ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนเชิงพื้นที่ต่อการทรุดตัวของดินจากการอัดตัวคายน้ำในพื้นที่ถมขนาดใหญ่

Effect of Soil Spatial Variability on Consolidation Settlement of Large Filled Area

สนั่น พิรุณจินดา[1,*] ชนา พุทธนานนท์[1] พรเกษม จงประดิษฐ์[1] และ Hyung-Mok Kim[2]

[1] ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

[2] Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, College of Engineering, Sejong University, Seoul, Republic of Korea

**Corresponding author; E-mail address: sanan.pirunjinda25@gmail.com*

บทคัดย่อ

การถมที่ดินชายฝั่ง เป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาพื้นที่ทางราบไม่เพียงพอในประเทศต่าง ๆ และมักจะถมเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำหลังการถมที่ ดินเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จำเป็นต้องประเมินการทรุดตัวอย่างถูกต้องในขั้นตอนการออกแบบการถมที่ดิน ในทางปฏิบัติ ดินมักจะถูกพิจารณาให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนในสมบัติของดิน งานวิจัยก่อนหน้ามีการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่มในการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดิน อย่างไรก็ตาม มีเพียงงานวิจัยส่วนน้อยเท่านั้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำในพื้นที่ขนาดใหญ่ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม งานวิจัยนี้ศึกษาการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำในบริเวณดินถมขนาดใหญ่ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม โดยแบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ตัวแปรเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์จะถูกคำนวณจากข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด ผลจากการวิเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนดแสดงให้เห็นว่า ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่มมีความสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวสุดท้ายมากกว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนในสมบัติของดินจึงเหมาะสมกว่าที่จะพิจารณาความเสี่ยงจากปัญหาการทรุดตัวที่อาจเกิดขึ้น

คำสำคัญ: การถมที่ดินชายฝั่ง, การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ, ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน, วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม

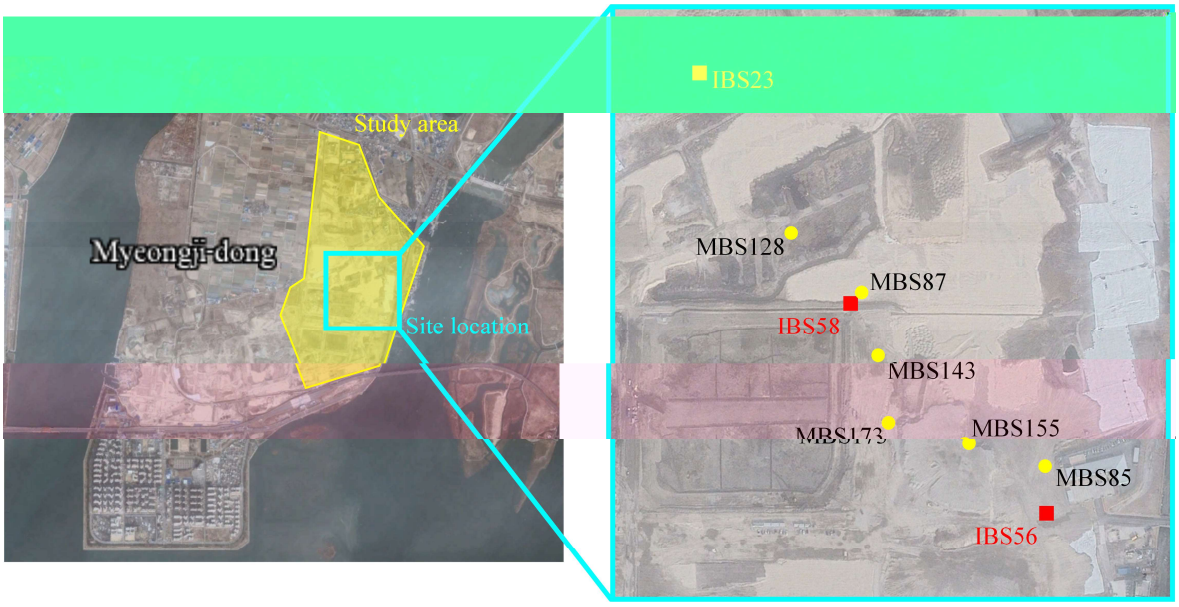
Abstract

Land reclamation, which is usually performed over a large area, is a solution to solve land shortage in many countries. Consolidation settlement after land reclamation is unavoidable and that is why the prediction of consolidation settlement must earnestly be considered in the design stage. In practice, the soils are normally considered to be homogeneous by ignoring the uncertainty of soil properties. Although stochastic finite element (FE) method has been carried out to investigate consolidation behaviors in some previous works; however, there are only few studies that performed stochastic consolidation settlement over large area based on limited field data. Therefore, in this study, an approach based on stochastic FE considering soil spatial variability is implemented and developed to systematically predict consolidation settlement of large land reclamation. Stochastic FE modeling is established through FE software PLAXIS 2D. Statistical parameters collected from limited field data are analyzed and adopted for stochastic FE analysis. The obtained results showed that the results obtained from stochastic FE are in good agreement with the final settlement which means considering the uncertainties of soil properties is more appropriate to evaluate the risk of problems caused by the settlement.

Keywords: Land reclamation, Consolidation settlement, Soil spatial variability, Stochastic finite element analysis

1. บทนำ

การถมที่ดินชายฝั่ง (Land Reclamation) เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาภาวะขาดแคลนพื้นที่ทางราบซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายประเทศ เช่น สิงคโปร์ [1] และเกาหลี [2] โดยส่วนใหญ่การถมที่ดินชายฝั่ง มักจะทำการถมเป็นบริเวณกว้าง เพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ในการพัฒนาและขยายโครงสร้างพื้นฐานของประเทศนั้น ๆ โดยปกติชั้นดินเดิมตามชายฝั่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก่อนการถม มักจะมีชั้นดินเหนียวเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวหลังการก่อสร้างจึงเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นปกติและควรให้ความสำคัญ [3] ในทางปฏิบัติการพิจารณาถึงการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวสำหรับปัญหาการถมที่ดินชายฝั่งนั้น มักจะพิจารณาชั้นดินเหนียวให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Clay Layer) โดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินแต่ในความจริงสมบัติดินมีความแปร



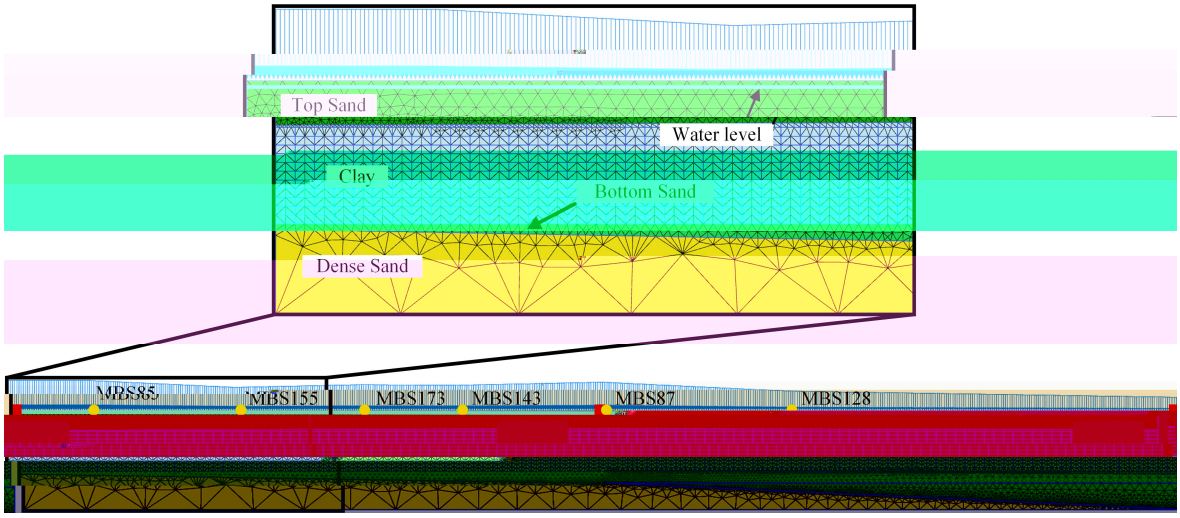
รูปที่ 1 ตำแหน่งหลุมเจาะและข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ศึกษา

ปรวนเชิงพื้นที่ซึ่งส่งผลอย่างมากและมีนัยสำคัญต่อการทรุดตัวของดิน [1] ดังนั้นการประเมินการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวของพื้นที่ดินถมชายฝั่ง โดยพิจารณาถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการก่อสร้างโครงสร้างต่าง ๆ บนพื้นที่ดินถมชายฝั่งอย่างไรก็ตาม ข้อมูลหลุมเจาะ (Boring Log) ในโครงการถมที่ดินขนาดใหญ่มักมีอยู่อย่างจำกัด หากผู้ออกแบบต้องการวิเคราะห์การทรุดตัวเพื่อให้ครอบคลุมความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินเหล่านี้ จะต้องมีการเจาะสำรวจดินเพิ่มเติม ซึ่งอาจส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การทรุดตัวโดยพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินจากข้อมูลหลุมเจาะที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นเรื่องสำคัญต่อโครงการเหล่านี้

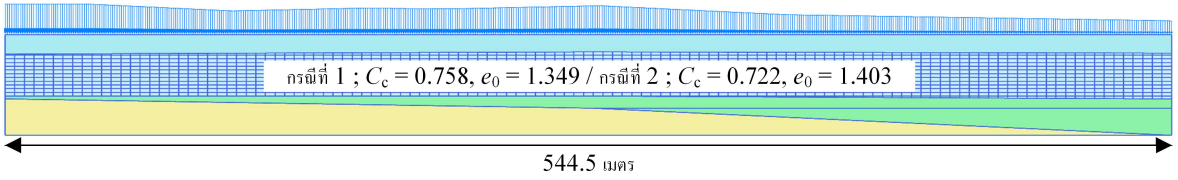
ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีสมบัติแปรปรวนเชิงพื้นที่อย่างมาก ซึ่งเกิดจาก 3 สาเหตุหลัก [4] คือ (1) ความแปรปรวนที่เกิดโดยธรรมชาติ (2) ความผิดพลาดจากการตรวจวัดสมบัติของดิน และ (3) ความไม่แน่นอนเนื่องจากการแปลงค่าสมบัติของดิน โดยที่ความแปรปรวนสมบัติดินที่เกิดจากแหล่งที่ 1 มีสาเหตุสำคัญมาจากกระบวนการพัดพา การทับถม หรือกระบวนการใด ๆ ตามธรรมชาติที่ก่อให้เกิดดิน ความผิดพลาดจากการใช้เครื่องมือวัดทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการเป็นที่มาสำคัญในการเกิดความแปรปรวนสมบัติดินเนื่องจากแหล่งที่ 2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบหาค่าสมบัติดินที่ต้องอาศัยอุปกรณ์การทดสอบที่มีความซับซ้อน ความแปรปรวนสมบัติดินในแหล่งที่ 3 เกิดจากการแปลงสมบัติใด ๆ ของดินเป็นสมบัติอื่น ๆ ที่สนใจ โดยปกติการแปลงสมบัติของดินสามารถทำได้จากการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) หรือใช้สมการซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) ระหว่างสมการรูปแบบใด ๆ กับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดิน

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสนามสุ่ม (Random Field Theory) เพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินโดยพิจารณาถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน [5-9] รวมถึงมีการนำเสนอและพัฒนาวิธีวิเคราะห์และออกแบบโดยใช้วิธีการทางสถิติขั้นสูงเข้ามาช่วย [10-11] ให้ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบมีความกระชับและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้ไม่ได้พิจารณานำผลตรวจวัดในสนามมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยเหล่านั้นซึ่งอาจทำให้ผู้ที่นำวิธีเหล่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพิจารณาความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ได้ยากเนื่องจากไม่มีตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์กับข้อมูลผลตรวจวัดภาคสนาม ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวด้วยกรอบการทำงานแบบขับเคลื่อนด้วยข้อมูล (Data-driven Framework) [12] ซึ่งมีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังต้องการข้อมูลผลตรวจวัดการทรุดตัวในสนาม นอกจากนี้งานวิจัยที่มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำด้วยทฤษฎีสนามสุ่มของดินในบริเวณพื้นที่กว้างในอดีตยังมีจำนวนน้อย

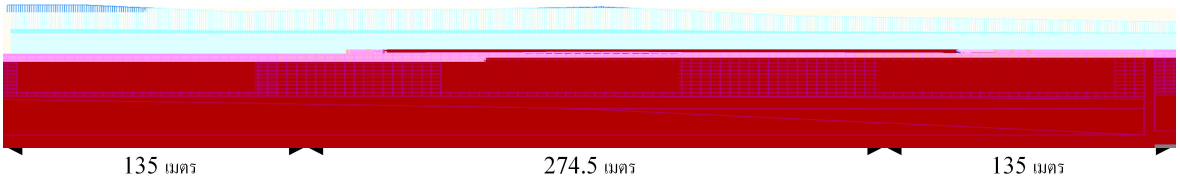
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นให้เห็นความสำคัญถึงการพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินในขั้นตอนการวิเคราะห์การทรุดตัวสุดท้ายเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในบริเวณพื้นที่ดินถมขนาดใหญ่ โดยใช้ข้อมูลชั้นดินและสมบัติดินจากหลุมเจาะที่มีอยู่อย่างจำกัดมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด (Deterministic Finite Element Method, DFEM), วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม (Stochastic Finite Element Method, SFEM) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องมีผลตรวจวัดการทรุดตัวในสนามหลังการก่อสร้างมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสุด



รูปที่ 2 ตำแหน่งหลุมเจาะและจุดตรวจวัดในโครงตาข่ายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



(ก)



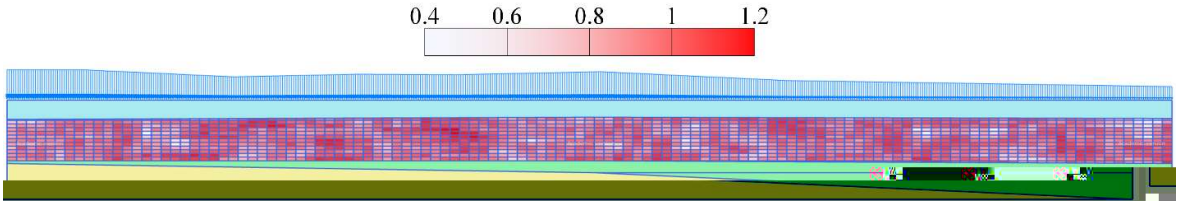
(ข)

รูปที่ 3 (ก) แบบจำลองเชิงตัวเลขของกรณีที่ใช้สมบัติตามหลุมเจาะที่มีค่าดัชนีการอัดตัวสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ
(ข) แบบจำลองเชิงตัวเลขของกรณีที่ใช้สมบัติตามพื้นที่รับผิดชอบของแต่ละหลุมเจาะ

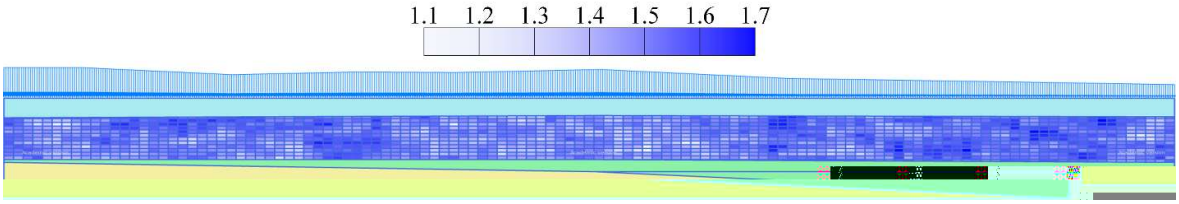
ท้าย โดยสมบัติดินที่พิจารณาให้มีความแปรปวนเชิงพื้นที่ในการศึกษานี้คือ ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index, $_c$) และค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดิน (Initial Void Ratio, $_0$) เนื่องจากเป็นสมบัติดินที่ส่งผลต่อการทรุดตัวสุดท้ายอย่างมาก อีกทั้งในการศึกษานี้ยังนำข้อมูลผลตรวจวัดในสนามมาคำนวณค่าการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะ (Asaoka's Method [13]) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DFEM และ SFEM

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ควบคู่กับภาษาไพทอน (Python) ขั้นสูง เพื่อวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวในการวิเคราะห์แบบ DFEM และยังใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการวิเคราะห์แบบ SFEM โดยที่สมบัติของดินแบบสุ่มในขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีทั้งหมดสองสมบัติ คือ ค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดิน ซึ่งเป็นสมบัติที่ส่งผลอย่างมากต่อค่าการทรุดตัวสุดท้ายตามแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model, SS) จากนั้นวิเคราะห์ผลการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะและถือว่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของอาซาโอกะเป็นค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดจริงในสนาม เพื่อเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธี DFEM กับ SFEM โดยมีพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในโครงการถมที่ดินชายฝั่งในเขตมยองจิ เมืองปูซาน ประเทศเกาหลีใต้ ทั้งนี้หลุมเจาะ 3 หลุมจากพื้นที่ศึกษาถูกเลือกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โดยมีเกณฑ์ว่าต้องมีผลตรวจวัดการทรุดตัวอยู่ในบริเวณระหว่างหลุมเจาะที่เลือก หลุมเจาะและตำแหน่งของหลุมเจาะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 4 ตัวอย่างสนามสุ่ม 1 สนามของค่าดัชนีการอัดตัว



รูปที่ 5 ตัวอย่างสนามสุ่ม 1 สนามของค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด (DFEM)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ พร้อมทั้งโครงตาข่ายสำหรับการศึกษานี้ประกอบไปด้วยชั้นดิน 4 ชั้น โดยมีน้ำหนักกดทับ (Surcharge Load) และระดับน้ำตามผลตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 2 ชั้นดินด้านบนสุดคือชั้นดินทราย (TS) ถัดมาคือชั้นดินเหนียว (Clay) ที่รองรับด้วยชั้นดินทราย (BS) และดินชั้นล่างสุดเป็นชั้นทรายแน่น (DS) โดยที่ชั้นดินสามชั้นบนแรกเป็นชั้นดินที่ได้จากข้อมูลหลุมเจาะซึ่งมีความหนาตามข้อมูลหลุมเจาะดังแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของชั้นดินด้านล่างสุดจะกำหนดให้เป็นทรายแน่นเนื่องจากไม่มีข้อมูลของดินในชั้นนี้ แต่จำเป็นต้องสร้างในแบบจำลองเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ การจำลองน้ำหนักกดทับในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดโดยการประมาณค่าเชิงเส้นจากผลตรวจวัดน้ำหนักกดทับจริงในสนามในแต่ละจุด

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Analysis) จะถูกแบ่งเป็น 2 ช่วงคือช่วงถมดินและช่วงอัดตัวคายน้ำ โดยกำหนดให้ดินถมสร้างขึ้นในช่วง 7 วัน จากนั้นปล่อยให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำจนกระทั่งแรงดันน้ำส่วนเกินในดินหมดไปซึ่งระดับน้ำถูกกำหนดตามข้อมูลหลุมเจาะดังแสดงในตารางที่ 1 และกำหนดให้ดินสามารถระบายน้ำได้สองทิศทางคือขอบบนและขอบล่างของแบบจำลองแต่ไม่สามารถระบายออกทางด้านข้างของแบบจำลองได้ พฤติกรรมการเสียรูปของทราย, ดินเหนียว และทรายแน่น ถูกกำหนดให้เป็นไปตามแบบจำลองมอร์คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MC), แบบจำลองดินอ่อน และแบบจำลองอิลาสติคเชิงเส้น (Linear Elastic Model, LE) ตามลำดับ โดยที่การวิเคราะห์การเสียรูปของดินกำหนดให้เป็นแบบความเครียดระนาบ (Plane Strain Analysis) และกำหนดให้ขอบล่างของแบบจำลองไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยที่ขอบด้านซ้ายและด้านขวาของแบบจำลองสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวดิ่ง สำหรับการวิเคราะห์แบบ SFEM ชั้นดินเหนียวในแบบจำลองจะถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยมีขนาดเป็น 0.5 เท่าของระดับความผันผวน

ตารางที่ 1 ระดับของชั้นดินที่ตำแหน่งหลุมเจาะต่าง ๆ (เมตร)

ชั้นดิน	หลุมเจาะ		
	IBS56	IBS58	IBS23
ระดับน้ำ	0.7	0.3	1.5
ทราย	0-10.5	0-9.3	0-10
ดินเหนียว	10.5-33	9.3-33	10-34.5
ทรายแน่น	33-34.5	33-39.5	34.5-54

(Scale of Fluctuation) ในแต่ละทิศทาง โดยอ้างอิงจากขนาดที่เหมาะสมจากงานวิจัยในอดีตที่พิจารณาทฤษฎีสนามสุ่มของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) เท่านั้น [14] ซึ่งการคำนวณระดับความผันผวนในแต่ละทิศทางอยู่นอกเหนือขอบเขตของบทความนี้ ดังนั้นบทความนี้จะไม่กล่าวถึงรายละเอียดของการคำนวณระดับความผันผวน แต่อย่างไรก็ตามสามารถศึกษารายละเอียดนี้ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า [15-16] แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะใช้เป็นแม่แบบ (Template) สำหรับการวิเคราะห์แบบ DFEM ด้วยเช่นกัน เพื่อความน่าเชื่อถือในการเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลอง SFEM และ DFEM

หลังจากแบ่งชั้นดินเหนียวเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ แล้ว การกำหนดสมบัติของดินเหนียวในการวิเคราะห์แบบ DFEM จะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 (รูปที่ 3(ก)) กำหนดค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินตามหลุมเจาะที่มีค่าดัชนีการอัดตัวสูงที่สุด กรณีที่ 2 (รูปที่ 3(ก)) กำหนดค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินตามหลุมเจาะที่มีค่าดัชนีการอัดตัวต่ำที่สุด และกรณีที่ 3 (รูปที่ 3(ข)) กำหนดค่าดัชนีการอัดตัวและอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นด้วยทุกค่าที่มีตามพื้นที่รับผิดชอบของแต่ละหลุมเจาะ โดยที่สมบัติดินอื่น ๆ เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยสมบัติดินจากทุกหลุมเจาะดังแสดงในตารางที่ 2 โดยสมมติค่าความซึมน้ำ (Permeability) ในแนวดิ่งและแนวราบให้มีค่าเท่ากัน (= =)

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม (SFEM)

การวิเคราะห์ SFEM เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน ซึ่งสมบัติของดินจะถูกสุ่มโดยอ้างอิงจากตัวแปรทางสถิติของสมบัติดิน ตัวแปรทางสถิติสำหรับสุ่มสมบัติดิน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) และค่าเฉลี่ย (μ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนคำนวณจากข้อมูลหลุมเจาะทุกหลุมในพื้นที่ศึกษาแต่ค่าเฉลี่ยคำนวณจากข้อมูลหลุมเจาะ 3 หลุมที่ถูกเลือก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่คำนวณจากข้อมูลหลุมเจาะ 3 หลุมมีความน่าเชื่อถือต่ำและค่าเฉลี่ยของสมบัติดินจากข้อมูลหลุมเจาะทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาอาจสูงหรือต่ำกว่าสมบัติของดิน ณ ตำแหน่งหลุมเจาะที่กำลังพิจารณาอย่างมีนัยสำคัญ ในการศึกษานี้ ค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของชั้นดินเหนียวจะถูกสุ่มและกำหนดเข้าไปในโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งขั้นตอนการสุ่มสมบัติของดินเหนียวเหล่านี้สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคแยกส่วนประกอบแบบโชเลสกี้ (Cholesky Decomposition Technique) [9, 17-18] ขั้นตอนการสุ่มค่าสมบัติดินสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การคำนวณเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติของข้อมูล

การคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Coefficient) จะใช้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Function) แบบ Single Exponentials ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสนามสุ่มในการวิเคราะห์ [18-19] โดยที่ค่าระดับความผันผวนของสมบัติดินที่พิจารณาในการศึกษานี้ที่จะต้องนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 และสามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$ \times = \begin{bmatrix} 1 & \rho(\Delta_{12},\Delta_{12}) & \cdots & \rho(\Delta_{1},\Delta_{1}) \\ \rho(\Delta_{21},\Delta_{21}) & 1 & \cdots & \rho(\Delta_{2},\Delta_{2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\Delta_{1},\Delta_{1}) & \rho(\Delta_{2},\Delta_{2}) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1) $$

2.2.2 การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติแบบโชเลสกี้

หลังจากคำนวณเมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติของข้อมูลแล้ว จะต้องแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์ด้วยเทคนิคการแยกส่วนประกอบแบบโชเลสกี้ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$ {}_{1\ 1} \quad (2) $$

โดย คือเมทริกซ์ที่ได้จากสมการที่ (1), $_1$ คือเมทริกซ์สามเหลี่ยมล่างที่ได้จากการแยกเมทริกซ์สหสัมพันธ์อัตโนมัติแบบโชเลสกี้ซึ่งมีขนาด แถวและ หลัก โดยที่ คือจำนวนชิ้นส่วนย่อยของดินเหนียว ในกรณีที่สมบัติของดินที่พิจารณามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) จะต้องแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-Correlation Matrix) แบบโชเลสกี้ด้วยเช่นกัน โดยเมทริกซ์สหสัมพันธ์ไขว้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3) และแยกส่วนประกอบแบบโชเลสกี้ได้ดังสมการที่ (4)

ตารางที่ 2 สมบัติของชั้นดินต่าง ๆ

สมบัติ	ชั้นดิน			
	TS	Clay	BS	DS
แบบจำลอง	MC	SS	MC	LE
γ (kN/m^3)	19.52	16.72	19.52	20
$'$ (kPa)	21,840	-	77,653	10^{14}
ν' (-)	0.3	-	0.3	0
$'$ (kPa)	1	39	1	-
ϕ' (deg.)	30	23	40	-
$_0$ (-)	0.676	แสดงในรูป	0.676	0.5
$_c$ (-)	-	แสดงในรูป	-	-
$_s$ (-)	-	0.1 เท่าของ Cc	-	-
ν_{ur} (-)	-	0.2	-	-
OCR (-)	-	1	-	-
(m/day)	0.14515	0.001	0.14515	0.14515

$$ = \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \quad (3) $$

$$ = {}_{2\ 2} \quad (4) $$

โดย ρ คือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน, $_2$ คือเมทริกซ์สามเหลี่ยมล่างที่ได้จากการแยกเมทริกซ์สหสัมพันธ์ มีขนาด แถวและ หลัก โดยที่ คือจำนวนสมบัติทั้งหมดที่สุ่ม (เท่ากับสองในการศึกษานี้) จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินมีค่าเท่ากับ 0.476

2.2.3 การคำนวณสมบัติดิน

สำหรับขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยสุ่มค่าจำนวนจริงที่มีการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ให้มีค่าเท่ากับจำนวนชิ้นส่วนย่อย ๆ ของชั้นดินเหนียวคูนจำนวนตัวแปรที่ต้องการสุ่ม เรียกเมทริกซ์นี้ว่าเมทริกซ์ β จากนั้นคำนวณสนามสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Random Field) ด้วยสมการที่ (5)

$$ = {}_1\beta \quad (5) $$

โดยเมทริกซ์ มีขนาด 1,512 แถว และ 2 หลัก ในกรณีที่สมบัติดินที่พิจารณามีมากกว่า 1 สมบัติ สนามสุ่มสหสัมพันธ์ไขว้ที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Cross-correlated Normal Random Field) สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (6)

$$ = {}_2 \quad (6) $$

โดยเมทริกซ์ มีขนาด 1,512 แถว และ 2 หลัก เนื่องจากสมบัติดินที่พิจารณาควรจะมีค่าเป็นบวก สนามสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติจากสมการที่ (6) จะถูกแปลงเป็นสนามสุ่มที่มีการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution) เพื่อหลีกเลี่ยงการสุ่มค่าสมบัติของดินที่เป็นลบ [18, 20] โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยของสมบัติดินที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 เป็นพารามิเตอร์ควบคุมความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินที่พิจารณา จากนั้นกำหนดสมบัติของดินเหนียวแบบสุ่มที่คำนวณแล้วใน

ตารางที่ 3 ตัวแปรทางสถิติของสมบัติของดินเหนียว

ตัวแปรทางสถิติของสมบัติของดินเหนียว	
δ_x (m)	10.21
δ_y (m)	4.56
(%)	14.66
μ	0.735

โปรแกรม PLAXIS 2D และวิเคราะห์การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำทำซ้ำจนกระทั่งค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่สนใจลู่เข้าค่าคงที่ [17, 21-22] ซึ่งในงานนี้ค่าที่สนใจคือค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งตรวจวัด ตัวอย่างสนามสุ่มในโปรแกรม PLAXIS 2D ของค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4 และ 5

2.3 การประเมินการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะ

วิธีอาซาโอกะเป็นวิธีการประเมินการทรุดตัวสุดท้ายด้วยข้อมูลการทรุดตัวในสนามซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ โดยการประเมินการทรุดสุดท้ายด้วยวิธีอาซาโอกะสามารถทำได้โดยการเลือกข้อมูลการทรุดตัวจากน้ำหนักกดทับสุดท้าย จากนั้นวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นโดยกำหนดให้ข้อมูลตามแกน เป็นค่าการทรุดตัวที่เวลา และแกน เป็นค่าการทรุดตัวที่เวลา $+1$ และคำนวณจุดตัดของเส้นตรงกับเส้นตรง 45 องศา จากนั้นนำผลการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากวิธีที่แสดงในหัวข้อที่ 2.1–2.3 มาเปรียบเทียบและอภิปรายผล

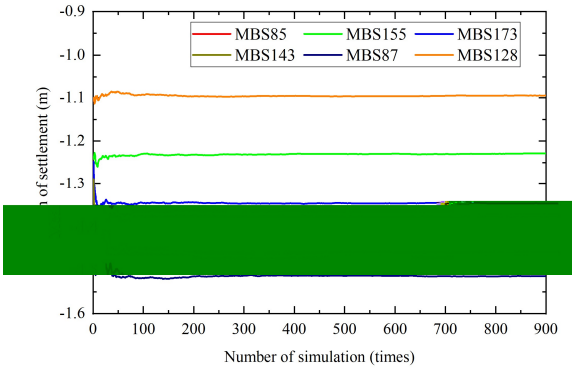
3. การวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการทรุดตัวและจำนวนรอบของการวิเคราะห์ที่เหมาะสม

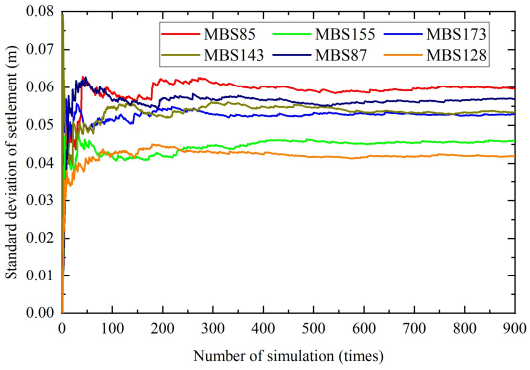
ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่ม การเลือกจำนวนรอบของการวิเคราะห์ที่เหมาะสมเป็นเรื่องจำเป็นอย่างมาก ถ้าหากจำนวนรอบของการวิเคราะห์มีจำนวนมากจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์อย่างมาก ในขณะเดียวกันถ้าจำนวนรอบของการวิเคราะห์มีจำนวนน้อย การวิเคราะห์ผลทางสถิติจะมีความน่าเชื่อถือต่ำ รูปที่ 6 และ 7 แสดงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งที่พิจารณา โดยในการศึกษานี้ จุดที่พิจารณาการทรุดตัวคือจุดที่มีผลตรวจวัดการทรุดตัวในสนามดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 6 จุด ค่าที่ลู่เข้าด้วยจำนวนรอบของการจำลองสูงที่สุดคือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการทรุดตัวที่จำนวน 750 รอบขึ้นไป ซึ่งมากเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติน่าเชื่อถือ และในการศึกษานี้ใช้รอบของการจำลอง 900 รอบ จึงมั่นใจได้ว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติมีความน่าเชื่อถือ

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงกำหนด , วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่มและวิธีของอาซาโอกะ

ผลการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาค่าการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะแสดงอยู่ในรูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่กล่าวในส่วนที่ 2 แสดงอยู่ในรูปที่ 9 โดยที่การศึกษานี้ใช้ค่าการทรุดตัว



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยของค่าการทรุดตัวเทียบกับจำนวนรอบของการจำลอง

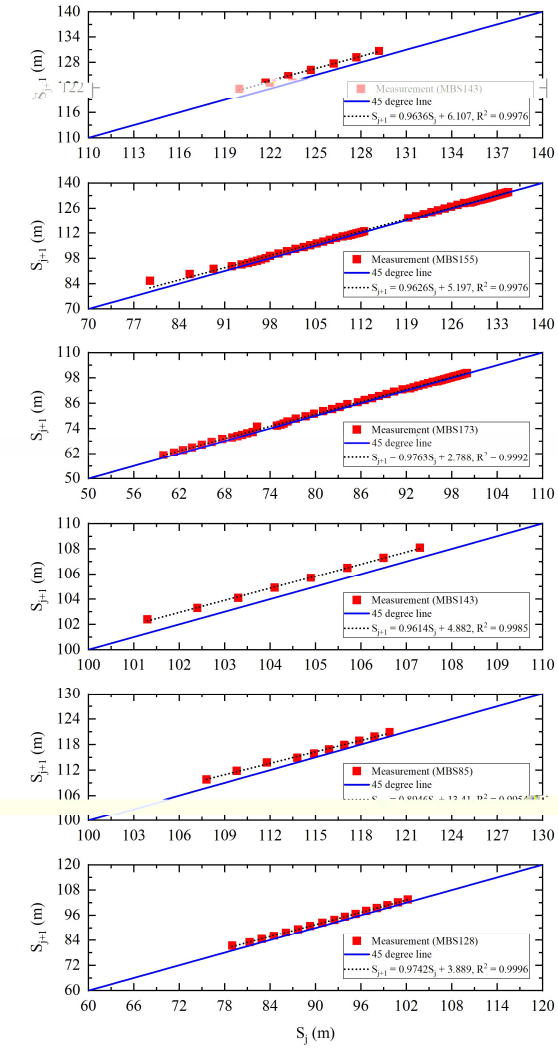


รูปที่ 7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการทรุดตัวเทียบจำนวนรอบของการจำลอง

สุดท้ายที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ DFEM และ SFEM อยู่ในช่วง −0.733 ถึง −1.586 เมตร และ −0.64 ถึง −1.74 เมตร ตามลำดับ โดยที่การทรุดตัวที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งเกิดจากน้ำหนักกดทับที่ไม่เท่ากันและลักษณะชั้นดินที่ต่างกัน จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสุดท้ายพบว่าค่าการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบ DFEM ทั้ง 3 กรณี แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของอาซาโอกะมีค่าใกล้เคียงช่วงการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ SFEM โดยที่มีค่าการทรุดตัวสุดท้ายเป็นจำนวน 2 ตำแหน่งที่มีค่าอยู่ในช่วงผลจากการวิเคราะห์แบบ SFEM ถึงแม้ว่าจะมีค่าการทรุดตัวสุดท้ายเป็นจำนวน 4 ตำแหน่งที่มีค่าที่ไม่อยู่ช่วงของผลการวิเคราะห์แบบ SFEM

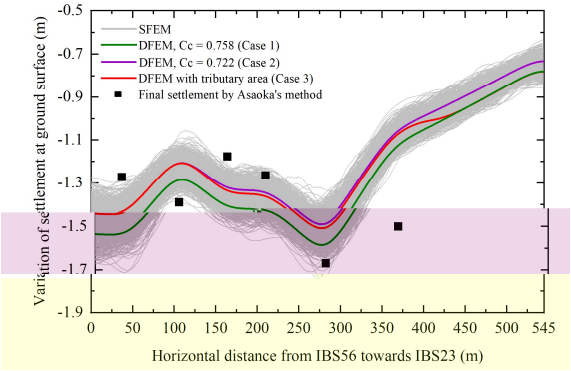
ตารางที่ 4 โอกาสการเกิดค่าการทรุดตัวสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด

โอกาสการเกิดการทรุดตัวสูงกว่าวิธีเชิงกำหนด (%)	
MBS85	12.67
MBS155	10.44
MBS173	13.33
MBS143	12.78
MBS87	11.78
MBS128	11.67



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยตามวิธีของอาซาโอกะ

เกิดจากน้ำหนักกดทับที่ไม่เท่ากันและลักษณะชั้นดินที่ต่างกัน จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสุดท้ายพบว่าค่าการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีของอาซาโอกะไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบ DFEM ทั้ง 3 กรณี แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของอาซาโอกะมีค่าใกล้เคียงช่วงการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ SFEM โดยที่มีค่าการทรุดตัวสุดท้ายเป็นจำนวน 2 ตำแหน่งที่มีค่าอยู่ในช่วงผลจากการวิเคราะห์แบบ SFEM ถึงแม้ว่าจะมีค่าการทรุดตัวสุดท้ายเป็นจำนวน 4 ตำแหน่งที่มีค่าที่ไม่อยู่ช่วงของผลการวิเคราะห์แบบ SFEM แต่ยังมีความใกล้เคียงกับผลการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากวิธีของอาซาโอกะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ DFEM ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในความเป็นจริงชั้นดินอาจมีการแปรปรวนในบริเวณที่ไม่มีข้อมูลหลุมเจาะ จากการเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างการวิเคราะห์แบบ DFEM และ SFEM พบว่าโอกาสที่การทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ SFEM สูงกว่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ DFEM ประมาณ 12.51% โดย



รูปที่ 9 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากการวิเคราะห์เชิงกำหนด, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสุ่มและวิธีของอาซาโอกะ

รายละเอียดของโอกาสที่วิธี DFEM ในกรณีที่ 1 ซึ่งกำหนดค่าดัชนีการอัดตัวและค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินตามหลุมเจาะที่มีค่าดัชนีการอัดตัวสูงที่สุด จะประเมินค่าการทรุดตัวสุดท้ายได้ต่ำกว่าความเป็นจริงของแต่ละจุดตรวจวัดถูกสรุปไว้ดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติของดินมีผลต่อการวิเคราะห์การทรุดตัวอย่างมากและควรที่จะนำมาพิจารณา นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 9 ว่าการทรุดตัวของแต่จุดมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ควรพิจารณาถึงการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของดินด้วย เนื่องจากการทรุดตัวที่สูงอาจไม่ใช่สิ่งที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารมากที่สุดแต่อาจเป็นการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของดิน

4. บทสรุป

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด (DFEM) และแบบสุ่ม (SFEM) อีกทั้งยังนำวิธีของอาซาโอกะมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียว โดยอาศัยข้อมูลหลุมเจาะที่มีอยู่อย่างจำกัดจำนวนทั้งหมด 3 หลุม โดยทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบจะลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาให้ชั้นดินเหนียวมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งไม่พิจารณาความแปรปรวนในสมบัติดิน แต่อย่างไรก็ตาม ในธรรมชาติ ดินมีความแปรปวนเชิงพื้นที่จากหลายแหล่ง ในการศึกษานี้จึงประยุกต์ใช้วิธี SFEM ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียว เพื่อให้การวิเคราะห์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำจากดินเหนียวมีความเสมือนจริงมากขึ้น จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์แบบ SFEM ให้ผลลัพธ์ที่ครอบคลุมการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากวิธีของอาซาโอกะมากกว่าการวิเคราะห์แบบ DFEM ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์การทรุดตัวสุดท้ายควรพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของสมบัติดินร่วมด้วย เพื่อให้การประเมินการทรุดตัวสุดท้ายมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
2. แม้ว่าการวิเคราะห์การทรุดตัวสุดท้ายแบบ SFEM จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากวิธีของอาซาโอกะมากกว่าการวิเคราะห์แบบ DFEM แต่การทรุดตัวสุดท้ายของดินอาจไม่ใช่สิ่งที่ก่อ

ความเสียหายให้แก่โครงสร้างมากที่สุดแต่อาจเป็นการทรุดตัวที่เกิดไม่เท่ากันของดินในแต่ละบริเวณ ดังนั้นการศึกษาในอนาคตควรคำนึงถึงการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันร่วมด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนเพชรโยธาปีการศึกษา 2565 และ ทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2566 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

[1] Shi, C. and Wang, Y. (2022). Assessment of reclamation-induced consolidation settlement considering stratigraphic uncertainty and spatial variability of soil properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 59, pp. 1215-1230.

[2] Park, S.W. and Hong, S.H. (2021). Nonlinear modeling of subsidence from a decade of InSAR time series. *Geophysical Research Letters*, 48, pp. e2020GL090970.

[3] Duncan, J.M. (1993). Limitations of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of geotechnical engineering*, 119, pp. 1333-1359.

[4] Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp. 612-624.

[5] Houmadi, Y., Cherif Benmoussa, M.Y., Cherifi, W.N.E.H. and Rahal, D.D. (2020). Probabilistic analysis of consolidation problems using subset simulation. *Computers and Geotechnics*, 124, pp. 103612.

[6] Bari, M.W., Shahin, M.A. and Nikraz, H.R. (2013). Probabilistic analysis of soil consolidation via prefabricated vertical drains. *International Journal of Geomechanics*, 13, pp. 877-881.

[7] Chong, S.H. (2017). Stochastic investigation of consolidation process in spatially correlated heterogeneous soils. *Applied Sciences*, 7, pp. 949.

[8] Bari, W., Shahin, M.A. and Nikraz, H.R. (2012). Probabilistic study into the impact of soil spatial variability on soil consolidation by prefabricated vertical drains. *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM12)*, Seoul, Korea, 26-30 August 2012, pp. 2773-2784.

[9] Cheng, Y., Zhang, L., Zuo, Z. and Wang, J. (2012). Influence of spatial variability on consolidation of unsaturated soils. *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM12)*, Seoul, Korea, 26-30 August 2012, pp. 1530-1542.

[10] Bari, M.W. and Shahin, M.A. (2014). Probabilistic design of ground improvement by vertical drains for soil of spatially variable coefficient of consolidation. *Geotextiles and Geomembranes*, 42, pp. 1-14.

[11] Bong, T. and Stuedlein, A.W. (2018). Efficient methodology for probabilistic analysis of consolidation considering spatial variability. *Engineering Geology*, 237, pp. 53-63.

[12] Tian, H. and Wang, Y. (2023). Data-driven and physics-informed Bayesian learning of spatiotemporally varying consolidation settlement from sparse site investigation and settlement monitoring data. *Computers and Geotechnics*, 157, pp. 105328.

[13] Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, 18, pp. 87-101.

[14] Huang, J. and Griffiths, D. V. (2015). Determining an appropriate finite element size for modelling the strength of undrained random soils. *Computers and Geotechnics*, 69, pp. 506-513.

[15] Elkateb, T., Chalaturnyk, R. and Robertson, P.K. (2003). An overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 1-15.

[16] Onyejekwe, S., Kang, X. and Ge, L. (2016). Evaluation of the scale of fluctuation of geotechnical parameters by autocorrelation function and semivariogram function. *Engineering Geology*, 214, pp. 43-49.

[17] Qu, C. X., Wang, G., Feng, K.W. and Xia, Z.D. (2021). Large deformation analysis of slope failure using material point method with cross-correlated random fields. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 22, pp. 856-869.

[18] Deng, Z.P., Pan, M., Niu, J.T. and Jiang, S.H. (2022). Full probability design of soil slopes considering both stratigraphic uncertainty and spatial variability of soil properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, pp. 195.

[19] Yang, Z., Nie, J., Peng, X., Tang, D. and Li, X. (2021). Effect of random field element size on reliability and risk assessment of soil slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, pp. 7423-7439.

[20] Nguyen, T.S., Ngamcharoen, K. and Likitlersuang, S. (2023). Statistical characterisation of the geotechnical properties of

Bangkok subsoil. *Geotechnical and Geological Engineering*, (In press).

[21] Wang, F., Huang, H., Yin, Z. and Huang, Q. (2022). Probabilistic characteristics analysis for the time-dependent deformation of clay soils due to spatial variability. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26, pp. 6096-6114.

[22] Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P. and Bacconnet, C. (2018). Probabilistic stability analysis of an earth dam by stochastic finite element method based on field data. *Computers and Geotechnics*, 101, pp. 34-47.