การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความน่าจะเป็นของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที โดยพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน

Probabilistic performance analysis of TDM column-supported embankments considering soil spatial variability

ภัทรธร โพธิ์เจริญ[1] ชนา พุทธนานนท์[2,*] และ พรเกษม จงประดิษฐ์[3]

[1,2,3] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร*
**Corresponding author; E-mail address: chana.phu@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่คำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของทั้งดินโดยรอบและวัสดุดินซีเมนต์ในการประเมินสมรรถนะของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที (TDM) โดยประยุกต์ใช้การจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นด้วยวิธี Adaptive Kriging Monte Carlo Simulation (AK-MCS) ผลการศึกษาพบว่าการพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดินและวัสดุดินซีเมนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการประเมินความน่าจะเป็นในการวิบัติของระบบคันทาง แม้ว่าผลการวิเคราะห์เชิงกำหนดจะบ่งชี้ว่าทั้งคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ (DCM) และเสาเข็ม TDM อยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยในด้านการเสียรูปตามที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นได้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าคันทางทั้งสองระบบมีความน่าจะเป็นในการวิบัติ (เกินเกณฑ์ที่กำหนด) ที่สูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการทรุดตัวสูงสุด โดยที่เสาเข็ม DCM มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการควบคุมความน่าจะเป็นในการวิบัติในด้านการทรุดตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวด้านข้าง ในขณะที่เสาเข็ม TDM มีประสิทธิภาพเหนือกว่าในการลดความน่าจะเป็นในการวิบัติในด้านการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบ การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในการวิบัติที่คำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่สำหรับการออกแบบและประเมินสมรรถนะของคันทางบนดินเหนียวอ่อนอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที, คันทางรองรับด้วยเสาเข็ม, การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น, ความแปรปรวนเชิงพื้นที่

Abstract

This study presents a numerical analysis method that considers the spatial variation of both surrounding soil and soil-cement materials in evaluating the performance of embankments supported by T-shaped deep cement mixing columns (TDM). The approach applies spatial variability simulation combined with probabilistic analysis using the Adaptive Kriging Monte Carlo Simulation (AK-MCS) method. The study found that considering the spatial variability of soil and soil-cement materials significantly affects the probability assessment of embankment system failure. Although deterministic analysis results indicated that both embankments supported by deep cement mixing (DCM) and TDM columns meet the specified deformation safety criteria, probabilistic analysis clearly showed that both systems have high failure probabilities (exceeding specified criteria), especially regarding maximum settlement. DCM columns demonstrated better efficiency in controlling failure probability in terms of maximum settlement and lateral movement, while TDM columns were superior in reducing the failure probability related to differential settlement between columns and surrounding soil. This study highlights the importance of probabilistic failure analysis that considers spatial variability for efficient and safe design and performance evaluation of embankments on soft clay.

Keywords: T-shaped deep cement mixing column, Column-supported embankment, Probabilistic analysis, Spatial variability

1. คำนำ

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินอ่อนเพื่อรองรับทางถนนและทางรถไฟมักประสบปัญหาเรื่องการเคลื่อนตัวของระบบคันทาง (ทั้งการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้าง) ที่มากเกินไป และรวมถึงปัญหาด้านเสถียรภาพเนื่องจากชั้นดินอ่อนมีความสามารถในการรับแรงแบกทานที่ต่ำและการยุบตัวที่สูง ด้วยเหตุนี้ ก่อนที่จะทำการก่อสร้างระบบคันทางบนชั้นดินอ่อนจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังที่ได้กล่าวข้างต้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดความยาวเสาเข็ม) หรือเสาเข็ม Conventional Deep Cement Mixing (DCM) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ [1–3] อย่างไรก็ตาม การใช้เสาเข็ม DCM ในงานระบบคันทางยังคงมีปัญหาบางประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็ม DCM และดินโดยรอบ จากกรณีศึกษาที่ผ่านมา พบว่าภายใต้การรับน้ำหนักคันทาง การทรุดตัวของดินรอบเสาเข็ม มักจะมีค่ามากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ [4] ความแตกต่างของการทรุดตัวนี้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งที่อาจนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างที่อยู่ด้านบน เนื่องจากการทรุดตัวที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบสามารถก่อให้เกิดความเครียดเฉือนในโครงสร้างคันทางและพื้นผิวถนน ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าว การเสียรูปทรง และการวิบัติของโครงสร้าง การทรุดตัวที่แตกต่างกันยังอาจส่งผลให้เกิดการขัดขวางระบบระบายน้ำ เกิดการสะสม

ของน้ำบนพื้นผิวถนน ซึ่งเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยในการจราจร และเร่งให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากการกัดเซาะ

เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีหรือเสาเข็ม T-Shaped Deep Cement Mixing (TDM) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาดังที่ได้กล่าวข้างต้น เสาเข็ม TDM มีลักษณะเด่นคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนบนที่ใหญ่กว่าส่วนล่าง ทำให้รูปตัดขวางของเสาเข็มประเภทนี้มีลักษณะคล้ายตัวอักษร “T” จากผลการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามรวมถึงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็ม TDM (TDM Column-Supported Embankment, TCSE) สามารถลดการเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างดินโดยรอบและเสาเข็มเมื่อเทียบกับคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็ม DCM (DCM Column-Supported Embankment, DCSE) ที่มีปริมาตรเสาเข็มที่เท่ากัน [5, 6]

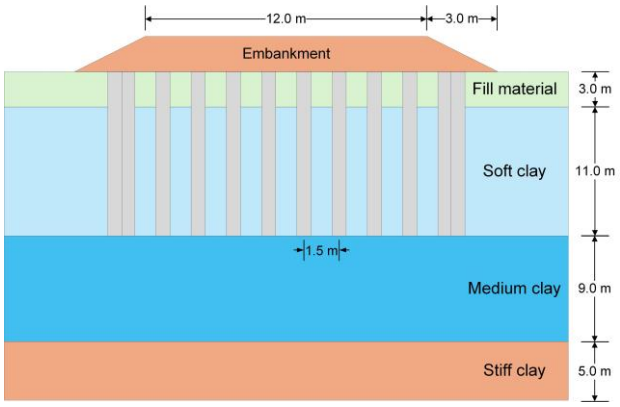
จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของเสาเข็ม TDM ในการประยุกต์ใช้สำหรับปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนเพื่อรองรับระบบคันทาง แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็ม TDM ยังคงตั้งอยู่บนสมมติฐานที่กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันในแต่ละวัสดุ (Homogeneous Material) ซึ่งในการประเมินสมรรถนะของระบบคันทางด้วยสมมติฐานนี้อาจนำไปสู่การคาดการณ์สมรรถนะที่ไม่ปลอดภัยมากนักเนื่องด้วยในภาคสนาม วัสดุธรรมชาติหรือในที่นี้คือดินมักแสดงความแปรปรวนเชิงพื้นที่เนื่องจากกระบวนการทางธรณีวิทยาตามธรรมชาติซึ่งส่งผลอย่างสำคัญโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของดิน เช่น กำลัง (Strength) และความแข็งแรง (Stiffness) จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่พิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ในธรรมชาติของดินอาจส่งผลให้เกิดการออกแบบโครงสร้างที่มีความปลอดภัยไม่เพียงพอหรือแข็งแรงมากเกินความจำเป็น [7–10]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์โดยคำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของทั้งสมบัติดินและเสาเข็มดินซีเมนต์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น โดยที่การวิเคราะห์ในลักษณะนี้สามารถให้ความเชื่อมั่นที่มากขึ้นในการประเมินสมรรถนะ (เชิงความปลอดภัย) ของระบบคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ แนวทางการประเมินสมรรถนะของระบบคันทางในลักษณะนี้สามารถนำไปสู่การออกแบบที่มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นสำหรับโครงการปรับปรุงคุณภาพดินขนาดใหญ่ ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่ก่อสร้างบนดินอ่อน

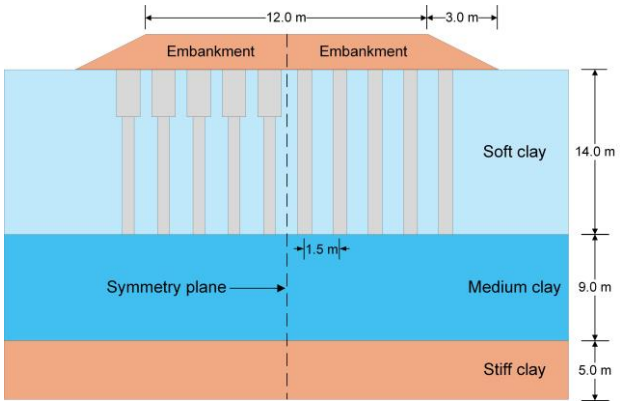
2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1 แบบจำลองอ้างอิงของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

กรณีศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้า [3] ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาอ้างอิงสำหรับการศึกษานี้ ซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 3117 (บางบ่อ-คลองด่าน) จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย โดยที่คันทางมีความสูง 1.5 เมตร ความกว้างที่ฐาน 18 เมตร และความลาดชัน 2:1 ซึ่งรองรับด้วยเสาเข็ม DCM ที่มีความยาว 14 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร เสาเข็มเหล่านี้ถูกจัดเรียงในรูปแบบตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.5 เมตร เพื่อลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินฐานราก เสาเข็ม DCM อีก 1 ต้น ถูกติดตั้งที่ใต้ลาดชันของคันทางแสดงดังรูปที่ 1(ก)

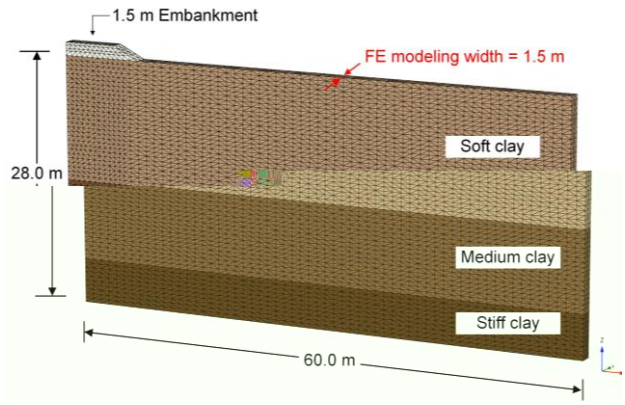


(ก) คันทางสำหรับกรณีศึกษาอ้างอิง



(ข) คันทางสำหรับการศึกษานี้

รูปที่ 1 ชั้นดินและลักษณะทางกายภาพของคันทาง



รูปที่ 2 โครงตาข่าย (Mesh) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ชั้นดินรองรับคันทางประกอบด้วยชั้นวัสดุดินถม (Fill Material) หนา 3 เมตร ทับอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) หนา 11 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) จากความลึก 14 ถึง 23 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) หนา 5 เมตรด้านล่าง เพื่อหลีกเลี่ยงพฤติกรรมที่ซับซ้อนเนื่องจากชั้นดินหลายชั้น ในการศึกษานี้ชั้นวัสดุดินถมด้านบนสุดจะถูกละเว้นและแทนที่ด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน เสาเข็ม DCM ใต้ลาดชันของคันทางจะถูกละเว้นเช่นกันเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักคันทางระหว่างเสาเข็ม TDM และ DCM ได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ตามที่ได้มีการนำเสนอไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [11]

เสาเข็ม TDM ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับการออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ส่วนหัว 1.0 เมตร และส่วนล่าง 0.5 เมตร ความยาวส่วนหัวที่ขยายใหญ่คิดเป็น 1.95 เมตร จากความยาวเสาเข็มทั้งหมด 14 เมตร โดยการออกแบบดังกล่าวอ้างอิงจากงานวิจัยของ Phutthananon et al. [12] ซึ่งได้ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างขนาดส่วนหัวและส่วนล่างของเสาเข็ม TDM ผ่านการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดสอบในห้องทดลอง

2.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขต

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D ในการจำลองพฤติกรรมของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิงจากการก่อสร้างในสนามแสดงดังตารางที่ 1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสมมาตรถูกเลือกใช้ในการศึกษานี้ โดยกำหนดให้แบบจำลองมีขนาด 28 เมตรในแนวดิ่ง 1.5 เมตรในแนวกว้าง (สอดคล้องกับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม) และ 60 เมตรในแนวยาวแสดงดังรูปที่ 2

จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 2 การเคลื่อนที่ในทิศทาง x ถูกยึดไว้บนระนาบแนวดิ่งทั้งสองระนาบ ได้แก่ ระนาบที่กึ่งกลางคันทาง (x = 0 เมตร) และระนาบที่ x = 60 เมตร สำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง y เนื่องจากมีระนาบสมมาตรที่ y = 0 และ 1.5 เมตร จึงกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่สำหรับทั้งสองระนาบนี้โดยที่ระนาบแนวดิ่งทั้งสี่ระนาบยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง การเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง (x, y, และ z) ถูกจำกัดสำหรับระนาบด้านล่าง ซึ่งอยู่ที่ z = -28 เมตร

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอน	คำอธิบาย	ระยะเวลา
0	จำลองความเค้นเริ่มต้น	-
1	ก่อสร้างเสาเข็ม DCM/TDM	0 วัน
2	ถมคันทางสูง 0.5 เมตร	10 วัน
3	ถมคันทางสูง 0.8 เมตร	40 วัน
4	ถมคันทางสูง 1.2 เมตร	70 วัน
5	ถมคันทางสูง 1.5 เมตร	105 วัน
6	130 วันหลังก่อสร้าง	235 วัน
7	การทรุดตัวคายน้ำที่ 90%	>10 ปี

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์

พารามิเตอร์	วัสดุคันทาง	ดินถม	ดินซีเมนต์
γ (kN/m^3)	20	20	15
E' (kPa)	20,000	30,000	21,000
ν' (-)	0.33	0.33	0.33
c' (kPa)	1	1	c = 150
ϕ' or ϕ (degree)	32	32	0
Tension cutoff (kPa)	-	-	51
k (m/day)	-	-	0.1 x 10^{-3}
$k_x = k_y$ (m/day)	-	-	0.2 x 10^{-3}

แรงดันน้ำเริ่มต้นก่อนการก่อสร้างคันทางถูกพิจารณาให้เป็นแบบ Hydrostatic โดยกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 1.5 เมตรใต้ผิวดิน มีเพียงขอบเขตที่ผิวดินเท่านั้นที่กำหนดให้น้ำสามารถระบายออกได้ เนื่องจากชั้นดินที่ระดับความลึกมากกว่า 28 เมตรมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาว่าน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ สำหรับการระบายน้ำในแนวราบผ่านระนาบแนวดิ่งที่ x = 0 เมตร x = 60 เมตร y = 0 เมตร และ y = 1.5 เมตร ถูกจำกัดให้ไม่สามารถซึมผ่านได้ เนื่องจากเป็นระนาบสมมาตร

2.3 พารามิเตอร์ของชั้นดินและวัสดุ

วัสดุคันทาง ชั้นดินถม และวัสดุดินซีเมนต์ถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) โดยมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2 ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.17 เท่า และ 70 เท่าของค่ากำลังการรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Unconfined Compressive Strength, q_u) ตามลำดับ ชั้นดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็งถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening Soil) โดยมีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Phutthananon et al. [13] ซึ่งได้ผ่านการสอบเทียบความถูกต้องกับผลการตรวจวัดในสนามจากกรณีศึกษาของ Jamsawang et al. [3]

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง

พารามิเตอร์	ดินเหนียวอ่อน	ดินเหนียวแข็งปานกลาง	ดินเหนียวแข็ง
γ (kN/m^3)	15	15	15
E_{50}^{ref} (kPa)	1,200	4,000	50,000
E_{oed}^{ref} (kPa)	1,200	4,000	50,000
E_{ur}^{ref} (kPa)	4,000	12,000	150,000
ν_{ur} (-)	0.35	0.35	0.2
m	1	1	1
c' (kPa)	2	10	18
ϕ' (degree)	22	22	25
R_f	1.1	1.5	2.2
k_x (m/day)	0.1 x 10^{-3}	0.05 x 10^{-3}	0.25 x 10^{-3}
$k_y = k_z$ (m/day)	0.2 x 10^{-3}	0.1 x 10^{-3}	0.25 x 10^{-3}

2.4 การจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของวัสดุ

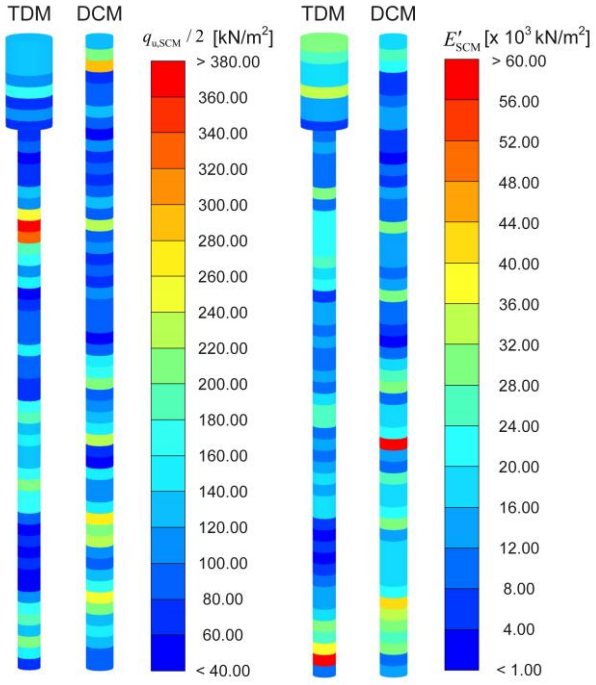
การศึกษานี้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีสนามสุ่ม (Random Field) ร่วมกับเทคนิคในการแยกส่วนประกอบแบบโชเลสกี้ (Cholesky Decomposition) ในการจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดินและวัสดุดินซีเมนต์

การจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของวัสดุดินซีเมนต์ในเสาเข็มถูกกำหนดให้พิจารณาเฉพาะในแนวดิ่ง โดยสมมติให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันในแนวราบเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่า ระยะสหสัมพันธ์ (Correlation Length) ในแนวดิ่งมีค่าน้อยกว่าแนวราบอย่างมีนัยสำคัญ [14] ซึ่งส่งผลให้สมบัติของวัสดุในแนวดิ่งมีความแปรปรวนมากกว่าใน

แนวราบ สมมติฐานนี้เพียงพอสำหรับการประเมินผลกระทบของความแปรปรวนเชิงพื้นที่ภายในเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น ในขณะที่ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดินธรรมชาติถูกพิจารณาทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะตามธรรมชาติของดินที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.4.1 การจำลองความแปรปรวนของวัสดุดินซีเมนต์

การจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของวัสดุดินซีเมนต์จะพิจารณาจากสองตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่ากำลังการรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ (q) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E) และค่า q ซึ่งสามารถนิยามได้เป็นพารามิเตอร์ R = E q ตามวิธีการที่ได้นำเสนอโดยงานวิจัยก่อนหน้า [13] โดยสามารถคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบประสิทธิผล (E') ที่ใช้สำหรับแบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์ได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 3 การกระจายตัวของ q และ E'

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

เอลิเมนต์ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกแบ่งออกเป็น 56 ส่วนย่อยตามแนวดิ่งในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Function) ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแต่ละส่วนย่อยจะพิจารณาเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ (2)

$$\rho(d_{ij}) = \left(-\frac{d_{ij}}{\theta}\right) \quad (2)$$

โดยที่ d_{ij} คือระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างจุดศูนย์กลางของส่วนย่อยที่ i และ j ในขณะที่ θ คือระยะสหสัมพันธ์ในแนวดิ่งของวัสดุดินซีเมนต์ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร ตามงานวิจัยที่ผ่านมา [13]

การแจกแจงของค่า q และ R ถูกพิจารณาเป็นแบบล็อกนอร์มัล (Lognormal Distribution) โดยมีค่าพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ย (mean, μ) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation,) เป็นตัวแปรสำคัญในการแจกแจงดังแสดงในตารางที่ 4 นอกจากนี้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง q และ R แสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างตัวแปรทั้งสอง จึงพิจารณาสุ่มค่าแบบอิสระต่อกัน [13] รูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่า q และ E ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น

วัสดุ	พารามิเตอร์	ค่าเชิงสถิติ
ดินซีเมนต์	$\mu - q$ * (kPa)	300
	$-q$ * (-)	0.5
	$\mu - R$ * (-)	80
	$-R$ * (-)	0.35
ดินเหนียวอ่อน	$\mu - s$ ** (kPa)	18.3
	$-s$ ** (-)	0.68
ดินเหนียวแข็งปานกลาง	$\mu - s$ ** (kPa)	41.1
	$-s$ ** (-)	0.43
ดินเหนียวแข็ง	$\mu - s$ ** (kPa)	108
	$-s$ ** (-)	0.54
ชั้นดินทั้งหมด	$\mu - R$ ** (-)	193
	$-R$ ** (-)	0.42

* R และ q นำไปใช้คำนวณค่า E ตามความสัมพันธ์ที่กำหนดในหัวข้อ 2.4.1 (R = E q) ก่อนจะนำไปแปลงเป็นค่า E'

** s และ R นำไปใช้คำนวณค่า E ตามความสัมพันธ์ที่กำหนดในหัวข้อ 2.4.2 (R = E $/s$) ในขณะที่ค่า c' คำนวณจาก s ตามสมการที่ (3)

2.4.2 การจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน

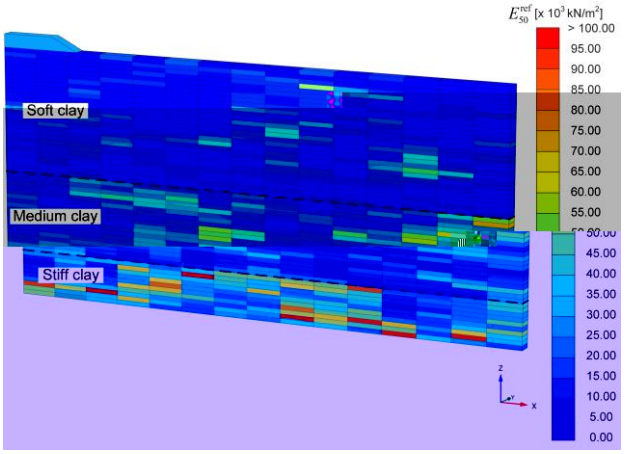
ดินถูกจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่โดยทำการสุ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s) และค่าอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสอ้างอิงของดิน (E) และ s (R = E $/s$) โดยที่ในแต่ละชั้นดินจะมีค่า μ ของ s ($\mu - s$) และ ของ s ($-s$) ที่แตกต่างกัน โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Nguyen et al. [15] ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่า s และ R ที่ได้จะถูกนำไปแปลงเป็นค่าพารามิเตอร์ E ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยอ้างอิงค่าเฉลี่ย ($\mu - R$) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของ R ($-R$) จากผลการทดสอบของดินกรุงเทพดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ในการศึกษานี้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ E และ E มีค่าเท่ากับ E และ E

ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า s ยังถูกใช้เป็นตัวกำหนดค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') ดังแสดงในรูปที่ 6 ตามสมการที่ (3) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [16]

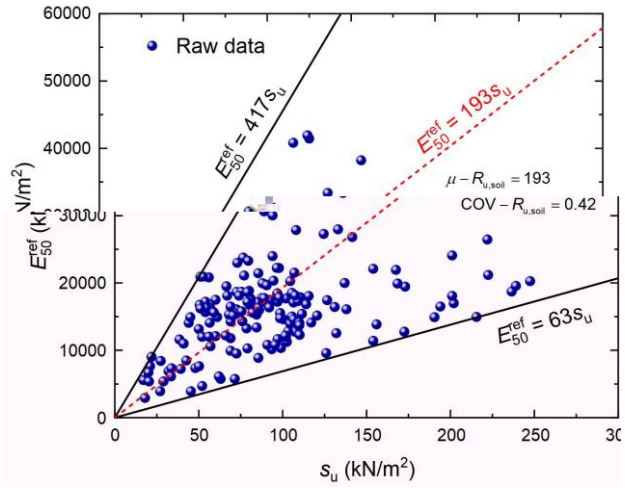
$$s = \phi' \left(c' \quad \phi' + \frac{\sigma'_v + k\,\sigma'_v}{} \right) \tag{3}$$

$$k = - \quad \phi' \tag{4}$$

กำหนดให้ σ'_v คือความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งโดย k สามารถคำนวนดังแสดงในสมการที่ (4) ซึ่งในการศึกษานี้จะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.625 สำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง สำหรับดินเหนียวแข็ง k มีค่าเท่ากับ 0.577 [16]



รูปที่ 4 การกระจายตัวของ E ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ s ของดินกรุงเทพ

สำหรับการจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของวัสดุดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ของดินจะถูกแบ่งออกเป็น 15 ส่วนในแนวนอนและ 56 ส่วนในแนวดิ่ง การเลือกขนาดของเอลิเมนต์ดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้สามารถจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดินได้อย่างเหมาะสม การแบ่งเอลิเมนต์ในลักษณะนี้ส่งผลให้ไฟไนต์เอลิเมนต์เมช (Finite Element Mesh) มีความละเอียดเท่า ๆ กันทั้งแบบจำลอง แม้ว่าบริเวณที่อยู่ห่างจากคันทางจะได้รับผลกระทบที่น้อยต่อพฤติกรรมโดยรวมของระบบคันทาง อย่างไรก็ตาม บริเวณที่อยู่ห่างจากคันทางได้ถูกจัดให้มีความละเอียดของไฟไนต์เอลิเมนต์เมชที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ภายใต้ข้อจำกัดของการจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่เพื่อลดภาระในการคำนวณ ทั้งนี้ความละเอียดของไฟไนต์เอลิเมนต์เมชที่เลือกใช้นี้ได้ผ่านการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองแล้วว่าให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดในสนาม ดังแสดงในหัวข้อ 3.1

ซึ่ง Autocorrelation Function ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแต่ละส่วนย่อยจะพิจารณาเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ (5)

$$\rho\,\tau = \left\{ -\sqrt{\left(\frac{\tau}{\theta}\right) + \left(\frac{\tau}{\theta}\right)} \right\} \tag{5}$$

โดย τ และ τ คือระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ส่วนย่อยของดินในแนวดิ่งและแนวนอนตามลำดับ ระยะสหสัมพันธ์ในแนวดิ่ง (θ) ถูกกำหนดให้มีระยะ 2 เมตร ในขณะที่ระยะสหสัมพันธ์ในแนวนอน (θ) มีระยะ 10 เมตร ตามข้อมูลเชิงสถิติของดินกรุงเทพ [15]

2.5 ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัดและการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในการวิบัติ

ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด (Limit State Function, LSF) ที่พิจารณาในการศึกษานี้ประกอบด้วย 3 สภาวะขีดจำกัดหลักตามเกณฑ์การใช้งาน ได้แก่

$$G = \delta \quad - \delta \tag{6}$$

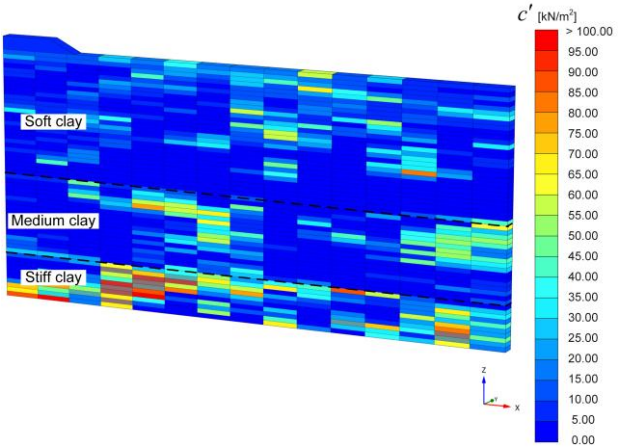
$$G = \delta \quad - \delta \tag{7}$$

$$G = \Delta\delta \quad - \Delta\delta \tag{8}$$

โดย δ δ และ $\Delta\delta$ คือค่าที่ยอมรับได้ของการทรุดตัวสูงสุด การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด และการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุดตามลำดับ δ δ และ $\Delta\delta$ คือค่าของตัวแปรที่เกิดขึ้นจริงในระบบคันทางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากการจำลองความแปรปรวนเชิงพื้นที่ส่งผลให้คุณสมบัติดินมีความผันแปรในแต่ละตำแหน่ง จึงไม่สามารถกำหนดจุดที่แน่นอนสำหรับการเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้ล่วงหน้า ดังนั้น การศึกษานี้ได้สร้างวิธีการค้นหาจุดที่มีการทรุดตัวที่มากที่สุดบริเวณผิวดินใต้คันทางสำหรับการวิเคราะห์ δ สำหรับ $\Delta\delta$ สามารถคำนวณได้จากค่าความต่างระหว่างการทรุดตัวน้อยที่สุดและมากที่สุดที่ระดับผิวดินในบริเวณใต้คันทาง ส่วนค่า δ พิจารณาจากค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ที่มากที่สุดบริเวณปลายคันทาง (x = 9 เมตร) สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้ δ δ และ $\Delta\delta$ มีค่าเท่ากับ 150, 45 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Phutthananon et al. [11, 13]

การพิจารณา LSF อาศัยหลักการดังต่อไปนี้ เมื่อฟังก์ชัน G มีค่ามากกว่าศูนย์ ($G >$) หมายถึงสภาวะมั่งคงหรือปลอดภัยของระบบคันทาง ในทางกลับกัน หากฟังก์ชัน G มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($G <$) จะถือว่าระบบคันทางอยู่ในสภาวะวิบัติหรือไม่ปลอดภัย

ในการประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Failure Probability หรือ Pf) วิธี Monte Carlo Simulation (MCS) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ โดยสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนตัวอย่างที่เกิดการวิบัติต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในการจำลอง สำหรับการศึกษานี้ Pf สำหรับแต่ละสภาวะขีดจำกัดสามารถประมาณได้จากสมการที่ (9)



รูปที่ 6 การกระจายตัวของ c' ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

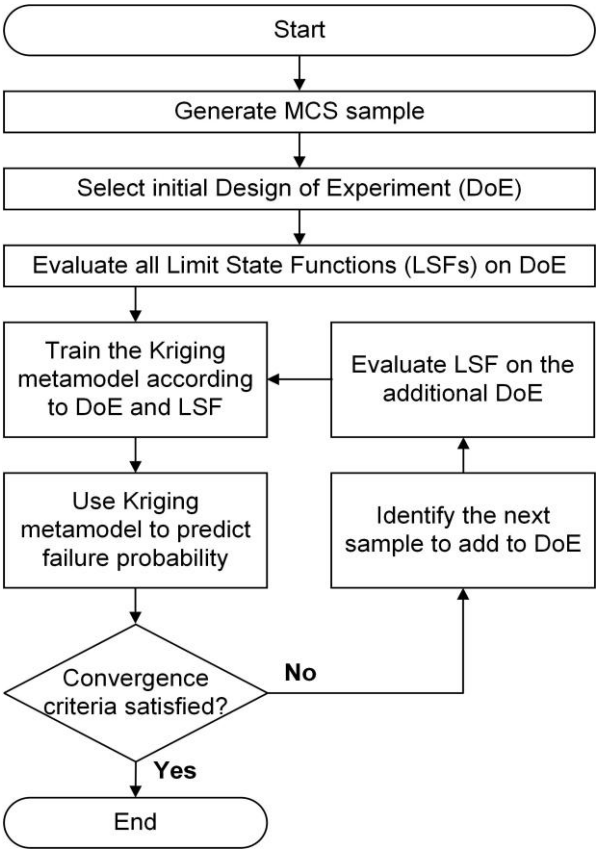
$$Pf_i = [G_i\ x\ <\ ] \tag{9}$$

โดยอ้างอิงจาก LSF ที่แสดงในสมการที่ (6) - (8) ทำให้สามารถกำหนดความน่าจะเป็นของการวิบัติตามสภาวะขีดจำกัดต่าง ๆ ได้แก่ ความน่าจะเป็นในการวิบัติของการทรุดตัวสูงสุด (Pf) ความน่าจะเป็นในการวิบัติของการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด (Pf) และความน่าจะเป็นในการวิบัติของการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุด (Pf) มากไปกว่านั้น ความน่าจะเป็นในการวิบัติของทั้งระบบ (Probability Failure of System, Pf) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) ตามที่เสนอโดย Phutthananon et al. [13]

$$Pf = \left[\bigcup_{i=}^{N_{LS}}(G_i\ x\ <\ )\right] \tag{10}$$

โดย N_{LS} คือจำนวนของ LSF (3 ในการศึกษานี้) ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นที่อย่างน้อยหนึ่งฟังก์ชันจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือในการศึกษานี้ใช้วิธี Adaptive Kriging Monte Carlo Simulation (AK-MCS) ซึ่งเป็นเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือที่มีประสิทธิภาพสูง โดยประยุกต์การผสมผสานระหว่างเมตาโมเดล Kriging กับวิธี MCS เพื่อประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 7 วิธีดังกล่าวสามารถลดภาระการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิธีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องประเมิน LSF สำหรับทุกตัวอย่างในประชากรของ MCS (MCS sample, n) ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการของวิธี AK-MCS เริ่มต้นด้วยการสร้าง n ในจำนวนที่มากและสร้างเมตาโมเดล Kriging เบื้องต้นจากการประเมิน LSF ของประชากรกลุ่มแรกจำนวนนึง (Design of Experiment Sample, n) จากนั้นจึงปรับปรุงเมตาโมเดลอย่างเป็นระบบโดยเพิ่มเติมตัวอย่างที่มีความไม่แน่นอนสูงและอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับขอบเขตสภาวะขีดจำกัด กระบวนการดังกล่าวดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นของการวิบัติเป็นไปตามเกณฑ์การลู่เข้าที่กำหนดไว้ในสมการที่ (11)



รูปที่ 7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี AK-MCS

$$\frac{Pf^{+} - Pf^{-}}{Pf} \leq \tag{11}$$

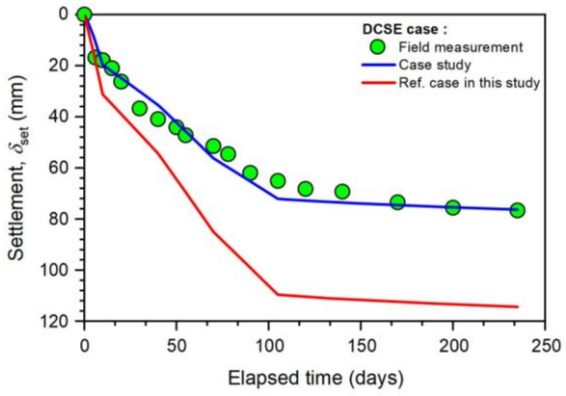
โดย Pf คือค่าประมาณค่าเฉลี่ยจากเมตาโมเดล Kriging ส่วน Pf^{+} และ Pf^{-} คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างของความน่าจะเป็นของการวิบัติ

3. ผลการวิเคราะห์

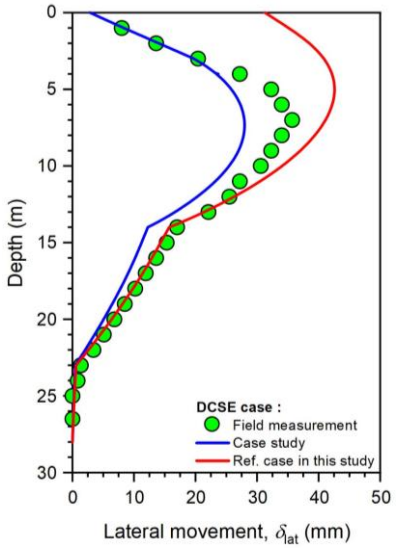
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกดำเนินการโดยเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ทำการตรวจวัดในสนามกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทรุดตัวในสนามได้ถูกวัดที่กึ่งกลางคันทางและการเคลื่อนตัวด้านข้างถูกตรวจวัดที่ระยะ 12 เมตรจากกึ่งกลางคันทาง

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการตรวจวัดในสนามและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ DCSE ในกรณีศึกษาจริง (Case Study) แสดงดังรูปที่ 8 จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของการศึกษานี้พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนามเป็นอย่างดีในด้านการทรุดตัวที่กึ่งกลางคันทาง (รูปที่ 8(ก)) และการเคลื่อนตัวด้านข้าง (รูปที่ 8(ข)) ผลลัพธ์ที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพฤติกรรมของดินและ



(ก) ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวที่กึ่งกลางคันทาง



(ข) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้าง

รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด

พารามิเตอร์ที่ใช้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป สำหรับการวิเคราะห์กรณีอ้างอิง (Reference Case) สำหรับการศึกษานี้ โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ชั้นดินตามกรณีอ้างอิงที่ปรับปรุงจากกรณีศึกษาจริง (ละเว้นวัสดุดินถมและเสาเข็มใต้ลาดชัน) ตามงานวิจัยของ Phutthananon et al. [11] สำหรับการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นโดยคำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของทั้งสมบัติดินและเสาเข็มดินซีเมนต์

3.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนดจะใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทั้งหมด (q , R , s และ R) โดยไม่พิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเปรียบเทียบสมรรถนะของ DCSE และ TCSE (กรณีอ้างอิง) จากผลการวิเคราะห์การใช้งานเสาเข็ม TDM มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในแง่ของการลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของระบบคันทาง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เสาเข็ม DCM สามารถแสดงสมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของการทรุดตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวด้านข้าง โดยผลลัพธ์ที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [17]

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงกำหนด

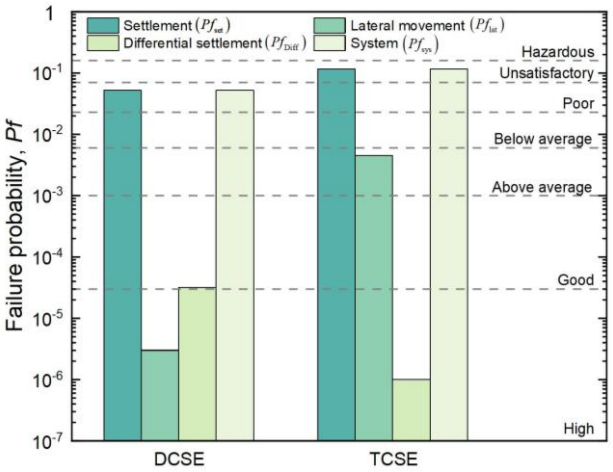
พฤติกรรมการเสียรูป	DCSE	TCSE	ค่าที่ยอมรับได้
การทรุดตัวสูงสุด (มม.)	96.17	99.08	150*
การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด (มม.)	18.83	23.99	45**
การทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุด (มม.)	9.70	7.35	30*

* Phutthananon et al. [11]; ** Phutthananon et al. [13]

3.3 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงความน่าจะเป็นในการวิบัติ

ผลการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความแตกต่างด้านสมรรถนะระหว่าง DCSE และ TCSE (กรณีอ้างอิง) โดยอ้างอิงเกณฑ์การประเมินสมรรถนะจาก U.S. Army Corps of Engineers [18] จากผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า สำหรับด้านการทรุดตัวสูงสุด คันทางประเภท DCSE มีค่า Pf เท่ากับ 0.0521 หรือมีสมรรถนะที่ “ต่ำ” (Poor) ในขณะที่คันทางประเภท TCSE มีค่า Pf เท่ากับ 0.116 สามารถจัดได้ว่ามีระดับสมรรถนะที่ไม่น่าพอใจ (Unsatisfactory) จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถบ่งชี้ให้เห็นได้ว่าการใช้เสาเข็ม DCM มีโอกาสการวิบัติที่ต่ำกว่าและมีระดับสมรรถนะที่ดีกว่า 1 ระดับ สำหรับการเคลื่อนตัวด้านข้าง คันทางประเภท DCSE แสดงสมรรถนะที่ดีเช่นกัน โดยที่คันทางประเภท DCSE มีค่า Pf เท่ากับ 3.00×10^{-6} ซึ่งมีระดับสมรรถนะที่ “สูง” (High) ในขณะที่คันทางประเภท TCSE มีค่า Pf เท่ากับ 4.51×10^{-3} ซึ่งมีระดับสมรรถนะที่สูงกว่ามาตรฐาน (Above average) ในด้านการทรุดตัวที่แตกต่างกันเสาเข็ม TDM สามารถแสดงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าอย่างชัดเจน โดยที่กรณีคันทางประเภท TCSE มีค่า Pf เท่ากับ 1×10^{-6} (มีสมรรถนะในระดับ “สูง”) และคันทางประเภท DCSE มีค่า Pf เท่ากับ 3.2×10^{-5} (มีสมรรถนะในระดับ “ดี”) ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงกำหนดเนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างของเสาเข็ม TDM ที่มีขนาดส่วนหัวที่ใหญ่ซึ่งส่งผลให้เกิดถ่ายแรงจากคันทางในสัดส่วนที่มากกว่าเสาเข็ม DCM ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการทรุดตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากกว่า ในขณะที่สามารถลดค่าความแตกต่างของการทรุดตัวระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบได้ดีกว่า ทั้งนี้การวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่ควบคุมการวิบัติของทั้งระบบนั้นเกิดจากพฤติกรรมการทรุดตัวสูงสุดของระบบคันทาง

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงกำหนดกับผลการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ผลการวิเคราะห์เชิงกำหนดบ่งชี้ว่าทั้งระบบ DCSE และ TCSE สามารถรองรับน้ำหนักคันทางได้โดยที่ค่าการทรุดตัวสูงสุด การเคลื่อนตัวด้านข้าง และการทรุดตัวที่แตกต่างกันในตารางที่ 5 มีค่าไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5 (อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของคุณสมบัติดินและวัสดุดินซีเมนต์ในการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในการวิบัติ กลับพบว่ามีโอกาสที่ระบบคันทางจะเกิดการวิบัติได้สูง (สมรรถนะถูกจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเสี่ยงในการวิบัติที่สูงมาก) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการทรุดตัวสูงสุด ซึ่งทั้ง DCSE และ TCSE มีสมรรถนะอยู่ในระดับที่ไม่น่าพอใจ



รูปที่ 9 ความน่าจะเป็นในการวิบัติของ DCSE และ TCSE

4. สรุป

การศึกษานี้ได้นำเสนอและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่คำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของทั้งสมบัติดินโดยรอบและวัสดุดินซีเมนต์ในการประเมินสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที (TCSE) เปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ (DCSE) โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านสมรรถนะระหว่าง DCSE และ TCSE โดย DCSE มีประสิทธิภาพดีกว่าในการควบคุมการทรุดตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวด้านข้าง ในขณะที่ TCSE มีประสิทธิภาพเหนือกว่าในการลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบ
2. แม้ว่าผลการวิเคราะห์เชิงกำหนดจะบ่งชี้ว่าเงื่อนไขขีดจำกัดการใช้งานนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือที่พิจารณาความแปรปรวนเชิงพื้นที่บ่งชี้ว่ามีโอกาสที่ระบบคันทางจะเกิดการวิบัติได้โดยเฉพาะด้านการทรุดตัวสูงสุด ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่น่าพอใจ แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเพียงค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์เชิงกำหนดอาจนำไปสู่การประเมินความปลอดภัยที่เกินจริง ดังนั้น การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของระบบในสภาพความเป็นจริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี ประจำปีงบประมาณ 2567 รอบ 1 ผ่านโครงการ “การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบความน่าจะเป็นของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีโดยคำนึงถึงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของดิน” นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติสำหรับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2568 (สัญญาเลขที่ N42A680226)

เอกสารอ้างอิง

[1] Yapage, N.N.S. and Liyanapathirana, D.S. (2014). A parametric study of geosynthetic-reinforced column-supported embankments. *Geosynthetics International*, 21, pp. 213–232.

[2] Chai, J.C., Shrestha, S., Hino, T., Ding, W.Q., Kamo, Y. and Carter, J. (2015). 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil–cement columns. *Computers and Geotechnics*, 68, pp. 28–37.

[3] Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit, N., Voottipruex, P. and Jongpradist, P. (2016). Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment. *Computers and Geotechnics*, 72, pp. 42–56.

[4] Bergado, D.T., Ruenkrairergsa, T., Taesiri, Y. and Balasubramaniam, A.S. (1999). Deep soil mixing used to reduce embankment settlement. *Ground Improvement*, 3, pp. 145–162.

[5] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D. and Baroth, J. (2020). Parametric analysis and optimization of T-shaped and conventional deep cement mixing column-supported embankments. *Computers and Geotechnics*, 122, pp. 103555.

[6] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Dias, D., Guo, X., Jamsawang, P. and Baroth, J. (2022). Reliability-based settlement analysis of embankments over soft soils reinforced with T-shaped deep cement mixing piles. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16, pp. 638–656.

[7] Wijerathna, M. and Liyanapathirana, D.S. (2019). Significance of spatial variability of deep cement mixed columns on reliability of column-supported embankments. *International Journal of Geomechanics*, 19, pp. 04019087.

[8] Wijerathna, M. and Liyanapathirana, D.S. (2018). Reliability-based performance of embankments improved with deep mixing considering spatial variability of material properties. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4, pp. 04018035.

[9] Al-Naqshabandy, M.S. and Larsson, S. (2013). Effect of uncertainties of improved soil shear strength on the reliability of embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, pp. 619–632.

[10] Coldwell, E., Khosravi, M., Zaregarizi, S., Perkins, S. and Montgomery, J. (2020). Stability analysis of an embankment supported by spatially variable soil-cement columns. *Geo-Congress 2020*, Minneapolis, Minnesota, USA, 25-28 February 2020, pp. 507–515.

[11] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D., Jamsawang, P. and Bergado, D.T. (2021). Performance-based design optimization of embankments resting on soft soil improved with T-shaped and conventional DCM columns. *Acta Geotechnica*, 16, pp. 3301–3326.

[12] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Yensri, P. and Jamsawang, P. (2018). Dependence of ultimate bearing capacity and

failure behavior of T-shaped deep cement mixing piles on enlarged cap shape and pile strength. *Computers and Geotechnics*, 97, pp. 27–41.

[13] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Kandavorawong, K., Dias, D., Guo, X. and Jamsawang, P. (2023). Reliability assessment for serviceability limit states of stiffened deep cement mixing column-supported embankments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 2402–2422.

[14] Al-Naqshabandy, M.S., Bergman, N. and Larsson, S. (2012). Strength variability in lime-cement columns based on cone penetration test data. *Ground Improvement*, 165, pp. 15–30.

[15] Nguyen, T.S., Ngamcharoen, K. and Likitlersuang, S. (2023). Statistical characterisation of the geotechnical properties of Bangkok subsoil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp. 2043–2063.

[16] Gouw, T.L. (2014). Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9, pp. 8291–8311.

[17] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Dias, D. and Jamsawang, P. (2021). Numerical study of the deformation performance and failure mechanisms of TDM pile-supported embankments. *Transportation Geotechnics*, 30, pp. 100623.

[18] USACE (U.S. Army Corps of Engineers) (1995). *Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering*, Technical letter No. 1110-2-547, Department of the Army, Washington, DC 20314-1000, USA.