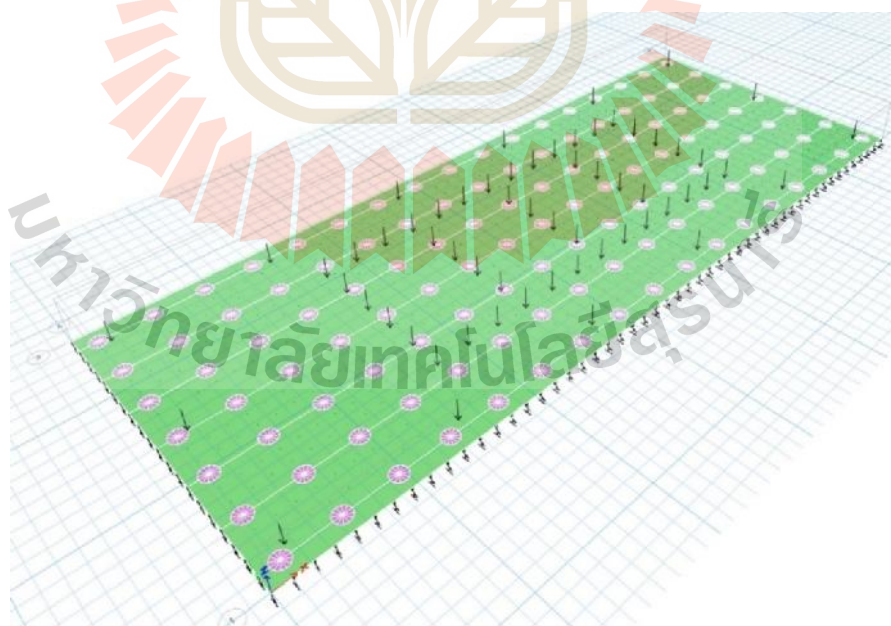
#### 3.4.2.2 ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ core-edge loading

สำหรับการจำลองแรงกระทำแบบ core-edge loading โดย PLAXIS 3D ซึ่งจำลอง mat แบบ 10-node tetrahedral element ในการจำลอง mat มีขนาดกว้าง 20 เมตร ยาว 50

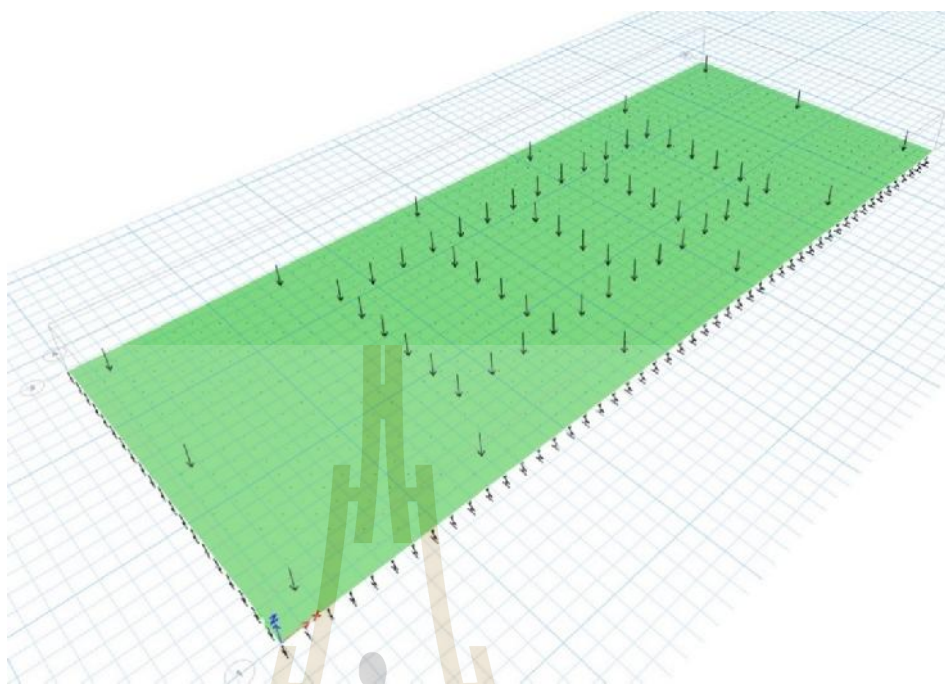
เมตร หน้า 2.5 เมตร จำลองเสาเข็มด้วย embedded beam หัวเสาเข็มมีระดับเท่ากับ -5.6 เมตร จากผิวดิน เสาเข็มมีความยาว 30 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็ม 3 เมตร จำนวน 119 ต้น สำหรับการจำลองอาคารสูงที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่หรือมีการจัดวางเสาเข็มที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่คงที่ทำให้การจำลองโดย SAP2000 จะมีขั้นตอนที่ยากและซับซ้อนมากกว่า ดังนั้นจึงจำลองแรงกระทำต่อฐานรากใน PLAXIS 3D จากผลการวิเคราะห์แรงในอาคารโดย ETABS โดยคิดเป็นอาคารที่มีความสูง 57 ชั้น ใช้การจำลองพื้น, ฐานราก และ core wall เป็นแบบ shell element เลือกประเภทเป็น shell thin และจำลองเสาเป็นแบบ frame element ดังรูปที่ 3.12 (b) โดยขนาดและคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังตารางที่ 3.3 และพิจารณาเฉพาะแรงในแนวตั้งที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมของเสาชั้นล่างสุด โดยแรงที่กระทำต่อฐานรากทั้งหมดเท่ากับ 469,728 kN โดยมีค่าใกล้เคียงกับโครงการที่วิจัยมากที่สุด เนื่องจากแรงกระทำจากงานวิจัยของ Amomfa (2012) จากรูปที่ 2.39 มีลักษณะไม่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของอาคาร เนื่องจากแรงกระทำบริเวณกลางฐานรากเป็นแรงกระทำแบบ point load ซึ่งทำให้ฐานรากเกิดโมเมนต์คดที่สูงเกินความจริง ดังรูปที่ 2.42 จึงเลือกใช้การจำลองฐานรากกรณี R4A และ ชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat จากนั้นนำค่าสถิติเเนสของสปริงที่หัวเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D กลับมาวิเคราะห์พฤติกรรมฐานรากใน ETABS ตามขั้นตอน ดังรูปที่ 3.10 โดยวิธี plate on springs โดยจำลองเสาเข็มเปรียบเทียบระหว่างแบบ point springs และ area springs ดังรูปที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการจำลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ area springs และ point springs



รูปที่ 3.11 แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่กรณี R4A โดยวิธีแบบ plate on area springs รองรับแรงกระทำแบบ core-edge loading



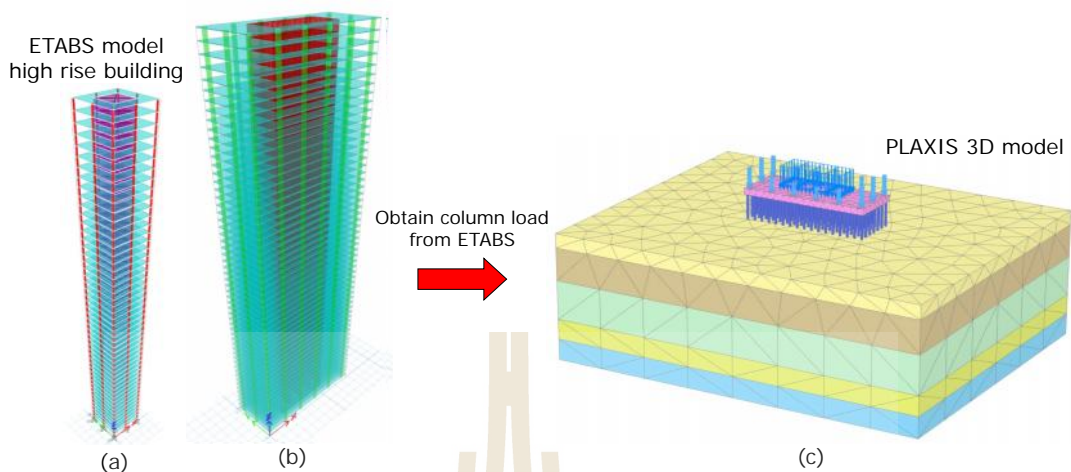
รูปที่ 3.12 แบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่กรณี R4A โดยวิธีแบบ plate on point springs รองรับ แรงกระทำแบบ core-edge loading

### 3.5 อิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการหลุดตัวและโมเมนต์คัตใน mat

งานศึกษาเกี่ยวกับการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มที่รองรับ mat ที่มีผู้ทำไว้ อาทิเช่น Amornfa (2012), Mali (2020) และ Randolph (2004) ได้มีการจำลองฐานรากด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยสมมุติขนาดของ mat และรูปแบบของแรงกระทำขึ้นมาโดยไม่สอดคล้องกับรูปแบบของอาคารสูง โดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น Randolph (2004) ใช้ฐานราก mat เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแรงกระทำเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีแรงกระทำแบบ uniform load ที่มีแรงกระทำแบบสม่ำเสมอทั่วทั้ง mat และกรณีแรงกระทำแบบ core-edge loading ที่มีแรงกระทำแบบบริเวณ core wall และบริเวณขอบของ mat ซึ่งทำให้สติเฟนส์ของ mat ซึ่งประมาณจากความยาวต่อความหนาของ mat,  $L/B$  นั้นค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับขนาดของ mat ในงานศึกษาของ Amornfa (2012) ที่ใช้ความกว้างของ mat รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ 15 เมตร สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการมุ่งเป้าหมายไปยังฐานรากของอาคารสูงพิเศษที่ใช้ฐานรากแบบ mat รองรับแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน อีกทั้งลักษณะของอาคารสูงสำหรับที่เป็นที่พักอาศัยในปัจจุบันนิยมใช้รูปทรงอาคารรูปทรงแบน ที่ทำให้ฐานของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในงานวิจัยได้จำลองรูปแบบของฐานราก mat ของอาคารทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์สรุป ดังตารางที่ 3.4 โดยฐานราก S1 และ R4 จัดเรียงเสาเข็มระยะห่างสม่ำเสมอ S2 จัดเรียงเสาเข็มเฉพาะบริเวณ core S3 และ R5 จัดเรียงเสาเข็มบริเวณ core และส่วน



เสาของอาคาร ซึ่งฐานราก 5 รูปแบบใช้การแปรผันความยาวเสาเข็มจากงานวิจัยของ Mali (2020) โดยจำลองการแปรผันความยาวเสาเข็มทั้งหมดสามระดับ โดยยาวสุดที่บริเวณกลางฐานรากและสั้นสุดในบริเวณขอบฐานราก ได้แก่ 30, 25, 20 เมตร ตามลำดับ และใช้การจัดวางตำแหน่งเสาเข็มจากงานวิจัยของ Randolph (2004) ซึ่งรูปแบบที่ S1, S2 และ S3 เป็นฐานราก mat แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 เมตร หนา 1 เมตร รองรับด้วยเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ที่มีระดับตัดหัวเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -16 เมตร โดยแรงกระทำต่อ mat นั้นใช้แรงกระทำจากผลการวิเคราะห์แรงในอาคารโดยใช้โปรแกรม ETABS ซึ่งคิดเป็นอาคารที่มีความสูง 50 ชั้น แรงที่กระทำต่อ mat ทั้งหมดเป็น 88,511 kN ใช้การจำลองพื้น และ core wall เป็นแบบ shell element เลือกรูปแบบเป็น shell thin และจำลองเสาเป็นแบบ frame element ดังรูปที่ 3.12 (a) แบบจำลองใช้คุณสมบัติของชั้นดินจากงานวิจัยของ Amornfa (2012) ดังตารางที่ 2.10 โดยขนาดและคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังตารางที่ 3.2 เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การจำลองฐานราก mat ในรูปแบบต่างๆ ส่วนกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปแบบ R4 และ R5 เป็นฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 20 เมตร ยาว 50 เมตร หนา 2.5 เมตร รองรับด้วยเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ที่มีระดับตัดหัวเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -5.6 เมตร ดังรูปที่ 3.11 โดยลักษณะและพื้นที่ของฐานรากและแรงกระทำต่อฐานรากได้ถูกจำลองให้มีค่าใกล้เคียงกับโครงการที่วิจัย ดังนั้นจึงจำลองชั้นดินเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากในโครงการที่วิจัย จากตารางที่ 4.3 สำหรับแรงกระทำต่อฐานรากได้จากผลการวิเคราะห์แรงในอาคารโดยใช้โปรแกรม ETABS โดยคิดเป็นอาคารที่มีความสูง 57 ชั้น โดยแรงที่กระทำต่อ mat ทั้งหมดเป็น 469,728 kN โดยจำลองพื้น และ core wall เป็นแบบ shell element โดยเลือกรูปแบบเป็น shell thin และจำลองเสาเป็นแบบ frame element ดังรูปที่ 3.12 (b) สำหรับการจำลองใน PLAXIS 3D รูปที่ 3.12 (c) ใช้ 10-node tetrahedral element ในการจำลอง mat จำลองเสาเข็มด้วย embedded beam โดยน้ำหนักกระทำต่อ mat ใน PLAXIS จะคิดเฉพาะแรงกระทำที่ค่อนข้างถาวรเนื่องจาก dead load และ superimposed dead load เท่านั้น ส่วน live load นั้นเป็นแรงกระทำที่ไม่แน่นอนและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ โดยขนาดและคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.13 แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูง โดย ETABS และแบบจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS 3D

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของโครงสร้างอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณี S1A

Material	width (m)	length (m)	height (m)	thickness (m)	unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (MPa)	$\nu$
Column wall 1 <sup>st</sup> -50 <sup>th</sup> floor	0.5	0.5	3	-	24	31.41	0.2
Core wall 1 <sup>st</sup> -50 <sup>th</sup> floor	7.5	7.5	3	0.3	24	31.41	0.2
Slap	15	15	-	0.25	24	31.41	0.2
Raft	20	50	-	2.5	24	28	0.2
Bore pile		1	30	-	24	26	0.2

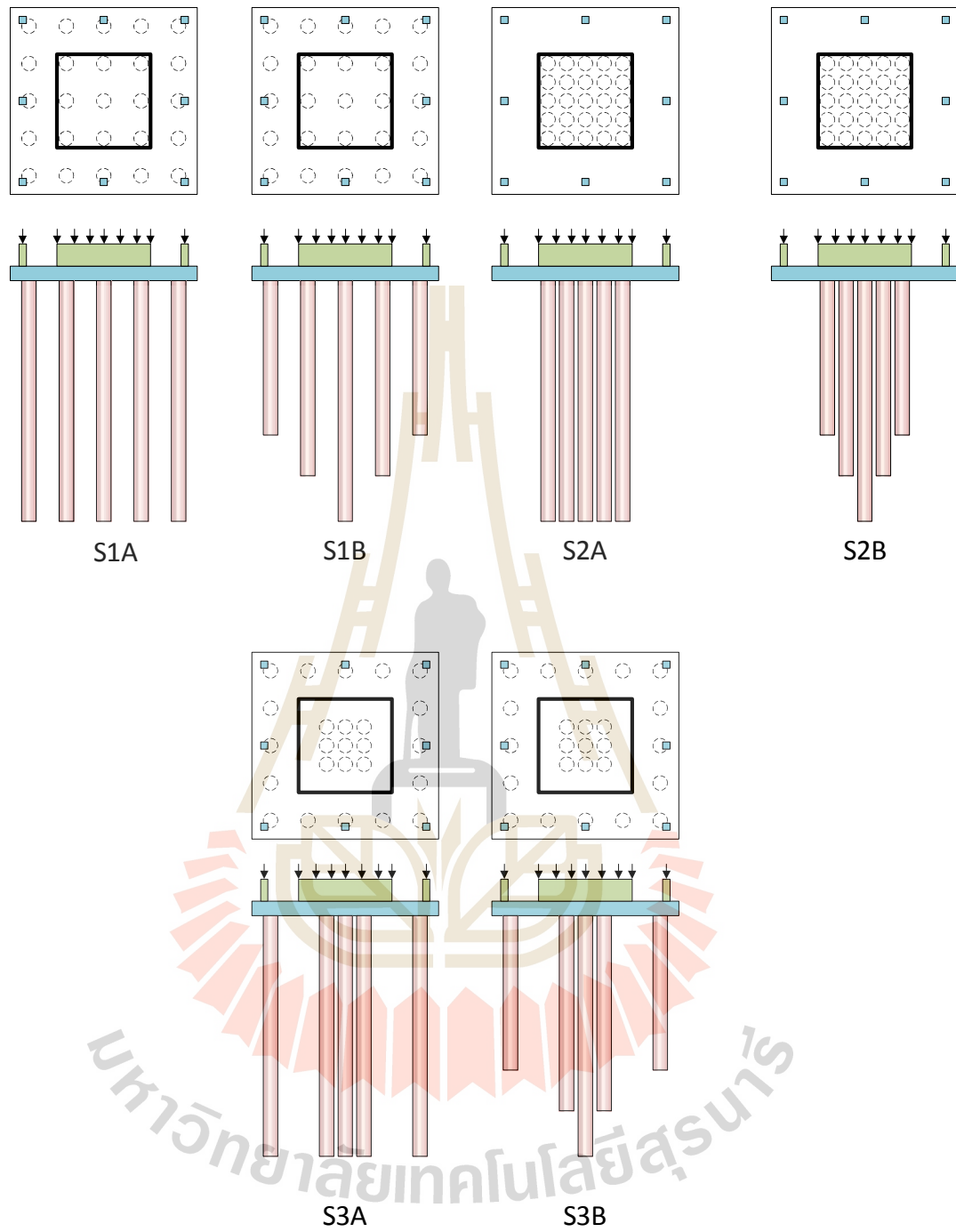
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของโครงสร้างอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรณี R4A

Material	width (m)	length (m)	height (m)	thickness (m)	unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (MPa)	$\nu$
Column wall 1 <sup>st</sup> -52 <sup>nd</sup> floor	1	1	3	-	24	33.11	0.2
Core wall 53 <sup>rd</sup> -57 <sup>th</sup> floor	1	1	3.5	-	24	33.11	0.2
Column wall 1 <sup>st</sup> -52 <sup>th</sup> floor	10	25	3	0.25	24	33.11	0.2
Core wall 53 <sup>rd</sup> -57 <sup>th</sup> floor	10	25	3.5	0.25	24	33.11	0.2
Slap	20	50	-	0.3	24	29.61	0.2
Raft	20	50	-	2.5	24	24.78	0.2
Bore pile		1	30	-	24	24.78	0.2

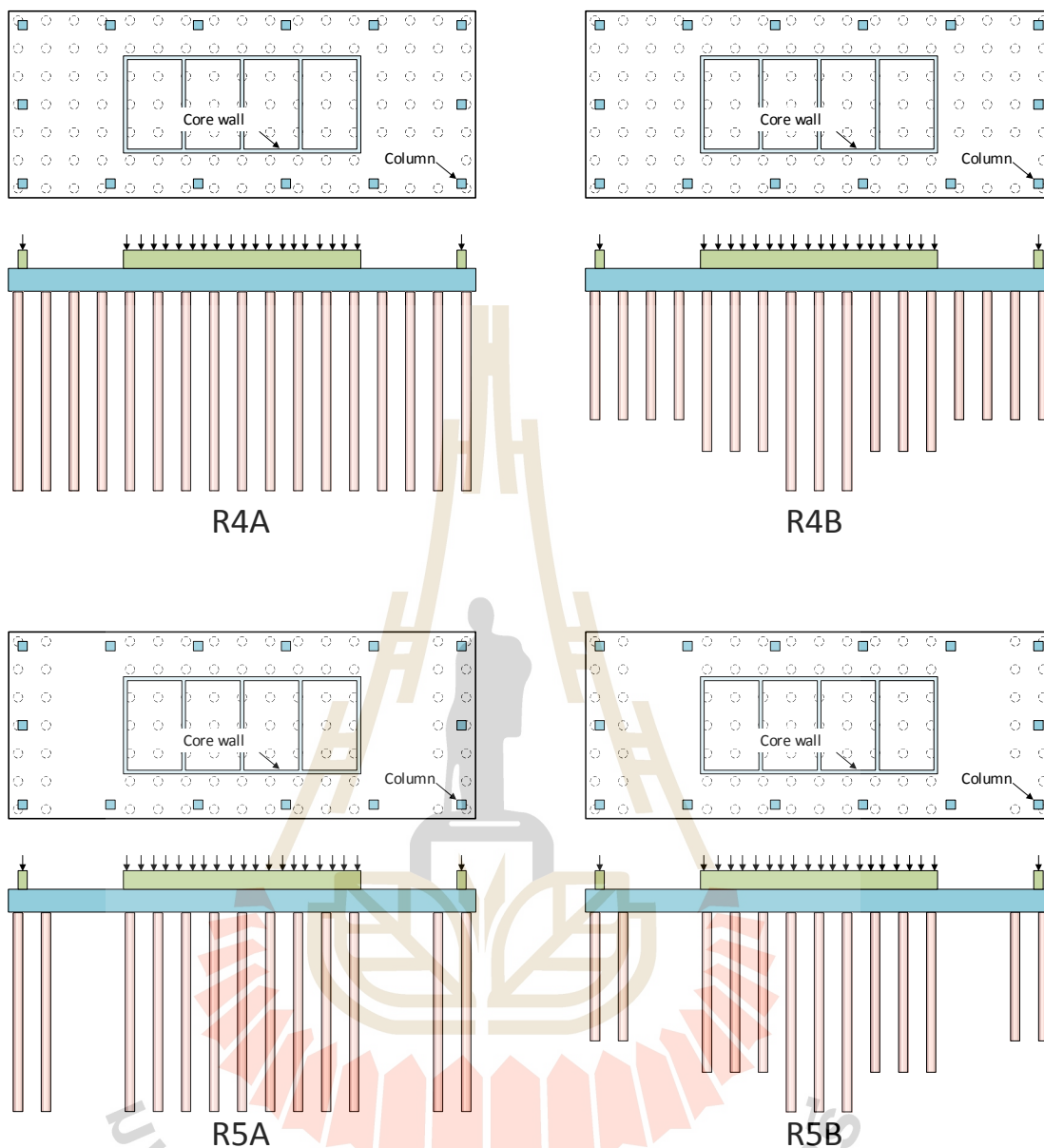


ตารางที่ 3.4 กรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำอธิบาย

กรณี	การจัดเรียงเสาเข็ม
S1A	เข็มกระจายทั่ว mat ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S1B	เข็มกระจายทั่ว mat แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
S2A	ใช้เสาเข็มรองเฉพาะบริเวณ core ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S2B	ใช้เสาเข็มรองเฉพาะบริเวณ core แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
S3A	เสาเข็มรองใต้ core และได้เสา ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S3B	เสาเข็มรองใต้ core และได้เสา แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
R4A	เข็มกระจายทั่ว mat ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
R4B	เข็มกระจายทั่ว mat แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
R5A	เสาเข็มรองใต้ core และได้เสา ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
R5B	เสาเข็มรองใต้ core และได้เสา แปรผันระดับปลายเสาเข็ม



รูปที่ 3.14 การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B



รูปที่ 3.15 การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ R4A, R4B, R5A, และ R5B

### 3.6 อิทธิพลการทรุดตัวของ mat ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมโครงสร้างอาคารสูงส่วนบน

#### 3.6.1 การ iteration โดยการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

การจำลองร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D โดยใช้การวิเคราะห์ที่โดยการ iteration โดยเริ่มจากการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อส่วนล่างสุดของเสา โดยจำลองโครงสร้างอาคารใน ETABS ที่พิจารณาให้เสาเข็มเป็นแบบ point springs ดังรูปที่ 3.15 โดยค่าสติฟเนสของ

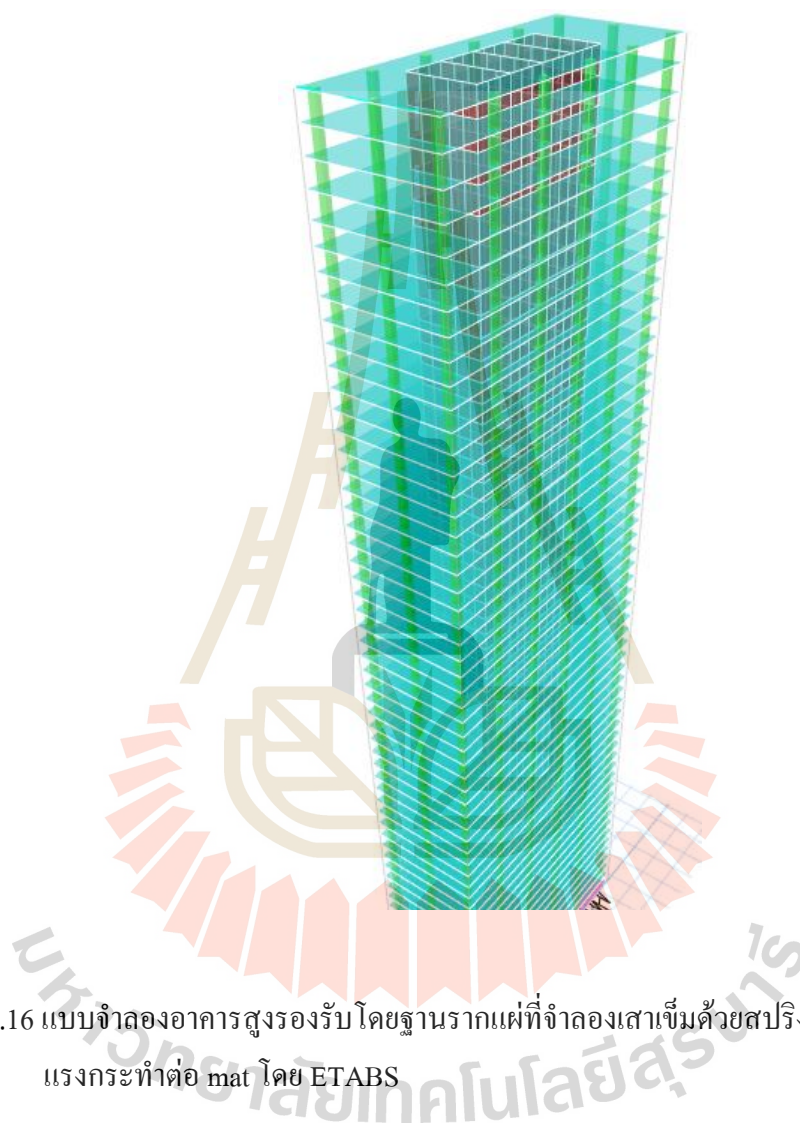
สปริงเริ่มต้นใช้ค่าของการวิเคราะห์จากผลการทดสอบเสาเข็มเป็นค่าตั้งต้น จากนั้นจำลองอาคาร และ mat มาตรฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A บนสปริงเพื่อให้ได้แรงกระทำที่โคนเสา จากนั้นนำแรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ไปเป็นแรงกระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D ดังรูปที่ 3.16 โดยใช้ 10-node tetrahedral element ในการจำลอง mat จำลองเสาเข็มด้วย embedded beam หัวเสาเข็มมีระดับเท่ากับ -5.6 เมตร จากผิวดิน โดยขนาดและคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังตารางที่ 4.4 ชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มและค่าทรุดตัวของเสาเข็มแต่ละต้น ในขั้นตอนนี้สามารถคำนวณสติเฟนสของสปริงที่จะใช้แทนเสาเข็มใน ETABS ได้ ดังสมการที่ 3.1

$$K = \frac{P}{u} \quad (3.1)$$

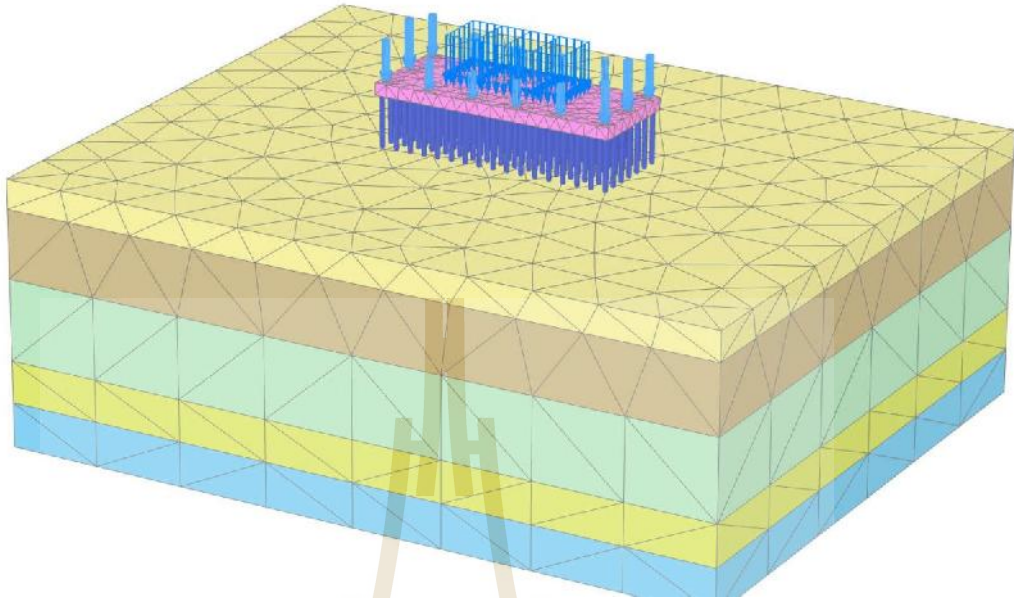
เมื่อ  $K$  คือค่าสติเฟนสของสปริง,  $P$  คือแรงที่หัวเสาเข็ม และ  $u$  คือการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม จากนั้นใช้สติเฟนสของสปริงสำหรับเสาเข็มแต่ละต้นจากโปรแกรม PLAXIS 3D ในการสร้างแบบจำลอง ETABS ในขั้นตอนนี้สปริงที่ได้ถือว่าได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat แล้วแต่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากการจำลอง PLAXIS 3D นั้นไม่ได้รวมเอาผลเนื่องจากสติเฟนสของอาคารส่วนบนเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องนำแรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ในรอบที่สองนี้มาใช้เป็นแรงกระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D ซ้ำเป็นรอบที่สอง ซึ่งการทำการวิเคราะห์จะทำซ้ำจนกระทั่งการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก PLAXIS 3D ต่างจากการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก ETABS ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการ iteration โดยแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D ดังรูปที่ 3.17 และนอกจากจำเป็นต้องใช้ค่าสติเฟนสของสปริงของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D แล้วยังจำเป็นต้องนำแรงดันดินใต้ฐานรากในรูปแบบของ modulus of subgrade reaction จากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D มาใช้ในการวิเคราะห์ฐานรากใน ETABS เพื่อจำลองพฤติกรรมการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกของอาคารสูงระหว่างเสาเข็มและฐานรากให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจากผลการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D มากที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณแรงดันดินเฉลี่ยที่กระทำกลับต่อฐานรากได้ ดังสมการที่ 3.2

$$K = \frac{P/u_{av}}{R} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $K$  คือ modulus of subgrade reaction,  $P$  คือแรงดันดินใต้ฐานรากโดยคำนวณจากผลต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดและแรงรวมที่หัวเสาเข็มทุกต้น,  $u_{av}$  คือค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของฐานราก และ  $A$  คือพื้นที่ทั้งหมดของฐานราก

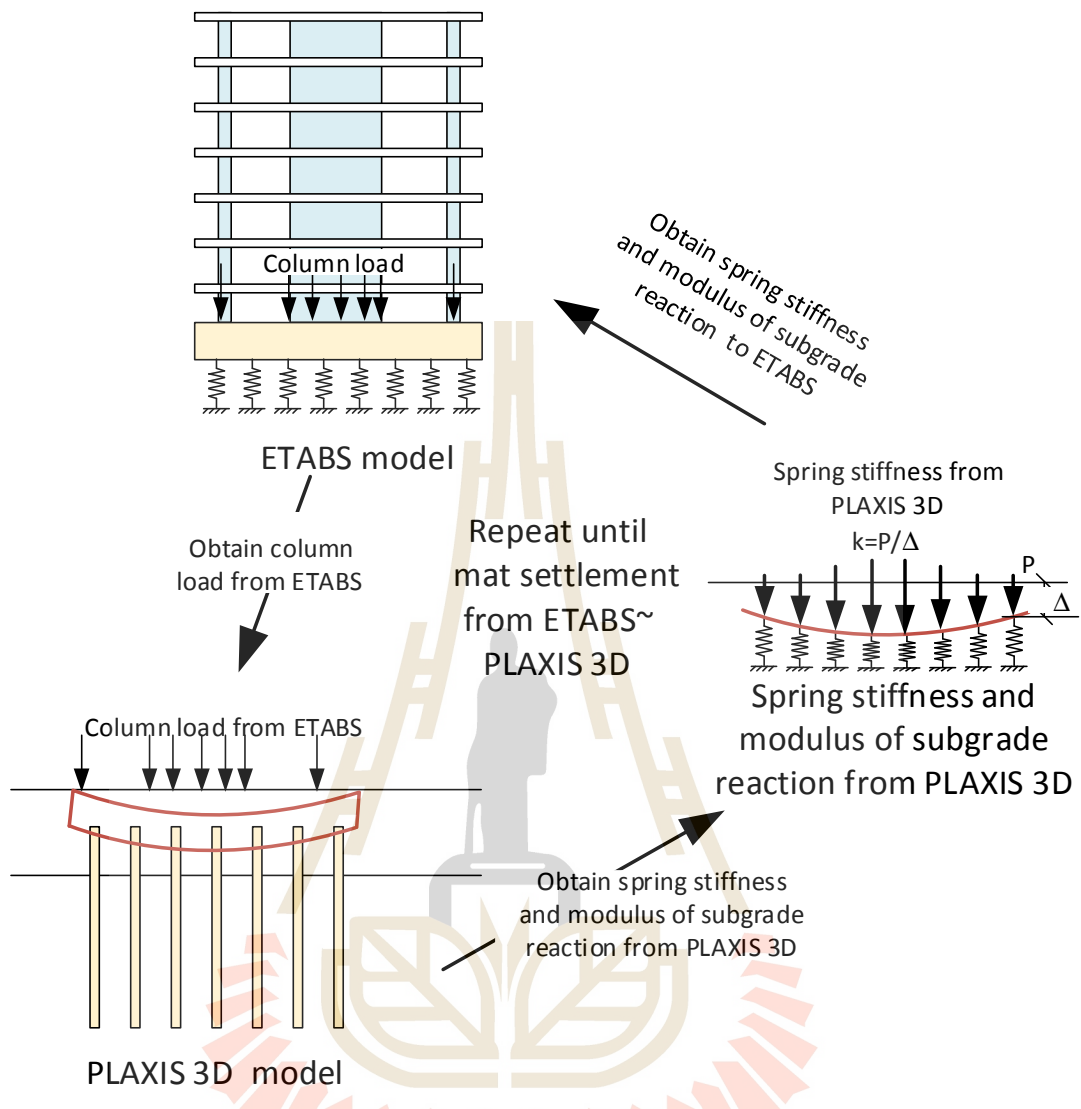


รูปที่ 3.16 แบบจำลองอาคารสูงรองรับโดยฐานรากแผ่ที่จำลองเสาเข็มด้วยสปริงในการวิเคราะห์แรงกระทำต่อ mat โดย ETABS



รูปที่ 3.17 แรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ที่กระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D





รูปที่ 3.18 กระบวนการ Iteration โดยแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

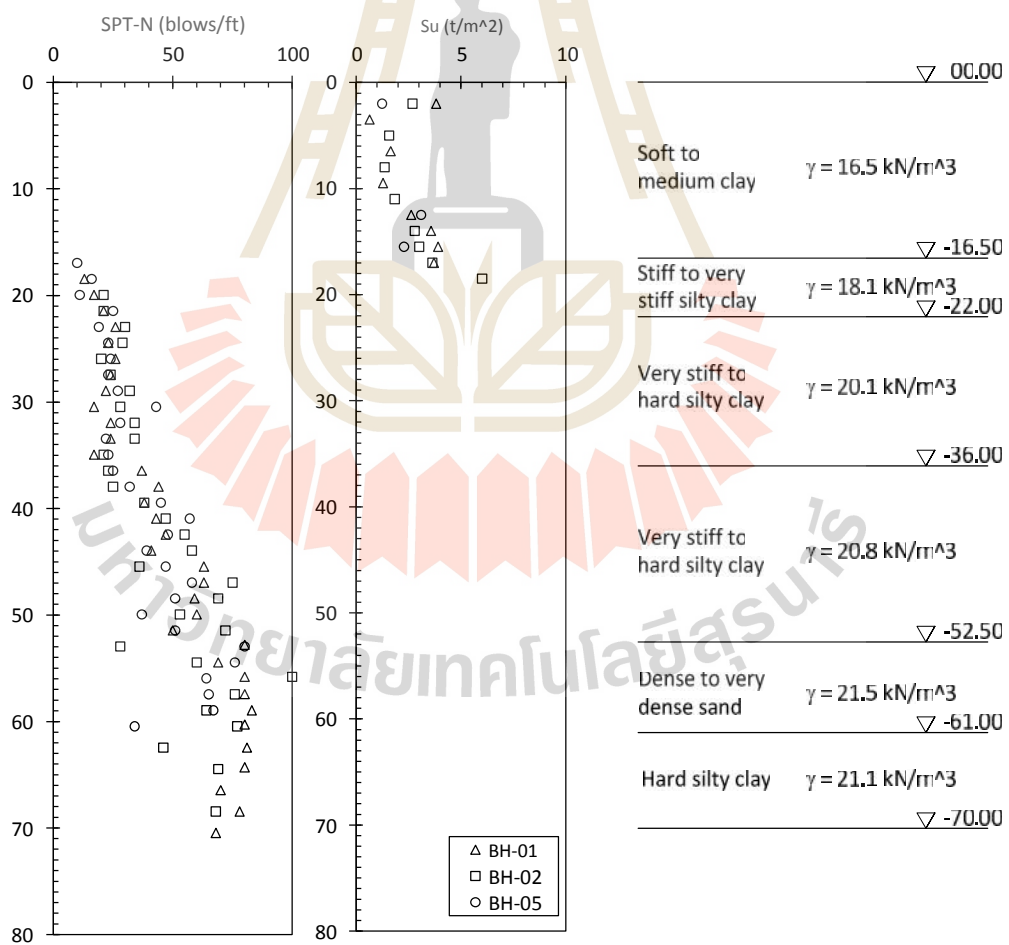
งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงแบบแผ่ โดยอาศัยผลการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบและผลการวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Finite element) และได้ใช้ผลการวิเคราะห์ที่กลับในการหาแนวทางที่จะทำให้ฐานรากเสาเข็มแผ่มีการทรุดตัวที่แตกต่างลดลง ซึ่งจะทำให้การออกแบบเป็นไปอย่างปลอดภัยและประหยัด และศึกษาถึงค่าสตีเฟนของเสาเข็มสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงโดยการ (iteration analysis) โดยใช้ ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

#### 4.1 ข้อมูลและผลการทดสอบดิน

ในงานวิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของอาคารทั้งหมด 3 หลุม โดยหลุมเจาะ BH-02 อยู่ตรงตำแหน่งของอาคาร รูปที่ 4.1 เป็นรูปตัดชั้นดิน โดยประกอบไปด้วยชั้นผิวหน้าดินหนา 1.5 เมตร ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลางหนา 15.0 เมตร จากนั้นเป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก ลึกลงถึง 52.5 เมตร หลังจากนั้นเป็นชั้นดินทรายแน่นถึงแน่นมากหนา 8.5 เมตร ถัดจากชั้นทรายจนถึงก้นหลุมเจาะเป็นชั้นดินเหนียวดานหนา 9.0 เมตร ตารางที่ 4.1 สรุประดับของชั้นดิน, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองที่ใช้สตีเฟนสประสิทธิภาพและใช้กำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำสำหรับชั้นดินเหนียว ซึ่งเป็น undrained type B ใน PLAXIS 3D สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองดินแบบ undrained type B นี้จะได้ผลลัพธ์การคำนวณแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อน้ำหนักอาคารกระทำต่อดิน ซึ่งสามารถจำลองการระบายน้ำส่วนเกินนี้ได้ด้วยการวิเคราะห์ consolidation analysis ใน PLAXIS 3D ส่วนชั้นทรายใช้แบบจำลองดินแบบระบายน้ำสำหรับฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กใช้แบบจำลองเป็น linear elastic โดยใช้ค่า Young's modulus เป็น 24.78 MPa และค่า Poisson' ratio เป็น 0.2

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง

Material	Depth (m)	$E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu'$	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	w (degree)	$S_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
Soft to medium clay	00.0-16.5	10,546	0.30	16.52	-	24.5
Stiff to very stiff silty clay	16.5-22.0	126,549	0.30	18.10	-	73.6
Very stiff to hard silty clay 1	22.0-36.0	210,915	0.30	20.18	-	122.6
Very stiff to hard silty clay 2	36.0-52.5	464,013	0.30	20.83	-	269.8
Dense to very dense sand	52.5-61.0	137,600	0.30	21.57	37.00	-
Hard silty clay	61.0-70.0	674,928	0.30	21.14	-	392.4



รูปที่ 4.1 รูปตัดชั้นดิน, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหา Young's modulus ที่เหมาะสมเพื่อทำนายการทรุดตัวของดิน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินในโครงการที่มีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ส่วนกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวแข็งถึงชั้นดินเหนียวดานประมาณจากผลการทดสอบตอกแบบมาตรฐานแบบจำลองดินที่ใช้เป็นแบบอีลาสติคเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของ มอห์ร์-คูลอมป์ (linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) สำหรับชั้นดินเหนียว ใช้ effective Young's modulus โดยคำนวณจากกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในรูป  $E' = mS_u$  โดย  $m$  เป็นค่าคงที่ซึ่งการเลือกใช้ค่า  $m$  ขึ้นกับระดับของ shear strain ที่เกิดขึ้นในชั้นดิน โดย effective Young's modulus มีความสัมพันธ์กับ undrained Young's modulus โดยมีค่า shear modulus ที่เท่ากันจากหลักการทางปฐพีกลศาสตร์วัสดุ ดังสมการที่ 4.1

$$E' = \frac{2(1+\epsilon')}{2(1+\epsilon_u)} E_u \quad (4.1)$$

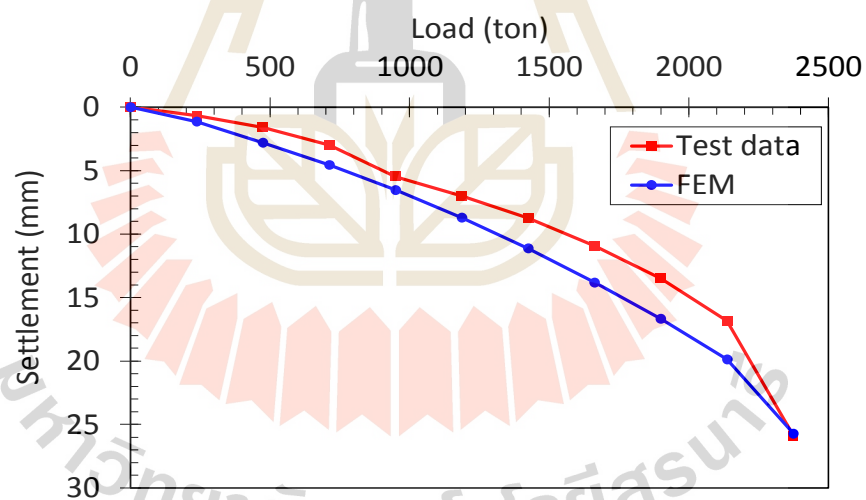
เมื่อ  $\epsilon' = 0.3$  กรณีหน่วยแรงประสิทธิภาพ และ  $\epsilon_u = 0.5$  กรณีหน่วยหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ได้ความสัมพันธ์เป็น  $E' = 0.87E_u$  สำหรับกำลังรับแรงเฉือนใช้เป็นหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งใน PLAXIS 3D เรียกว่า undrained type B ส่วนชั้นดินทรายกำหนดให้คิดเป็นหน่วยแรงประสิทธิภาพและเป็นแบบระบายน้ำ ในการคำนวณโดยให้ชั้นดินเหนียวเป็นแบบไม่ระบายน้ำทำให้โปรแกรมคำนวณแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อหน่วยแรงในดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องให้โปรแกรมวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฐานรากในกรณีที่แรงดันน้ำส่วนเกินลดลงจนได้ระดับการอัดตัวคายน้ำที่ 90 เปอร์เซ็นต์

ในการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็ม ทำโดยสร้างแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดินโครงการ โดยความกว้างและความลึกของแบบจำลองมากพอที่จะไม่ทำให้ขอบเขตของแบบจำลองส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์ใช้วิธีการเพิ่มแรงกระทำเป็นแบบ point load บนหัวเสาเข็มที่มีค่าเท่ากับแรงกระทำต่อหัวเสาเข็ม และคำนวณค่าทรุดตัวของหัวเสาเข็ม และได้แปรผันค่าสติเฟเนสของดินโดยการปรับค่าอัตราส่วนระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  เมื่อ  $E' = 0.87E_u$  สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน 150, 250 และ 500 เท่า และสำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง 750,

1000, 1500 และ 2000 เท่า ซึ่งทำการแปรผันจนกระทั่งผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเสาเข็มมากที่สุด ดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 สรุปค่าสถิติฟิเนสที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับ

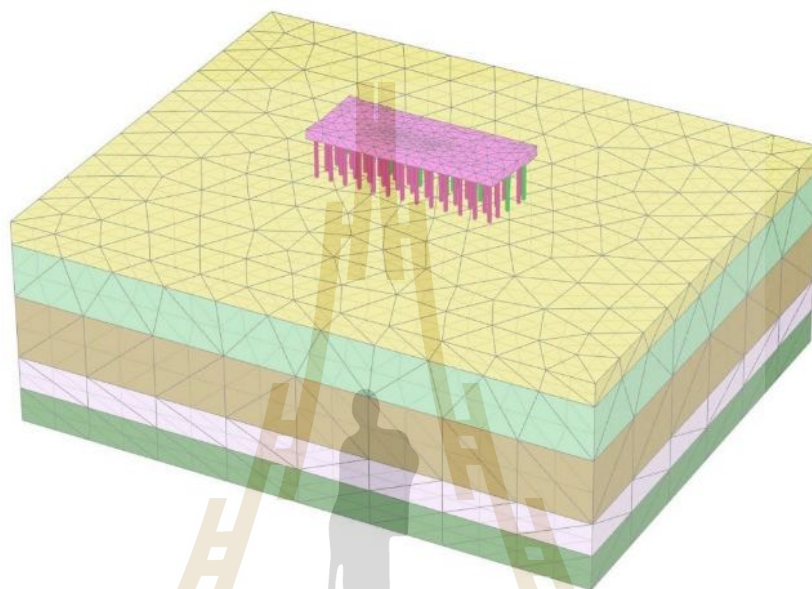
ตารางที่ 4.2 ค่า Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว

Material	$E'$	$E'$ (kPa)
Soft to medium clay	$E'=435S_u$	10546
Stiff to very stiff silty clay	$E'=1740S_u$	126549
Very stiff to hard silty clay 1	$E'=1740S_u$	210915
Very stiff to hard silty clay 2	$E'=1740S_u$	464013
Dense to very dense sand	$E'=2000N_{60}$	137600
Hard silty clay	$E'=1740S_u$	674928



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ห้กลับจากแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดิน โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

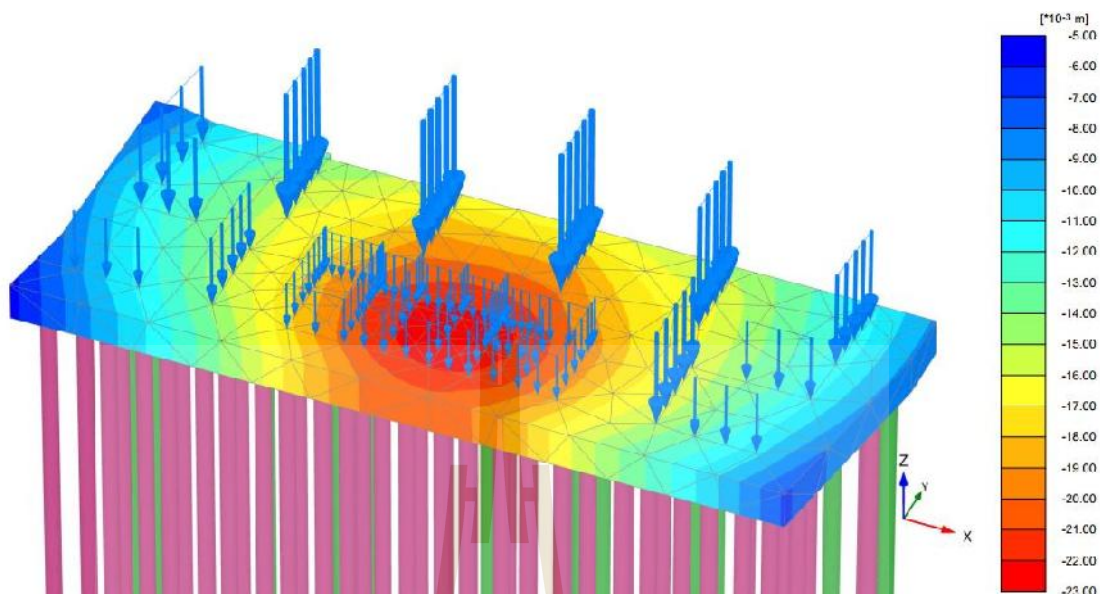
เมื่อได้ Young's modulus ของชั้นดินจากการวิเคราะห์ห้กลับโดยอาศัยผลการทดสอบเสาเข็ม แล้ว จึงได้ทำการจำลองฐานรากเสาเข็ม mat โดยใช้ Young's modulus ในตารางที่ 4 โดยใช้ 10-node tetrahedral element ในการจำลอง mat และจำลองเสาเข็มโดยใช้ embedded beam ดังรูปที่ 4.3



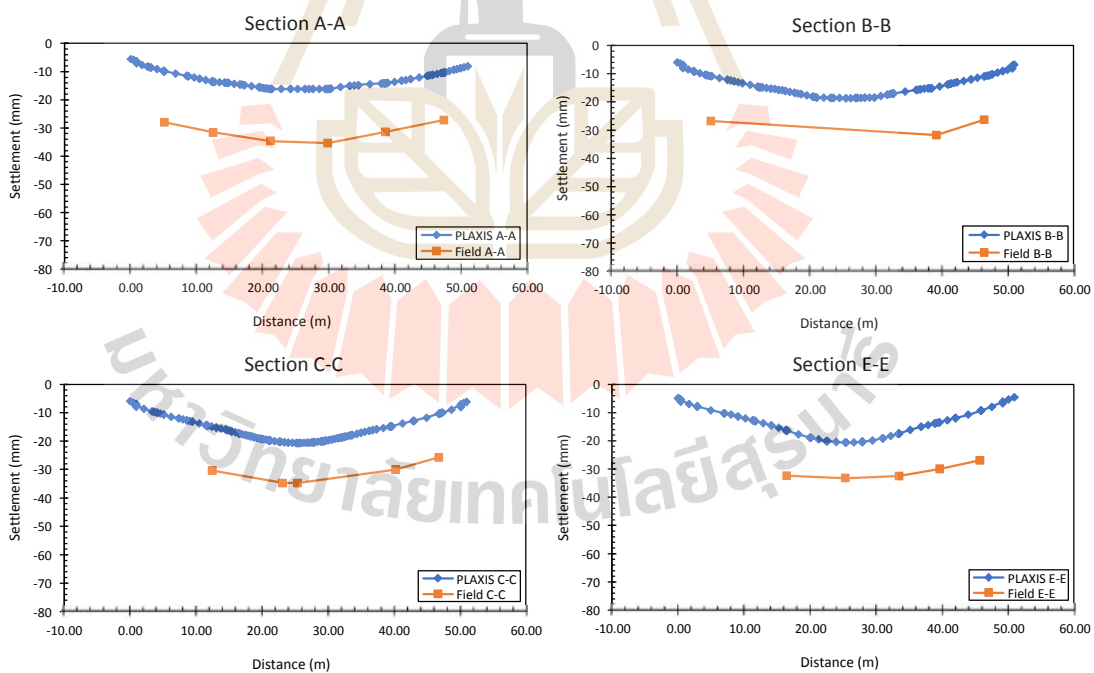
รูปที่ 4.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแผ่ โดย PLAXIS 3D

ผลการวิเคราะห์ในรูปของเส้นชั้นการทรุดตัวของ mat ในรูปที่ 4.4 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าทรุดตัวของฐานในแนว section A, section B, section C และ section E ในรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าค่าทรุดตัวของ mat ของแบบจำลองที่ใช้ Young's modulus จากการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มนั้นต่ำกว่าค่าทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงอยู่ประมาณ 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Young's modulus ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มของโครงการนี้อาจสูงเกินกว่าที่จะให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat ในแบบจำลอง FEM ตรงกับผลการทรุดตัวจากการตรวจวัดจริง ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ห้กลับเพิ่มเติมโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของอาคารในการวิเคราะห์ห้กลับเพื่อเปรียบเทียบ โดยได้จำลองฐานราก mat, เสาเข็ม, และชั้นดิน โดยใช้แรงกระทำส่วนบนจากผู้ออกแบบโครงสร้าง และแปรผัน Young's modulus จนทำให้ค่าทรุดตัวของ mat ในแบบจำลอง FEM สอดคล้องกับการทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด





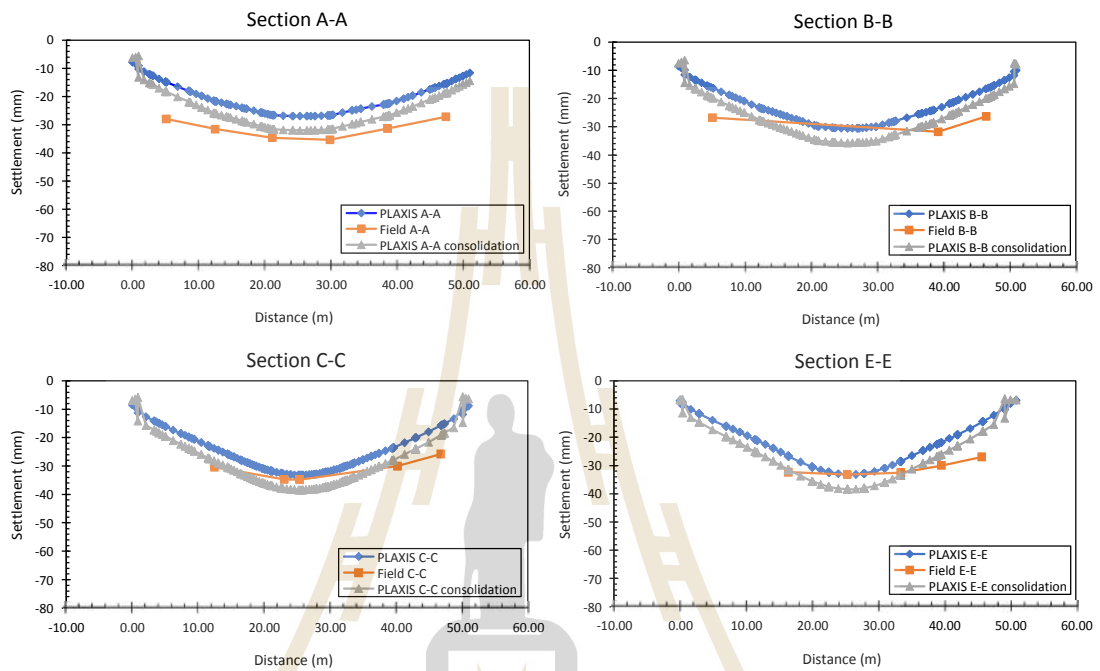
รูปที่ 4.4 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ที่กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะของโครงการ



รูปที่ 4.5 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่างๆ จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D โดยใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ที่กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะของโครงการ

จากผลการวิเคราะห์ รูปที่ 4.6 เป็นค่าทรุดตัวของ mat จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D ที่สอดคล้องกับค่าทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุดจากการคำนวณย้อนกลับ โดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินโดยการปรับค่าอัตราส่วนระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  เมื่อ  $E' = 0.87E_u$  สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน 150, 250 และ 500 เท่า และสำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง 500, 750, 1000, 1500 และ 2000 เท่า ซึ่งทำการแปรผันจนกระทั่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดมากที่สุด และนำสติฟเนสของดินที่ได้จากการวิเคราะห์กลับจากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากนี้มาคำนวณการทรุดตัวของฐานรากที่ระดับการอัดตัวคายน้ำที่ 90% เพื่อทำนายลักษณะการทรุดตัวของฐานรากหลังจากเสร็จสิ้นการก่อสร้างโดยการทำให้ excess pore water pressure ค่อยๆมีการ dissipate ออกไปจนหมดโดยไม่คำนึงถึงเวลาของการทรุดตัว โดย Young's modulus ของดินที่ให้ค่าการทรุดตัวที่สอดคล้องที่สุดนี้สรุปอยู่ในตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่า Young's modulus ของดินที่คำนวณกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มนั้นสูงกว่า Young's modulus ที่คำนวณกลับจากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat โดยในชั้น soft to medium clay มีค่า  $E_u = 500S_u$ ,  $E'_u = 435S_u$  และในชั้น very stiff to hard clay มีค่า  $E_u = 2000S_u$ ,  $E'_u = 1740S_u$  และสำหรับในชั้นทรายนั้นใช้ค่า effective Young's modulus มีค่า  $E'_u = 2000N_{60}$  ในส่วนของการที่ Young's modulus ของชั้นดินเหนียวที่วิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มสูงกว่าอาจเนื่องจากการที่แบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นได้ ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น สำหรับเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดการทรุดตัวในสนามกับผลการวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat พบว่าผลการทรุดตัวจากการวิเคราะห์กลับยังคงมีค่าน้อยกว่าผลการตรวจวัดในสนามเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าความคลาดของการทรุดตัวระหว่างการจำลองโดยวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat กับค่าการตรวจวัดการทรุดตัวในสนามซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0% และค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 47% จากการวิเคราะห์กลับโดยใช้ค่าสติฟเนสจากตารางที่ 4.3 พบว่าผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ยังไม่เกิดการ yielding และสติฟเนสแบบจำลองยังค่ามีค่าสูงกว่าสติฟเนสจากของดินในสนาม หากใช้แบบจำลองดินแบบ non-linear ที่สติฟเนสลดลงเมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นน่าจะทำให้ผลการประมาณการทรุดตัวเป็นไปอย่างสอดคล้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นประโยชน์ของงานวิจัยไปยังผู้ออกแบบอาคารสูง ดังนั้นจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและนำเสนอ Young's modulus ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองได้ง่ายกว่าแบบจำลองดินชนิดที่เป็นแบบ nonlinear model และสำหรับการถ่ายแรงระหว่างฐานรากกับเสาเข็มพบว่าเสาเข็มรองรับน้ำหนักถึง 86% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด และพบว่าฐานรากมีส่วนช่วยเสาเข็มในการรองรับน้ำหนักกระทำได้เพียง 14% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด การที่ฐานรากมี

ส่วนช่วยเสาชี้มในการรองรับน้ำหนักกระทำได้ดีขึ้น เนื่องจากฐานรากวางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน หากฐานรากวางอยู่ในชั้นดินที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งสามารถทำให้ฐานรากช่วยเสาชี้มในการรองรับน้ำหนักกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.6 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่าง ๆ จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D ที่สอดคล้องกับค่าทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดในการทำวิเคราะห์หาค่า Young's modulus ของชั้นดิน

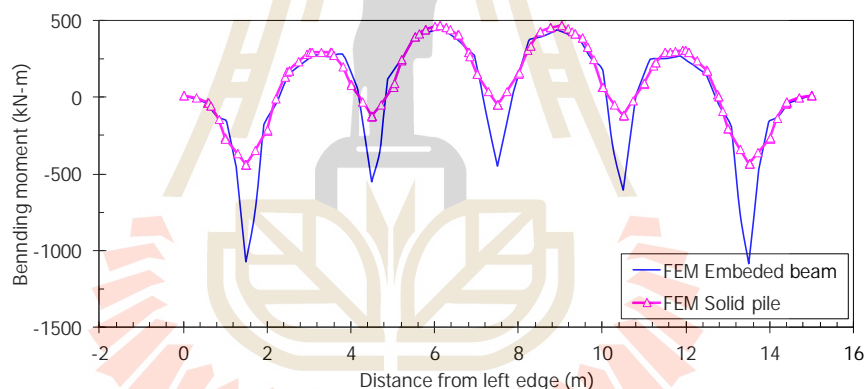
ตารางที่ 4.3 Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat

Material	$E'$	$E'$ (kPa)
Soft to medium clay	$E'=130S_u$	3164
Stiff to very stiff silty clay	$E'=435S_u$	31637
Very stiff to hard silty clay 1	$E'=435S_u$	52729
Very stiff to hard silty clay 2	$E'=435S_u$	116003
Dense to very dense sand	$E'=2000N_{60}$	137600
Hard silty clay	$E'=435S_u$	168732

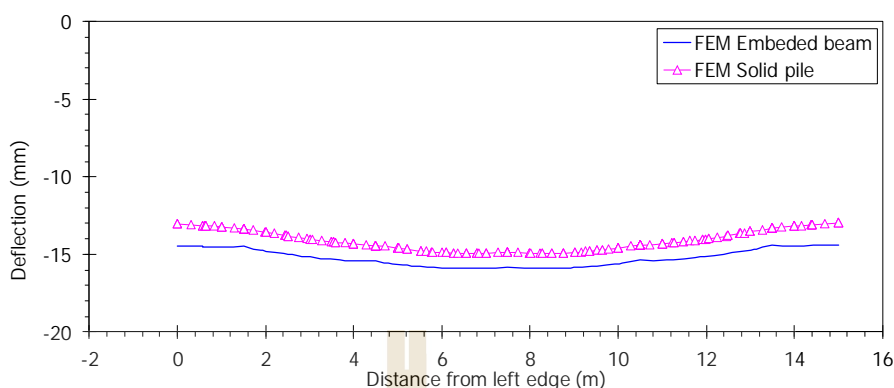
### 4.3 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสาเข็มโดย PLAXIS 3D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาการเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ solid element และ embedded beam โดย PLAXIS 3D

จากผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่โดยจำลองเสาเข็มแบบ embedded beam เกิดค่าโมเมนต์ที่เป็นลบสูงมากกว่าการจำลองเสาเข็มแบบ solid element อยู่เท่ากับ 58.7% สำหรับลักษณะการทรุดตัวของ mat มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันมาก แต่การจำลองเสาเข็มแบบ embedded beam เกิดการทรุดตัวมากกว่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การจำลองเสาเข็มแบบ embedded beam เพื่อลดการสิ้นเปลืองจำนวนทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองมีขนาดใหญ่ซึ่งความกว้างและความลึกของแบบจำลองมากพอที่จะไม่ทำให้ขอบเขตของแบบจำลองส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์



รูปที่ 4.7 โมเมนต์คัตใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A ระหว่างการจำลองเสาเข็มแบบ embedded beam และ solid element

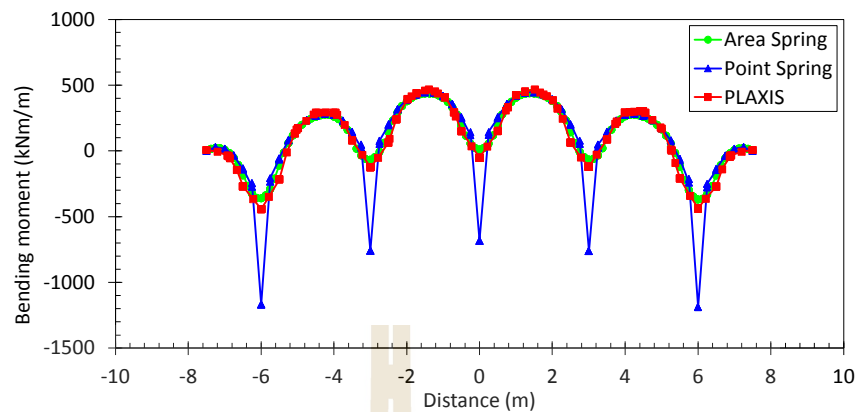


รูปที่ 4.8 การแ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A ระหว่างการจำลองเสาเข็มแบบ embedded beam และ solid element

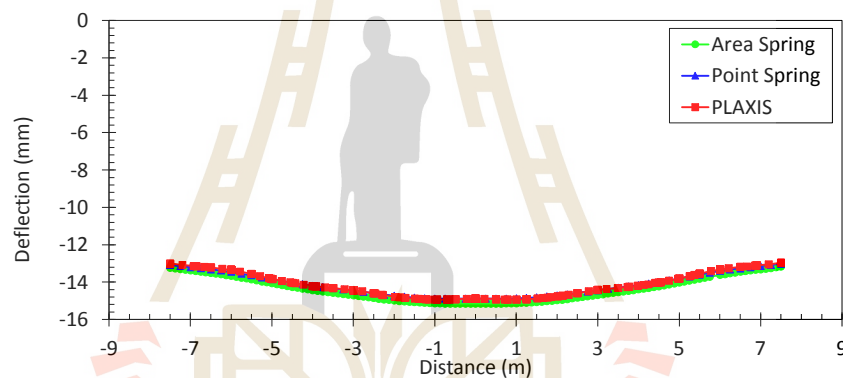
#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสาเข็มระหว่างแบบ area springs และ point springs โดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างส่วนบน

##### 4.3.2.1 ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ uniform loading

เห็นได้ว่าการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่ใน PLAXIS และ SAP2000 โดยจำลองเสาเข็มแบบ area springs มีค่าโมเมนต์ที่สอดคล้องกัน แต่สำหรับการจำลองเสาเข็มแบบ point springs ทำให้ mat เกิดโมเมนต์ที่เป็นลบสูงกว่าเท่ากับ 62.14% ดังรูปที่ 4.9 และพบว่า การจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS และ SAP2000 โดยวิธีแบบ plate on springs ทั้ง 2 แบบมีการทรุดตัวที่สอดคล้องกันมาก ดังรูปที่ 4.10 โดยมีการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางของ mat มากที่สุด และมีลักษณะเป็นรูปถ้วย และพบว่าผลการวิเคราะห์โมเมนต์คัดของฐานรากมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amornfa (2012) เป็นอย่างมาก แต่ในงานวิจัยนี้กลับให้ผลการทรุดตัวที่สอดคล้องกันระหว่างการจำลอง SAP2000 และ PLAXIS 3D มากกว่างานวิจัยของ Amornfa (2012) เนื่องจากในงานวิจัยของ Amornfa (2012) ใช้การประมาณ modulus of subgrade reaction ได้ฐานรากโดยมีค่าเท่ากับ 10000 kN/m แต่ในงานวิจัยนี้คำนวณได้เท่ากับ 8416.24 kN/m ดังสมการที่ 4.3



รูปที่ 4.9 โมเมนต์คดใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A



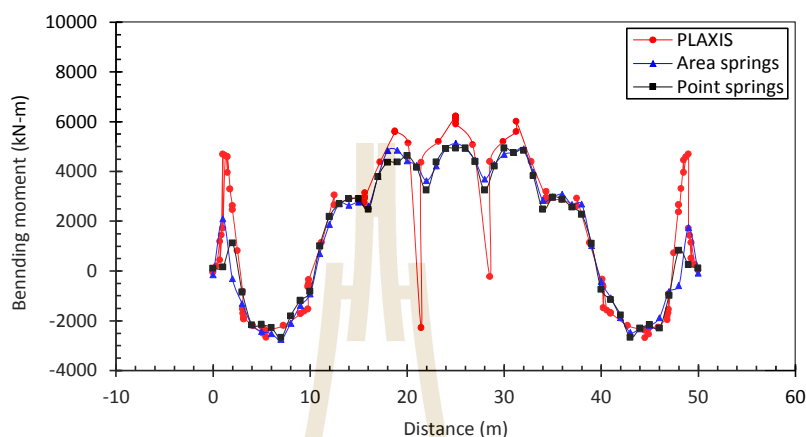
รูปที่ 4.10 การแอ่นตัวของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A

#### 4.3.2.2 ฐานรากแผ่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ core-edge loading

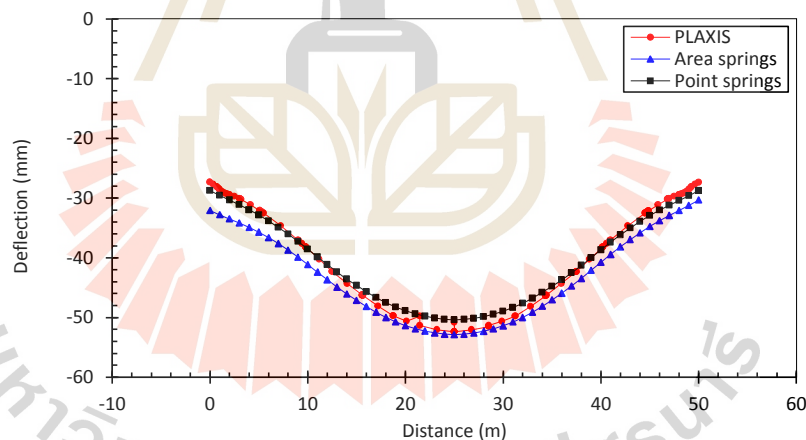
จากรูปที่ 4.11 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นใน mat จากการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่ใน PLAXIS 3D และการจำลองแบบ plate on springs ทั้ง 2 แบบ โดย ETABS มีความสอดคล้องกัน โดย mat เกิดโมเมนต์ที่เป็นบวกสูงมากในบริเวณกลาง mat และผลการวิเคราะห์จาก PLAXIS 3D มีค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกสูงกว่าผลการวิเคราะห์จาก ETABS เพียงเล็กน้อย และพบว่า การจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS 3D และ ETABS โดยวิธีแบบ plate on springs ทั้ง 2 แบบมีการทรุดตัวที่สอดคล้องกัน โดยการทรุดตัวเกิดขึ้นในบริเวณส่วนกลางของ mat มากที่สุด การทรุดตัวมีลักษณะเป็นรูปที่ถ้วย และการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่ด้วยวิธีแบบ plate on area springs โดย ETABS เกิดการทรุดตัวมากกว่าแบบจำลองกรณีอื่นเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.12 ดังนั้น การเลือกใช้การจำลอง



เสาเข็มแบบ point springs อาจเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการวิเคราะห์เนื่องจากมีกระบวนการจำลองที่สะดวกและมีความซับซ้อนน้อยกว่าการจำลองเสาเข็มแบบ area springs



รูปที่ 4.11 โมเมนต์คดใน mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A

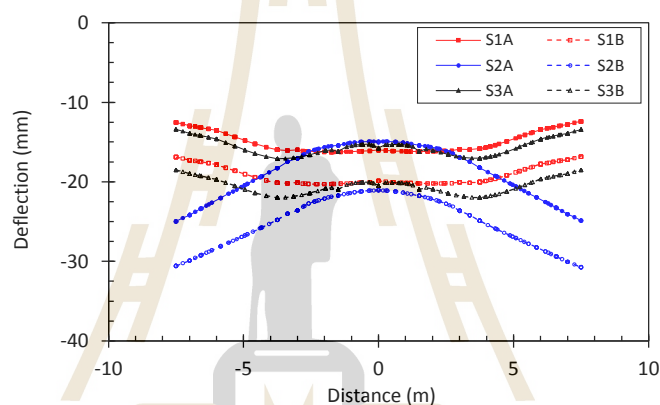


รูปที่ 4.12 การแอ่นตัวของ mat ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A

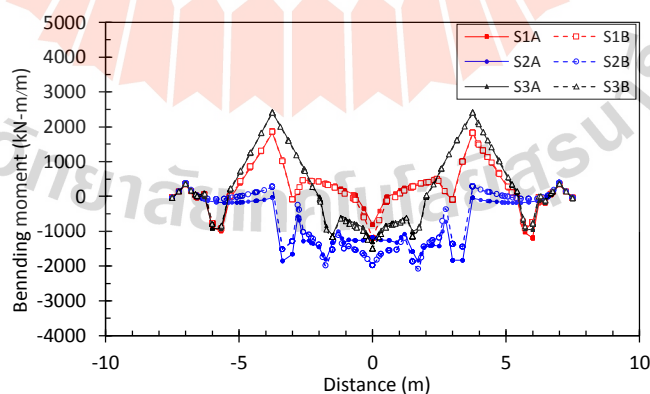
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ห้อทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มต่อแรงในโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์ห้อทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็ม แสดงให้เห็นว่าสำหรับฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส การจัดเรียงเสาเข็มแบบกรณี S1A และ S3A ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 มีการทรุดตัวของ mat คล้ายคลึงกัน ส่วนกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core กรณี S2A ทำให้ mat ส่วนกลางมีการทรุดตัวต่ำกว่าขอบ mat ซึ่งกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core นี้เป็นกรณีที่สมมุติขึ้นตาม

งานวิจัยของ Randolph (2004) ซึ่งไม่สามารถใช้ได้หากกรณีของ mat วางอยู่บนชั้นดินอ่อน แต่สำหรับการจำลองในกรณีนี้ mat วางอยู่บนชั้นดินแข็งที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงถึง  $90 \text{ kN/m}^2$  ซึ่งเป็นชั้นดินจากงานวิจัยของ Amornfa (2012) จากตารางที่ 2.10 พบว่าดินบริเวณขอบ mat เกิดการวิบัติจนทำให้เกิดการทรุดตัวเป็นรูปถ้วยคว่ำหรือรูปดอกเห็ด สำหรับการแปรผันระดับปลายเสาเข็มในกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากฐานรากมีความกว้างเพียง 15 เมตร ซึ่งทำให้ฐานรากมีสตีเฟนสูงจนอาจถือได้ว่าเป็นฐานรากแกร่ง ประกอบกับการจัดเรียงเสาเข็มทั้งหมดเข้าไปรองใต้ core จึงทำให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มลดลงทำให้อิทธิพลของการวิบัติแบบกลุ่มเกิดขึ้นเป็นหลัก

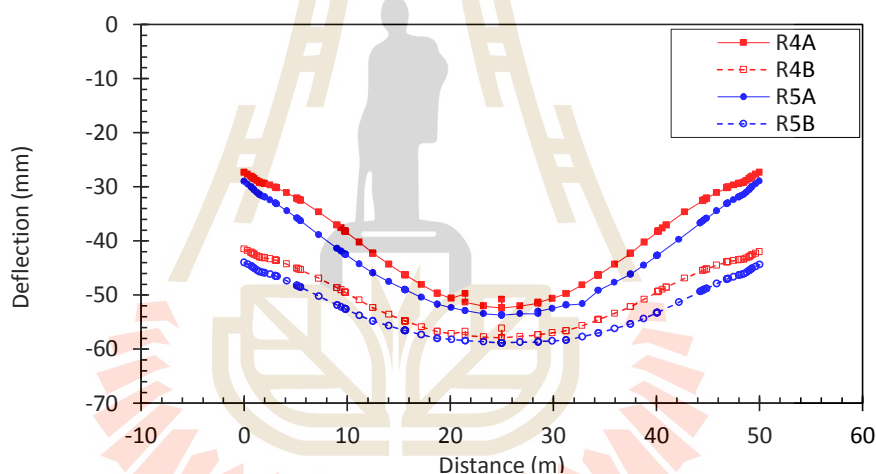


รูปที่ 4.13 การแอ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

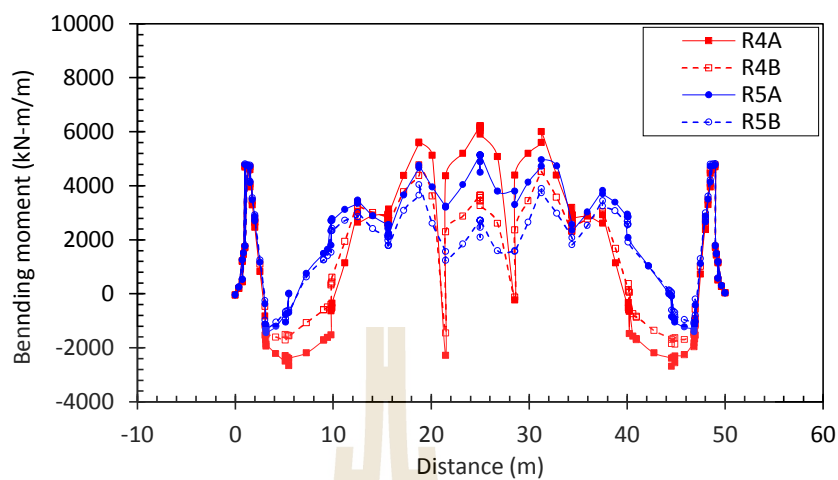


รูปที่ 4.14 โมเมนต์ดัดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

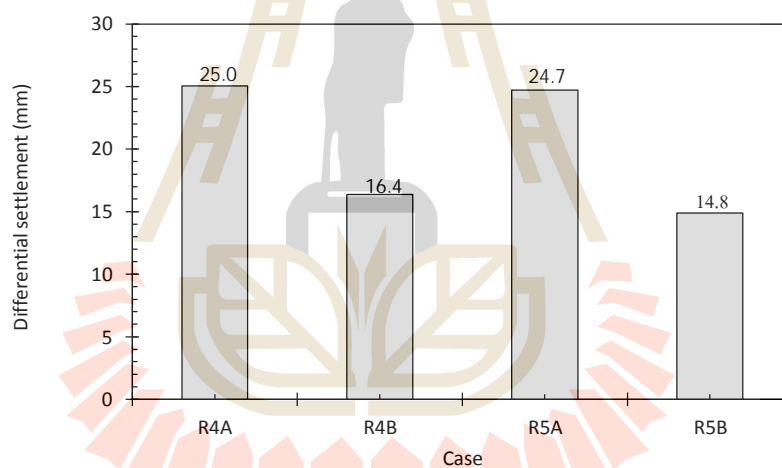
ในกรณีของ mat สี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B ซึ่งเป็นฐานรากที่มีสตีเฟนต่ำกว่าฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสในงานวิจัยนี้เนื่องจากฐานรากมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างต่ำกว่า เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดการแอ่นของ mat ซึ่งอาจใช้เป็นรัศมีความโค้ง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าทรุดตัวที่ขอบ mat เทียบกับการทรุดตัวมากที่สุดที่กลาง mat,  $\Delta_{mat}$  เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบ สำหรับ mat กรณี R4A และ R4B เห็นได้ว่าการปรับลดความยาวเสาเข็มลงโดยให้เสาเข็มส่วนกลาง mat ยาวที่สุดทำให้  $\Delta_{mat}$  ลดลงจาก 25.0 มิลลิเมตร ลงเหลือ 16.4 มิลลิเมตร คิดเป็น 34.4% ดังรูปที่ 4.17 สำหรับกรณี R5A และ R5B ที่ใช้เสาเข็มรับเฉพาะส่วน core และส่วนเสาอาคารก็ได้ผลการทรุดตัวที่คล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ 4.15 แต่เมื่อพิจารณาจากโมเมนต์ตัดพบว่ากรณี R5A และ R5B ที่ใช้เสาเข็มเฉพาะบริเวณ core และเฉพาะส่วนเสาทำให้เกิดโมเมนต์ตัดต่ำกว่ากรณีฐานราก R4A เท่ากับ 17.4%, 56.3% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16 และ 4.18



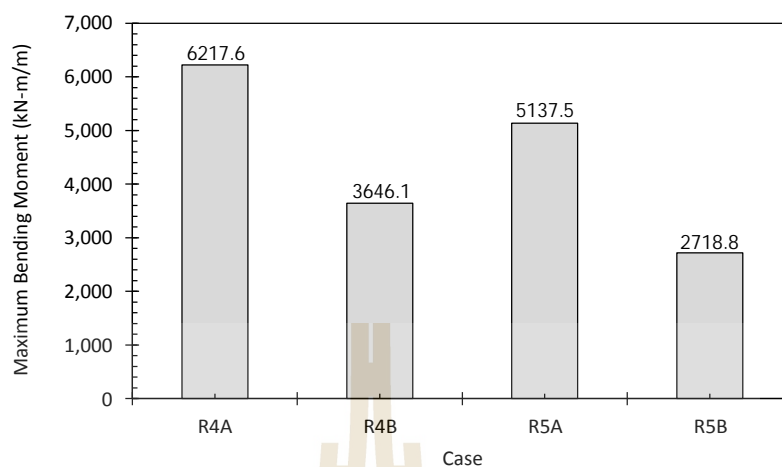
รูปที่ 4.15 การแอ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B



รูปที่ 4.16 โมเมนต์คดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B



รูปที่ 4.17 การทรุดตัวที่แตกต่างกันของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B



รูปที่ 4.18 โมเมนต์ค้ดสูงสุดนใน mat กรณีสฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลการทรุดตัวของ mat ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมโครงสร้างอาคารสูงส่วนบน

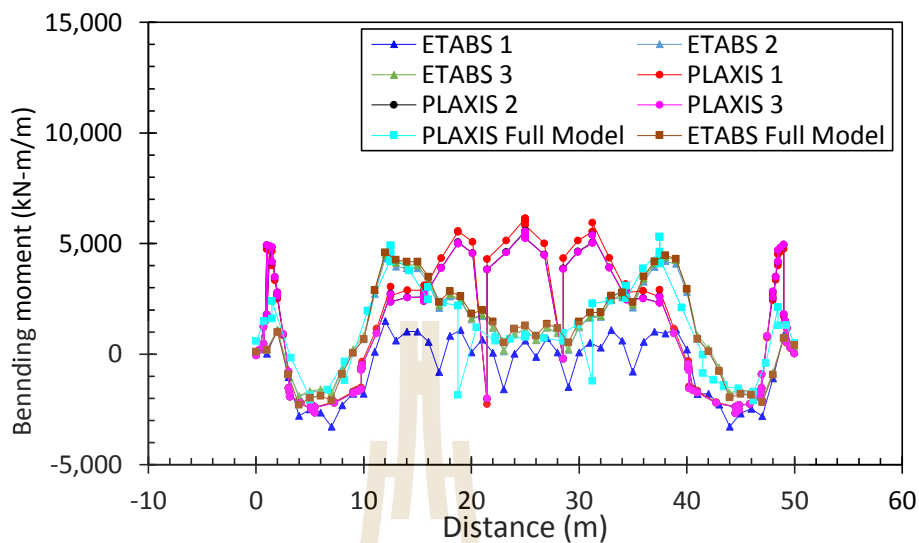
##### 4.5.1 การ iteration โดยการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

จากผลการวิเคราะห์โดยการ iteration ระหว่าง ETABS และ PLAXIS กรณีสฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A โดยการ iteration ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าผลการวิเคราะห์ในรอบที่หนึ่งการทรุดตัวและโมเมนต์ของ mat จากการวิเคราะห์โดย ETABS มีค่าน้อยมากและมีลักษณะทรุดตัวแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากจำลองสปริงที่มีค่าสติเฟนส์ตั้งต้นจากผลการทดสอบเสาเข็มซึ่งมีค่าเท่ากันทุกต้น ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่ได้รวมผลเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat ในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงแรงกระทำที่โคนเสา จาก ETABS ไปเป็นแรงกระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D รอบที่หนึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat มีการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุดโดยมีลักษณะเป็นรูปถ้วย และมีค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกค่อนข้างสูง ในขั้นตอนนี้สปริงที่ได้ถือว่าได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat แล้วแต่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากในการจำลอง PLAXIS 3D นั้นไม่ได้รวมเอาผลเนื่องจากสติเฟนส์ของอาคารส่วนบนเข้าไปด้วย ดังนั้นนำค่าสติเฟนส์ของเสาเข็มแต่ละต้นและ modulus of subgrade reaction ไปวิเคราะห์ใน ETABS เป็นรอบที่สองเพื่อนำแรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ในรอบที่สองนี้มาใช้เป็นแรงกระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D เข้าเป็นรอบที่สอง จากผลการวิเคราะห์ในรอบที่สองระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D พบว่าการทรุดตัวและโมเมนต์ค้ดที่เกิดขึ้นใน mat ไม่สอดคล้องกัน จึงทำการวิเคราะห์ซ้ำเป็นรอบที่สาม พบว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat จาก ETABS และ PLAXIS 3D ในรอบที่สองและ

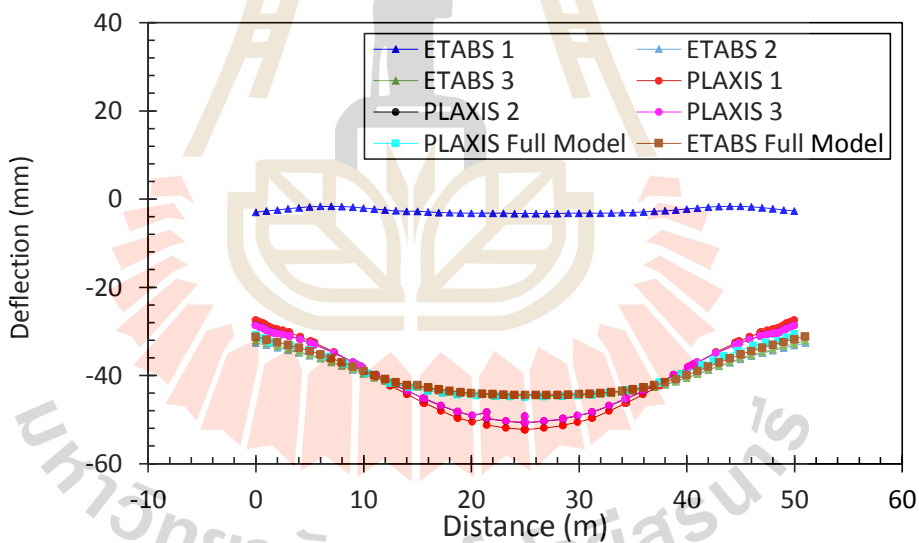
สามมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นน้อยมาก และให้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกัน โดยผลการวิเคราะห์จาก ETABS เกิดการทรุดตัวในบริเวณส่วนกลางของ mat สม่าเสมอ ทำให้มีค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกน้อยมากเนื่องจากบริเวณส่วนกลางของ mat มีการแอ่นตัวที่น้อยมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก PLAXIS ซึ่งมีการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุดโดยมีลักษณะเป็นรูปถ้วย และมีค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกสูงมาก โดยการ iteration รอบที่สองและสามระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D มีค่าทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันถึง 12.59 % และ 12.15% ตามลำดับ และสำหรับการ iteration รอบที่หนึ่งมีค่าการทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันถึง 93.73% ดังตารางที่ 4.4 จากการ iteration ดังรูปที่ 4.21 เห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแต่ละระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D มีแนวโน้มไม่เข้าใกล้กัน โดยมีลักษณะเป็นเส้นขนาน

ดังนั้นจึงได้ศึกษากรณีเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบทำการเปรียบเทียบการ iteration ร่วมกันระหว่าง PLAXIS 3D และ ETABS โดยการจำลอง PLAXIS 3D ที่มีโครงสร้างอาคารสูงรองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า Full model ดังรูปที่ 4.22 โดยวางอยู่ในชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat แล้วนำค่าสติเฟนสของเสาเข็มแต่ละต้นและ modulus of subgrade reaction ที่ได้จากการวิเคราะห์ใน PLAXIS 3D มาวิเคราะห์การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในฐานรากอาคารสูงโดย ETABS จากผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาเพิ่มเติมโดย PLAXIS 3D พบว่าการทรุดตัวและโมเมนต์ของ mat มีค่าสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นใน ETABS และสอดคล้องผลการวิเคราะห์จากการ iteration โดย ETABS ในรอบที่สองและสาม ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 จากการวิเคราะห์แบบ Full model นี้แสดงให้เห็นว่าการ iteration โดยวิเคราะห์ร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D ได้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากโครงสร้างอาคารสูงมี core wall ขนาดใหญ่มากที่สามารถส่งผลต่อพฤติกรรมการคัดต่อพื้นและชั้นฐานรากซึ่งในการจำลองได้พิจารณาเฉพาะแรงกระทำในแนวตั้งอาจไม่เพียงพอ





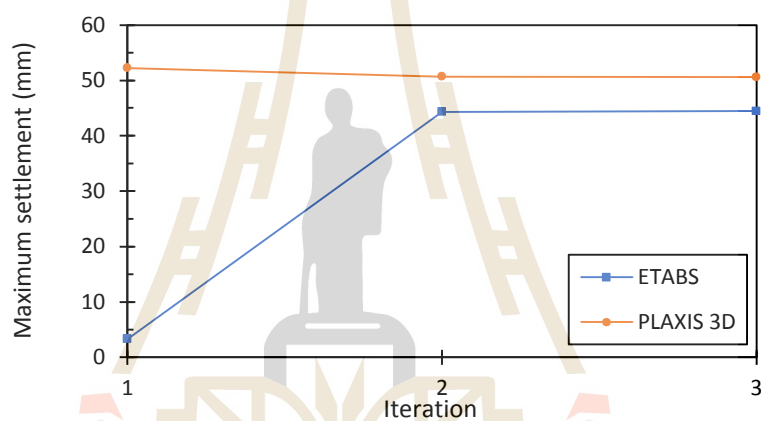
รูปที่ 4.19 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A



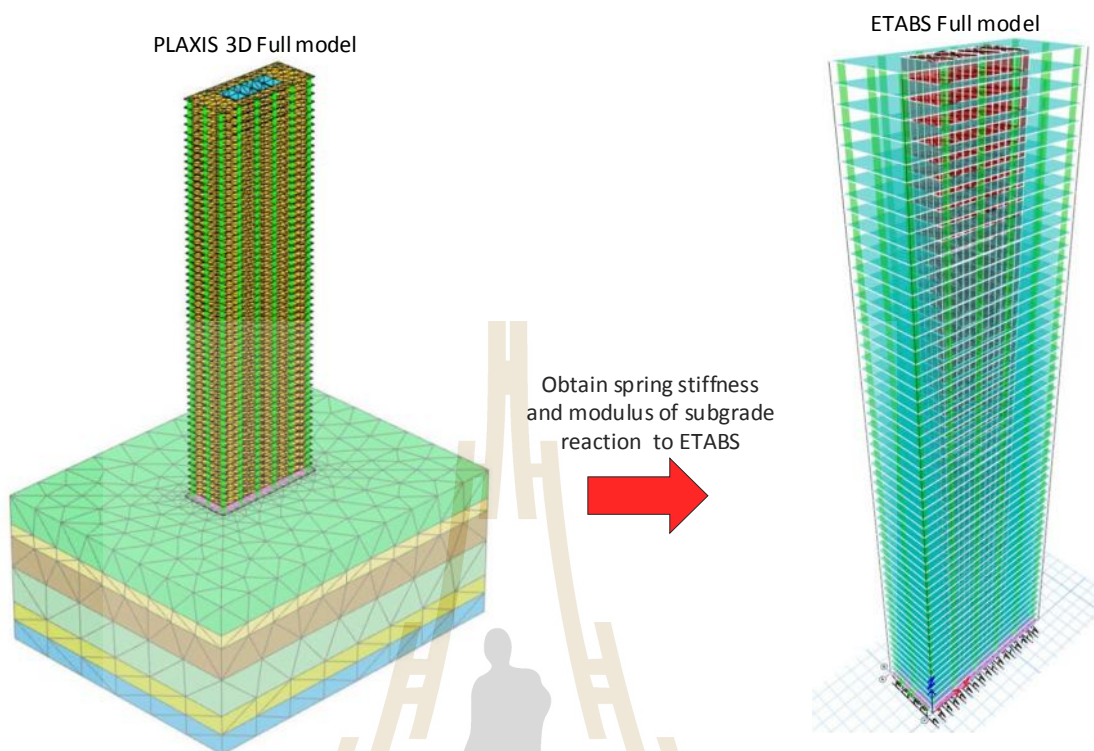
รูปที่ 4.20 โมเมนต์คัตใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสูงสุดระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration

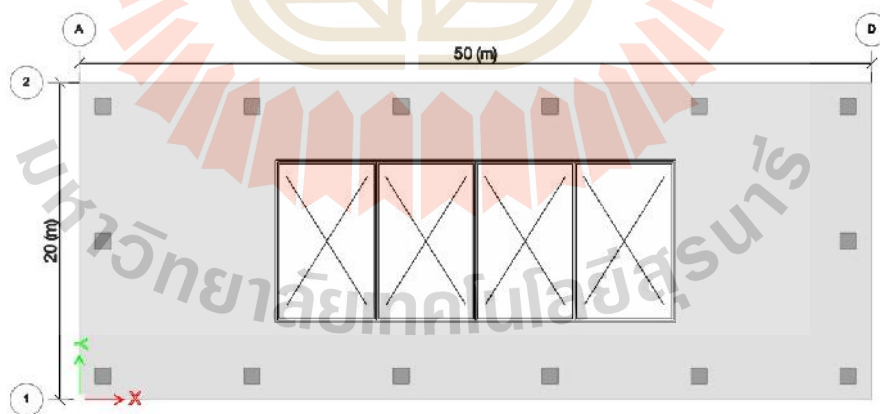
Iteration	Maximum settlement (mm)		Difference %
	ETABS	PLAXIS 3D	
Iteration 1 <sup>st</sup>	3.27	52.24	93.73
Iteration 2 <sup>nd</sup>	44.29	50.67	12.59
Iteration 3 <sup>rd</sup>	44.45	50.60	12.15
Full Model	44.38	44.84	1.03



รูปที่ 4.21 แนวโน้มค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นใน mat ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration



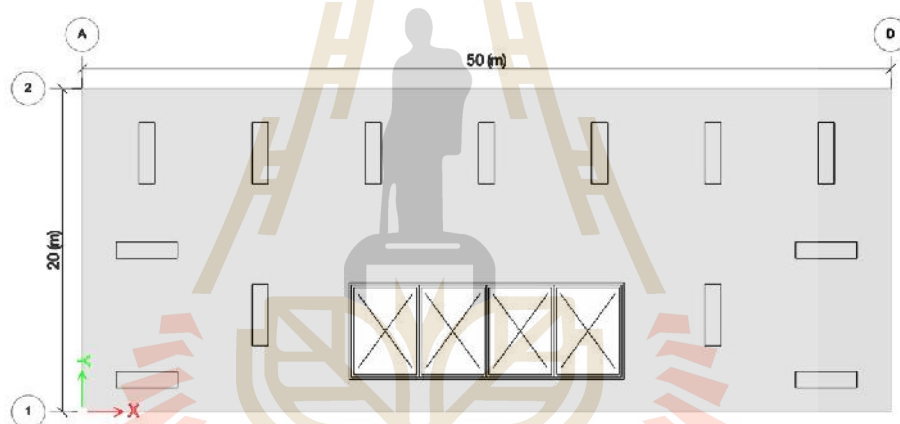
รูปที่ 4.22 แบบจำลอง Full model ของกรณีฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A โดยจำลองโครงสร้างอาคารสูงที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS และ ETABS



รูปที่ 4.23 การจัดวาง core wall และ column ในรูปแบบที่ R4A

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นที่กล่าวมา พบว่ากรณีฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A มีขนาด core wall ที่มีพื้นที่ถึง 25% ของพื้นที่ฐานรากทั้งหมด ดังรูปที่ 4.23 ทำให้ core wall ที่มีสติเฟนสูงส่งอิทธิพลต่อการค้ำของพื้นในแต่ละชั้นรวมถึงการค้ำที่เกิดขึ้นใน mat ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ปัญหา

ดังกล่าวจึงเพิ่มแบบจำลองกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A โดยเสาเข็มมีขนาด, ความยาว และการจัดเรียงเหมือนกับกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A ซึ่งแตกต่างเพียงขนาดและตำแหน่งของ core wall และ column wall โดยจำลองพื้น, ฐานราก, core wall และ column wall เป็นแบบ shell element โดยเลือกประเภทเป็น shell thin สำหรับการจำลองใน ETABS ซึ่งออกแบบให้มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบของโครงการที่วิจัยมากที่สุด ซึ่ง core wall มีพื้นที่ลดลงเหลือเพียง 10.2% ของพื้นที่ฐานรากทั้งหมด การจำลองฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรณี R6A ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลเนื่องจากสตีเฟนจากโครงสร้างส่วนบนจากการ iteration เพียงอย่างเดียว และไม่สามารถใช้ในการเปรียบเทียบการลดการแอ่นกับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรณี R4 และ R5 ได้เนื่องจากฐานรากมีลักษณะของการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมจากเสาส่วนล่างที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.24 โดยขนาดและคุณสมบัติของ โครงสร้างอาคารและฐานรากเสาเข็มแผ่ ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.24 การจัดวาง core wall และ column wall กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A

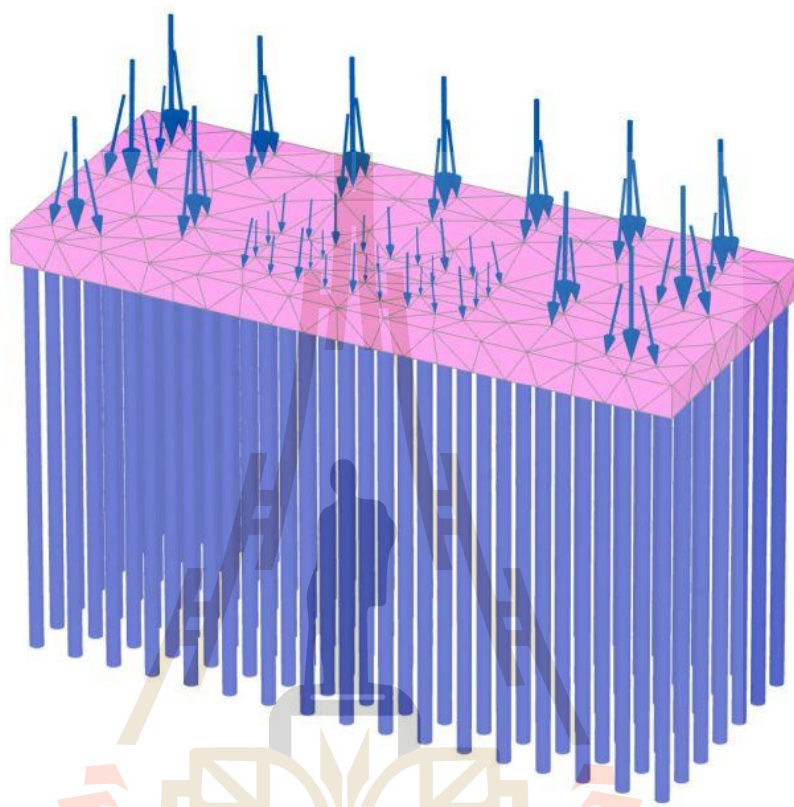
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของ โครงอาคารสูงและฐานรากเสาเข็มแผ่ R6A

Material	width (m)	length (m)	height (m)	thickness (m)	unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (MPa)	$\nu$
Column wall 1 <sup>st</sup> -51 <sup>st</sup> floor	1	3.8	3	-	24	33.11	0.2
Core wall 1 <sup>st</sup> -51 <sup>st</sup> floor	5.7	16.7	3	0.3	24	33.11	0.2
Slap	20	50	-	0.3	24	29.61	0.2
Raft	20	50	-	2.5	24	24.78	0.2
Bore pile	1		30	-	24	24.78	0.2

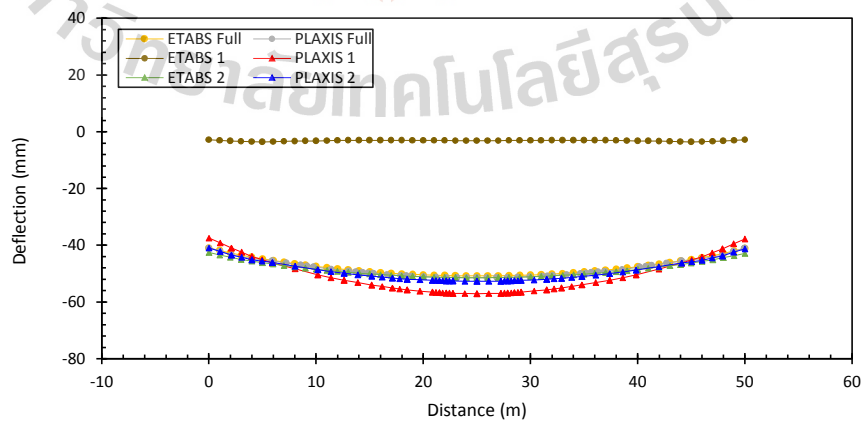
สำหรับการจำลองกรณีฐานราก R6A โดยการ iteration ร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D โดยการจำลองครั้งนี้ได้พิจารณาผลของสติฟเนสจาก core wall และ column wall ที่มีผลต่อการโก่งคดของ mat โดยนำแรงกระทำและโมเมนต์คดทุกแนวแกน ได้แก่  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_{x-x}$ ,  $M_{y-y}$ ,  $M_{z-z}$  ดังรูปที่ 4.25 ที่วิเคราะห์ได้จาก ETABS ในแต่ละรอบมากระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D ดังรูปที่ 4.26 พบว่าผลการวิเคราะห์ในรอบที่หนึ่งการทรุดตัวและโมเมนต์ของ mat จากการวิเคราะห์โดย ETABS มีค่าน้อยมากและมีลักษณะทรุดตัวแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากจำลองสปริงที่มีค่าสติฟเนสตั้งต้นจากการทดสอบเสาเข็มซึ่งมีค่าเท่ากันทุกต้น ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่ได้รวมผลเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat ในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงแรงกระทำที่โคนเสาจาก ETABS ไปเป็นแรงกระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D รอบที่หนึ่ง พบว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat มีการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุดโดยมีลักษณะเป็นรูปถ้วย และมีค่าโมเมนต์ที่เป็นบวกสูง ในขั้นตอนนี้สปริงที่ได้ถือว่าได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat แล้วแต่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากการจำลอง PLAXIS 3D นั้นไม่ได้รวมเอาผลเนื่องจากสติฟเนสของอาคารส่วนบนเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องนำสติฟเนสของสปริงของเสาเข็มแต่ละต้นและ modulus of subgrade reaction มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงโดย ETABS และนำแรงกระทำโคนเสา ซึ่งเป็นแรงกระทำและโมเมนต์คดทุกแนวแกนจาก ETABS ในรอบที่สองนี้มาใช้เป็นแรงกระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D เข้าเป็นรอบที่สอง จากผลการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D ในรอบที่สองและรอบที่หนึ่งเห็นได้ว่า mat เกิดการโค้งแอ่นน้อยลงหรือเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันลดลงทำให้ mat มีค่าโมเมนต์ลดลงตามไปด้วย และผลการวิเคราะห์การทรุดตัวและโมเมนต์ของ mat ในรอบที่สองโดย ETABS และ PLAXIS 3D มีความสอดคล้องมาก ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 โดยการ iteration รอบที่สองระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D มีค่าทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันเพียง 2.43 % และสำหรับการ iteration รอบที่หนึ่งมีค่าการทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันถึง 94.5% ดังตารางที่ 4.6 จากการ iteration พบว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D มีแนวโน้มเข้าใกล้กันมากขึ้น ดังรูปที่ 4.28

เพื่อตรวจสอบความบกพร่องจากผลการวิเคราะห์โดยกระบวนการ iteration ร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จึงเพิ่มแบบจำลองโดยการจำลองโครงสร้างอาคารสูงรองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS 3D ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า PLAXIS Full model ดังรูปที่ 4.29 โดยวางอยู่ในชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ของโครงการที่วิจัย แล้วนำค่าสติฟเนสของเสาเข็มแต่ละต้นและ modulus of subgrade reaction ที่ได้จากการวิเคราะห์ใน PLAXIS Full model มาวิเคราะห์การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในฐานรากอาคารสูงโดย ETABS พบว่าการทรุดตัวและโมเมนต์ของ mat มีค่าสอดคล้องกับ

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นใน ETABS และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากการ iteration โดย ETABS ในรอบที่สองมาก ดังตารางที่ 4.6

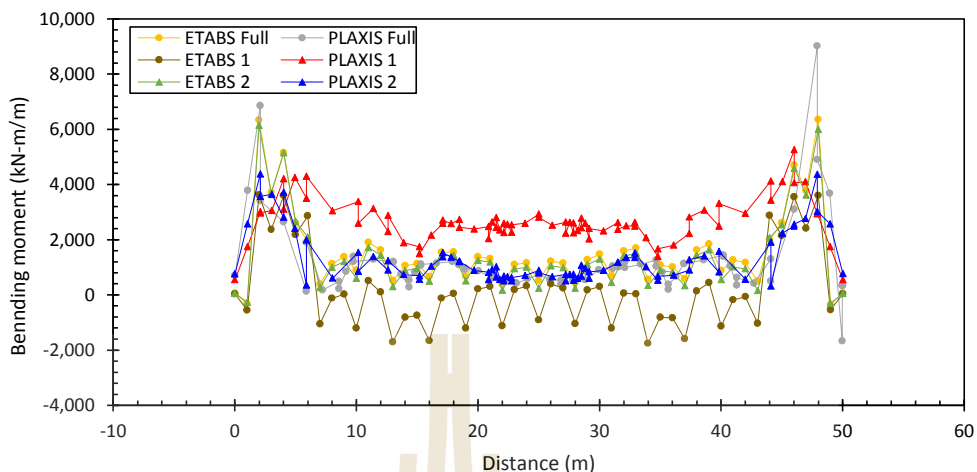


รูปที่ 4.25 แรงกระทำและ โมเมนต์ตัดทุกแนวแกนที่ โคนเสาจาก ETABS กระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D



รูปที่ 4.26 การแอนตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมพื้นผ้า R6A

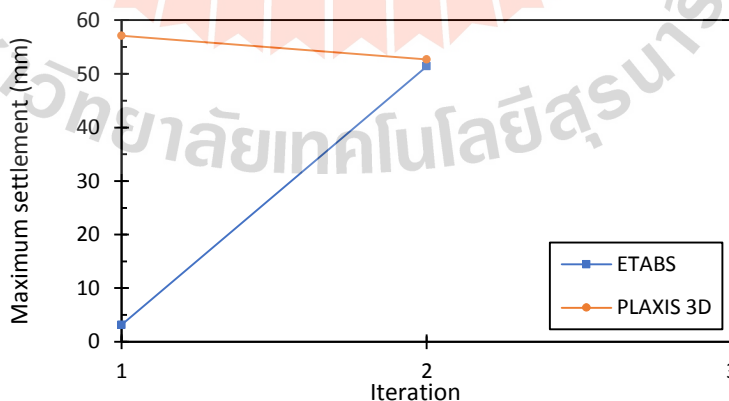




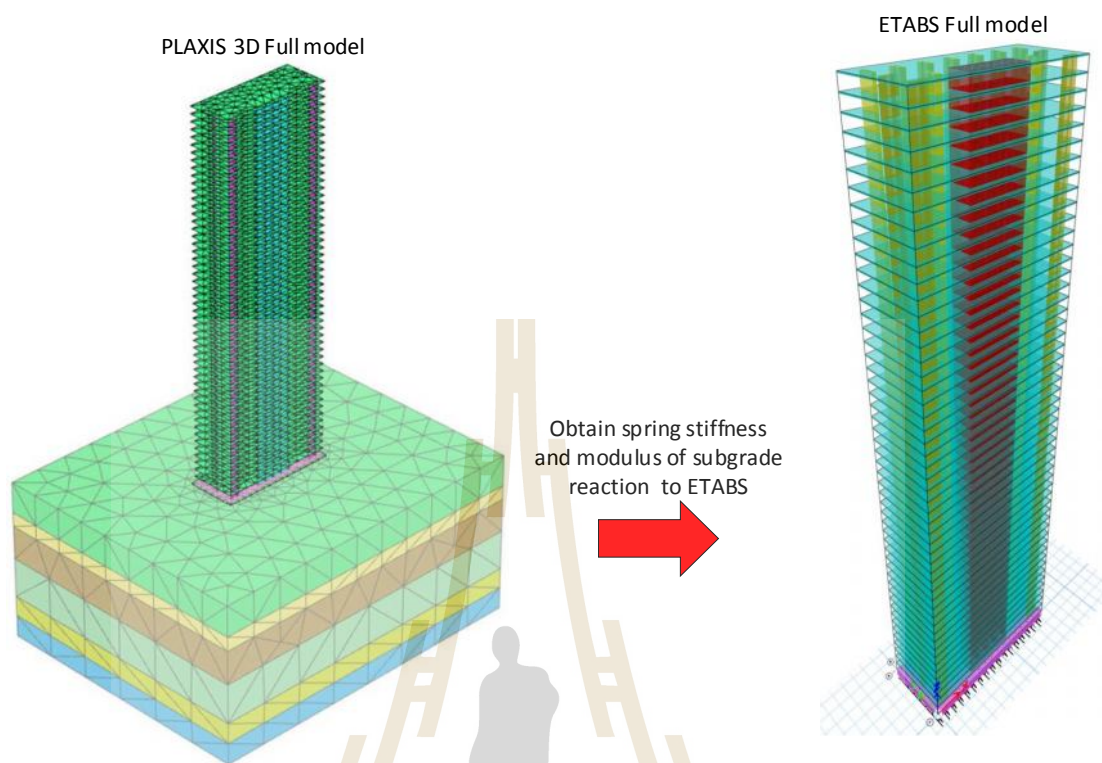
รูปที่ 4.27 โมเมนต์คดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสูงสุดระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration

Iteration	Maximum settlement (mm)		Difference %
	ETABS	PLAXIS 3D	
Iteration 1 <sup>st</sup>	3.14	57.10	94.5
Iteration 2 <sup>nd</sup>	51.40	52.68	2.43
Full Model	50.79	51.41	1.21



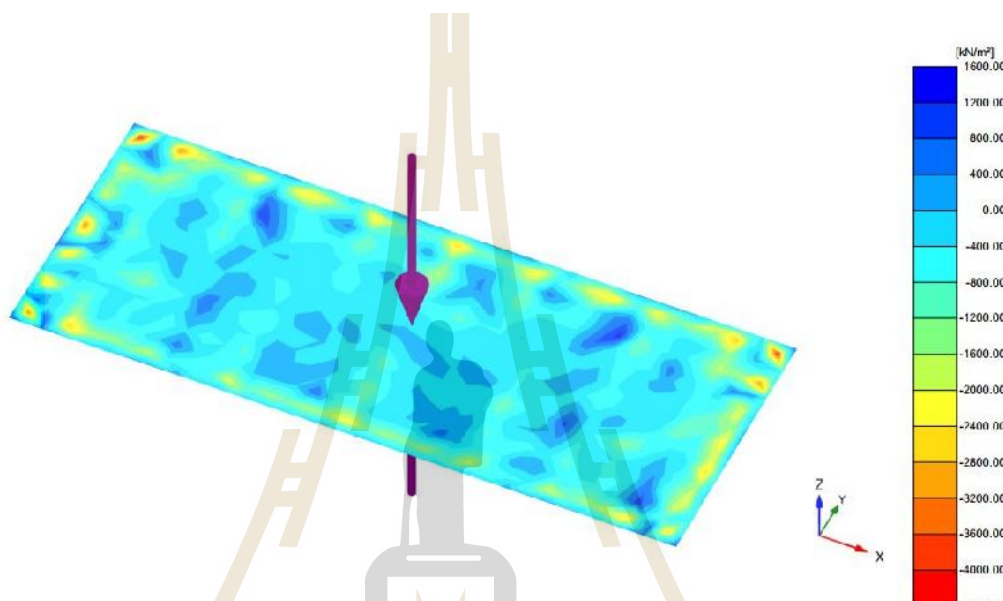
รูปที่ 4.28 แนวโน้มค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นใน mat ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D จากการ iteration



รูปที่ 4.29 แบบจำลอง Full model ของกรณีฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A โดยจำลองโครงสร้างอาคารสูงที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็มแผ่โดย PLAXIS 3D และ ETABS

สำหรับการคำนวณค่า modulus of subgrade reaction ได้จากการนำผลต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดคลบแรงที่หัวเสาเข็มทุกต้น พบว่าแรงดันดินที่กระทำกลับต่อฐานรากทั้งหมดเท่ากับ  $75,875.66 \text{ kN}$  และฐานรากมีพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ  $1000 \text{ m}^2$  และเกิดการทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0457 \text{ mm}$  จากสมการที่ 4.3 ดังนั้นค่า modulus of subgrade reaction ได้เท่ากับ  $1,659.44 \text{ kN/m}^3$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันดินใต้ฐานรากโดย ETABS ในกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R6A ซึ่งมีผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากจากการ iteration ระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D สอดคล้องกันมาก ดังรูปที่ 4.28 แต่หากพิจารณาจากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าแรงดันดินที่เกิดขึ้นใต้ฐานรากมีความแปรปรวนมากสูงมาก ดังนั้นการอ่านค่าแถบสีจากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D อาจจะสามารถคำนวณแรงดันดินใต้ฐานรากได้โดยการประมาณ effective normal stress โดยพิจารณาเฉพาะกลุ่มสีส่วนใหญ่ที่เหมือนกันมากที่สุด สำหรับในกรณีนี้แรงดันดินใต้ฐานรากมีค่าอยู่ระหว่าง  $0-400 \text{ kN/m}^2$  ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง และหากคำนวณ modulus of subgrade reaction เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ใน ETABS ได้จากการนำ effective normal stress มาหารด้วยการทรุดตัวเฉลี่ยทั้งหมดของฐานราก จากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D ซึ่งหากเลือกแรงดันดินใต้ฐานรากเท่ากับ

400 kN/m<sup>2</sup> ดังนั้น modulus of subgrade reaction จะเท่ากับ 8,748.20 kN/m<sup>3</sup> ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าจากวิธีการคำนวณในสมการที่ 4.3 อยู่เท่ากับ 81% ซึ่งทำให้การทรุดตัวระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D ให้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกันเหมือนในรูปที่ 4.28 ดังนั้นการคำนวณค่า modulus of subgrade reaction โดยสมการที่ 4.3 สามารถเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากกว่าและลดปัญหาเรื่องความแปรปรวนจากการอ่านค่าจากกลุ่มสี



รูปที่ 4.30 แรงดันดิน Effective normal stress ใต้ฐานรากโดย PLAXIS 3D

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูง โดยงานงานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D และได้ศึกษาถึงปัจจัยและการแก้ปัญหาของการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารสูงซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่า Young's modulus ที่ทำให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat สอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากสำหรับชั้นดิน soft to medium clay มีค่า  $E_u = 150S_u$ ,  $E' = 130S_u$  และในชั้น very stiff to hard clay มีค่า  $E_u = 500S_u$ ,  $E' = 435S_u$  ส่วนชั้นทรายนั้นใช้ค่าeffective Young's modulus มีค่า  $E' = 2000N_{60}$  โดยมีค่าความคลาดของการทรุดตัวระหว่างการจำลองโดยวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat กับค่าการตรวจวัดการทรุดตัวในสนามซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0% และค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 47%

2. สำหรับสติเฟนของเสาเข็มสำหรับวิเคราะห์ฐานรากที่รองรับโครงสร้างอาคารสูงโดย ETABS ซึ่งจำลองสปริงแทนเสาเข็ม โดยสติเฟนของเสาเข็มเป็นค่าที่เกิดจากการ Iteration โดยการพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นดินและฐานรากเสาเข็มรวมไปถึงผลเนื่องจากสติเฟนจากโครงสร้างส่วนบน ซึ่งได้แก่ vertical load, horizontal loads และ bending moment โดยค่าค่าสติเฟนของเสาเข็มแต่ละต้นจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน โดยมีค่าน้อยที่บริเวณกลางฐานราก และมากขึ้นในบริเวณขอบของฐานราก และควรเพิ่ม modulus of subgrade reaction ได้ฐานรากสำหรับการจำลองใน ETABS เพื่อให้ฐานรากสามารถช่วยเสาเข็มในการรองรับแรง ทำให้ฐานรากมีการทรุดตัวและการถ่ายแรงระหว่างฐานรากและเสาเข็มสอดคล้องกับพฤติกรรมจากการวิเคราะห์โดย PLAXIS 3D มากที่สุด

3. การจัดเรียงเสาเข็มและการแปรผันความยาวเสาเข็มสามารถลดการทรุดตัวที่ต่างกันและลดโมเมนต์คดที่เกิดขึ้นภายในฐานรากได้ โดยเปรียบเทียบกับกรณี R4A ซึ่งเป็นฐานรากรูป

แบบทั่วไปที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มแบบสม่ำเสมอและเสาเข็มมีความยาวเท่ากัน โดยการตัด section ตามแนวยาวที่กลางฐานราก พบว่ารูปแบบฐานรากกรณี R4B, R5A, R5B สามารถช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้ 34.4%, 1.2%, 40.8% ตามลำดับ และช่วยลดโมเมนต์คัดสูงสุดที่ฐานรากได้ 41.4%, 17.4%, 56.3% ตามลำดับ โดยการจัดเรียงเสาเข็มและการแปรผันความยาวเสาเข็มของรูปแบบฐานรากกรณี R5B สามารถช่วยลดค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันและลดโมเมนต์คัดสูงสุดได้มากที่สุด ทำให้การก่อสร้างฐานรากรูปแบบ R5B มีความประหยัดมากที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต

ในงานวิจัยถึงแม้ว่าจะสามารถหาค่าสถิติของดินได้จริงโดยมาจากการวิเคราะห์กลับจากผลการตรวจวัดเพียงกรณีเดียวนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์กลับจากผลการตรวจวัดเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการวิจัยนี้



## รายการอ้างอิง

- ทินกร โรจนธรา. (2528). การทำนายการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณดินอ่อนโดยใช้หน่วย แบริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ธานีรินทร์ พงศ์รุจิกิจ. (2528). เทคนิคในการประมาณค่าการทรุดตัวของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นพดล เพียรเวช. (2542). การทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพฯ และปัญหาต่องานวิศวกรรมฐานราก. โยธาสาร 4, น. 29-35.
- นรากร แซ่เล่า. (2546). การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่กรณีฐานรากรับน้ำหนักไม่เพียงพอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปฐม เฉลยวาเรศ. (2529). การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พงษ์ศิลป์ เดชะคนูวงศ์. (2553). การศึกษาพฤติกรรมความเค้นความเครียดของกำแพงดินชนิดเรียงต่อเนื่องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วรวิทย์ รุ่งอรุณนันทย์. (2546). การวิเคราะห์การทรุดตัวของหน่วยแบริงบริเวณคอสะพานด้วยวิธีทางตัวเลข. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ศิริมาส วิเศษศรี. (2541). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเข็มพืดสำหรับงานขุดค้ำยันในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- Amornfa, K., Phienwej, N., & Kitpayuck, P. (2012). **Current practice on foundation design of high-rise buildings in Bangkok**, Thailand. *Lowland technology international*, 14(2, Dec), 70-83.
- Duncan, J.M., & Buchighani, A.L. (1976). **An Engineering Manual for Settlement Studie**. Geotech. Eng. Report, Departure of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 254 - 268.
- El Gendy, O., & El Gendy, A. (2018). **Analysis of Piled raft of Burj Khalifa in Dubai by the program ELPLA**. GEOTEC Software Inc., Canada, 3-23
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M. and Elson, K. (1992). **Piling Engineering** (2<sup>nd</sup> edition), Taylor & Francis.
- Hemsley, J.A. (2000). **Design applications of raft foundations**. Thomas Telford, London.
- Hansbo, S. (1993). **Interaction problems related to the installation of pile groups**. Proc. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 59-66.
- Hirakawa, K., Hamada, J., & Yamashita, K. (2016). **Settlement behavior of piled raft foundation supporting a 300 m tall building in Japan constructed by top-down method**. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(2), 166-169.
- Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C., & Reul, O. (1998). **Piled raft foundation: interaction between piles and raft**. *Darmstadt Geotechnics*, 4(2), 279-296.
- Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G. (1977). **Stress-deformation and strength characteristics**, Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 2, 421-494.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1992). **Prediction of clay behaviour around tunnels using plasticity solutions**. In *Predictive soil mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium held at St Catherine's College, Oxford*, Thomas Telford Publishin, 449-463.
- Mali, S., & Singh, B. (2020). **3D Numerical Modeling of Large Piled-Raft Foundation on Clayey Soils for Different Loadings and Pile-Raft Configurations**. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(1), 1-17.
- Poulos, H.G., & E.H. Davis (1980). **Pile Foundation Analysis and Design**. New York : John Wiley and Sons.

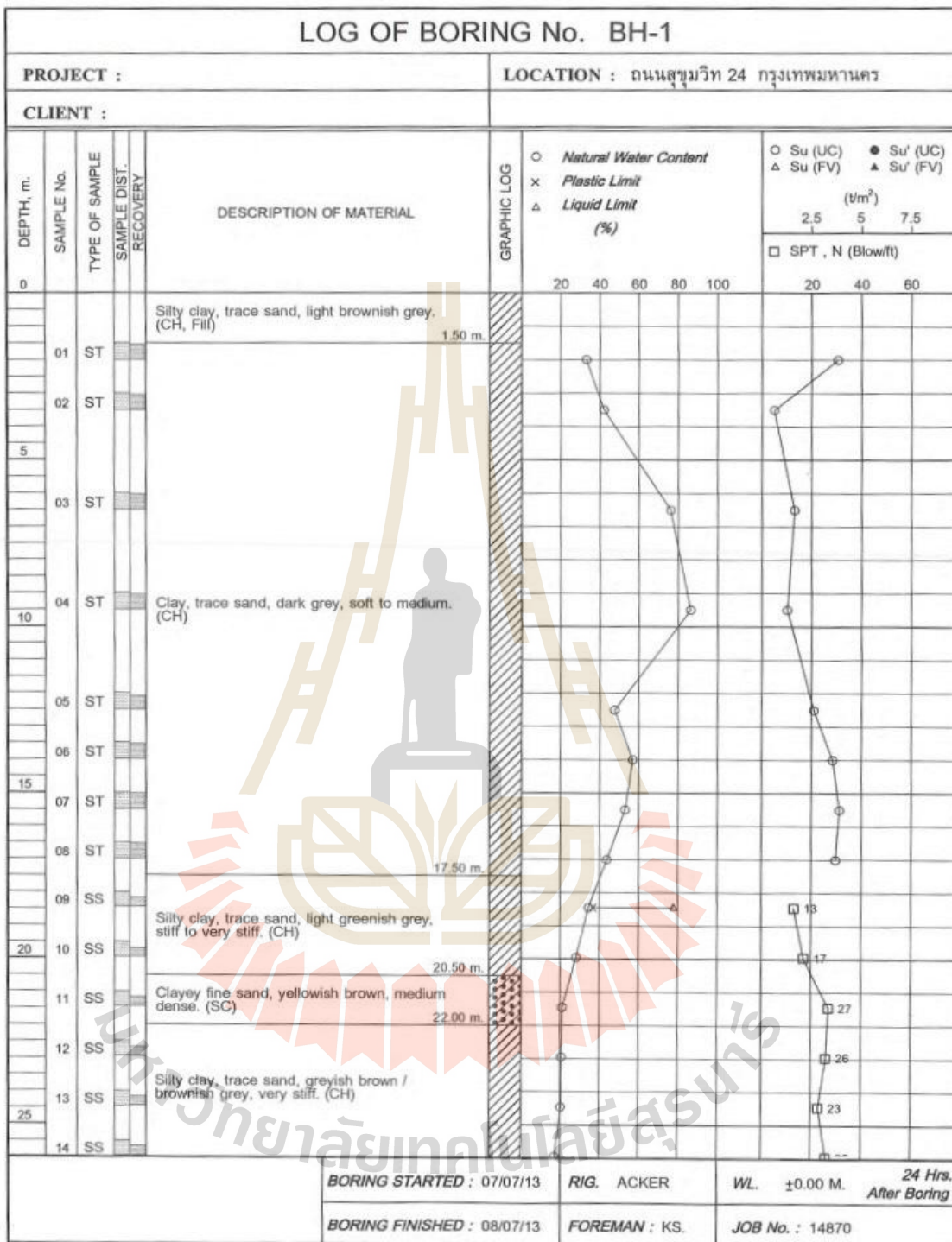
- Poulos, H. G. (2001). **Piled raft foundations: design and applications**. *Geotechnique*, 51(2), 95-113.
- Randolph, M. F. (1994). **Design methods for pile groups and piled rafts**. In International conference on soil mechanics and foundation engineering, 61-82
- Rajakakse R., (2007). **Pile Design for Structural and Geotechnical Engineers (1<sup>st</sup> Edition)**. Butterworth-Heinemann.
- Reul, O., & Randolph, M. F. (2004). **Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(1), 1-13.
- Reul, O. (2000). **In-situ measurements and numerical studies on the bearing behaviour of piled rafts.**, PhD thesis, Darmstadt Univ. of Technology, Darmstadt, Germany (in German).
- Sambhandharaska, S., Pongrujidorn, T., & Chaloeuywares, P. (1987). **Settlements of structures and their predictions in Bangkok subsoils**. In Southeast Asian geotechnical conference. 9, 25-40
- Tamaro, G. J. (1996). **Foundation engineers: why do we need them? 1996 Martin S. Kapp Lecture**. New York: American Society of Civil Engineers.
- Tanseng, P. (2017). **Design and construction of foundation and deep excavation for high-rise building, Seminar on deep basements and foundations**, Society of structural engineer – Sri Lanka.
- Teparaksa, W., Thasnanipan, N., & Tanseng, P. (1999, November). **Analysis of lateral wall movement for deep braced excavation in Bangkok subsoils**. In Proceeding of the Civil and Environmental Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 67-76
- Wroth, C. P., & Houlsby, G. T. (1985). **Soil-Mechanics-Property Characterization and analysis Procedures**. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and FoundationEngineering, San Francisco, (1), 1–55.

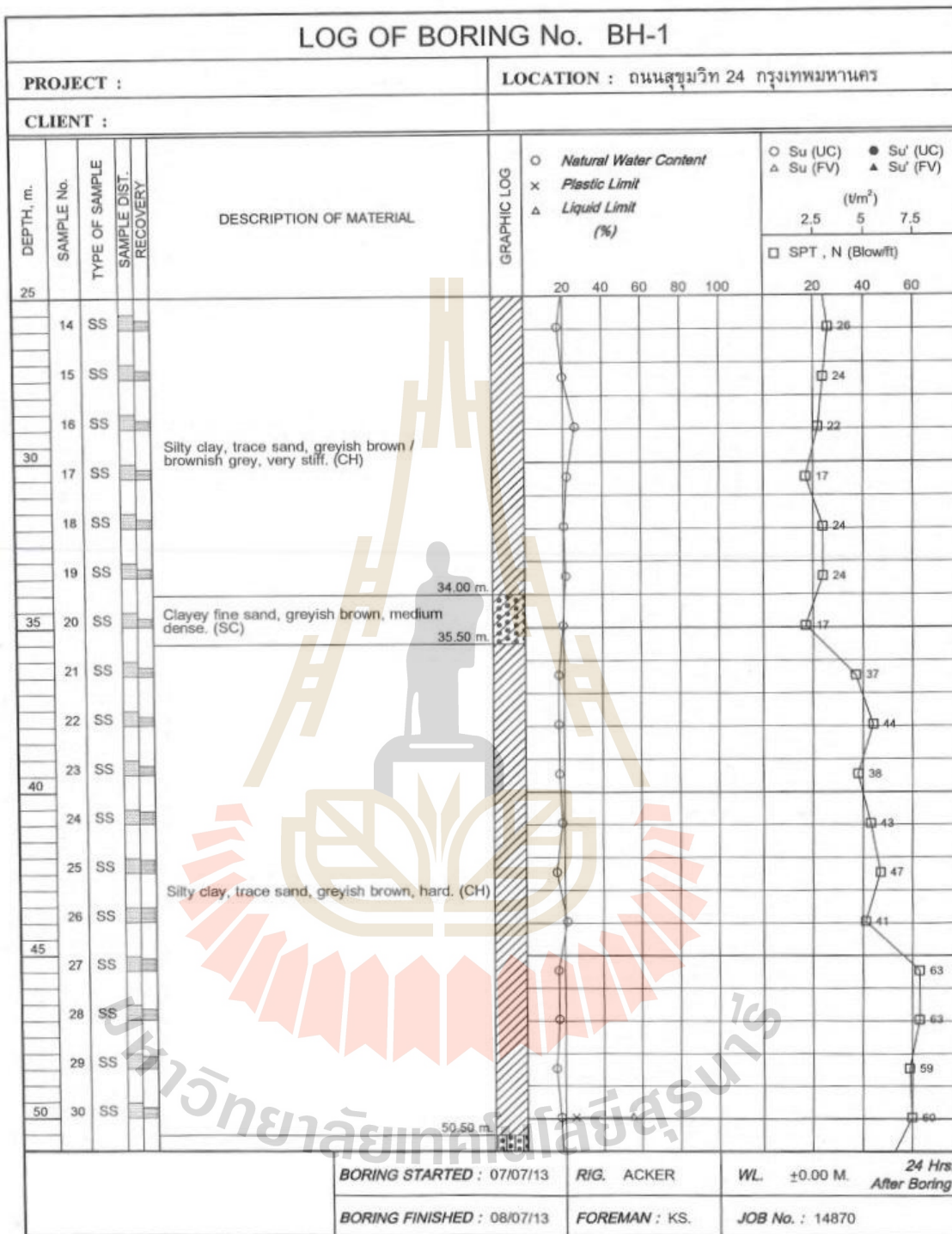


ภาคผนวก ก

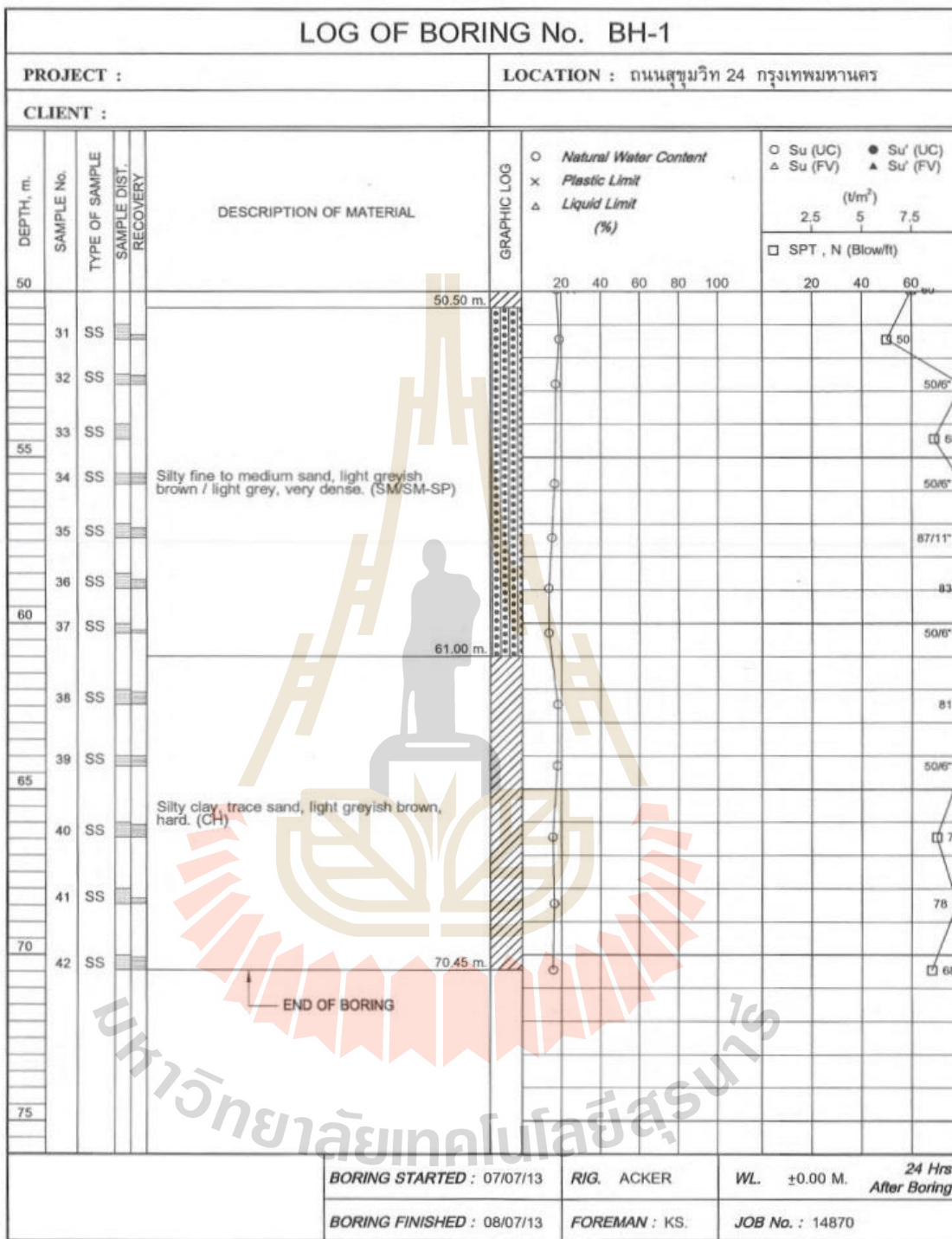
ผลการเจาะสำรวจดินทั้งหมด 3 หลุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

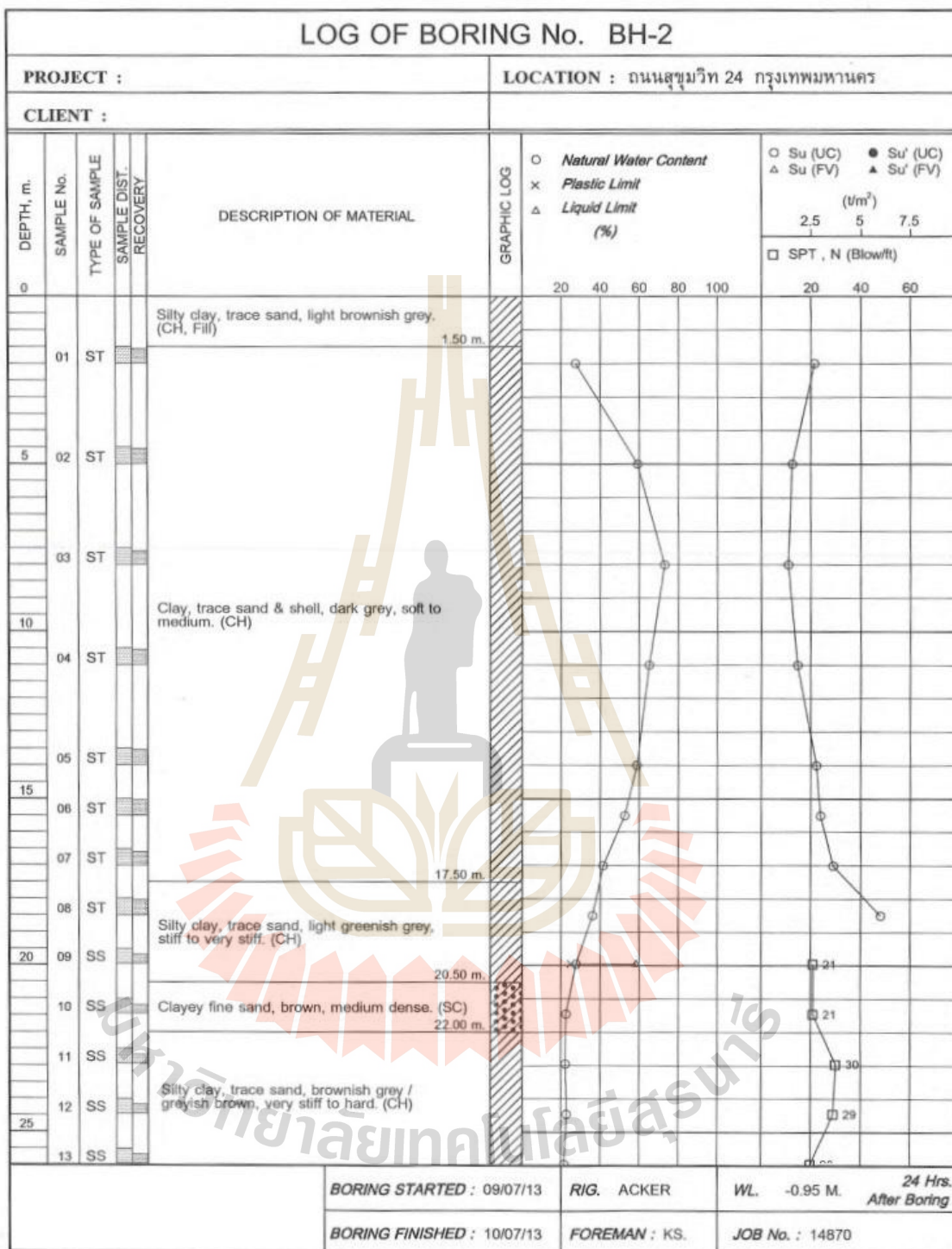


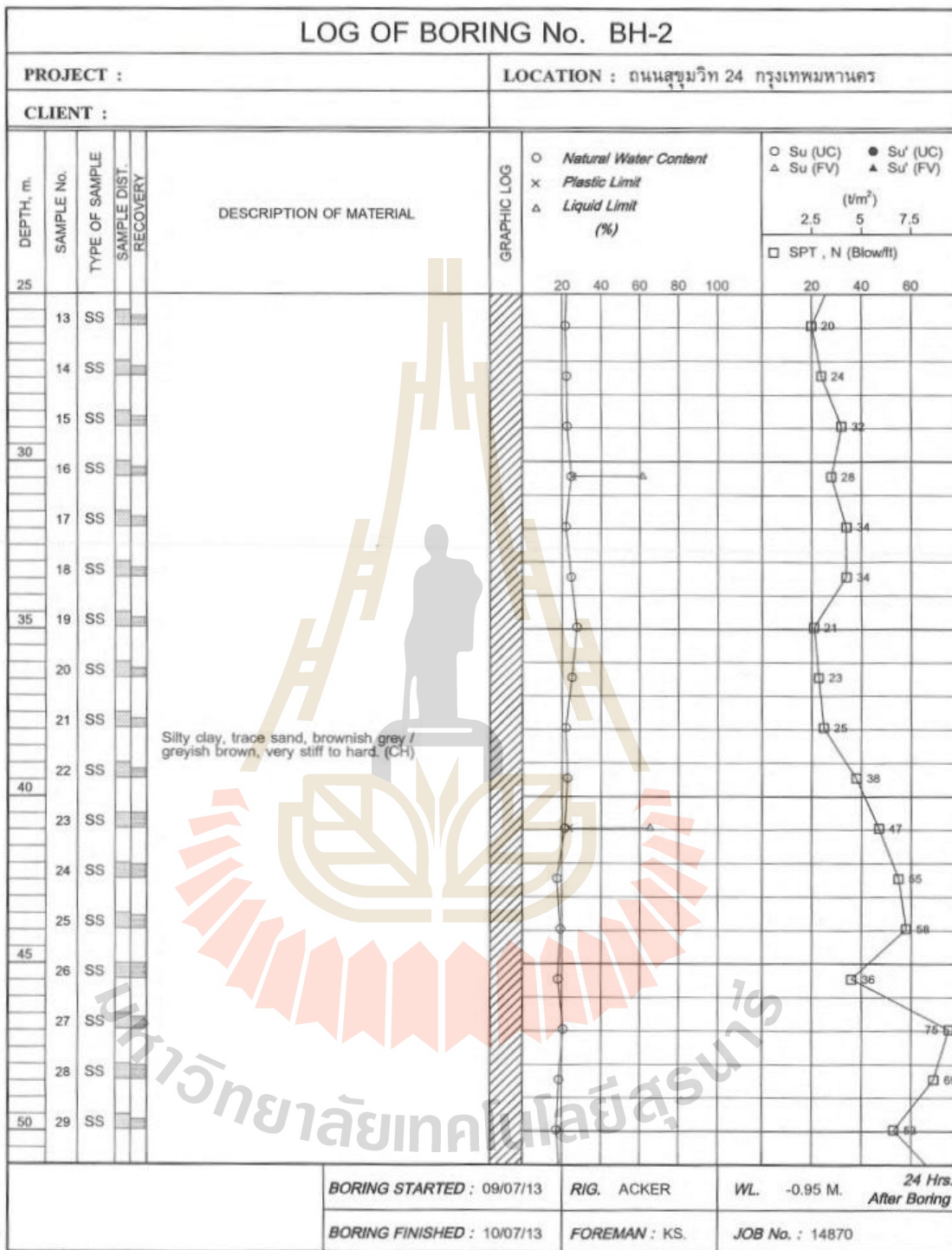


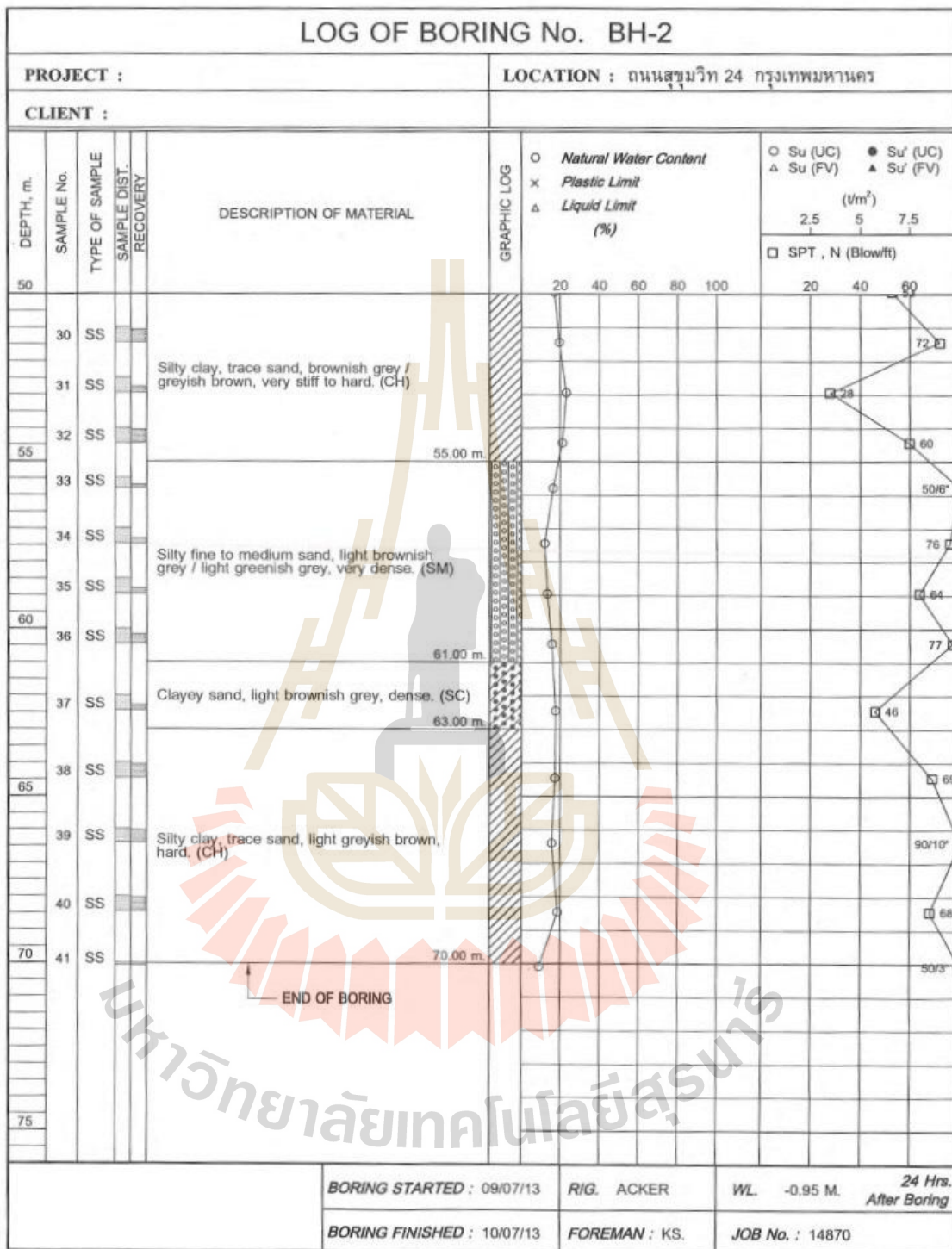


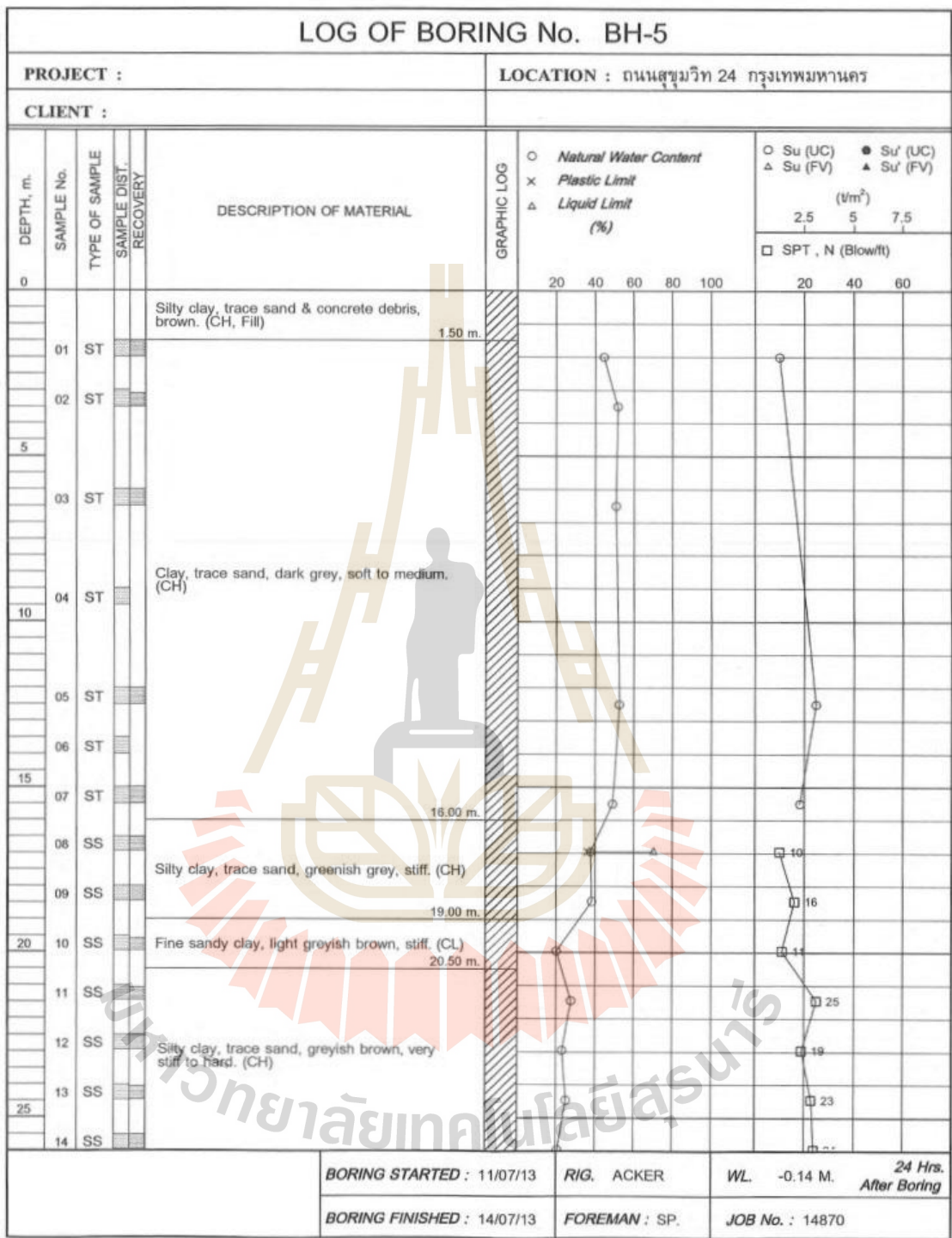




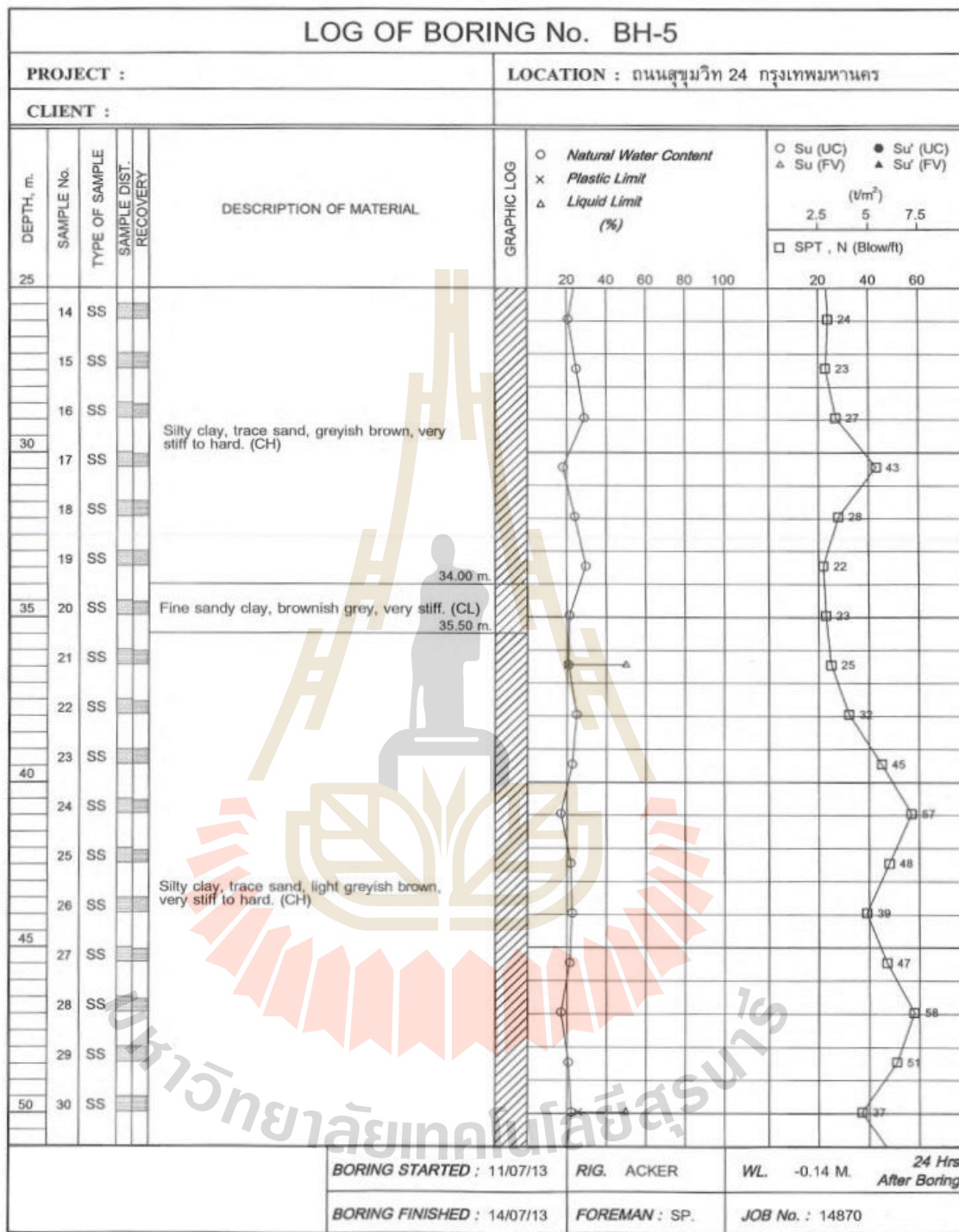


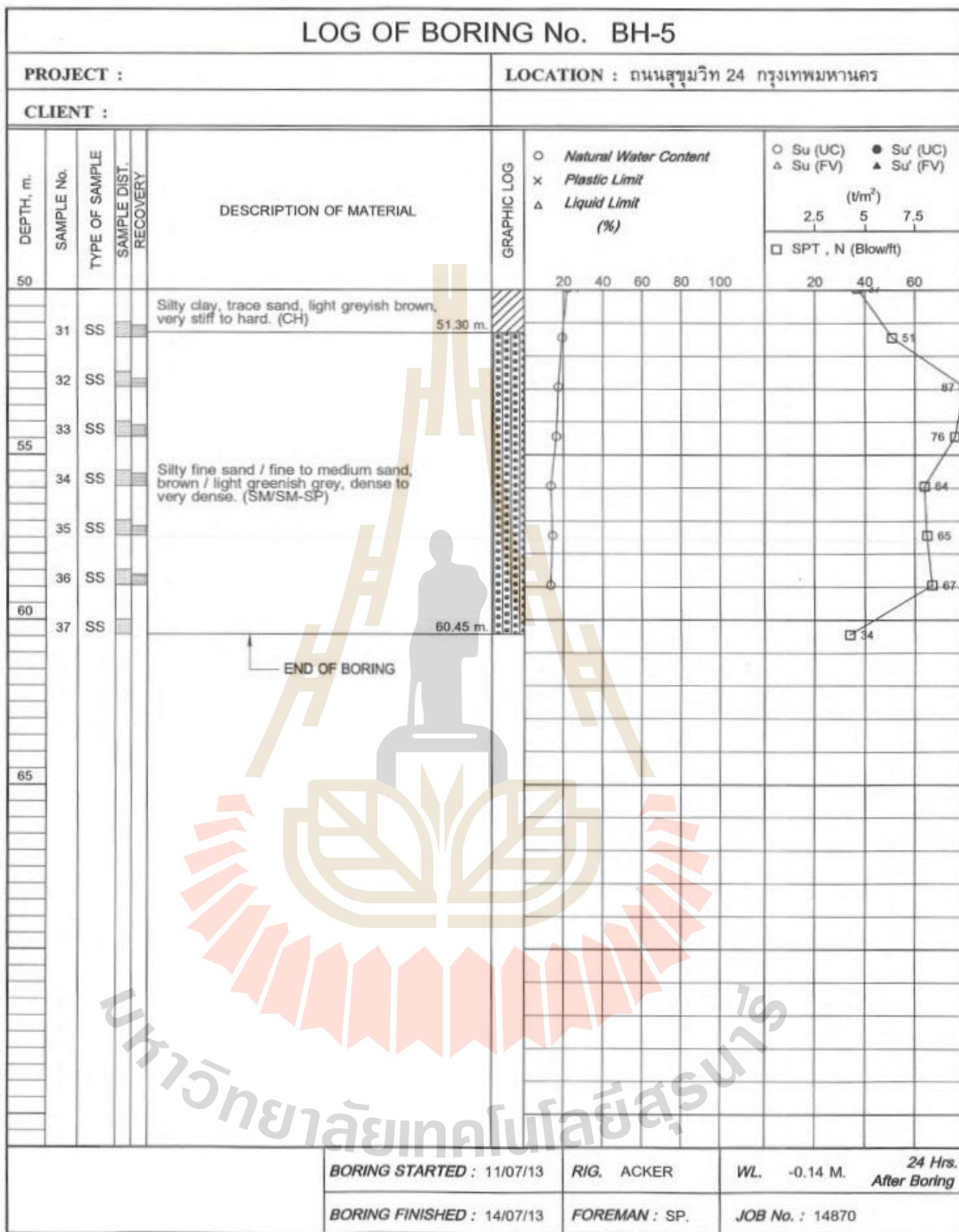
















ภาคนวท ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ยอดตะวัน รักษาภรณ์ และ พรพจน์ ต้นเส็ง. (2563). การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานราก เสาค้ำแบบแผ่นสำหรับอาคารสูงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 (The 25th National Convention on Civil Engineering, GTE15) การประชุมออนไลน์ ณ วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1409-1410





## การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ

### ANALYSIS OF MAT SETTLEMENT FOR HIGH-RISE BUILDING WITH 3D FEM

ยอดตะวัน รักขารมย์<sup>1</sup> และ พรพจน์ ต้นเส็ง<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

\*Corresponding author; E-mail address: pompot@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิจัยพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่ (mat) สำหรับอาคารสูง โดยใช้ข้อมูลแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน, ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาด 1000 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร และผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนถึงสิ้นสุดการก่อสร้าง พบว่าการทรุดตัวของ mat มีลักษณะเป็นรูปถ้วยโดยการทรุดตัวเกิดขึ้นที่ส่วนกลางของฐานมากที่สุด ค่าการทรุดตัวของ mat สูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบประมาณ 6 เท่า งานวิจัยจึงได้ใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม PLAXIS 3D วิเคราะห์หาค่า Young's modulus โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวจากผลการทดสอบเสาเข็มพบว่าค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าการวิเคราะห์หาค่าโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานราก งานวิจัยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการทรุดตัวและโมเมนต์คดใน mat โดยใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS กับ PLAXIS 3D พบว่าการจัดเรียงเสาเข็มมีการแปรผันความยาวเสาเข็มสามารถลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันภายใน mat และลดโมเมนต์คดที่เกิดขึ้นใน mat ได้

คำสำคัญ: ฐานรากเสาเข็มแผ่, PLAXIS 3D, ETABS, การทรุดตัว, การวิเคราะห์หาค่า

#### Abstract

This paper presents results of the research on behavior of mat foundation of a high-rise building. The force from super structures, pile load test on bored pile of 1000 mm and 1500 mm, and settlement monitoring from starting of construction until the end of the construction were recorded and analyzed. The settlement character of mat is dish shape with maximum settlement at about center of the mat. The observed settlement is about 6 time higher than the settlement from single pile load test at the design load. Therefore, the research focuses on back analysis procedure to obtain appropriate Young's modulus by using 3D FEM program PLAXIS 3D which the data from the pile load test results was found that the obtained values were lower than the back

analysis by foundation settlement. Moreover, the research studied the effects of the pile configuration per settlement and bending moment in mat by using joint analysis between structural analysis programs ETABS and PLAXIS 3D, it was found that the pile configuration which variable pile length can reduce the differential settlement and bending moment within the mat.

Keywords: mat foundation, PLAXIS 3D, ETABS, settlement, back analysis

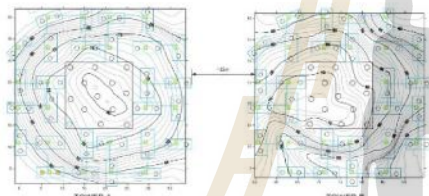
#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการออกแบบและก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลกำลังทวีความถี่เป็นอย่างมาก ซึ่งความต้องการปรังอาคารที่มีความโดดเด่นและเป็นเอกลักษณ์ ทำให้สถาปนิกออกแบบอาคารที่มีความซับซ้อนและมีความสูงมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีการออกแบบโครงสร้างถูกพัฒนาเพื่อรองรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้นด้วย สำหรับเทคโนโลยีการก่อสร้างเสาเข็มก็ถูกพัฒนาขึ้นให้รองรับน้ำหนักบรรทุกของอาคารจนกระทั่งในปัจจุบันสามารถเจาะเสาเข็มใช้งานผ่านศูนย์กลาง 1800 มิลลิเมตร ให้ลึกได้ถึง 92 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้ 6300 ตัน ในชั้นดินกรุงเทพฯ ในขณะที่การออกแบบโครงสร้างและการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มได้รับการพัฒนาไปมากแล้ว แต่สำหรับการออกแบบฐานรากแล้ววิศวกรยังคงนิยมใช้การคำนวณโดยอาศัยการคำนวณอย่างง่ายที่สมมติให้ฐานรากมีความแกร่ง (rigid) และคำนวณแรงในเสาเข็มด้วยวิธีสมดุลของแรงแบบสถิตย์ (static equilibrium) แต่พฤติกรรมจริงของฐานรากเมื่อรับแรงนั้นไม่ได้มีความแกร่งอย่างที่สมมติไว้ และสามารถเสียรูปได้เมื่อรับแรงโดยเฉพาะฐานรากที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนาของฐานค่อนข้างมาก ดังนั้นวิศวกรโครงสร้างบางส่วนจึงได้จำลองพฤติกรรมการเสียบของฐานราก โดยใช้สปริงที่มีการรับตัวได้แทนเสาเข็ม โดยทั่วไปวิศวกรผู้ทำการวิเคราะห์มักใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยคิดจากการยุบตัวของเสาเข็มที่วัดได้เมื่อเสาเข็มรับแรงกดทดสอบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ  $K = P_{design} / \delta$  ซึ่งโดยปกติการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบสูงในชั้นดินกรุงเทพฯจะมีการทรุดตัวประมาณไม่เกิน 6 มิลลิเมตร จากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกตามที่ยออกแบบไว้แล้วพบว่าทรุดตัวมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุก

ของเสาเข็ม ทำให้ต้องย้อนกลับหาพิจารณาว่าการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบเสาเข็มนี้ไม่น่าจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งได้มีผู้ทำวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของอาคารไว้หลายท่าน ซึ่งได้ยกตัวอย่างมาให้เห็นได้แก่ [7] ได้บันทึกการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อก่อสร้างเสร็จ พบว่ามีการทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบถึง 60 เท่า สำหรับอาคารอนุสาวรีย์กรุงเทพ สำนักงานใหญ่ซึ่งใช้เสาเข็มแบบ barrette 0.8mx2.0m tip -30m สำหรับอาคารไทปิง ซึ่งใช้เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5m tip -32m การทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบเป็น 10.7 เท่า โดยการทรุดตัวของอาคารไทปิง tower A และ tower B มีลักษณะเป็นรูปถ้วย (dish shape) ที่การทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ส่วนกลางของอาคาร และการทรุดตัวจะลดลงบริเวณขอบของอาคาร ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 การทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อทดสอบและการทรุดตัวของอาคาร [7]

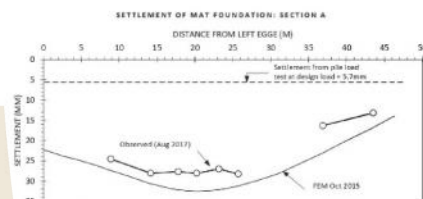
โครงการ	การทรุดตัว	
	ทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ	การทรุดตัวฐานรากเมื่อสร้างเสร็จ
อนุสาวรีย์กรุงเทพ สำนักงานใหญ่	2.5mm at 635 ton	150mm
อาคารไทปิง tower A	9mm at 1100 ton	96mm
อาคารไทปิง tower B	9mm at 1100 ton	96mm



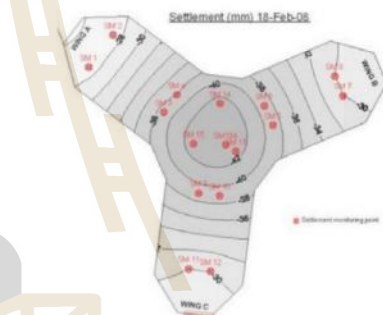
รูปที่ 1 เส้นชั้นการทรุดตัวของอาคารไทปิง tower A และ tower B ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปถ้วยที่มีการทรุดบริเวณกลางอาคารสูงกว่าที่ขอบอาคารวัดใหม่จากงานเดิมของ [7]

[8] ได้รายงานว่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแฉ่งของอาคารสูง 50 ชั้น ในชั้นดินกรุงเทพฯมีการทรุดตัวสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบอยู่ 5.2 เท่า และการทรุดตัวนี้สอดคล้องกับการทำนายการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ก่อนที่จะมีการก่อสร้างอาคาร ดังนั้นการทรุดตัวของฐานรากอาคารจึงไม่ได้เป็นการทรุดตัวที่ผิดปกติหรือเป็นการทรุดตัวที่เกิดจากความบกพร่องของเสาเข็มแต่อย่างใด เนื่องจากได้ทำการวิเคราะห์และทำนายไว้ล่วงหน้าถึง 2 ปี ดังรูปที่ 2 [2] ได้วิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแฉ่งด้วยโปรแกรม ELPLA โดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงของตึก Burj Khalifa ที่มีความสูงประมาณ 829.8 เมตร จำนวน 163 ชั้น และใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแฉ่งรองรับน้ำหนักของอาคาร โดยฐานรากแฉ่งหนา 3.7 เมตร เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร จำนวน 192 ต้น ยาวประมาณ 47.45 เมตร พบว่าเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 30 เมกะนิวตัน หัวเสาเข็มเกิดการทรุดตัวประมาณ 5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าการทรุดตัวต่ำกว่าค่าการทรุดตัวจากผลการตรวจวัดในระหว่างก่อสร้างเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 8.6 เท่า โดยฐานรากเกิดการทรุดตัวบริเวณส่วนกลางมากที่สุดเท่ากับ 43 มิลลิเมตร และเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันเท่ากับ 14 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3

เหตุผลที่การทรุดตัวของเสาเข็มอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของทดสอบนั้น [6] ได้อธิบายเหตุผลว่าการทดสอบเสาเข็มที่เป็นเสาเข็มเดี่ยวทำให้เกิดการกระจายแรงดันดินเล็กกว่าการกระจายแรงดันดินของเสาเข็มกลุ่มที่เกิดจากการซ้อนทับของแรงดันดินจากเสาเข็มเดี่ยว การกระจายแรงดันดินที่ใหญ่ขึ้นนี้ส่งผลให้ผลลงไปในพื้นที่ดินเล็กกว่า ดังรูปที่ 4 [3] ยังได้อธิบายถึงการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มบริเวณส่วนกลางของฐานรากเสาเข็มกลุ่มเกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ดังรูปที่ 5



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการทำนายการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแฉ่งส่วนหน้า 2 ปี กับผลการตรวจวัดหลังจากการก่อสร้าง [8]

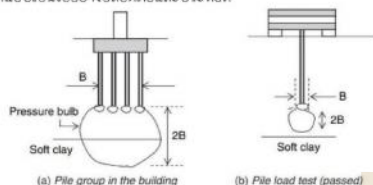


รูปที่ 3 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแฉ่งของตึก Burj Khalifa ภายได้ 80% ของน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด [2]

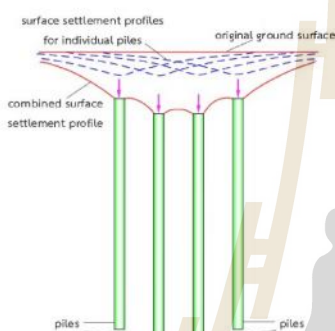
จากงานวิจัยและหลักฐานที่กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าวิธีการออกแบบที่มีแนวคิดว่าหากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกันแล้วจะมีการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันนั้นไม่เป็นจริง โดยฐานรากจะมีการทรุดตัวแบบเสาเข็มกลุ่ม ซึ่งเกิดการซ้อนทับของหน่วยแรงทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มนั้นสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว และทำให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วยขึ้น และการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงเพื่อใช้ในการจำลองเสาเข็มเป็นสปริงนั้นทำให้ได้ค่าคงที่ของสปริงที่สูงเกินกว่าความเป็นจริงอันนำไปสู่ผลการโค้งงอของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งการวิเคราะห์ที่ได้การทรุดตัวของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริงนี้ทำให้แรงในโครงสร้างส่วนบนของอาคารผิดไปจากความเป็นจริงด้วย

งานวิจัยนี้ได้รับงานมอบหมายจากภาคีกรรมการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงแบบแฉ่ง โดยอาศัยผลการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบและผลการวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Finite element) และได้ใช้ผลการวิเคราะห์กลับในการหาแนวทาง

ที่จะทำให้อาคารเสาเข็มมีการทรุดตัวที่แตกต่างลดลง ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบเป็นไปอย่างปลอดภัยและประหยัด



รูปที่ 4 กระเปาะแรงดันของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและกระเปาะแรงดันของเสาเข็มกลุ่ม [6]



รูปที่ 5 พฤติกรรมทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากความซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว [3]

2. วิธีการวิจัย

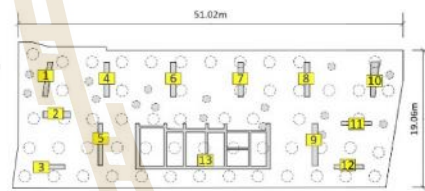
วิธีการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการออกแบบฐานรากอาคารสูงของโครงการก่อสร้างอาคาร 51 ชั้นในซอยสุขุมวิท 24 ที่ใช้ฐานรากเป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินของโครงการ ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มโครงการทั้งเสาเข็มที่ก่อสร้างไว้ก่อนและเสาเข็มที่ก่อสร้างใหม่ และได้เก็บข้อมูลการทรุดตัวของฐานรากอาคารโดยได้ตรวจวัดที่พื้นชั้น 1 ของอาคารเพื่อความสะดวกในการตรวจวัด จากนั้นทำการวิเคราะห์หกลีบโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ การวิเคราะห์หกลีบใช้ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มและทำการวิเคราะห์โดยแปรผันค่า Young's modulus ที่ทำให้ได้การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำในแบบจำลอง FEM ใกล้เคียงกับการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด เมื่อได้ค่า Young's modulus จากการวิเคราะห์หกลีบแล้วนำไปใช้ในการจำลองฐานรากเสาเข็มเดี่ยวของโครงการ โดยใช้น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากผู้ออกแบบโครงสร้าง โดยน้ำหนักบรรทุกที่ใช้จะคิดเฉพาะ dead load และ superimposed dead load เพื่อให้สอดคล้องกับการทรุดตัวของอาคาร เนื่องจากในขั้นตอนการก่อสร้างอาคารนั้นยังไม่มี live load มากระทำกับอาคาร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำ parametric study โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เพื่อใช้ในการพิจารณาการจัดวางตำแหน่งของเสาเข็ม และพิจารณาการปรับความยาวเสาเข็มให้ mat มีการโก่งตัวที่ทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของ mat ลดลง ในงานวิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แรงในองค์อาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ETABS ที่จำลองเสาเข็มเป็นสปริง โดยใช้ stiffness ของสปริงที่ได้จากการนำ

แรงที่ได้จาก ETABS มาคำนวณการทรุดตัวและแรงในเสาเข็มด้วย PLAXIS 3D จากนั้นคำนวณ stiffness ของสปริงและตั้งต้นแล้ววิเคราะห์แรงในองค์อาคารโดยใช้ stiffness ของสปริงของเสาเข็มแต่ละต้นที่ได้จากการจำลองใน PLAXIS 3D ซึ่งในงานวิจัยได้ครอบคลุมไปถึงผลของการใช้สปริงในขอบเขตพื้นที่เสาเข็ม (area spring) ที่ทำให้การคำนวณแรงใน mat ตรงกับความเป็นจริงมากกว่าการใช้สปริงที่เป็นเพียงจุดต่อที่ไม่มีพื้นที่ (node spring)

2.1 ลักษณะของอาคาร

อาคารที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอาคารสูง 51 ชั้น มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง 51.02 เมตร ยาว 19.06 เมตร รองรับด้วยฐานราก mat หนา 2.50 เมตร วางบนเสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร โดยระดับหัวเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -5.60 เมตร และระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -56.00 เมตร จำนวน 56 ต้น ในอาคารนี้มีเสาเข็มเก่าที่ก่อสร้างไว้แล้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร จำนวน 16 ต้น โดยระดับหัวเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -5.60 เมตร และระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -50.00 เมตร โดยอาคารมีเสาที่มีลักษณะเป็นเหมือนกำแพง (column wall) และมีปล่องลิฟท์ที่เป็นกำแพงแกน (core wall) ดังรูปที่ 6 โดยแรงที่กระทำต่อ mat ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยผู้ออกแบบโครงสร้างส่วนบน ดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 มัด mat, ตำแหน่งเสาเข็ม, ตำแหน่งของ column wall และ core wall

ตารางที่ 2 แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มเดี่ยว

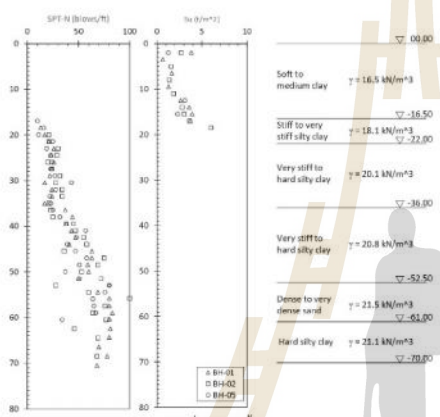
Column No.	DL+SDL (ton)	LL (ton)	Total Load (ton)
1	2015	334	2349
2	1665	252	1917
3	1378	156	1534
4	3224	568	3812
5	2093	278	2371
6	3483	629	4112
7	3540	598	4138
8	3154	548	3702
9	2854	391	3245
10	2399	432	2771
11	1407	220	1627
12	1312	154	1466
13	19487	2491	21978

3. ข้อมูลชั้นดินและสมบัติทางกลของดิน

ในงานวิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของอาคารทั้งหมด 3 หลุม โดยหลุมเจาะ BH-02 อยู่ตรงตำแหน่งของอาคารรูปที่ 7 เป็นรูปตัดชั้นดิน โดยประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียว หนา 1.5 เมตร ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หนา 15.0 เมตร จากนั้นเป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก ลึกไปจนถึง 52.5 เมตร หลังจากนั้นเป็นชั้นดิน



ทรายแน่นถึงแน่นมาก หนา 8.5 เมตร ถัดจากชั้นทรายจนถึงชั้นหลุมเจาะเป็นชั้นดินเหนียวดาน หนา 9.0 เมตร ตารางที่ 3 สรุประดับของชั้นดิน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง ในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองที่ใช้สถิติบนสเปกตรัมผลและใช้กำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำสำหรับชั้นดินเหนียว ซึ่งเป็น undrained type B ใน PLAXIS 3D สำหรับการให้แบบจำลองดินแบบ undrained type B นี้จะได้ผลลัพธ์การคำนวณแรงคั้นน้ำส่วนเกินเมื่อน้ำหนักอาคารกระทำต่อดิน ซึ่งสามารถจำลองการระบายน้ำส่วนเกินนี้ได้ด้วยการวิเคราะห์ consolidation analysis ใน PLAXIS 3D ส่วนชั้นทรายใช้แบบจำลองดินแบบระบายน้ำ สำหรับฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กใช้แบบจำลองเป็น linear elastic โดยใช้ค่า Young's modulus เป็น 24.78 MPa และค่า Poisson' ratio เป็น 0.2



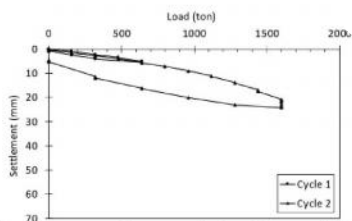
รูปที่ 7 วัสดุชั้นดิน

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง

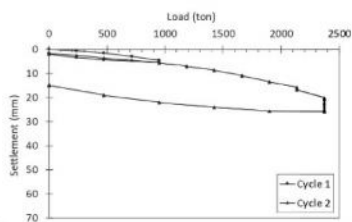
Material	Depth (m)	E' (kN/m <sup>2</sup> )	v'	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	phi (degree)	Su (kN/m <sup>2</sup> )
Soft to medium caly	00.0-16.5	10,516	0.30	16.52	-	21.5
Stiff to very stiff silty clay	16.5-22.0	126,549	0.30	18.10	-	73.6
Very stiff to hard silty clay 1	22.0-36.0	210,915	0.30	20.18	-	122.6
Very stiff to hard silty clay 2	36.0-52.5	464,013	0.30	20.83	-	269.8
Dense to very dense sand	52.5-61.0	137,600	0.30	21.57	37.00	-
Hard silty clay	61.0-70.0	674,928	0.30	21.14	-	392.4

3.1 ข้อมูลและผลการทดสอบเสาเข็ม

ในโครงการนี้ได้ทำการทดสอบเสาเข็มเจาะด้วยวิธี Static Pile Load Test โดยเสาเข็มทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร โดยใช้มาตรฐานของ ASTM D 1143/D 1143M-07 ทำการทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบและน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่า 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ผลการทดสอบเสาเข็มขนาด 1000 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 640 ตัน มีการทรุดตัว 5.50 มิลลิเมตร และทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 1600 ตัน ส่วนผลการทดสอบเสาเข็มขนาด 1500 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 950 ตัน มีการทรุดตัว 5.47 มิลลิเมตร และทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุก 2375 ตัน ดังรูปที่ 8 และ 9



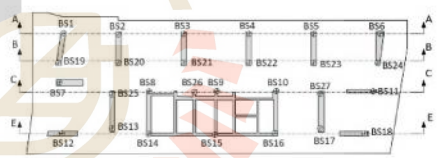
รูปที่ 8 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

3.2 การทรุดตัวของฐานราก

เพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานอาคารเมื่อน้ำหนักบรรทุกได้ติดตั้งจุดวัดการทรุดตัวไว้เสาส่วนล่างที่ติดกับ mat ทั้งหมด 26 จุด ดังรูปที่ 10 โดยวัดการทรุดตัวของฐานด้วยกล้องระดับตั้งแต่เริ่มการก่อสร้างจนกระทั่งก่อสร้างอาคารได้เสร็จสิ้นถึงชั้นที่ 51 รูปที่ 11 เป็นเส้นชั้นการทรุดตัวของ mat เมื่อสิ้นสุดการก่อสร้าง เห็นได้ว่าการทรุดตัวสูงสุดเป็น 35.0 มิลลิเมตร ตรงกึ่งกลาง mat โดยขอบ mat มีการทรุดตัว 27.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปถ้วยเล็กน้อย คิดเป็นการทรุดที่แตกต่างกัน 7.5 มิลลิเมตร ซึ่งค่าทรุดตัวของอาคารที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงกว่าค่าทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบอยู่ประมาณ 6 เท่า



รูปที่ 10 ตำแหน่งจุดตรวจวัดการทรุดตัวที่ติดตั้งไว้ชั้นล่างของอาคาร



รูปที่ 11 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat จากการตรวจวัดในสนาม



4. การวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหา Young's modulus ที่เหมาะสมเพื่อทำนายการทรุดตัวของดิน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินในโครงการที่มีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ส่วนกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวแข็งถึงชั้นดินเหนียวดานประมาณจากผลการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน แบบจำลองดินที่ใช้เป็นแบบอีลาสติคเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของ มอห์ร์-คูลอมบ์ (linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) สำหรับชั้นดินเหนียว ใช้ effective Young's modulus โดยคำนวณจากกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในรูป  $E' = mS_u$  โดย  $m$  เป็นค่าซึ่งการเลือกใช้ค่า  $m$  ขึ้นกับระดับของ shear strain ที่เกิดขึ้นในชั้นดิน โดย effective Young's modulus มีความสัมพันธ์กับ undrained Young's modulus ดังสมการที่ 1

$$E' = \frac{2(1+\nu')}{2(1+\nu_u)} E_u \tag{1}$$

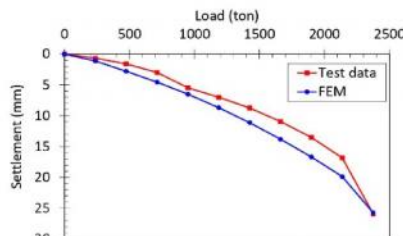
เมื่อ  $\nu' = 0.3$  กรณีหน่วยแรงประสิทธิผล และ  $\nu_u = 0.5$  กรณีหน่วยหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ได้ความสัมพันธ์เป็น  $E' = 0.87E_u$  สำหรับกำลังรับแรงเฉือนใช้เป็นหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งใน PLAXIS 3D เรียกว่า undrained type B ส่วนชั้นดินทรายกำหนดให้คิดเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลและเป็นแบบระบายน้ำ ในการคำนวณโดยให้ชั้นดินเหนียวเป็นแบบไม่ระบายน้ำทำให้โปรแกรมคำนวณแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อหน่วยแรงในดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องให้โปรแกรมวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฐานรากในกรณีที่แรงดันน้ำส่วนเกินลดลงจนได้ระดับการอัดตัวคายน้ำที่ 90 เปอร์เซ็นต์

ในการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็ม ทำโดยสร้างแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดินโครงการ โดยความกว้างและความลึกของแบบจำลองมากพอที่จะไม่ทำให้ขอบเขตของแบบจำลองส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์ใช้วิธีการเพิ่มแรงกระทำที่เป็นแบบ point load บนหัวเสาเข็มที่มีค่าเท่ากับแรงกระทำต่อหัวเสาเข็ม และคำนวณค่าทรุดตัวของหัวเสาเข็ม และได้แปรผันค่าสถิติในสองอันดับจนกระทั่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเสาเข็มมากที่สุด ดังรูปที่ 12 และตารางที่ 4 สรุปค่าสถิติพลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้กลับ

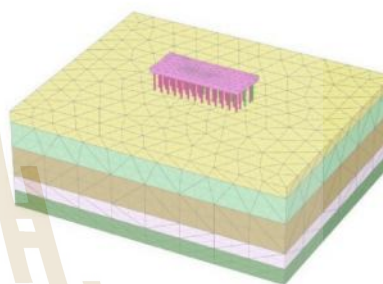
ตารางที่ 4 ค่า Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว

Material	$E'$	$E'$ (kPa)
Soft to medium clay	$E' = 435S_u$	10546
Stiff to very stiff silty clay	$E' = 1740S_u$	126549
Very stiff to hard silty clay 1	$E' = 1740S_u$	210915
Very stiff to hard silty clay 2	$E' = 1740S_u$	464013
Dense to very dense sand	$E' = 2000N_{60}$	137600
Hard silty clay	$E' = 1740S_u$	674928

เมื่อได้ Young's modulus ของชั้นดินจากการวิเคราะห์ห้กลับโดยอาศัยผลการทดสอบเสาเข็มแล้ว จึงได้ทำการจำลองฐานรากเสาเข็ม mat โดยใช้ Young's modulus ในตารางที่ 4 โดยใช้ 10-node tetrahedral element ในการจำลอง mat และจำลองเสาเข็มโดยใช้ embedded beam element ซึ่งเป็นการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินโดยรอบกับเสาเข็มและ mat ดังรูป 13



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ห้กลับจากแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดิน โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

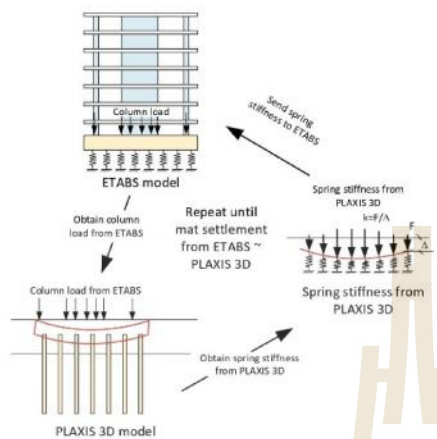


รูปที่ 13 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มและ mat โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D

ในการจำลองร่วมกันระหว่าง ETABS กับ PLAXIS 3D ใช้การวิเคราะห์แบบกระทำซ้ำหลายรอบ iteration ระหว่าง ETABS กับ PLAXIS โดยเริ่มจากการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อส่วนล่างสุดของเสา โดยจำลองโครงสร้างอาคารใน ETABS ที่พิจารณาให้เสาเข็มเป็นสปริง โดยค่าสถิติในสองสปริงเริ่มต้นใช้ค่าของการวิเคราะห์จากผลการทดสอบเสาเข็มเป็นค่าตั้งต้น จากนั้นจำลองอาคารและ mat บนสปริงเพื่อให้ได้แรงกระทำที่โคนเสา จากนั้นนำแรงกระทำที่โคนเสาจาก ETABS ไปเป็นแรงกระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D ผลลัพธ์ที่ได้เป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มและค่าทรุดตัวของเสาเข็มแต่ละต้น ในขั้นตอนนี้สามารถคำนวณสถิติในสองสปริงที่ใช้แทนเสาเข็มใน ETABS ได้ ดังสมการที่ 2

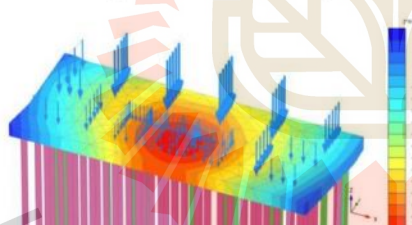
$$K = \frac{P}{\delta} \tag{2}$$

เมื่อ  $K$  คือค่าสถิติในสองสปริง,  $P$  คือแรงที่หัวเสาเข็ม และ  $\delta$  คือการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม จากนั้นใช้สถิติในสองสปริงสำหรับเสาเข็มแต่ละต้นจากโปรแกรม PLAXIS 3D ในการสร้างแบบจำลอง ETABS ในขั้นตอนนี้สปริงที่ได้ถือว่าได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat แล้วแต่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากการจำลอง PLAXIS 3D นั้นไม่ได้รวมเอาผลเนื่องจากสถิติในสองอาคารส่วนบนเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องนำแรงกระทำที่โคนเสาจาก ETABS ในรอบที่สองนี้มาใช้เป็นแรงกระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D ว่าเป็นรอบที่สอง ซึ่งกระทำการวิเคราะห์ที่จะทำซ้ำจนกระทั่งการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก PLAXIS 3D ต่างจากการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก ETABS ค่ากว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยขั้นตอนการจำลอง ดังรูปที่ 14

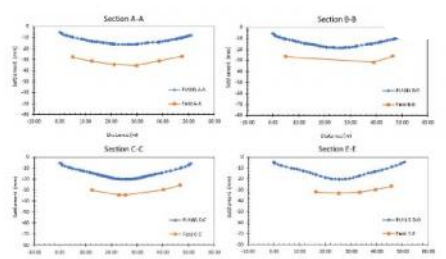


รูปที่ 14 ขั้นตอนการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

ผลการวิเคราะห์ในรูปของเส้นชั้นการทรุดตัวของ mat ในรูปที่ 15 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าทรุดตัวของฐานในแนว section A, section B, section C และ section E ในรูปที่ 16 เห็นได้ว่าค่าทรุดตัวของ mat ของแบบจำลองที่ใช้ Young's modulus จากการวิเคราะห์ที่กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มนั้นต่ำกว่าค่าทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงอยู่ประมาณ 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Young's modulus ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มของโครงการนี้อาจสูงเกินกว่าที่จะให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat ในแบบจำลอง FEM ตรงกับผลการทรุดตัวจากการตรวจวัดจริง ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ที่กลับเพิ่มเติมโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของอาคารในการวิเคราะห์ที่กลับเพื่อเปรียบเทียบ โดยได้จำลองฐานราก mat, เสาเข็ม และชั้นดิน โดยใช้แรงกระทำส่วนบนจากผู้ออกแบบโครงสร้าง และแปรผัน Young's modulus จนทำให้ค่าทรุดตัวของ mat ในแบบจำลอง FEM สอดคล้องกับการทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด

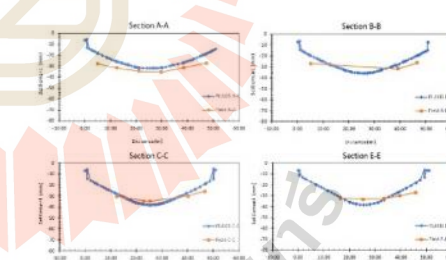


รูปที่ 15 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat โดยวิธี Finite Element และใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ที่กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มของโครงการ



รูปที่ 16 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่างๆ จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D โดยใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์ที่กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มของโครงการ

รูปที่ 17 เป็นค่าทรุดตัวของ mat จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D ที่สอดคล้องกับค่าทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด โดย Young's modulus ของดินที่ให้ค่าการทรุดตัวที่สอดคล้องที่สุดนี้สรุปอยู่ในตารางที่ 5 เห็นได้ว่า Young's modulus ของดินที่คำนวณกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มนั้นสูงกว่า Young's modulus ที่คำนวณกลับจากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat โดยในชั้น soft to medium clay มีค่า  $E_u = 500S_u$ ,  $E' = 435S_u$  และในชั้น very stiff to hard clay มีค่า  $E_u = 2000S_u$ ,  $E' = 1740S_u$  ส่วนในชั้นทรายนั้นใช้ค่า effective Young's modulus มีค่า  $E' = 2000N_{60}$  ในส่วนของการที่ Young's modulus ของชั้นดินเหนียวที่วิเคราะห์ที่กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มสูงกว่าอาจเนื่องจากการที่แบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นได้ ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น หากใช้แบบจำลองดินแบบ non-linear ที่ stiff ในสลดงเมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นน่าจะทำให้ผลการประมาณการทรุดตัวเป็นไปอย่างสอดคล้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นประโยชน์ของงานวิจัยไปยังผู้ออกแบบอาคารสูง ดังนั้นจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและนำเสนอ Young's modulus ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองได้สะดวก และพารามิเตอร์ยังสื่อถึงพฤติกรรมเชิงกลของดินอีกด้วย



รูปที่ 17 การทรุดตัวของ mat ในแนวต่างๆ จากแบบจำลองใน PLAXIS 3D ที่สอดคล้องกับค่าทรุดตัวจริงที่ได้จากการตรวจวัดในการวิเคราะห์ที่กลับเพื่อหา Young's modulus ของชั้นดิน

ตารางที่ 5 ค่า Young's modulus จากการค้าขายย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat

Material	$E'$	$E'$ (kPa)
Soft to medium clay	$E' = 130S_u$	3164
Stiff to very stiff silty clay	$E' = 435S_u$	31637
Very stiff to hard silty clay 1	$E' = 435S_u$	52729
Very stiff to hard silty clay 2	$E' = 435S_u$	116003
Dense to very dense sand	$E' = 2000N_{60}$	137600
Hard silty clay	$E' = 435S_u$	168732

S3B	เสาเข็มร่องใต้ core และได้เสา แปรมันระดับปลายเสาเข็ม
R4A	เข็มกระจายทั่ว mat ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
R4B	เข็มกระจายทั่ว mat แปรมันระดับปลายเสาเข็ม
R5A	เสาเข็มร่องใต้ core และได้เสา ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
R5B	เสาเข็มร่องใต้ core และได้เสา แปรมันระดับปลายเสาเข็ม

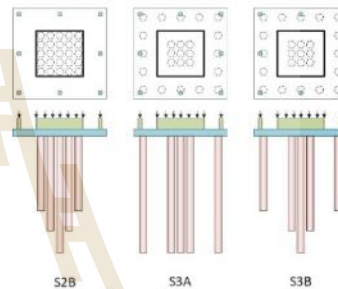
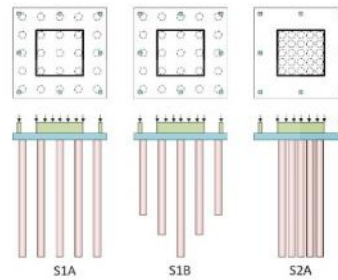
5. การศึกษาอิทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มต่อแรงในโครงสร้าง

งานศึกษาเกี่ยวกับการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มที่รองรับ mat ที่มีผู้ทำไว้ อาทิเช่น [1], [4] และ [5] ได้มีการจำลองฐานรากด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติขนาดของ mat และรูปแบบของแรงกระทำขึ้นมาโดยไม่สอดคล้องกับรูปแบบของอาคารสูงโดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น [5] ใช้ฐานราก mat เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแรงกระทำเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีแรงกระทำแบบ uniform load และกรณีแรงกระทำแบบ core-edge loading ซึ่งทำให้สถิติพื้นของ mat ซึ่งประมาณจากความยาวต่อความหนาของ mat,  $L/B$  นั้นสูงมาก เช่นเดียวกับขนาดของ mat ในงานศึกษาของ [1] ที่ใช้ความกว้างของ mat รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ 15 เมตร สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการมุ่งเป้าหมายไปยังฐานรากของอาคารสูงพิเศษที่ใช้ฐานรากแบบ mat รองรับแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน อีกทั้งลักษณะของอาคารสูงสำหรับที่เป็นที่ก่อกำเนิดในปัจจุบันนิยมใช้รูปทรงอาคารรูปทรงแบน ที่ทำให้ฐานของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

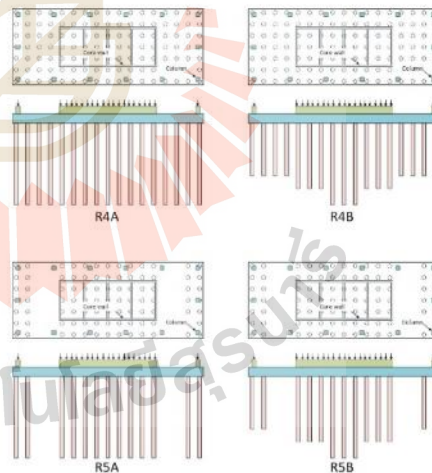
ในงานวิจัยนี้ได้จำลองรูปแบบของฐานราก mat ของอาคารทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ S1, S2 และ S3 เป็นฐานราก mat แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 เมตร หนา 1 เมตร รองรับด้วยเสาเข็มที่มีระดับตัดหัวเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -16 เมตร ดังรูปที่ 18 ส่วนรูปแบบ R4 และ R5 เป็นฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 20 เมตร ยาว 50 เมตร หนา 2.5 เมตร รองรับด้วยเสาเข็มที่มีระดับตัดหัวเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -5 เมตร โดยจัดวางเสาเข็มให้มีระยะห่างเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ดังรูปที่ 19 โดยกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B จำลองชั้นดินและขนาดของแรงกระทำต่อ mat จากงานวิจัยของ [1] เพื่อทำการเปรียบเทียบการจำลองฐานราก mat ในรูปแบบต่างๆ สำหรับกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B ชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ส่วนแรงกระทำต่อ mat นั้นใช้แรงกระทำจากผลการวิเคราะห์แรงในอาคารโดยใช้โปรแกรม ETABS โดยคิดเป็นอาคารที่มีความสูง 57 ชั้น ดังรูปที่ 20 โดยจะคิดเฉพาะแรงกระทำที่ค่อนข้างถาวรเนื่องจาก dead load และ superimposed dead load เท่านั้น ส่วน live load นั้นเป็นแรงกระทำที่ไม่แน่นอนและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ โดยแรงที่กระทำต่อ mat ทั้งหมดเป็น 469,728 kN ตารางที่ 6 สรุปกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 6 กรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์และค่าอธิบาย

กรณี	การจัดเรียงเสาเข็ม
S1A	เข็มกระจายทั่ว mat ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S1B	เข็มกระจายทั่ว mat แปรมันระดับปลายเสาเข็ม
S2A	ใช้เสาเข็มร่องเฉพาะบริเวณ core ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S2B	ใช้เสาเข็มร่องเฉพาะบริเวณ core แปรมันระดับปลายเสาเข็ม
S3A	เสาเข็มร่องใต้ core และได้เสา ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน

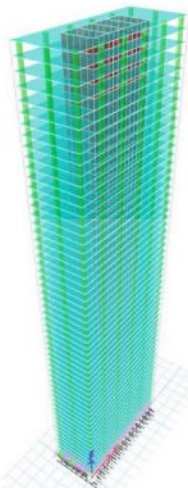


รูปที่ 18 การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B



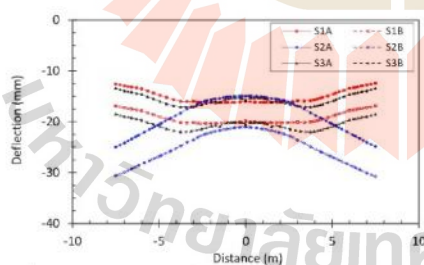
รูปที่ 19 การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ R4A, R4B, R5A, และ R5B



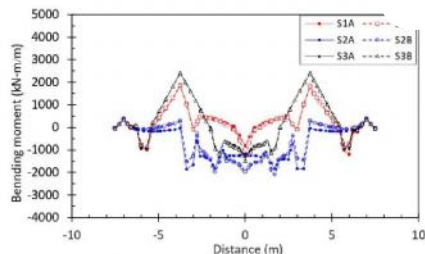


รูปที่ 20 แบบจำลองอาคารสูง 57 ชั้น รองรับโดยฐานรากที่จำลองเสาเข็มด้วยสปริงในการวิเคราะห์แรงกระทำต่อ mat กรณี R4A, R4B, R5A และ R5B โดยซอฟต์แวร์ ETABS

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการปรับผันการจัดเรียงเสาเข็ม แสดงให้เห็นว่าสำหรับฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส การจัดเรียงเสาเข็มแบบกรณี S1A และ S3A มีการทรุดตัวของ mat คล้ายคลึงกัน ส่วนกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core กรณี S2A ทำให้ mat ส่วนกลางมีการทรุดตัวต่ำกว่าขอบ mat ซึ่งกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core นี้เป็นกรณีที่เหมาะสมขึ้นตามงานวิจัยของ [5] ซึ่งเป็นไปได้ยากในกรณีของ mat ที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อน แต่สำหรับการจำลองในกรณีนี้ mat วางอยู่บนชั้นดินแข็งที่มีค่ารับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงถึง 90 kN/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นชั้นดินจากงานวิจัยของ [1] พบว่าดินบริเวณขอบ mat เกิดการวิบัติจนทำให้เกิดการทรุดตัวเป็นรูปถ้วยคว่ำหรือรูปดอกเห็ด สำหรับการแปรผันระดับปลายเสาเข็มในกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความสำคัญเนื่องจากฐานรากมีความกว้างเพียง 15 เมตร ซึ่งทำให้ฐานรากมีสติฟเนสสูงจนอาจถือว่าเป็นฐานรากแตร่ง ประกอบกับการจัดเรียงเสาเข็มทั้งหมดเข้าไปรองรับได้ core จึงทำให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มลดลงทำให้เกิดอิทธิพลของการวิบัติแบบกลุ่มเกิดขึ้นเป็นหลัก

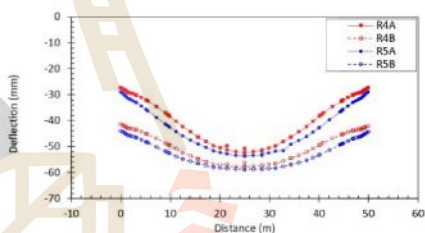


รูปที่ 21 การแอ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

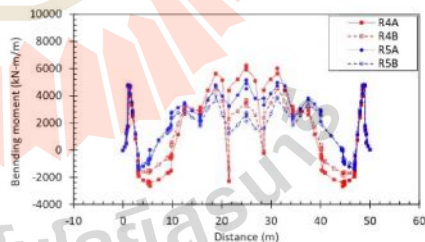


รูปที่ 22 โมเมนต์ดัดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

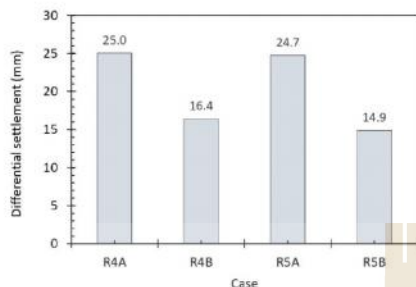
ในกรณีของ mat สี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B ซึ่งเป็นฐานรากที่มีสติฟเนสต่ำกว่าฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสในงานวิจัยนี้เนื่องจากฐานรากมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างต่ำกว่า เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดการแอ่นของ mat ซึ่งอาจใช้เป็นปริมาตรความโค้ง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าทรุดตัวที่ขอบ mat เทียบกับการทรุดตัวมากที่สุดที่กลาง mat,  $\Delta_{mat}$  เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบ สำหรับ mat กรณี R4A และ R4B เห็นได้ว่าการปรับลดความยาวเสาเข็มลงโดยให้เสาเข็มส่วนกลาง mat ยาวที่สุดทำให้  $\Delta_{mat}$  ลดลงจาก 25.0 มิลลิเมตร ลงเหลือ 16.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 25 สำหรับกรณี R5A และ R5B ที่ใช้เสาเข็มรับเฉพาะส่วน core และส่วนเสาอาคารก็ได้ผลการทรุดตัวที่คล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ 23 แต่เมื่อพิจารณาจากโมเมนต์ดัดพบว่ากรณี R5A และ R5B ที่ใช้เสาเข็มเฉพาะบริเวณ core และเฉพาะส่วนเสาทำให้เกิดโมเมนต์ดัดต่ำกว่า ดังรูปที่ 24



รูปที่ 23 การแอ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B



รูปที่ 24 โมเมนต์ดัดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B



รูปที่ 25 การทรุดตัวที่แตกต่างกันของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B

## 6. บทสรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่า Young's modulus ที่ทำให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของ mat สอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานราก สำหรับชั้นดิน soft to medium clay มีค่า  $E_u = 150S_u$ ,  $E' = 130S_u$  และในชั้น very stiff to hard clay มีค่า  $E_u = 500S_u$ ,  $E' = 435S_u$  ส่วนในชั้นทรายนั้นใช้ค่า effective Young's modulus มีค่า  $E' = 2000N_{60}$  ค่าที่ได้นี้ได้มาจากการวิเคราะห์กลับจากผลการตรวจวัดเพียงกรณีเดียวดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์กลับจากผลการตรวจวัดเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการวิจัยนี้

2. การจัดเรียงเสาเข็มโดยมีการแปรผันความยาวเสาเข็มสามารถลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันภายใน mat และลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน mat เนื่องจากการแปรผันความยาวเสาเข็มจะทำให้การทรุดตัวของ mat ที่มีเสาเข็มสั้นสุดเกิดการทรุดตัวใกล้เคียงกับบริเวณส่วนกลางของ mat ที่มีเสาเข็มยาวสุด ส่งผลให้การทรุดตัวที่แตกต่างกันและโมเมนต์ดัดลดลง โดยการแปรผันความยาวเสาเข็มในกรณี R4B และ R5B สามารถช่วยลดค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันจากกรณี R4A และ R5A เป็นอัตราส่วนประมาณ 1.5 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Amornfa, K., Phienweij, N. and Kitpayuck, P. (2012). Current practice on foundation design of high-rise buildings in Bangkok, Thailand, Lowland technology international 14<sup>th</sup>, December 2012, pp.70-83.
- [2] El Gendy, O. and El Gendy, A. (2018), Analysis of Piled raft of Burj Khalifa in Dubai by the program ELPLA. GEOTEC Software Inc., Canada, pp.3-23
- [3] Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M. and Elson, K. (1992). Piling Engineering (2<sup>nd</sup> edition), Taylor & Francis.
- [4] Mali, S. and Singh, B. (2020). 3D Numerical Modeling of Large Piled-Raft Foundation on Clayey Soils for Different Loadings and Pile-Raft Configurations. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(1), pp.1-17.
- [5] Reul, O. and Randolph, M.F., (2004). Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(1), pp.1-13.

- [6] Rajapakse R., (2007). Pile Design for Structural and Geotechnical Engineers (1<sup>st</sup> Edition), Butterworth-Heinemann
- [7] Sambhandharaska, S. et al. (1987). Settlements of structures and their predictions in Bangkok subsoils., Southeast Asian geotechnical conference 9<sup>th</sup>, Bangkok, Thailand, 7-11 December 1987, pp.25-40
- [8] Tanseng, P. (2017). Design and construction of foundation and deep excavation for high-rise building, Seminar on deep basements and foundations, Society of structural engineer – Sri Lanka.

## ประวัติผู้เขียน

นายยอดตะวัน รักขารมย์ เกิดเมื่อวันพฤหัสบดีที่ 11 มกราคม 2539 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนโยธินบูรณะ อำเภอเขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2560 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษากับบริษัท บริษัท เบญจมาศ จำกัด เป็นระยะเวลา 4 เดือน และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2561 และมีผลงานเผยแพร่จำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 การประชุมออนไลน์ ณ วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1409-1410



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี