การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ

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

ยอดตะวัน รักษารมย์[1] และ พรพจน์ ตันเส็ง[2,*]

[1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิจัยพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานราเสาเข็มแบบแผ่ (mat) สำหรับอาคารสูง โดยใช้ข้อมูลแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน, ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาด 1000 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร และผลการตรวจวัดการทรุดตัวของ mat ตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนสิ้นสุดการก่อสร้าง พบว่าการทรุดตัวของ mat มีลักษณะเป็นรูปถ้วยโดยการทรุดตัวเกิดที่ส่วนกลางของฐานมากที่สุด ค่าการทรุดตัวของ mat สูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบประมาณ 6 เท่า งานวิจัยจึงได้ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม PLAXIS 3D วิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า Young's modulus โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวจากผลการทดสอบเสาเข็มพบว่าค่าที่ได้นั้นต่ำกว่าการวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานราก งานวิจัยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการทรุดตัวและโมเมนต์ดัดใน mat โดยใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS กับ PLAXIS 3D พบว่าการจัดเรียงเสาเข็มโดยมีการแปรผันความยาวเสาเข็มสามารถลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันภายใน mat และลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน mat ได้

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

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 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 and bending moment within the mat.

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

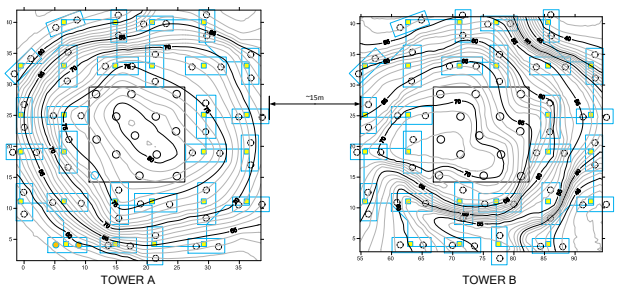
1. บทนำ

ปัจจุบันการออกแบบและก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลก้าวหน้าไปจากอดีตเป็นอย่างมาก ซึ่งความต้องการรูปทรงอาคารที่มีความโดดเด่นและเป็นเอกลักษณ์ ทำให้สถาปนิกออกแบบอาคารให้มีความซับซ้อนและมีความสูงมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีการออกแบบโครงสร้างถูกพัฒนาเพื่อรองรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้นด้วย สำหรับเทคโนโลยีการก่อสร้างเสาเข็มก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้รองรับน้ำหนักบรรทุกของอาคารจนกระทั่งในปัจจุบันสามารถเจาะเสาเข็มใช้งานเส้นผ่านศูนย์กลาง 1800 มิลลิเมตร ให้ลึกได้ถึง 92 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้ 6300 ตัน ในชั้นดินกรุงเทพ ในขณะที่การออกแบบโครงสร้างและการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มได้รับการพัฒนาไปมากแล้ว แต่สำหรับการออกแบบฐานรากแล้ววิศวกรยังคงนิยมใช้การคำนวณโดยอาศัยการคำนวณอย่างง่ายที่สมมุติให้ฐานรากมีความแกร่ง (rigid) และคำนวณแรงในเสาเข็มด้วยวิธีสมดุลของแรงแบบสถิตย์ (static equilibrium) แต่พฤติกรรมจริงของฐานรากเมื่อรับแรงนั้นไม่ได้มีความแกร่งอย่างที่สมมุติไว้ และสามารถเสียรูปได้เมื่อรับแรงโดยเฉพาะฐานรากที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนาของฐานค่อนข้างมาก ดังนั้นวิศวกรโครงสร้างบางส่วนจึงได้จำลองพฤติกรรมการเสียรูปของฐานราก โดยใช้

สปริงที่มีการยุบตัวได้แทนเสาเข็ม โดยทั่วไปวิศวกรผู้ทำการวิเคราะห์มักใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยคิดจากการยุบตัวของเสาเข็มที่วัดได้เมื่อเสาเข็มรับแรงกดทดสอบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ $K = P_{design} / \delta$ ซึ่งโดยปกติการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบสูงในชั้นดินกรุงเทพจะมีการทรุดตัวประมาณไม่เกิน 6 มิลลิเมตร จากผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรรทุกตามที่ออกแบบไว้แล้วพบว่าการทรุดตัวมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ทำให้ต้องย้อนกลับมาพิจารณาว่าการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงจากผลการทดสอบเสาเข็มนั้นไม่น่าจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งได้มีผู้ทำวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของอาคารไว้หลายท่าน ซึ่งได้ยกตัวอย่างมาให้เห็นได้แก่ [7] ได้บันทึกการทรุดตัวของฐานรากอาคารเมื่อก่อสร้างเสร็จ พบว่ามีการทรุดตัวของอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบถึง 60 เท่า สำหรับอาคารธนาคารกรุงเทพสำนักงานใหญ่ซึ่งใช้เสาเข็มแบบ 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]

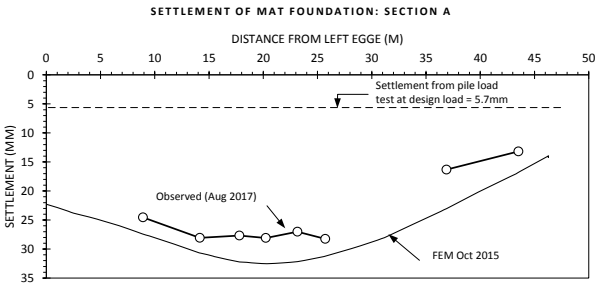
โครงการ	การทรุดตัว	
	ทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ	การทรุดตัวของฐานรากเมื่อสร้างเสร็จ
ธนาคารกรุงเทพ สำนักงานใหญ่	2.5mm at 635 ton	150mm
อาคารไทปิง tower A	9mm at 1100 ton	96mm
อาคารไทปิง tower B	9mm at 1100 ton	96mm



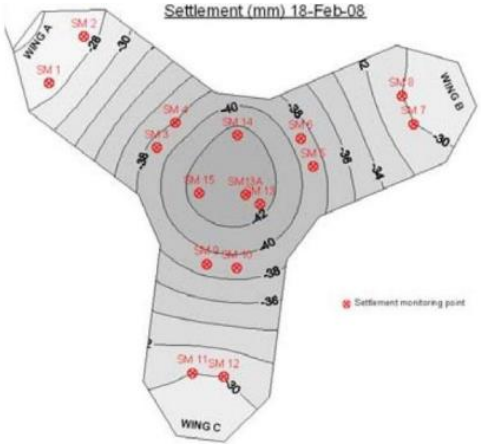
รูปที่ 1 เส้นชั้นการทรุดตัวของอาคารไทปิง tower A และ tower B ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปถ้วยที่มีการทรุดบริเวณฐานกลางอาคารสูงกว่าที่ขอบอาคาร วาดใหม่จากงานเดิมของ [7]

[8] ได้รายงานว่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ของอาคารสูง 50 ชั้น ในชั้นดินกรุงเทพมีการทรุดตัวสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบอยู่ 5.2 เท่า และการทรุดตัวนี้สอดคล้องกับการทำนายการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ก่อนที่จะมีการก่อสร้างอาคาร ดังนั้นการทรุดตัวของฐานรากอาคารจึงไม่ได้เป็นการทรุดตัวที่ผิดปกติหรือเป็นการทรุดตัวที่เกิดจากความบกพร่องของเสาเข็มแต่อย่างใด เนื่องจากได้ทำการวิเคราะห์และทำนายไว้ล่วงหน้าถึง 2 ปี ดังรูปที่ 2 [2] ได้วิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแพด้วยโปรแกรม ELPLA โดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงของตึก Burj Khalifa ที่มีความสูงประมาณ 829.8 เมตร จำนวน 163 ชั้น และใช้ระบบฐานรากเสาเข็มแพรองรับน้ำหนักของอาคาร โดยฐานรากแพหนา 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

เหตุผลที่การทรุดตัวของเสาเข็มอาคารสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบนั้น [6] ได้อธิบายเหตุผลว่าการทดสอบเสาเข็มที่เป็นเสาเข็มเดี่ยวทำให้เกิดกระเปาะแรงดันดินเล็กกว่ากระเปาะแรงดันของเสาเข็มกลุ่มที่เกิดจากการซ้อนทับของแรงดันดินจากเสาเข็มเดี่ยว กระเปาะแรงดันดินที่ใหญ่ขึ้นนี้ส่งอิทธิพลลงไปในชั้นดินลึกกว่า ดังรูปที่ 4 [3] ยังได้อธิบายถึงการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มบริเวณส่วนกลางของฐานรากเสาเข็มกลุ่มเกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ดังรูปที่ 5



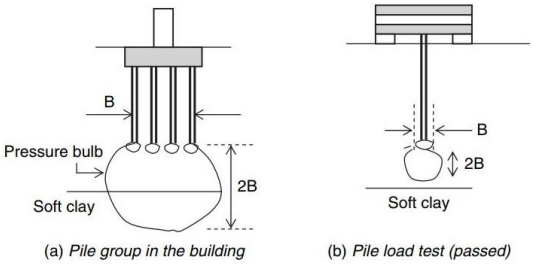
รูปที่ 2 เปรียบเทียบการทำนายการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแผ่ล่วงหน้า 2 ปี กับผลการตรวจวัดหลังจากการก่อสร้าง [8]



รูปที่ 3 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแพของตึก Burj Khalifa ภายใต้ 80% ของน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด [2]

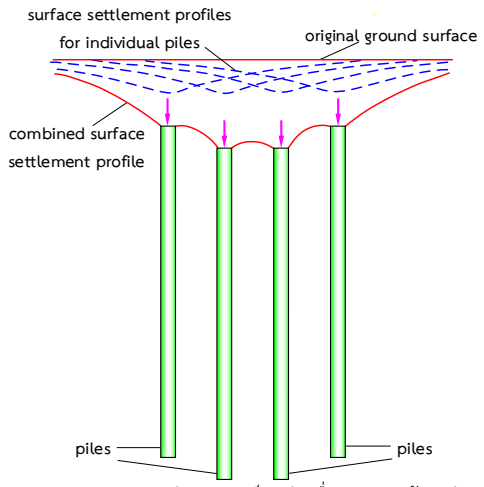
จากงานวิจัยและหลักฐานที่กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าวิธีการออกแบบที่มีแนวคิดว่าหากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกันแล้วจะมีการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันนั้นไม่เป็นจริง โดยฐานรากจะมีการทรุดตัวแบบเสาเข็มกลุ่ม ซึ่งเกิดการซ้อนทับของหน่วยแรงทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มนั้นสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว และทำให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นรูปถ้วยขึ้น และการเลือกใช้ค่าคงที่ของสปริงเพื่อใช้ในการจำลองเสาเข็มเป็นสปริงนั้นทำให้ได้ค่าคงที่ของสปริงที่สูงเกินกว่าความเป็นจริงอันนำไปสู่ผลการโก่งของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งการวิเคราะห์ที่ได้การทรุดตัวของฐานรากที่น้อยกว่าความเป็นจริงนี้ทำให้แรงในโครงสร้างส่วนบนของอาคารผิดไปจากความเป็นจริงด้วย

งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากอาคารสูงแบบแผ่ โดยอาศัยผลการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบและผลการวัดการทรุดตัวของฐานรากอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Finite element) และได้ใช้ผลการวิเคราะห์กลับในการหาแนวทางที่จะทำให้ฐานรากเสาเข็มแผ่มีการทรุดตัวที่แตกต่างลดลง ซึ่งจะทำให้การออกแบบเป็นไปอย่างปลอดภัยและประหยัด



(a) *Pile group in the building* (b) *Pile load test (passed)*

รูปที่ 4 กระเปาะแรงดันของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและกระเปาะแรงดันของเสาเข็มกลุ่ม [6]



รูปที่ 5 พฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากการซ้อนทับของการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว [3]

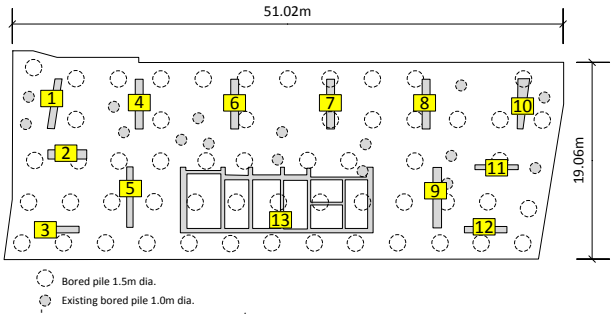
2. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลการออกแบบฐานรากอาคารสูงของโครงการก่อสร้างอาคาร 51 ชั้นในซอยสุขุมวิท 24 ที่ใช้ฐานรากเป็นฐานรากเสาเข็มแผ่, ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินของโครงการ, ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มโครงการทั้งเสาเข็มที่ก่อสร้างไว้ก่อนและเสาเข็มที่ก่อสร้างใหม่ และได้เก็บข้อมูลการทรุดตัวของฐานรากอาคารโดยได้ตรวจวัดที่พื้นชั้น 1 ของอาคารเพื่อความสะดวกในการตรวจวัด จากนั้นทำการวิเคราะห์กลับโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ การวิเคราะห์กลับใช้ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มและทำการวิเคราะห์โดยแปรผันค่า Young's modulus ที่ทำให้ได้การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำในแบบจำลอง FEM ใกล้เคียงกับการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบมากที่สุด เมื่อได้ค่า Young's modulus จากการวิเคราะห์กลับแล้วนำไปใช้ในการจำลองฐานรากเสาเข็มแผ่ของโครงการโดยใช้น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากผู้ออกแบบโครงสร้าง 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 โดยใช้สติฟเนสของสปริงที่ได้จากการนำแรงที่ได้จาก ETABS มาคำนวณการทรุดตัวและแรงในเสาเข็มแต่ละต้นด้วย PLAXIS 3D จากนั้นคำนวณสติฟเนสของสปริงแต่ละต้นแล้ววิเคราะห์แรงในองค์อาคารโดยใช้สติฟเนสของสปริงของเสาเข็มแต่ละต้นที่ได้จากการจำลองใน 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



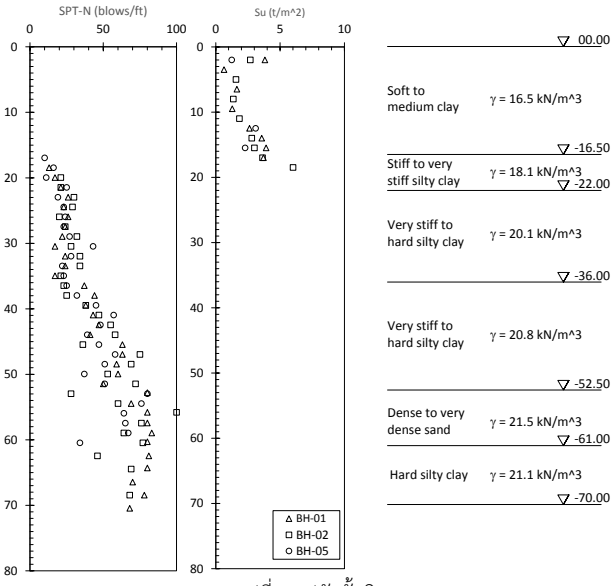
รูปที่ 6 ผัง mat, ตำแหน่งเสาเข็ม, ตำแหน่งของ column wall และ core wall

ตารางที่ 2 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. ข้อมูลชั้นดินและสมบัติทางกลของดิน

ในงานวิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของอาคารทั้งหมด 3 หลุม โดยหลุมเจาะ BH-02 อยู่ตรงตำแหน่งของอาคาร รูปที่ 7 เป็นรูปตัดชั้นดิน โดยประกอบไปด้วยชั้นผิวหน้าดิน หนา 1.5 เมตร ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หนา 15.0 เมตร จากนั้นเป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก ลึกไปจนถึง 52.5 เมตร หลังจากนั้นเป็นชั้นดินทรายแน่นถึงแน่นมาก หนา 8.5 เมตร ถัดจากชั้นทรายจนถึงก้นหลุมเจาะเป็นชั้นดินเหนียวดาน หนา 9.0 เมตร ตารางที่ 3 สรุประดับของชั้นดิน, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองที่ใช้สติฟเนสประสิทธิผลและใช้กำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำสำหรับชั้นดินเหนียว ซึ่งเป็น undrained type B ใน PLAXIS 3D สำหรับการใช้แบบจำลองดินแบบ undrained type B นี้จะได้ผลลัพธ์การคำนวณแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อน้ำหนักอาคารกระทำต่อดิน ซึ่งสามารถจำลองการระบายน้ำส่วนเกินนี้ได้ด้วยการวิเคราะห์ consolidation analysis ใน PLAXIS 3D ส่วนชั้นทรายใช้แบบจำลองดินแบบระบายน้ำ สำหรับฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กใช้แบบจำลองเป็น linear elastic โดยใช้ค่า Young's modulus เป็น 24.78 MPa และค่า Poisson' ratio เป็น 0.2



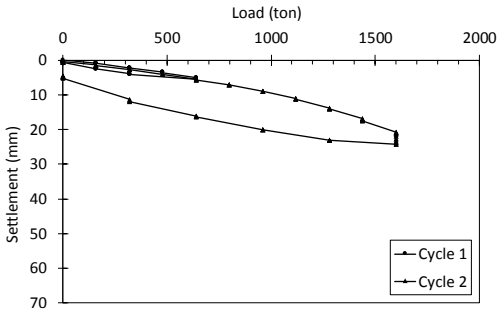
รูปที่ 7 รูปตัดชั้นดิน

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของดินที่ใช้ในการจำลอง

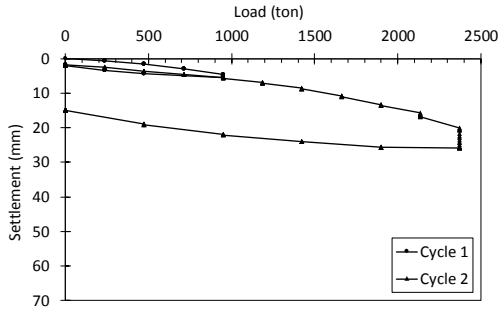
Material	Depth (m)	E' (kN/m^2)	ν'	Unit weight (kN/m^3)	ϕ' (degree)	Su (kN/m^2)
Soft to medium caly	00.0-16.5	10,546	0.30	16.52	-	24.5
Stiff to very stiff silty clay	16.5-22.0	126,549	0.30	18.10	-	73.6
Very stiff to hard silty clay 1	22.0-36.0	210,915	0.30	20.18	-	122.6
Very stiff to hard silty clay 2	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

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



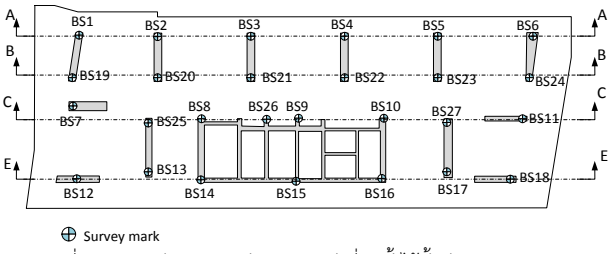
รูปที่ 8 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร



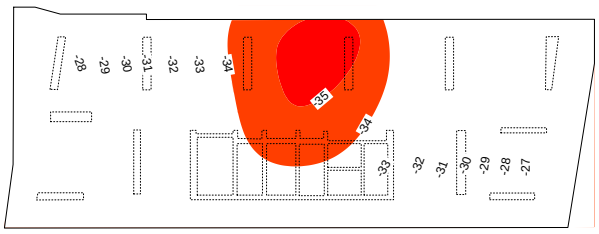
รูปที่ 9 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

3.2 การทรุดตัวของฐานราก

เพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานอาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกได้ติดตั้งจุดวัดการทรุดตัวไว้ที่เสาส่วนล่างที่ติดกับ 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 ตำแหน่งจุดตรวจวัดการทรุดตัวที่ติดตั้งไว้ชั้นล่างสุดของอาคาร



รูปที่ 11 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat จากการตรวจวัดในสนาม

4. การวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มและผลการวัดการทรุดตัวของอาคาร

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์กลับเพื่อหา Young's modulus ที่เหมาะสมเพื่อทำนายการทรุดตัวของดิน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินในโครงการที่มีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ส่วนกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวแข็งถึงชั้นดินเหนียวดานประมาณจากผลการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน แบบจำลองดินที่ใช้เป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของ มอหร์-คูลอมบ์ (linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) สำหรับชั้นดินเหนียวใช้ 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 ดังสมการที่ 1

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

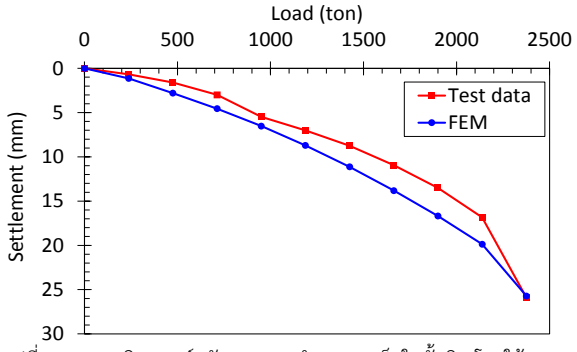
เมื่อ $\nu' = 0.3$ กรณีหน่วยแรงประสิทธิผล และ $\nu_u = 0.5$ กรณีหน่วยหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ได้ความสัมพันธ์เป็น $E' = 0.87E_u$ สำหรับกำลังรับแรงเฉือนใช้เป็นหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งใน PLAXIS 3D เรียกว่า undrained type B ส่วนชั้นดินทรายกำหนดให้คิดเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลและเป็นแบบระบายน้ำ ในการคำนวณโดยให้ชั้นดินเหนียวเป็นแบบไม่ระบายน้ำทำให้โปรแกรมคำนวณแรงดั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

ในการวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็ม ทำโดยสร้างแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดินโครงการ โดยความกว้างและความลึกของแบบจำลองมากพอที่จะไม่ทำให้ขอบเขตของแบบจำลองส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์ใช้วิธีการเพิ่มแรงกระทำเป็นแบบ point load บนหัวเสาเข็มที่มีค่าเท่ากับแรงกระทำต่อหัวเสาเข็ม และคำนวณค่าทรุดตัวของหัวเสาเข็ม และได้แปรผันค่าสติฟเนสของดินจนกระทั่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเสาเข็มมากที่สุด ดังรูปที่ 12 และตารางที่ 4 สรุปค่าสติฟเนสที่ได้จากการวิเคราะห์กลับ

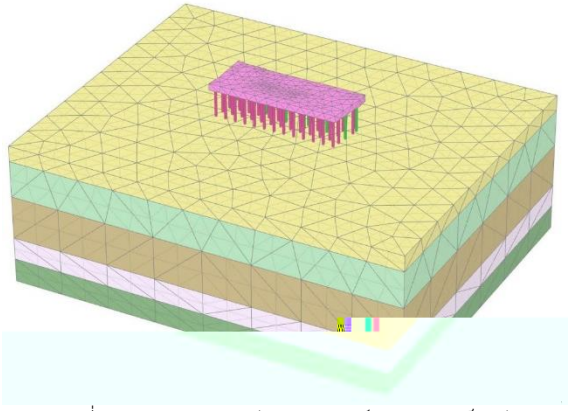
ตารางที่ 4 ค่า Young's modulus จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ผลการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว

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 ของชั้นดินจากการวิเคราะห์กลับโดยอาศัยผลการทดสอบเสาเข็มแล้ว 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 ผลการวิเคราะห์กลับจากแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดิน โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร

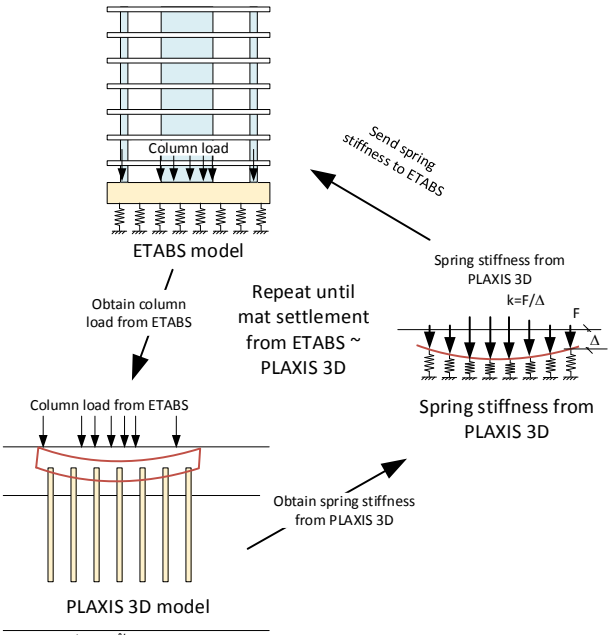


รูปที่ 13 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแผ่ โดยซอฟแวร์ PLAXIS 3D

ในการจำลองร่วมกันระหว่าง ETABS กับ PLAXIS 3D ใช้การวิเคราะห์แบบกระทำซ้ำหลายรอบ iteration ระหว่าง ETABS กับ PLAXIS โดยเริ่มจากทำการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อส่วนล่างสุดของเสา โดยจำลองโครงสร้างอาคารใน ETABS ที่พิจารณาให้เสาเข็มเป็นสปริง โดยค่าสติฟเนสของสปริงเริ่มต้นใช้ค่าของการวิเคราะห์จากผลการทดสอบเสาเข็มเป็นค่าตั้งต้น จากนั้นจำลองอาคารและ mat บนสปริงเพื่อให้ได้แรงกระทำที่โคนเสา จากนั้นนำแรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ไปเป็นแรงกระทำต่อ mat ในแบบจำลอง PLAXIS 3D ผลลัพธ์ที่ได้เป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มและค่าทรุดตัวของเสาเข็มแต่ละต้น ในขั้นตอนนี้สามารถคำนวณสติฟเนสของสปริงที่จะใช้แทนเสาเข็มใน ETABS ได้ ดังสมการที่ 2

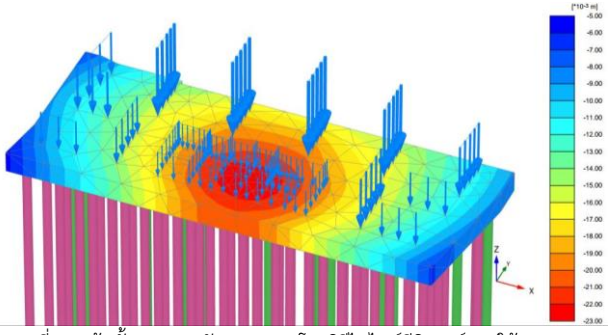
$$K = \frac{P}{\delta} \tag{2}$$

เมื่อ K คือค่าสติฟเนสของสปริง, P คือแรงที่หัวเสาเข็ม และ δ คือการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม จากนั้นใช้สติฟเนสของสปริงสำหรับเสาเข็มแต่ละต้นจากโปรแกรม PLAXIS 3D ในการสร้างแบบจำลอง ETABS ในขั้นตอนนี้สปริงที่ได้ถือว่าได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มและ mat แล้วแต่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากในการจำลอง PLAXIS 3D นั้นไม่ได้รวมเอาผลเนื่องจากสติฟเนสของอาคารส่วนบนเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องนำแรงกระทำโคนเสาจาก ETABS ในรอบที่สองนี้มาใช้เป็นแรงกระทำต่อ mat ใน PLAXIS 3D ซ้ำเป็นรอบที่สอง ซึ่งการทำการวิเคราะห์จะทำซ้ำจนกระทั่งการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก PLAXIS 3D ต่างจากการทรุดตัวของ mat ที่ได้จาก ETABS ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยขั้นตอนการจำลอง ดังรูปที่ 14

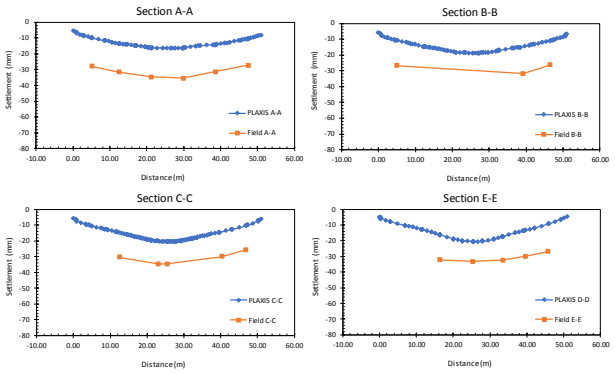


รูปที่ 14 ขั้นตอนการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างโดย ETABS ร่วมกับ PLAXIS 3D

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

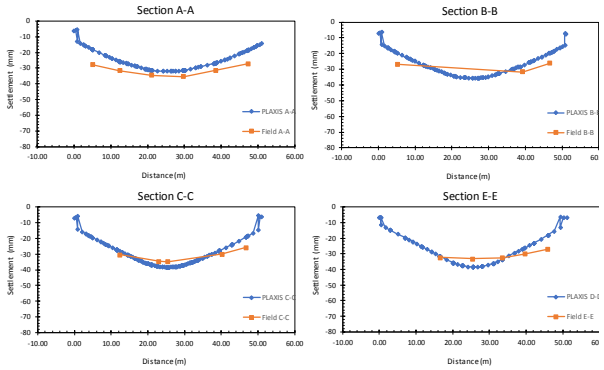


รูปที่ 15 เส้นชั้นการทรุดตัวของ mat โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และใช้ Young's modulus แบบวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะของโครงการ



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

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 ของชั้นดินเหนียวที่วิเคราะห์กลับโดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มสูงกว่าอาจเนื่องจากการที่แบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นได้ ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น หากใช้แบบจำลองดินแบบ non-linear ที่สติฟเนสลดลงเมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นน่าจะทำให้ผลการประมาณการทรุดตัวเป็นไปอย่างสอดคล้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นประโยชน์ของงานวิจัยไปยังผู้ออกแบบอาคารสูง ดังนั้นจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและนำเสนอ Young's modulus ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองได้สะดวก และพารามิเตอร์ยังสื่อถึงพฤติกรรมเชิงกลของดินอีกด้วย



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

ตารางที่ 5 ค่า 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

5. การศึกษาอิทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มต่อแรงในโครงสร้าง

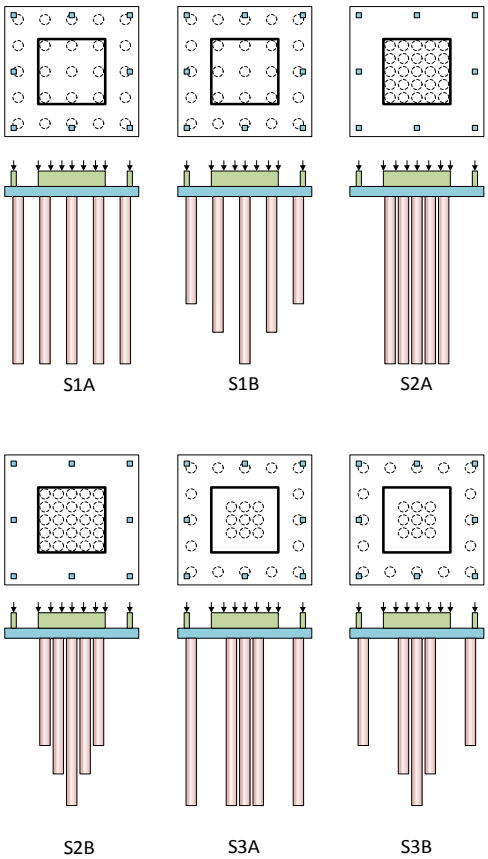
งานศึกษาเกี่ยวกับการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็มที่รองรับ mat ที่มีผู้ทำไว้อาทิเช่น [1], [4] และ [5] ได้มีการจำลองฐานรากด้วยวิธี ไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยสมมุติขนาดของ mat และรูปแบบของแรงกระทำขึ้นมาโดยไม่สอดคล้องกับรูปแบบของอาคารสูงโดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น [5] ใช้ฐานราก mat เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแรงกระทำเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีแรงกระทำแบบ uniform load และกรณีแรงกระทำแบบ core-edge loading ซึ่งทำให้สติฟเนสของ mat ซึ่งประมาณจากความยาวต่อความหนาของ mat, L/B นั้นสูงมาก เช่นเดียวกับขนาดของ mat ในงานศึกษาของ [1] ที่ใช้ความกว้างของ mat รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ 15 เมตร สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการมุ่งเป้าหมายไปยังฐานรากของอาคารสูงพิเศษที่ใช้ฐานรากแบบ mat รองรับแรงกระทำจากโครงสร้างส่วนบน อีกทั้งลักษณะของอาคารสูงสำหรับที่เป็นที่พักอาศัยในปัจจุบันนิยมใช้รูปทรงอาคารรูปทรงแบน ที่ทำให้ฐานของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในงานวิจัยได้จำลองรูปแบบของฐานราก 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 -5.6 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

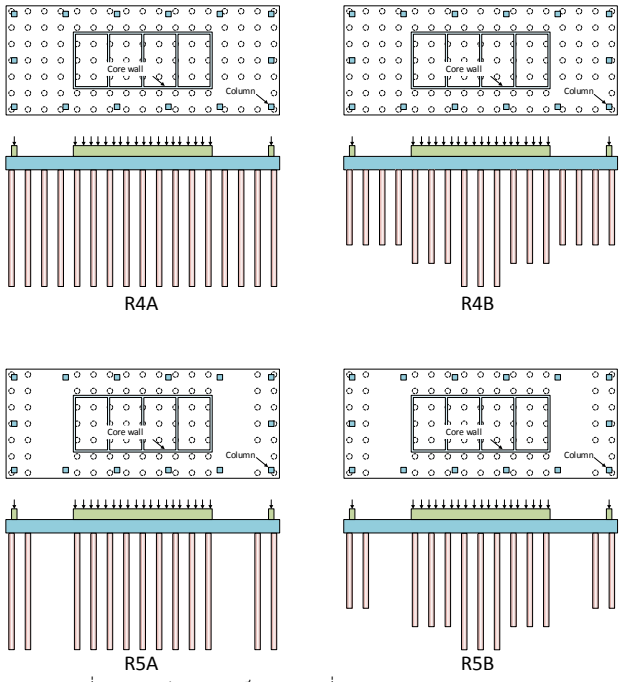
load และ superimposed dead load เท่านั้น ส่วน live load นั้นเป็นแรงกระทำที่ไม่แน่นอนและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ โดยแรงที่กระทำต่อ mat ทั้งหมดเป็น 469,728 kN ตารางที่ 6 สรุปกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 6 กรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำอธิบาย

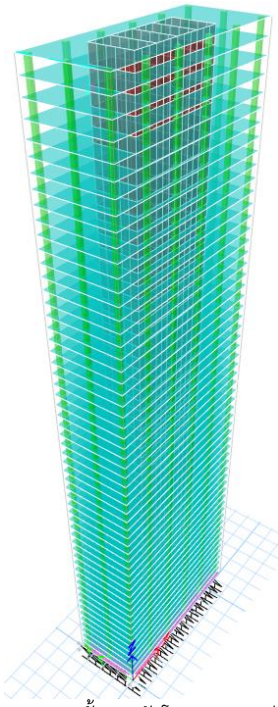
กรณี	การจัดเรียงเสาเข็ม
S1A	เข็มกระจายทั่ว mat ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S1B	เข็มกระจายทั่ว mat แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
S2A	ใช้เสาเข็มรองเฉพาะบริเวณ core ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S2B	ใช้เสาเข็มรองเฉพาะบริเวณ core แปรผันระดับปลายเสาเข็ม
S3A	เสาเข็มรองใต้ core และใต้เสา ปลายเสาเข็มยาวเท่ากัน
S3B	เสาเข็มรองใต้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



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



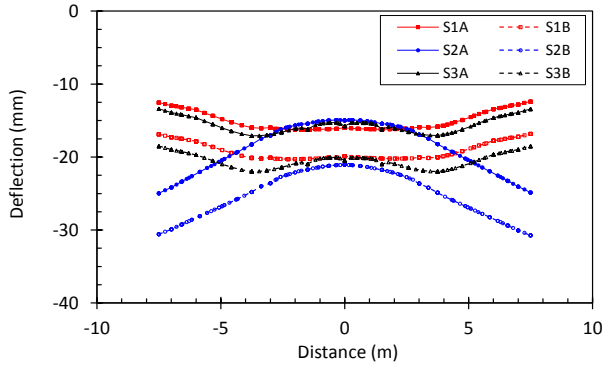
รูปที่ 19 การจัดวางเสาเข็มรูปแบบที่ R4A, R4B, R5A, และ R5B



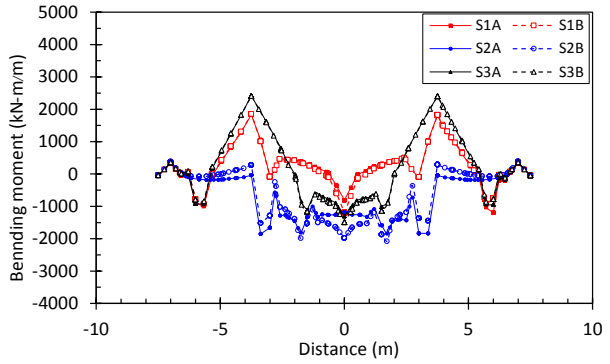
รูปที่ 20 แบบจำลองอาคารสูง 57 ชั้น รองรับโดยฐานรากแผ่ที่จำลองเสาเข็มด้วยสปริงในการวิเคราะห์แรงกระทำต่อ mat กรณี R4A, R4B, R5A และ R5B โดยซอฟแวร์ ETABS

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการแปรผันการจัดเรียงเสาเข็ม แสดงให้เห็นว่าสำหรับฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส การจัดเรียงเสาเข็มแบบกรณี S1A และ S3A มีการทรุดตัวของ mat คล้ายคลึงกัน ส่วนกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core กรณี S2A ทำให้ mat ส่วนกลางมีการทรุดตัวต่ำกว่าขอบ mat ซึ่งกรณีที่ใช้เสาเข็มรองรับเฉพาะ core นี้เป็นกรณีที่สมมุติขึ้นตามงานวิจัยของ [5] ซึ่งเป็นไปได้ยากในกรณีของ mat ที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อน

แต่สำหรับการจำลองในกรณีนี้ mat วางอยู่บนชั้นดินแข็งที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงถึง 90 kN/m^2 ซึ่งเป็นชั้นดินจากงานวิจัยของ [1] พบว่าดินบริเวณขอบ mat เกิดการวิบัติจนทำให้เกิดการทรุดตัวเป็นรูปถ้วยคว่ำหรือรูปดอกเห็ด สำหรับการแปรผันระดับปลายเสาเข็มในกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากฐานรากมีความกว้างเพียง 15 เมตร ซึ่งทำให้ฐานรากมีสติฟเนสสูงจนอาจถือได้ว่าเป็นฐานรากแกร่ง ประกอบกับการจัดเรียงเสาเข็มทั้งหมดเข้าไปรองใต้ core จึงทำให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มลดลงทำให้อิทธิผลของการวิบัติแบบกลุ่มเกิดขึ้นเป็นหลัก

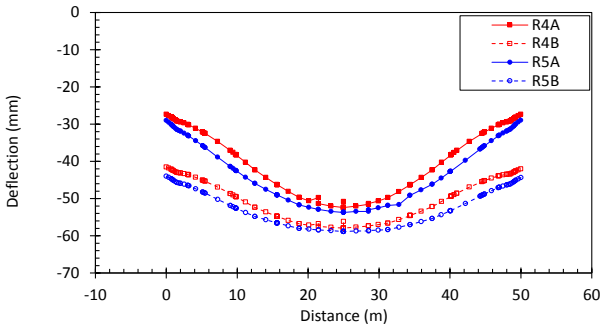


รูปที่ 21 การแอ่นตัวของ mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

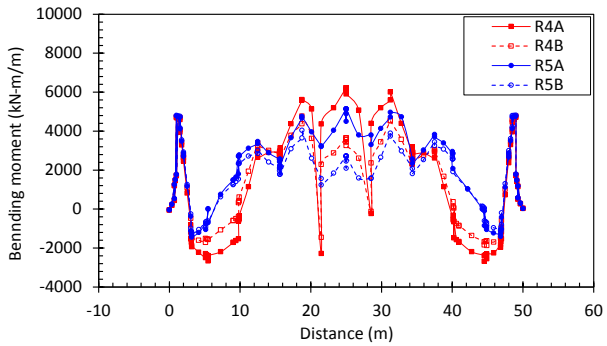


รูปที่ 22 โมเมนต์ดัดใน mat กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส S1A, S1B, S2A, S2B, S3A และ S3B

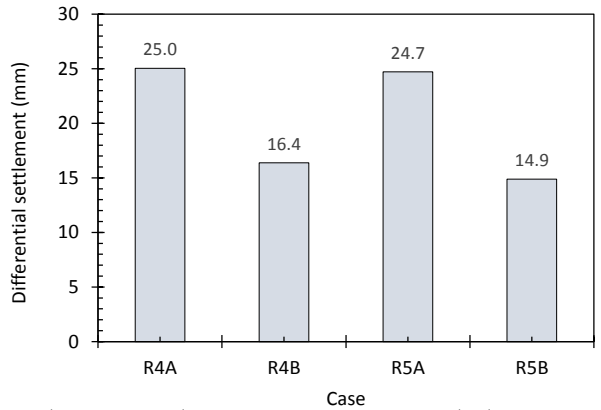
ในกรณีของ mat สี่เหลี่ยมผืนผ้า R4A, R4B, R5A และ R5B ซึ่งเป็นฐานรากที่มีสติฟเนสต่ำกว่าฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสในงานวิจัยนี้เนื่องจากฐานรากมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างต่ำกว่า เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดการแอ่นของ mat ซึ่งอาจใช้เป็นรัศมีความโค้ง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าทรุดตัวที่ขอบ mat เทียบกับการทรุดตัวมากสุดที่กลาง mat, Δ_{mat} เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบ สำหรับ mat กรณี R4A และ R4B เห็นได้ว่าการปรับลดความยาวเสาเข็มลงโดยให้เสาเข็มส่วนกลาง mat ยาวที่สุดทำให้ Δ_{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 สอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวของฐานราก 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 เนื่องจากการแปรผันความยาวเสาเข็มจะทำให้การทรุดตัวที่ขอบของ 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., Phienwej, N. and Kitpayuck, P. (2012). Current practice on foundation design of high-rise buildings in Bangkok, Thailand, Lowland technology international 14th, 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 (2nd 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 (1st Edition), Butterworth-Heinemann

[7] Sambhandharaska, S. et al. (1987). Settlements of structures and their predictions in Bangkok subsoils., Southeast Asian geotechnical conference 9th, 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.