

การศึกษาผลกระทบจากความแปรปรวนของคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีผลต่อราคาของกำแพงกันดินประเภทเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever

สำหรับงานถมดินโครงการบ้านจัดสรร

Study of the Impact of Variability in Soft Bangkok Clay Properties on the Cost of Pile and Plank Cantilever Retaining Walls for Soil Filling in Housing Development Projects

สิทธิชัย แสงย่อย^{1*} สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์²

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

² อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

*Corresponding author; E-mail: sittichai.sang@ku.th

บทคัดย่อ

ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯทำให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์ความมั่นคงของกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever สำหรับโครงการบ้านจัดสรร ในการศึกษาครั้งนี้ทฤษฎีความน่าจะเป็นถูกใช้ในการประเมินผลของความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดิน ค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินคำนวณในรูปแบบของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน (P_f) คำนวณด้วยวิธี Monte Carlo Simulation (MCS) ผลการศึกษาพบว่ากำแพงกันดินที่มีความสูงดินถม 2 เมตร ค่า S_u ชั้น Soft Clay เท่ากับ 1.25 t/m^2 มีผลต่อความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) และราคาค่าก่อสร้างกำแพงกันดินสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงดินถม 0.5-1.5 เมตร ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (S_u) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นภายใต้ค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ นำไปสู่การวิเคราะห์เปรียบเทียบหาราคาค่าก่อสร้างที่เหมาะสมสำหรับกำแพงกันดินชนิดนี้

คำสำคัญ: กำแพงกันดินแบบ Cantilever, การถมดินของบ้านจัดสรร, เสถียรภาพของกำแพงกันดิน, ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ, ราคา

Abstract

Uncertainty in the properties of Soft Bangkok Clay creates problems in analyzing the stability of pile and plank cantilever retaining walls for housing projects. This study uses probability theory to evaluate the effect of the uncertainty of soft clay properties on the stability of the retaining wall. The stability of the retaining wall is calculated in terms of the factor of safety

(FS), and the probability of failure of the retaining wall (P_f) is calculated using Monte Carlo Simulation (MCS). The results show that the retaining wall's stability is affected by the soil's properties, especially with a height of 2 meters. The S_u value of the soft clay layer is 1.25 t/m^2 , affecting the probability of failure (P_f) and the construction cost of a retaining wall, especially when compared to heights of 0.5 to 1.5 meters. The variables important in the probabilistic analysis of the stability of retaining walls include the shear strength of clay (S_u), a variable used in the design of retaining walls with a probability within an acceptable value. The results obtained from this analysis lead to a comparative analysis to find the appropriate construction cost for this type of retaining wall.

Keywords: Cantilever Wall, Soil Filling in Housing Development, Stability of Retaining Walls, Probability of Failure, Cost

1. คำนำ

โครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรต่างๆ มักมีการถมดินเพื่อปรับระดับพื้นที่ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยจะต้องสร้างกำแพงกันดินบริเวณแนวเขตที่ดินซึ่งกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากในประเทศไทย เนื่องจากก่อสร้างได้ง่ายสะดวก รวดเร็ว และช่วยลดปัญหาเรื่องข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ ทั้งพื้นที่ภายในโครงการและพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Bangkok Clay) ข้อมูลคุณสมบัติดินที่ใช้จึงถือเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันดิน และพบว่าในการออกแบบกำแพงกันดินจะมีการกำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าสูงและดูเหมาะสม แต่ก็ยังพบว่ากำแพงกันดินบางส่วนเกิดการเคลื่อนตัวและการพิบัติ หนึ่งในสาเหตุหลักของการพิบัติที่น่าสนใจคือความถูกต้องของคุณสมบัติดินที่ใช้

ในการวิเคราะห์และออกแบบ เนื่องจากดินเป็นวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งส่งผลให้ค่าคุณสมบัติดินต่างๆ มีความไม่แน่นอน [1] นอกจากนี้ความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสมเพียงพอ ดังนั้นในการวิเคราะห์ออกแบบกำแพงกันดินจึงควรคำนึงถึงความไม่แน่นอนของคุณสมบัติดินในขั้นตอนการคำนวณด้วย

ในทางปฏิบัติวิศวกรจัดการกับความไม่แน่นอนนี้โดยการกำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงเพื่อชดเชยกับความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงเกินไปอาจทำให้ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้อัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำเกินไปอาจนำไปสู่การพิบัติของกำแพงกันดิน การนำทฤษฎีความน่าจะเป็นมาใช้ในการวิเคราะห์ (Probabilistic analysis) เป็นวิธีการที่นำข้อมูลทางสถิติอย่างมีระบบเข้ามามีส่วนร่วม โดยการจำลองความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินด้วย Probability density function ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรปรวน (Coefficient of variation; COV) ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์ของเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของความน่าจะเป็นของการพิบัติ (Probability of failure) [2]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบจากความแปรปรวนของคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนสำหรับบ้านจัดสรรโดยใช้ Probabilistic analysis เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินที่จะใช้ในการคำนวณโดยอาศัย

วิธีการของ Monte Carlo simulation (MCS) ทั้งนี้การออกแบบจะใช้ค่า Probability of failure เพิ่มเติมแทนที่จะเป็น Factor of safety อย่างเดียว ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการออกแบบกำแพงกันดิน โดยความน่าจะเป็นภายใต้ค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะนำไปสู่การเปรียบเทียบหาราคาค่าก่อสร้างที่เหมาะสมสำหรับกำแพงกันดินชนิดนี้

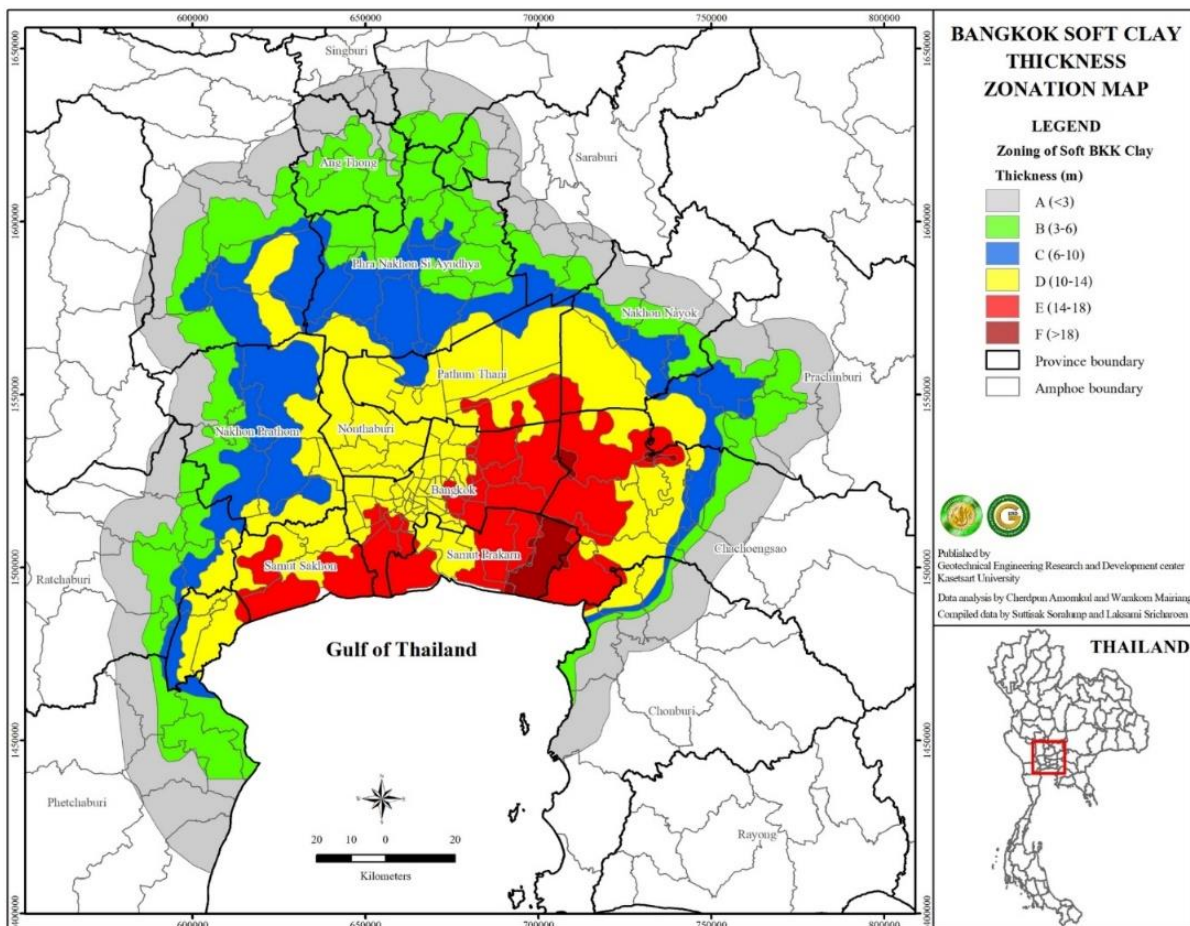
2. ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผนที่ดินเหนียวอ่อนทางวิศวกรรม

[3] ศึกษาและจำแนกพื้นที่ดินอ่อนในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลโดยแบ่ง Zone ต่างๆ ที่มีลักษณะพฤติกรรมของดินที่เหมือนกันให้อยู่ในพื้นที่เดียวกัน ผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 6 Zone ประกอบด้วย Zone A ถึง F โดยที่แต่ละ Zone มีความลึก คุณสมบัติดิน และพฤติกรรมต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 1

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น

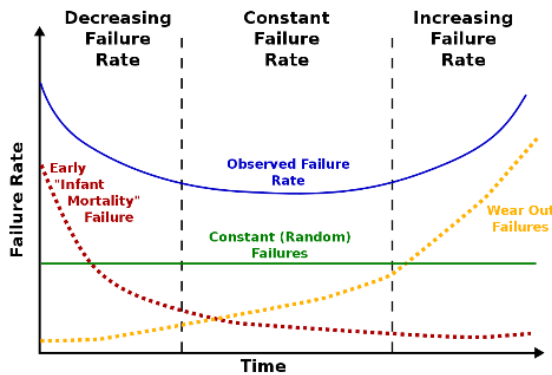
การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น คือวิธีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการพิบัติ (Probability of failure) ของกำแพงกันดินโดยประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านสถิติ โดยสามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ FS หรือการหาจากค่าการกระจายตัวของค่าเหล่านี้



รูปที่ 1. แผนที่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ [3]

Monte Carlo Simulation (MCS) เป็นวิธีการวิเคราะห์โอกาสเกิดปรากฏการณ์ หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติที่มีความแปรปรวน สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะทำการสุ่มตัวเลข (random number generation) ของข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ โดยกำหนดขอบเขตจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่ากลางของข้อมูล เพื่อนำไปหาผลลัพธ์หรืออัตราส่วนความปลอดภัย นำผลลัพธ์ที่ได้มาแจกแจงความน่าจะเป็น

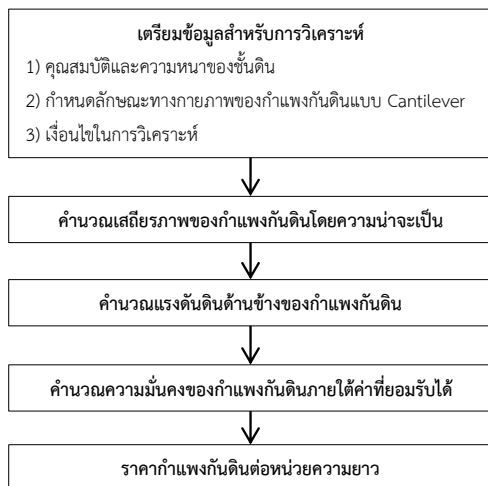
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางวิศวกรรมค่าโอกาสการเกิดการพิบัติอาจจะไม่คงที่ตลอดอายุการใช้งานโดย [4] เส้นโค้ง bathtub อธิบายการทำงานที่เป็นอันตรายของอุปกรณ์หรือระบบเมื่อเวลาผ่านไป ประกอบด้วย 3 ระยะคือ ความล้มเหลวตั้งแต่เนิ่น ๆ (Early Failures) มีลักษณะอัตราความล้มเหลวที่ลดลงเกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการในช่วงแรกของระบบใหม่ ความล้มเหลวแบบสุ่ม (Random Failures) ในระยะนี้มีอัตราความล้มเหลวคงที่ ความล้มเหลวในการสึกหรอ (Wear Out Failures) ในระยะนี้มีอัตราความล้มเหลวที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามในกรณีของกำแพงกันดินในการศึกษานี้จะพิจารณาอัตราการการพิบัติคงที่



รูปที่ 2 bathtub สาเหตุหลัก 3 ประการของความล้มเหลวของระบบต่างๆ [4]

3. วิธีการ

ภาพรวมของกระบวนการการทำให้วิจัย แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังในรูปที่ 3

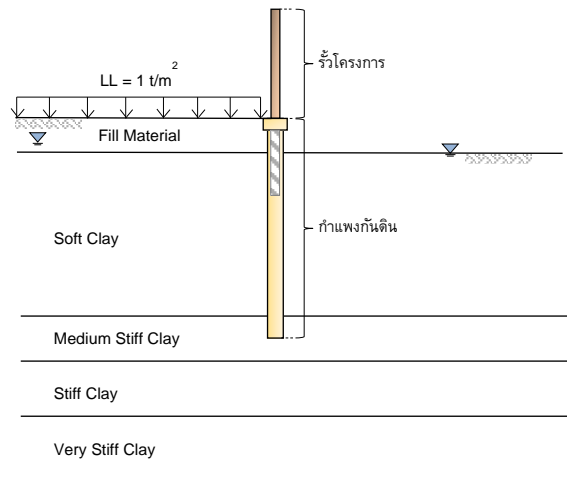


รูปที่ 3 กระบวนการการทำให้วิจัย

3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

การศึกษาและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever ใช้คุณสมบัติดินและความหนาของชั้นดินจากงานวิจัย [3] โดยใช้ข้อมูล Zone D, ข้อมูล Zone E และข้อมูล Zone F จากนั้นนำข้อมูลที่รวบรวมไว้มาวิเคราะห์ทางสถิติประกอบไปด้วย การกระจายตัวของข้อมูล (Distribution curve), วิเคราะห์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation), ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation) ด้วยโปรแกรม Mini Tab เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนที่จะนำไปสร้างแบบจำลองต่อไป

การกำหนดลักษณะทางกายภาพของกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever ประกอบด้วยระดับความสูงของกำแพงกันดินเท่ากับระดับความสูงดินถม และความยาวเสาเข็มโดยระดับปลายเสาเข็มวัดเทียบกับผิวดินด้านบนของดินถม ส่วนดินที่ใช้ในการศึกษากำหนดให้ดินถมหลังกำแพงเป็นดินทราย ดินฐานรากเป็นดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ ดังรูปที่ 4 เงื่อนไขในการวิเคราะห์กำแพงกันดิน ดังในตารางที่ 1



รูปที่ 4 ลักษณะของกำแพงกันดิน

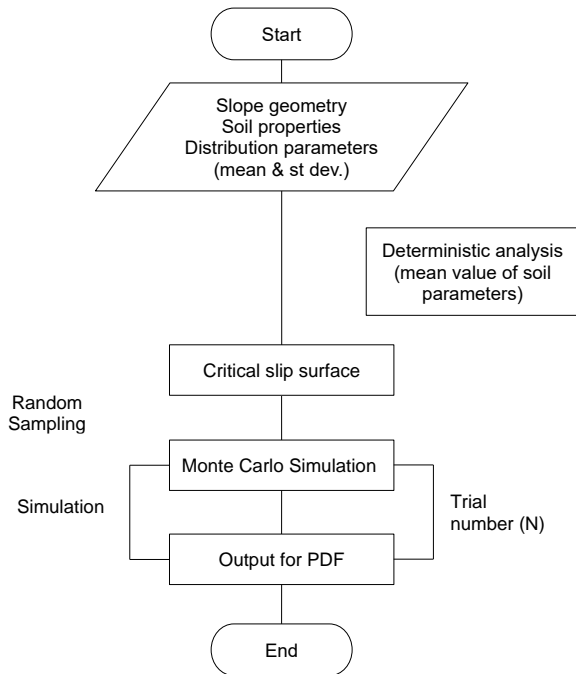
ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์กำแพงกันดิน

ลำดับ	ตัวแปร	ค่าที่ใช้วิเคราะห์
1	ความสูงดินถม	0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m
2	คุณสมบัติดินถม	$c=1 \text{ t/m}^2$, $\phi=20$, $\gamma=1.8 \text{ t/m}^3$
3	ความสูงรั้วโครงการ	3.6 m
4	แรงลม	50 kg/m ²
5	น้ำหนักจรหลังกำแพงกันดิน	1 t/m ²
6	แผ่นคอนกรีตกันดิน	กตลงในชั้นดินฐานราก 0.5 m
7	ระดับน้ำใต้ดินด้านหลังกำแพงกันดิน	ระดับ 1/3 ของความสูงของดินถม
8	ระดับน้ำใต้ดินด้านหน้ากำแพงกันดิน	ระดับของผิวดินฐานราก

3.2 การคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น

คำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วยวิธีสมมูลจำกัดจากโปรแกรม Geo - Studio 2018 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี

Monte Carlo Simulation (MCS) สามารถทำได้โดยคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ตามลักษณะการพิบัติที่ต้องการหลายๆครั้ง โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน (S_u of Soft Clay) เป็น Input parameter ที่มีค่าแตกต่างกัน และมากครั้งพอที่จะได้การกระจายตัวของค่า FS (Distribution of factor of safety) จากนั้นสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินได้จากความน่าจะเป็นที่ $FS < 1$ ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Monte Carlo Simulation (MCS)

3.3 การคำนวณแรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดิน

การคำนวณแรงดันดินด้านข้างโดยใช้ทฤษฎี Rankine [5] ของกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever ตามความสูงของดินถมตั้งแต่ 0.5-2.0 เมตร เพื่อคำนวณหาความยาวเสาเข็ม (Pile Length) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Pile Spacing) ได้แก่ 1.125, 1.500 และ 2.250 เมตร หน้าตัดเสาเข็ม (Pile Size) ได้แก่ 0.22, 0.26 และ 0.30 เมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความมั่นคงของกำแพงกันดินภายใต้ค่าที่ยอมรับได้ และใช้ในการคำนวณราคากำแพงกันดิน

3.4 การคำนวณความมั่นคงของกำแพงกันดินภายใต้ค่าที่ยอมรับได้

นำค่า P_f จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นมาแปลงเป็นรายปี (Annual) โดยหารด้วยระยะเวลาการใช้งาน (Working Life) 50 ปี [6] ภายใต้สมมติฐานอัตราการพิบัติของกำแพงกันดินตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนถึง 50 ปีมีอัตราการพิบัติคงที่ตลอดอายุการใช้งาน [4] หลังจากนั้นนำผลการคำนวณ Annual P_f และ FS โดยเลือกความยาวเสาเข็มจากการคำนวณแรงดันดินด้านข้างมาพล็อตลงกราฟความสัมพันธ์ Annual P_f และ FS ของงานวิจัย [7]

3.5 ราคากำแพงกันต่อหน่วยความยาว

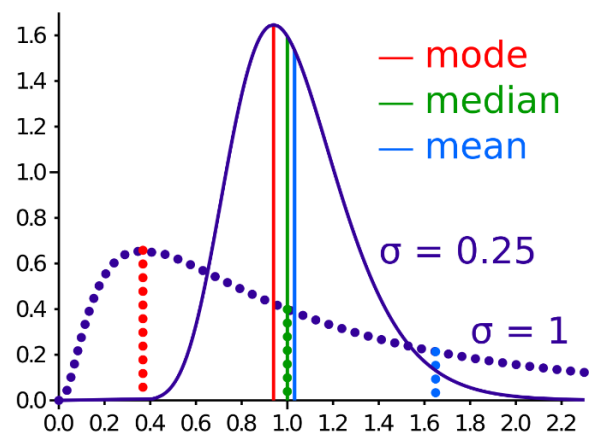
ค่า Annual P_f ที่ยอมรับได้ ความยาวเสาเข็ม (Pile Length) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Pile Spacing) และหน้าตัดเสาเข็ม (Pile Size) ถูกนำมาออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงงาน มาตรฐานว.ส.ท. (2562) โดยการออกแบบนี้เน้นไปที่คานรัดเสาเข็มเท่านั้น ในขณะที่ส่วนของเสาเข็มและแผ่นกันดินจะไม่ถูกออกแบบแต่จะใช้ราคากลางซึ่งถูกกำหนดโดยหน่วยงานภาครัฐ หลังจากนั้นถอดปริมาณงานและคำนวณราคากำแพงกันดิน เพื่อเปรียบเทียบราคากำแพงกันดินต่อเมตร อ้างอิงค่าวัสดุและค่าแรงจากสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ (2567) สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์การศึกษาระหว่างพาณิชย์ (2567) และกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง (2566)

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติดินและความหนาของชั้นดิน

ค่า S_u ชั้น Soft Clay จาก Zone D ถึง F มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่า COV อยู่ระหว่าง 40-45% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [1] ค่า S_u ชั้น Medium Stiff Clay จาก Zone D ถึง F มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล เนื่องจากตัวอย่างดินถูกรบกวนจากการเก็บตัวอย่างในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะเบี่ยงเบนไปในค่าที่ลดลง ดังตารางที่ 2-3

ผลการเลือกตัวแทนของข้อมูลจากการกระจายตัวของข้อมูล (Distribution curve) ดังตารางที่ 4 ข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติเลือกใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) ข้อมูลที่มีการแจกแจงไม่ปกติหรือเลือกใช้ค่ามัธยฐาน (Median) เนื่องจากค่าเฉลี่ยสามารถถูกดึงไปในทิศทางของค่าสุดโต่งได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีข้อมูลชุดหนึ่งที่มีค่าส่วนใหญ่อยู่รอบๆ 50 แต่มีค่าหนึ่งอยู่ที่ 1,000 ค่าเฉลี่ยจะถูกดึงขึ้นสูงเกินไปและไม่สะท้อนค่าทั่วไปของข้อมูลอื่น ๆ ส่วนค่ามัธยฐานเป็นค่าที่อยู่ตรงกลางของชุดข้อมูลเมื่อข้อมูลถูกเรียงลำดับ และไม่ได้รับผลกระทบจากค่าสุดโต่งเหมือนค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐานจึงเป็นค่าที่วัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางได้ดีหากข้อมูลมีการแจกแจงไม่ปกติหรือเบ้ [8,9] ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานที่มีความเบ้ต่างกัน [10]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติดินของค่า S_u

S_u (t/m ²)	Zoning	Distribution	Count	Mean	COV	Median
Soft Clay (S_{u1})	Zone D	Normal	9196	1.45	0.40	1.49
	Zone E	Normal	4297	1.32	0.45	1.30
	Zone F	Normal	1534	1.36	0.40	1.30
Medium Stiff Clay (S_{u2})	Zone D	Log-normal	3547	3.35	0.20	3.20
	Zone E	Log-normal	1558	3.35	0.20	3.20
	Zone F	Log-normal	321	3.28	0.21	3.07
Stiff Clay (S_{u3})	Zone D	Log-normal	1196	6.91	0.20	6.70
	Zone E	Log-normal	468	6.82	0.20	6.60
	Zone F	Log-normal	68	6.71	0.20	6.37
Very Stiff Clay (S_{u4})	Zone D	Log-normal	314	12.64	0.21	11.80
	Zone E	Log-normal	62	12.18	0.16	11.60
	Zone F	Log-normal	28	13.76	0.24	13.27

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชั้นดิน

Thickness (m)	Zoning	Distribution	Count	Mean	COV	Median
Soft Clay (T_1)	Zone D	Normal	213	12	0.21	12
	Zone E	Normal	131	14	0.18	14
	Zone F	Log-normal	38	17	0.24	16
Medium Stiff Clay (T_2)	Zone D	Log-normal	128	3	0.63	2
	Zone E	Log-normal	85	3	0.72	2
	Zone F	Log-normal	24	3	0.55	3
Stiff Clay (T_3)	Zone D	Log-normal	148	3	0.64	3
	Zone E	Log-normal	90	4	0.53	3
	Zone F	Log-normal	25	3	0.64	3
Very Stiff Clay (T_4)	Zone D	Log-normal	107	5	0.62	5
	Zone E	Log-normal	65	5	0.55	5
	Zone F	Log-normal	26	5	0.58	5

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรในการวิเคราะห์

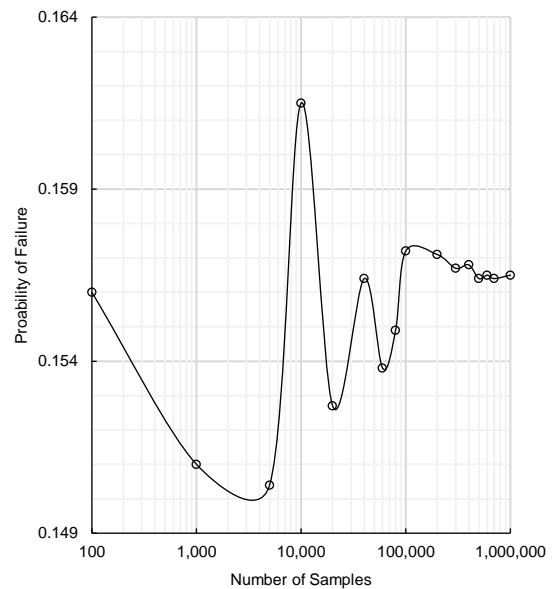
Parameters	Consistency	Unit	Zone D	Zone E	Zone F
S_{u1}	Soft Clay	t/m ²	1.25, 1.50, 1.75		
S_{u2}	Medium Stiff Clay	t/m ²	3.20	3.20	3.07
S_{u3}	Stiff Clay	t/m ²	6.70	6.60	6.37
S_{u4}	Very Stiff Clay	t/m ²	11.80	11.60	13.27
γ_1	Soft Clay	t/m ³	1.60	1.54	1.48
γ_2	Medium Stiff Clay	t/m ³	1.68	1.68	1.62
γ_3	Stiff Clay	t/m ³	1.91	1.86	1.90
γ_4	Very Stiff Clay	t/m ³	1.99	1.96	1.99
T_1	Soft Clay	m	12	14	16
T_2	Medium Stiff Clay	m	2	2	3
T_3	Stiff Clay	m	3	3	3
T_4	Very Stiff Clay	m	5	5	5
COV	Soft Clay	%	40	45	40

4.2 ผลการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น

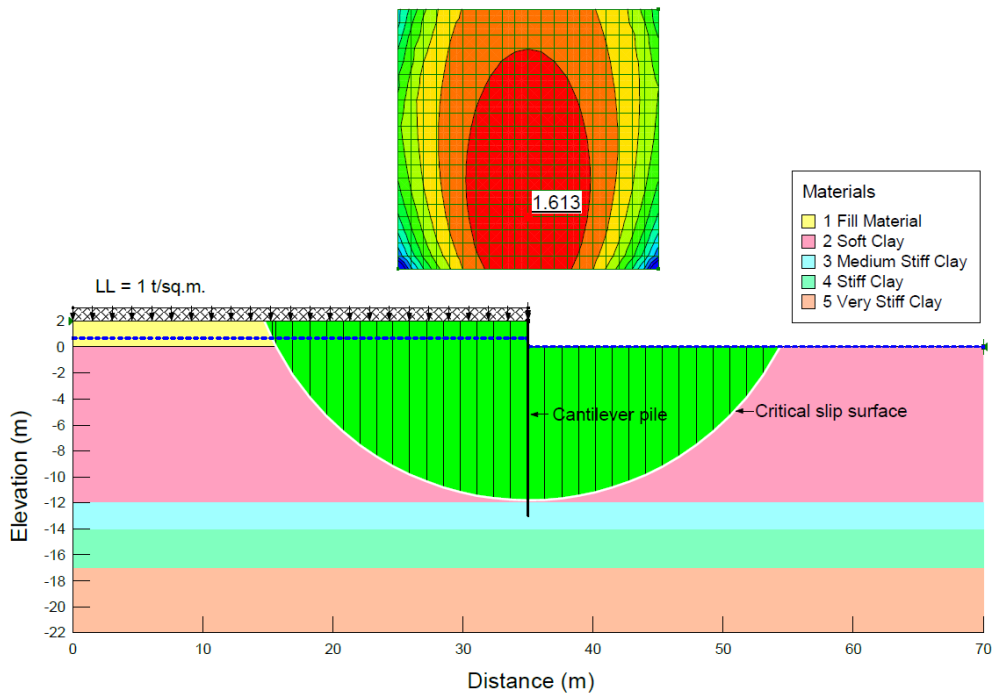
จำนวนการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธี MSC ที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการในการแก้ปัญหาลดจนตัวแปรที่พิจารณา ในงานวิจัยนี้ การสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมเมื่อค่า P_f ที่ได้จากการวิเคราะห์ 2 ครั้งต่อเนื่องกันต่างกันไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณจำนวนการสุ่มตัวอย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 300,000 ครั้ง จึงจะให้ค่า P_f ที่น่าเชื่อถือได้ ดังรูปที่ 7 ตัวอย่างผลการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินจาก Zone D ดังรูปที่ 8

การศึกษานี้สนใจค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่เปลี่ยนแปลงตามตัวแปรต่างๆ จึงใช้ตัวแปรในแกนนอน การคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นจากความไม่แน่นอนของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน (S_{u1}) ด้วยวิธี MCS ได้ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) และเสาเข็มมีความยาวตั้งแต่ 6-16 เมตร ดังรูปที่ 9

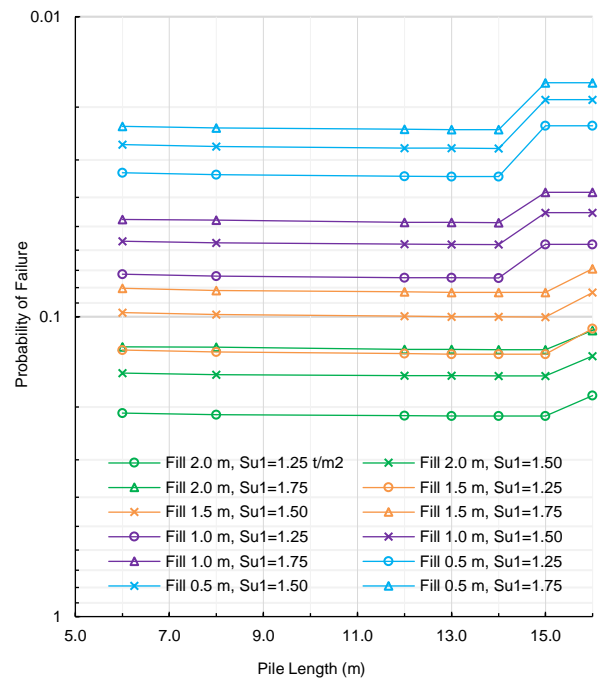
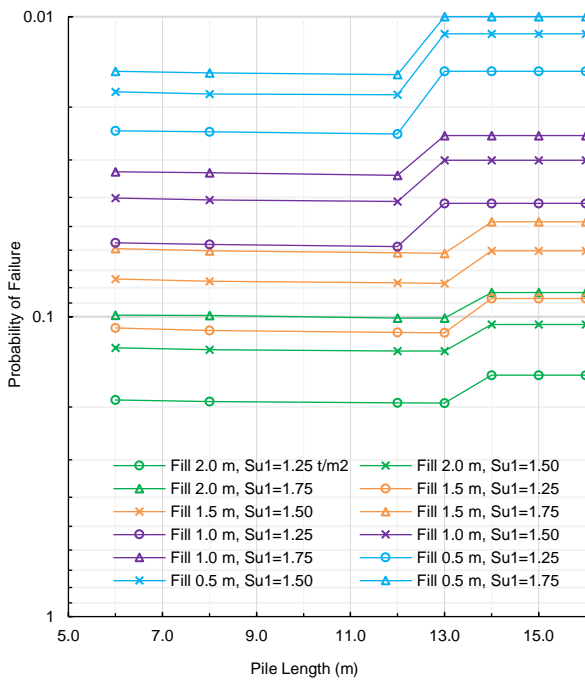
ค่า P_f ของแต่ละ Zone สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Soft Clay ค่า P_f ที่ได้ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน กลุ่มที่ 2 ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Medium Stiff to Very Stiff Clay ค่า P_f ที่ได้ใกล้เคียงหรือเท่ากัน ค่าเฉลี่ย F.S. มากกว่า 1.5 ทุกกรณี ยกเว้นกรณีดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Soft Clay ได้ค่าเฉลี่ย F.S. อยู่ระหว่าง 1.476-1.495

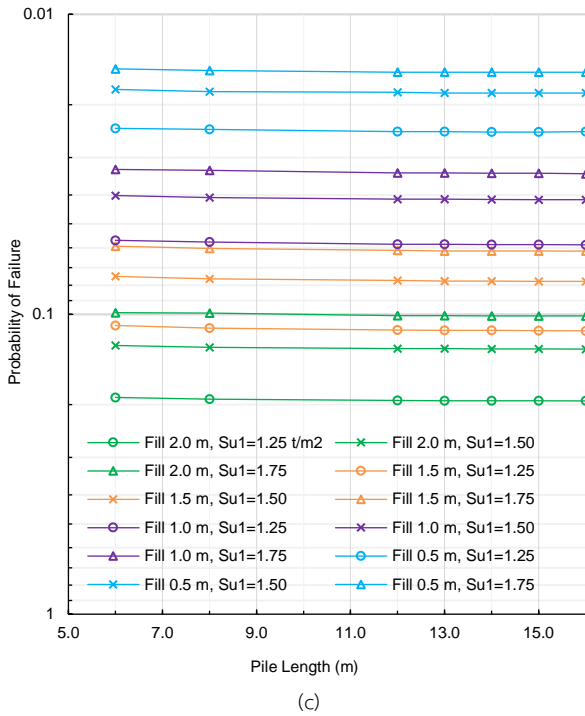


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณกับค่า P_f เมื่อ: ดินถมสูง 2 เมตร จาก Zone D



รูปที่ 8 ตัวอย่างผลการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินจาก Zone D





รูปที่ 9 ความยาวเสาเข็มและความน่าจะเป็นในการพิบัติ (a) Zone D, (b) Zone E และ (c) Zone F

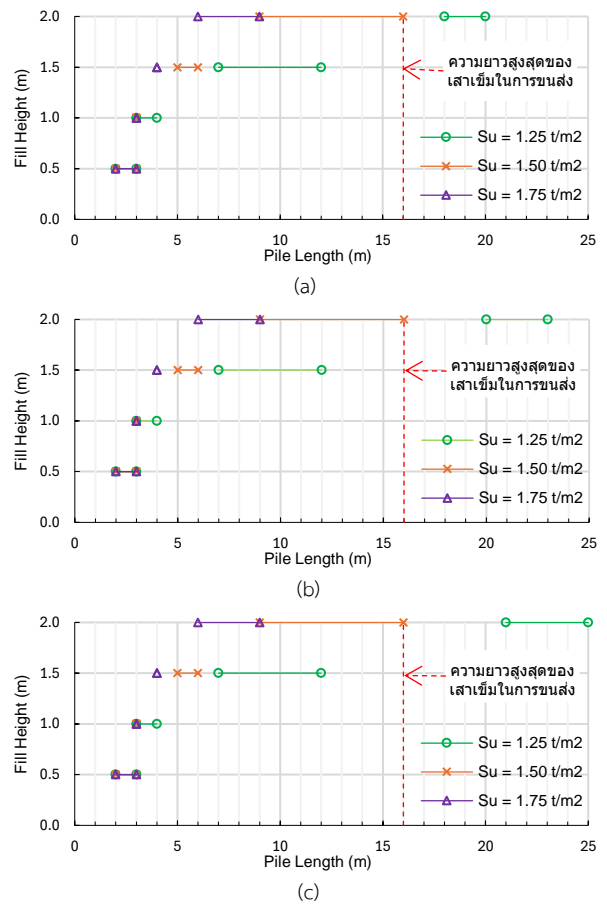
4.3 ผลการคำนวณแรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดิน

กรณีตัวอย่างความยาวเสาเข็มจากการคำนวณแรงดันดินด้านข้าง Zone D ดังตารางที่ 5 พบว่าแต่ละ Zone ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 18-25 เมตร ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.50-1.75 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 6-16 เมตร และดินถมสูง 0.5-1.5 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25-1.75 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 2-12 เมตร ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 5 ความยาวเสาเข็มจากการคำนวณแรงดันดินด้านข้าง Zone D

S_{u1} (t/m ²)	Fill Height (m)	Spacing (m)	Pile Length (m)		
			I-0.22	I-0.26	I-0.30
1.25	2.00	1.125	19*	18*	18*
		1.500	19*	19*	19*
		2.250	20*	20*	20*
	1.50	1.125	8	7	7
		1.500	9	9	8
		2.250	12	11	10
	1.00	1.125	4	3	3
		1.500	4	4	4
		2.250	4	4	4
	0.50	1.125	2	2	2
		1.500	2	2	2
		2.250	3	2	2

* ความยาวเสาเข็มเกิน 16 เมตรเป็นเรื่องที่ยากลำบากในการดำเนินการก่อสร้างจริง



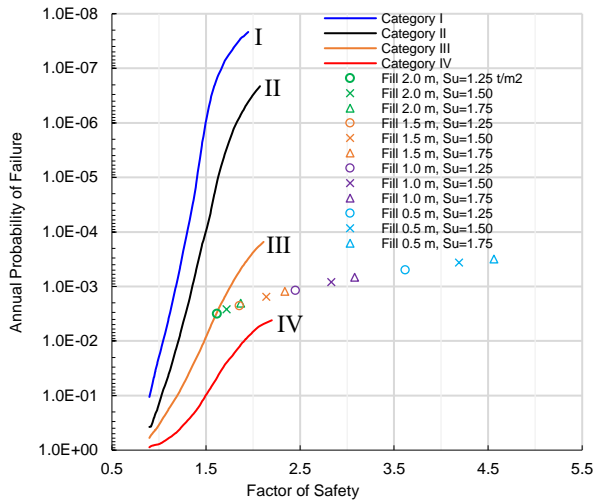
รูปที่ 10 ความยาวเสาเข็มและความสูงดินถม (a) Zone D, (b) Zone E และ (c) Zone F

4.4 ผลการคำนวณความมั่นคงของกำแพงกันดินภายใต้ค่าที่ยอมรับได้

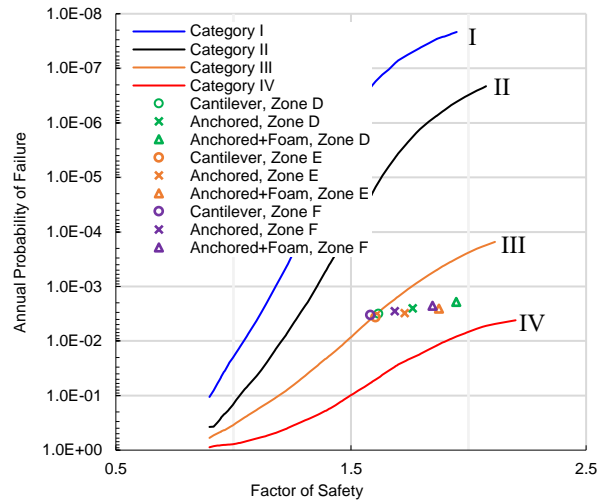
ผลการคำนวณ Annual P_f และ FS เลือกความยาวเสาเข็มจากการคำนวณแรงดันดินด้านข้าง โดยปลายเสาเข็มที่วางอยู่ในชั้น Soft Clay เลือก Annual P_f จากกลุ่มที่ 1 และปลายเสาเข็มที่วางอยู่ในชั้น Medium Stiff to Very Stiff Clay เลือก Annual P_f จากกลุ่มที่ 2 มาพล็อตลงกราฟ Annual P_f และ FS ของงานวิจัย [7] ดังรูปที่ 11

ผลการคำนวณพบว่ากำแพงกันดินแบบ Cantilever แต่ละ Zone อยู่ระหว่าง Category 3 (ไม่มีการออกแบบเฉพาะสถานที่ การก่อสร้าง การดำเนินงานต่ำกว่ามาตรฐาน) และ Category 4 (ออกแบบ สร้าง มีวิศวกรรมเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย) นอกจากนี้ได้วิเคราะห์กรณีดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² โดยออกแบบเป็นกำแพงกันดินแบบ Anchored และกำแพงกันดินแบบ Anchored รวมถึงใส่ EPS Foam ความกว้าง 15 เมตร วางแทนดินถมหลังกำแพง โดยกำหนดให้ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้นดิน Medium Stiff Clay เพื่อให้ได้ Annual P_f ที่น้อยลง ดังรูปที่ 12

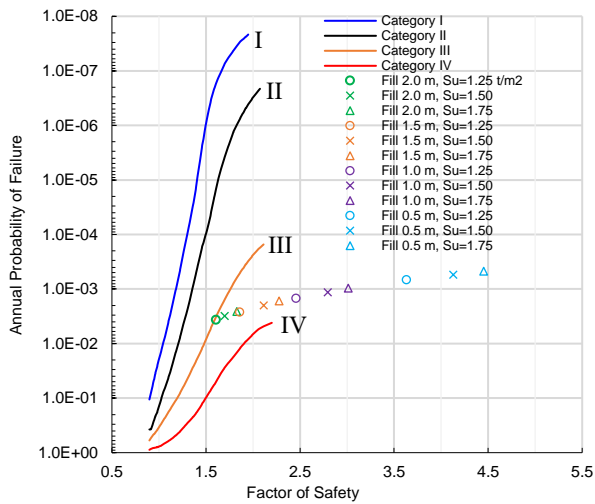
จากผลวิเคราะห์ความมั่นคงของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นในการพิบัติ แบบ Cantilever และ Anchored แสดงให้เห็นว่าค่า FS ไม่ได้บอกถึงความปลอดภัยในการพิบัติของกำแพงกันดินเสมอไปเมื่อคุณสมบัตินี้มีความแปรปรวน



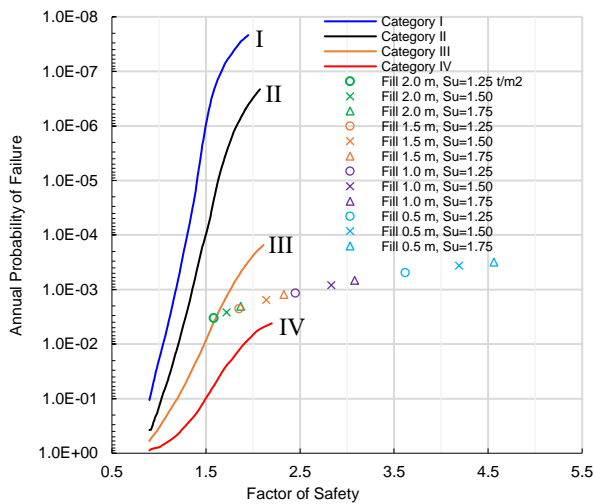
(a)



รูปที่ 12 Factor of Safety และ Annual P_f กรณีดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m^2 กำแพงกันดินแบบ Cantilever และ Anchored



(b)



(c)

รูปที่ 11 Factor of Safety และ Annual P_f ของ (a) Zone D, (b) Zone E และ (c) Zone F กำแพงกันดินแบบ Cantilever

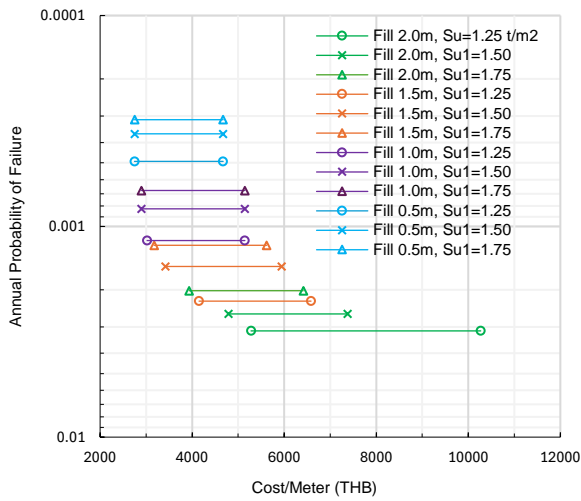
4.5 ราคากำแพงกันต่อหน่วยความยาว

เนื่องจากผลการถอดปริมาณงานและคำนวณราคากำแพงกันดินต่อเมตรมีจำนวนมากเพื่อให้สะดวกต่อการแสดงผลการคำนวณและง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงนำเสนอตัวอย่างกรณีของ Zone D ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.50 t/m^2 ดังตารางที่ 6

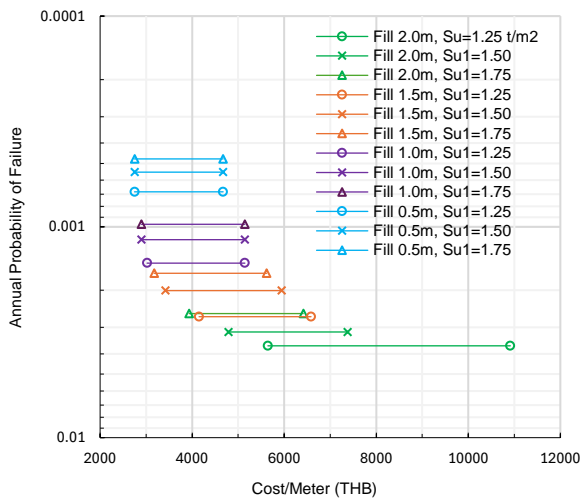
ราคากำแพงกันดินต่อเมตรแต่ละ Zone ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m^2 ได้ราคา 5,279-11,234 บาท ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ $1.50-1.75 \text{ t/m}^2$ ได้ราคา 3,935-7,377 บาท และดินถมสูง 0.5-1.5 เมตร S_{u1} เท่ากับ $1.25-1.75 \text{ t/m}^2$ ได้ราคา 2,747-6,583 บาท ราคากำแพงกันดินต่อเมตร และ Annual P_f ที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 13

ตารางที่ 6 ราคากำแพงกันดิน Zone D ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.50 t/m^2

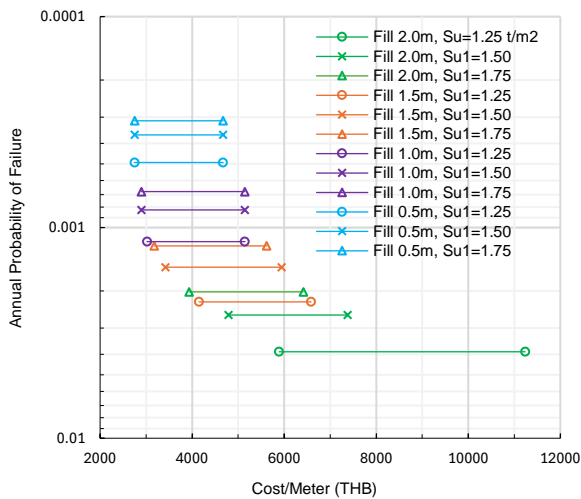
ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่า ของ	ค่า แรง	รวม เป็นเงิน
1.0	คานรัศเสาเข็ม					
1.1	คอนกรีต	0.72	ลบ.ม.	2420	327	1978
1.2	เหล็กข้ออ้อย DB16	28.40	กก.	22	4	723
1.3	เหล็กปลอก RB9	8.39	กก.	23	4	232
1.4	แบบหล่อคอนกรีต	5.40	ตร.ม.	400	121	2813
2.0	แผ่นกันดิน					
2.1	พื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง	11.25	ตร.ม.	278	25	3409
3.0	งานเสาเข็ม, ตอกเสาเข็ม, ตัดเข็ม					
3.1	เสาเข็ม I-0.3x0.3x9ม. @1.5ม.	4	ต้น	2603	1925	18113
3.2	ค้ำสัดเสาเข็ม	4	ต้น	-	280	1120
รวมราคา (บาท/4.5 เมตร)						28,388
รวมราคา (บาท/เมตร)						6,309



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 13 ราคากำแพงกันดินต่อเมตร และ Annual P_f ของ (a) Zone D, (b) Zone E และ (c) Zone F

5. บทสรุป

การศึกษาผลกระทบจากความแปรปรวนของคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่มีผลต่อราคาของกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever สำหรับงานถมดินโครงการบ้านจัดสรร การคำนวณและแสดงผลในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน ด้วยวิธี Monte Carlo Simulation สำหรับการพิบัติจากเสถียรภาพเชิงลาด ซึ่งผลการศึกษารูปร่างได้ดังนี้

1. ค่า S_u ชั้น Soft Clay จาก Zone D ถึง F มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่า COV อยู่ระหว่าง 40-45% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [1] ส่วนค่า S_u ชั้น Medium Stiff Clay จาก Zone D ถึง F มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล เนื่องจากตัวอย่างดินถูกรบกวนจากการเก็บตัวอย่างในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะเบี่ยงเบนไปในค่าที่ลดลง

2. จำนวนการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติด้วยวิธี Monte Carlo Simulation จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 300,000 ครั้ง จึงจะให้ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่น่าเชื่อถือได้

3. ผลจากการคำนวณความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินด้วยวิธี Monte Carlo Simulation พบว่าค่า S_u ชั้น Soft Clay เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณความน่าจะเป็นในการพิบัติ ในขณะที่ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

4. ผลคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ของกำแพงกันดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Soft Clay ค่า P_f ที่ได้ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน กลุ่มที่ 2 ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Medium Stiff to Very Stiff Clay ค่า P_f ที่ได้ใกล้เคียงหรือเท่ากัน ค่าเฉลี่ย FS มากกว่า 1.5 ทุกกรณี ยกเว้นกรณีดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² ปลายเสาเข็มวางอยู่ในชั้น Soft Clay ได้ค่าเฉลี่ย FS อยู่ระหว่าง 1.476-1.495

5. ผลการคำนวณแรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดิน พบว่าแต่ละ Zone ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 18-25 เมตร ดินถมสูง 2 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.50-1.75 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 6-16 เมตร และดินถมสูง 0.5-1.5 เมตร S_{u1} เท่ากับ 1.25-1.75 t/m² ได้ความยาวเสาเข็ม 2-12 เมตร ซึ่งจะพบว่ากรณีที่มีความยาวเสาเข็ม 18-25 เมตร เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากต้องใช้เสาเข็มท่อนเดียวทำให้ยากต่อการขนส่ง ดังนั้นกรณี S_{u1} เท่ากับ 1.25 t/m² ดินถมสูง 2 เมตร จึงไม่เหมาะสมกับกำแพงกันดินเสาเข็มเสียบแผ่นกันดินแบบ Cantilever

6. โครงสร้างกำแพงกันดินแปรผกผันตามค่า S_u ชั้น Soft Clay เนื่องจากเมื่อค่า S_u ชั้น Soft Clay ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงขึ้น ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงต้านการกระทำ (Resisting force) มีค่ามากขึ้น ทำให้โครงสร้างกำแพงกันดินและความยาวเสาเข็มที่ต้องการก็มีค่าลดลง

7. ผลการคำนวณความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินด้วยวิธี Monte Carlo Simulation แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความ

น่าจะเป็นในการพิบัติรายปี (Annual P_f) กับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS), ราคาค่าก่อสร้างกำแพงกันดินต่อเมตร

8. ผลการคำนวณ Annual P_f และ FS พบว่ากำแพงกันดินแบบ Cantilever แต่ละ Zone อยู่ระหว่าง Category 3 (ไม่มีการออกแบบเฉพาะสถานที่ การก่อสร้าง การดำเนินงานต่ำกว่ามาตรฐาน) และ Category 4 (ออกแบบ สร้าง มีวิศวกรรมเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย)

9. ผลวิเคราะห์ความมั่นคงของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นในการพิบัติ แบบ Cantilever และ Anchored แสดงให้เห็นว่าค่า FS ไม่ได้บอกถึงความปลอดภัยในการพิบัติของกำแพงกันดินเสมอไปเมื่อคุณสมบัติดินมีความแปรปรวน ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบควรดูค่า P_f ร่วมด้วย เพราะค่าคุณสมบัติดินต่างๆ มีความไม่แน่นอน

10. ความสูงดินถม โครงสร้างกำแพงกันดินและราคาค่าก่อสร้างกำแพงกันดิน แปรผันตามกับความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) เนื่องจากเมื่อค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติมีค่าเพิ่มขึ้น (โอกาสที่จะเกิดการพิบัติสูง) ส่งผลให้ความยาวเสาเข็มต้องยาวเพิ่มขึ้นและราคาค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น

11. กำแพงกันดินแต่ละ Zone ความสูงดินถม 2 เมตร ค่า S_u ชั้น Soft Clay เท่ากับ 1.25 t/m^2 มีผลต่อความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) และราคาค่าก่อสร้างกำแพงกันดินสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความสูงดินถม 0.5-1.5 เมตร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Phoon, K.K., Kulhawy, F.H. & Grigoriu, M.D. (1995). *Reliability-based design of foundations for transmission line structures*. EPRI Report TR-105000. Palo Alto: Electric Power Research Institute.
- [2] Degroot, D.J. (1996). Analyzing Spatial Variability of In Situ Soil Properties. *Proceedings of Uncertainty*. 96. Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE. 1:210-238.
- [3] ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, เข็มพันธ์ อมรกุล, วรากร ไฉ่เรียง และสุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. (2553). แผนที่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] Tobias, P.A. and Trindade, D.C., *Applied Reliability*, Second Edition, CRC Press, (1995). US Army Document, (2005).
- [5] Rankine, W.J.M., 1857. On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal society of London* 147, 9–27.
- [6] EN 1990 Eurocode. *Basis of Structural Design*. Supersedes ENV 1991-1 :1994 Incorporating corrigenda December 2008 and April 2010.
- [7] Silva, F., T.W. Lambe, and W.A. Marr, 2008. Probability and risk of slope failure: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, pp. 1691-1699.
- [8] Look, B.G. and He, W (2022). Simulations Used in Geotechnical Practice: Part 2 - Comparing Normal and Non-normal PDF in Sampling, *8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2022)*, Newcastle, Australia, 14-16 December 2022 (Unpublished to date).
- [9] นิคม. (2559). สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics). แหล่งที่มา <http://home.kku.ac.th/nikom/>
- [10] Wikipedia. (2024). Log-normal distribution. แหล่งที่มา https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution/