

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดิน ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Comparisons of Analysis Results of Slope Stability between Limit Equilibrium Method and Finite Element Method

พิทักษ์ชน ทันมั่ง* และวีรยา ฉิมอ้อย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Pitakchon Tunmung* and Weeraya Chimoye

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ระหว่างวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้หน้าตัดคันดินตัวอย่าง หน้าตัดคันดินและข้อมูลดินจากงานวิจัยที่ผ่านมา และคันดินป้องกันน้ำท่วมของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นกรณีศึกษา โดยศึกษาอิทธิพลของสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักของดินและอิทธิพลของระดับน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดิน จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยโดยใช้ผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีสมดุลขีดจำกัดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยทั้งสองวิธี และเมื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังรับน้ำหนักของดิน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยขึ้นกับกำลังรับน้ำหนักของดิน โดยค่ามุมเสียดทานภายในของดินมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมากกว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน และอิทธิพลของระดับน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดินป้องกันน้ำท่วมมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าลดลงเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น โดยอิทธิพลของระดับน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแสดงให้เห็นชัดในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คำสำคัญ : เสถียรภาพของลาดดิน; วิธีสมดุลขีดจำกัด; วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย

Abstract

This paper presents the comparison of analysis results of slope stability between limit equilibrium method and finite element method by using slope from previous work and flood

protection slope from Suvarnabhumi Airport as case studies. The effective of strength of soil and water level flow through the slope are studied. As the results, the factors of safety by limit equilibrium method and finite element method are similar with the previous work. The strengths of soil affect the factor of safety from both methods. The friction angle play more effect with factor of safety than cohesion of soil. For the effect of water level, it is found that factor of safety depends on water level especially when analyzed with finite element method.

Keywords: slope stability; limit equilibrium method; finite element method; safety factor

1. บทนำ

เสถียรภาพความลาดชันเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบความลาดชันของคันดินไม่ว่าจะเป็นความลาดชันเนื่องจากงานถม เช่น ถนน คันกั้นน้ำ หรือความลาดชันเนื่องจากการขุด เช่น คันคลอง สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันนั้น โดยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method) คือวิธีการคำนวณตามทฤษฎี Method of Slices เช่น วิธี Bishop [1] วิธี Janbu [2] เป็นวิธีที่ยังคงใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของความลาดชันและแนวของการเคลื่อนพังของความลาดชันเท่านั้น ต่อมา Whitman และ Bailey [3] ได้เสนอทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ซึ่งเป็นแนวทางเลือกใหม่สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งสามารถให้ผลที่ถูกต้อง ครบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสดงกลไกการพังทลายของเสถียรภาพของลาดดิน และพบว่าการพังทลายของลาดดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความสอดคล้องกับธรรมชาติที่เกิดพังมากกว่าวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิม นอกจากนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถวิเคราะห์สมบัติอื่น ๆ ของคันดินได้ด้วย เช่น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดิน การทรุดตัวของดิน ซึ่งทำให้มีผลการวิเคราะห์ที่

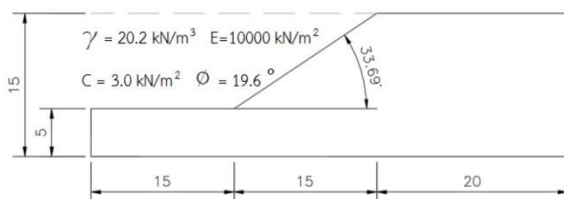
หลากหลายกว่าวิธีแบบเดิม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดิน แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าพารามิเตอร์ของดินต่าง ๆ ที่ต้องนำมาใช้นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่หาได้ยากจากผลการทดลอง รวมถึงแบบจำลองของกำลังรับแรงเฉือนของดินอาจมีความแตกต่างจากวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินโดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งหน้าตัดคันดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดคันดินถมอย่างง่าย โดยศึกษาอิทธิพลของกำลังรับน้ำหนักของดินและอิทธิพลของระดับน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดินป้องกันน้ำท่วมของสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ

2. วิธีการวิจัย

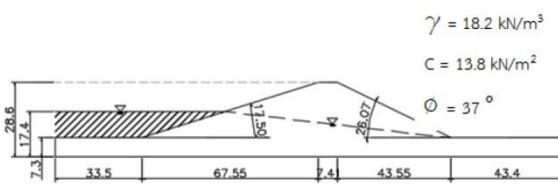
2.1 การตรวจสอบโปรแกรมด้วยการวิเคราะห์ความลาดชันจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม KUSlope [4] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของดินด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด โดยโปรแกรม KUSlope นั้นสามารถเลือกวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของดินด้วยวิธี Ordinary [1] วิธี Bishop [1] วิธี Janbu [2] และวิธี Spencer [5] สำหรับการ

วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นใช้โปรแกรม Plaxis [6] ในการวิเคราะห์ ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบโปรแกรมจึงวิเคราะห์ความลาดชันของผลงานวิจัยที่ผ่านมา 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีน้ำ และกรณีที่มีน้ำไหลผ่านในคันดิน Data from [7] โดยหน้าตัดของความลาดชันแสดงในรูปที่ 1



(ก) กรณีไม่มีน้ำไหลผ่านคันดิน

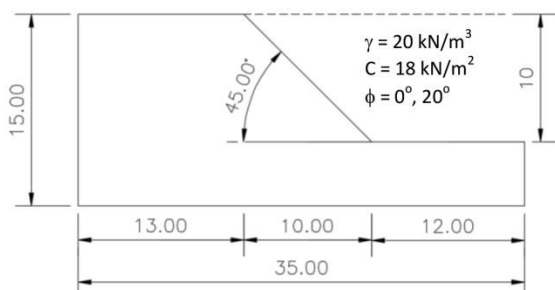


(ข) กรณีมีน้ำไหลผ่านคันดิน

รูปที่ 1 หน้าตัดความลาดชันจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

2.2 การวิเคราะห์ความลาดชันด้วยหน้าตัดอย่างง่าย

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้หน้าตัดอย่างง่าย และศึกษาอิทธิพลของค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน (Cohesion, C) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle, ϕ) โดยหน้าตัดของความลาดชันแสดงในรูปที่ 2 และเงื่อนไขของการศึกษาอิทธิพลของค่ากำลังรับน้ำหนักของดินแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 หน้าตัดความลาดชันอย่างง่าย

เงื่อนไขในงานวิจัยของ Roscience, Inc. นั้นจะจำลองดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โมเดลแบบ T6 element ให้พื้นด้านล่างมีจุดยึดแบบยึดแน่น (Fixity) และให้ด้านข้างเป็นจุดยึดแบบหมุน (roller) และมีสมบัติของดินตาม Mohr-Coulomb model ตามรูปที่ 1

การวิเคราะห์สมมูลขีดจำกัดเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของดินโดยใช้โปรแกรม KUSlope การวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ โดยให้ขอบด้านข้างและด้านล่างเป็นผิวเรียบ แบ่งชั้นเพื่อการวิเคราะห์โดยค่าที่เหมาะสมของโปรแกรม และหาจุดศูนย์กลางและรัศมีของวงเคลื่อนที่ตามการคำนวณแบบอัตโนมัติของโปรแกรม

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของดินโดยใช้โปรแกรม Plaxis การวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ โดยให้ขอบด้านข้างและด้านล่างเป็นผิวเรียบ ถูกจำลองโดย 15-Node Triangular Element, Coarse Mesh Generation และใช้เงื่อนไขการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria) โดยให้มีเงื่อนไขให้ดินมีพฤติกรรมระบายน้ำ (Drain Condition) ค่า Dilation Angle = 0° ค่า Poisson ratio = 0.3 สำหรับการจำลองโมเดลให้เป็นดินเหนียว และกำหนดค่ามอดูลัสของยัง (Young Modulus, E_{ur}) ให้มีค่าเท่ากับ 8600 kN/m^2 [9]

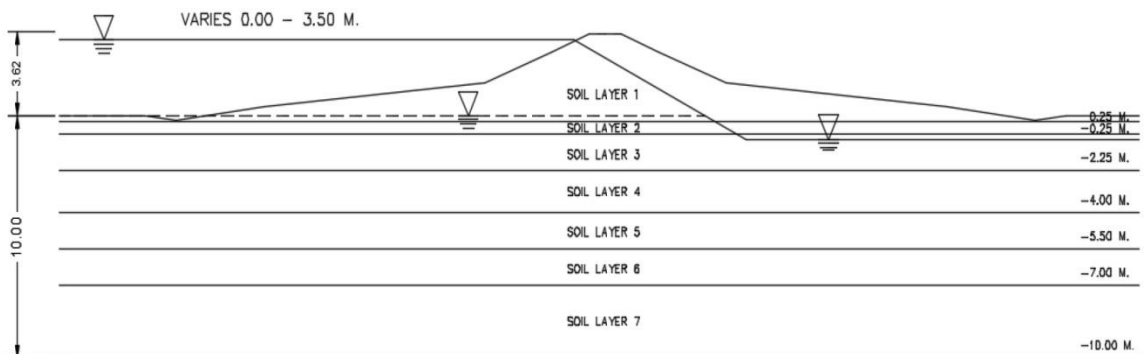
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการศึกษาอิทธิพลของค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน

กรณี	Unit Weight, γ (kN/m^3)	Young Modulus, E_{ur} (kN/m^2)	Cohesion, C (kN/m^2)	Internal Friction Angle, ϕ (degree)
1. ศึกษาผลของ Internal Friction Angle	20	8,600	18	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
2. ศึกษาผลของ Cohesion	20	8,600	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50	0
3. ศึกษาผลของ Cohesion	20	8,600	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50	20

2.3. การวิเคราะห์ความลาดชันของคันดินป้องกันน้ำท่วม

วิเคราะห์ความลาดชันโดยหน้าตัดความลาดชันที่ต้องการศึกษา เป็นคันดินสำหรับป้องกันน้ำท่วมของโครงการสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ โดยมีชั้นดินทั้งหมด 7 ชั้น สมบัติของดินแต่ละชั้นได้จากการ

เก็บตัวอย่างในสนาม [8] ดังแสดงให้รูปที่ 3 โดยวิเคราะห์อิทธิพลของระดับน้ำตั้งแต่ 0.0 ถึง 3.5 เมตร โดยสมบัติของดินแต่ละชั้นแสดงในตารางที่ 2 [8] ทั้งนี้ ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน [9]



รูปที่ 3 หน้าตัดคันดินป้องกันน้ำท่วม

3. ผลการวิจัย

3.1 การศึกษาหน้าตัดคันดินจากงานวิจัยที่ผ่านมา

การตรวจสอบโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ด้วยโปรแกรม KUSlope และโปรแกรม Plaxis โดยให้มีการตรวจสอบ 2 กรณี คือ

(1) กรณีไม่มีน้ำไหลผ่านคันดิน และ (2) กรณีที่มีน้ำไหลผ่านคันดิน โดยเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา

กรณีที่ 1 : กรณีไม่มีน้ำไหลผ่านคันดิน

ผลการวิเคราะห์หน้าตัดคันดินจากงาน

วิจัยที่ผ่านมาในกรณีที่ไม่มีน้ำไหลผ่านคันดิน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของคันดินทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกับข้อมูลเดิมที่ได้มีการคำนวณไว้ ซึ่งแสดงใน

ตารางที่ 3 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งแสดงว่าคันดินเกิดการเคลื่อนพัง

ตารางที่ 2 สมบัติของชั้นดินสำหรับคันดินป้องกันน้ำท่วม [8]

Soil No.	Cohesion, C (kN/m ²)	Internal Friction Angle, ϕ (degree)	Unit Weight, γ (kN/m ³)	Young Modulus, E_{ur} [9] (kN/m ²)
1	45.00	0	19.63	41,000
2	0.00	30	19.63	41,000
3	40.30	0	18.50	37,540
4	13.70	0	18.70	3,597
5	11.50	0	16.50	2,350
6	21.50	0	15.70	8,017
7	8.40	0	16.10	1,500

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของคันดิน ในกรณีที่ไม่มีน้ำมากระทำต่อคันดิน

γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ	Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	FE
From Data			0.987	1.005	0.988	0.987	1.018
20.2	3.0	19.6	0.933	0.918	0.982	0.979	1.047

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของคันดิน ในกรณีที่มีน้ำมากระทำต่อคันดิน

γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ	Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	From Data (LE)	FE	From Data (FE)
18.2	13.7	37.0	1.578	1.695	1.901	1.909	1.910	1.881	1.850

กรณีที่ 2 : กรณีที่มีน้ำไหลผ่านคันดิน

งานวิจัยที่ผ่านมาในกรณีที่มีน้ำไหลผ่านคันดิน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของคันดินจากทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของงานวิจัยเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4 ยกเว้นบางทฤษฎีของวิธีสมมูลขีดจำกัด คือ วิธี Ordinary และวิธี Janbu ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความ

ปลอดภัยที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจากวิธี Spencer ใกล้เคียงกับงานวิจัยมากที่สุด สาเหตุอาจเป็นเพราะค่าที่คำนวณได้จากงานวิจัย มาจากการคำนวณด้วยวิธี Bishop หรือวิธี Spencer มากกว่า ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ก็มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยใกล้เคียงกับผลงานวิจัย

เดิม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรม KUslope และ Plaxis สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินได้

3.2 การวิเคราะห์ความลาดชันของหน้าตัดคันดินอย่างง่าย

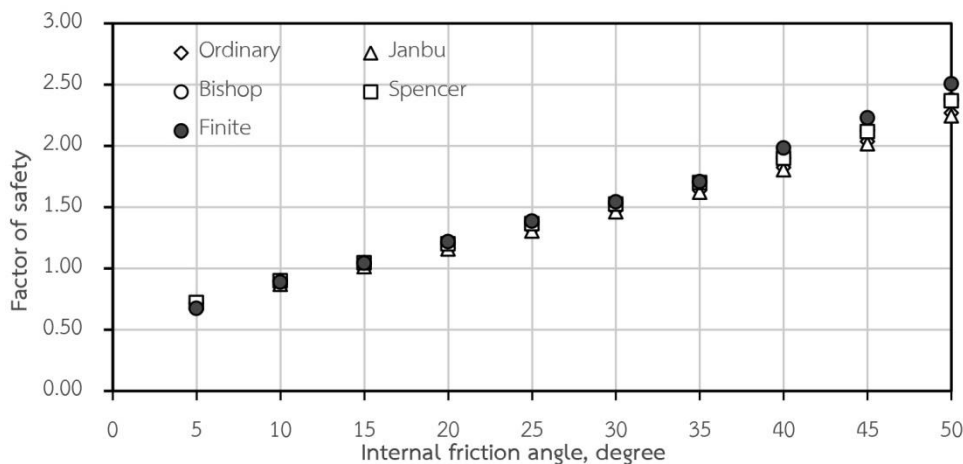
กรณีที่ 1 : ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายใน

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายใน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้ กรณีที่ใส่ค่ามุมเสียดทานภายในให้มีค่าน้อย ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าที่ต่ำกว่า 1.00 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีสมมูลขีดจำกัด คือวิธี Ordinary วิธี Janbu วิธี Bishop และวิธี Spencer และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 5 เนื่องจากเมื่อค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าน้อย แสดงว่าดินมีสมบัติที่ไม่ดี เกิดการเคลื่อนพังได้ง่าย ทำให้ความแปรปรวนในการคำนวณในแต่ละทฤษฎีนั้นน้อย และเมื่อปรับค่าให้มุมเสียดทานภายในมีค่ามากขึ้น ดิน

มีสมบัติที่ดีขึ้น มีการอัดแน่นระหว่างเม็ดดินที่ดีขึ้น และมีน้ำหนักมากขึ้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในแต่ละทฤษฎี โดยแบ่งค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยได้เป็น 2 ช่วง คือ วิธี Ordinary กับวิธี Janbu จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่น้อยกว่าวิธี Bishop วิธี Spencer และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากวิธีการคำนวณในวิธี Ordinary และวิธี Janbu มีการคำนวณที่ละเอียดน้อยกว่าวิธี Bishop และวิธี Spencer โดยการคำนวณด้วยวิธี Ordinary กับวิธี Janbu จะเป็นการคำนวณแรงในแนวแกนใดแกนหนึ่ง ซึ่งต่างจากวิธี Bishop และวิธี Spencer ซึ่งมีการคำนวณแรงในทุกแนวแกน และยังคงคำนึงถึงผลของโมเมนต์ด้วย [1] ส่วนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งชิ้นส่วนเป็นชิ้นเล็ก ๆ [10] เพื่อคำนวณแรงในทุกทิศทาง โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะใช้วิธี c- ϕ reduction [11] ทำให้ค่าที่ได้มีความละเอียดมากกว่าทฤษฎีของวิธีสมมูลขีดจำกัดบางทฤษฎีที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายใน

No.	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Internal Friction Angle	Factor of Safety, FS				
				Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	FE
1	20	18	5	0.712	0.719	0.720	0.721	0.675
2	20	18	10	0.871	0.870	0.899	0.899	0.889
3	20	18	15	1.024	1.016	1.048	1.047	1.043
4	20	18	20	1.166	1.158	1.203	1.201	1.219
5	20	18	25	1.318	1.307	1.368	1.365	1.387
6	20	18	30	1.476	1.463	1.530	1.526	1.545
7	20	18	35	1.639	1.623	1.707	1.700	1.708
8	20	18	40	1.823	1.805	1.904	1.899	1.984
9	20	18	45	2.036	2.017	2.127	2.118	2.229
10	20	18	50	2.269	2.247	2.376	2.369	2.508



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเสียดทานภายใน

กรณีที่ 2 : ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน กรณีที่ค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 0°

กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน โดยค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 0° ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันทุกทฤษฎี ไม่ว่าจะเป็นวิธี Ordinary วิธี Janbu วิธี Bishop และวิธี Spencer ในวิธีสมมูลขีดจำกัดหรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะมีค่ามากขึ้น ตามสมมติฐานที่ว่าเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินดีขึ้น สมบัติของดินก็ดีขึ้น มีความหนาแน่นมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจึงมีค่ามากขึ้น และเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่า $5-50 \text{ kN/m}^2$ ดินมีสมบัติที่เป็นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) โดยเมื่อคำนวณด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด (วิธี Ordinary วิธี Janbu วิธี Bishop วิธี Spencer) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากค่ามุมของแรงเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับ 0° ดินนั้นเป็นดินเหนียวที่มีสมบัติเป็น Undrained Condition จึงมีค่าสัมประสิทธิ์ความ

ปลอดภัยของทุกทฤษฎีใกล้เคียงกัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าน้อยกว่า สาเหตุเป็นเพราะวิธีการคำนวณมีความแตกต่างกัน การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการคำนวณแรงทุกทิศทางและเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ [10] ได้มากกว่าวิธีสมมูลขีดจำกัด

กรณีที่ 3 : ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน กรณีที่ค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 20°

กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน โดยค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 20° ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีสมมูลขีดจำกัดหรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่ามากขึ้น ตามสมมติฐานที่ว่าเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินดีขึ้น สมบัติของดินก็ดีขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจึงมีค่ามากขึ้น โดยกรณีนี้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ต่ำกว่าวิธีสมมูลขีดจำกัด เป็นเพราะ

การคำนวณด้วยวิธีในต์เอลิเมนต์ จะใช้หลักการวิธี C- ϕ reduction [11] เป็นการใช้หลักการลดทอนค่ากำลังของตัวแปร $\tan \phi$ และ C ลงจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ ทำให้ค่ามุมเสียดทานภายใน

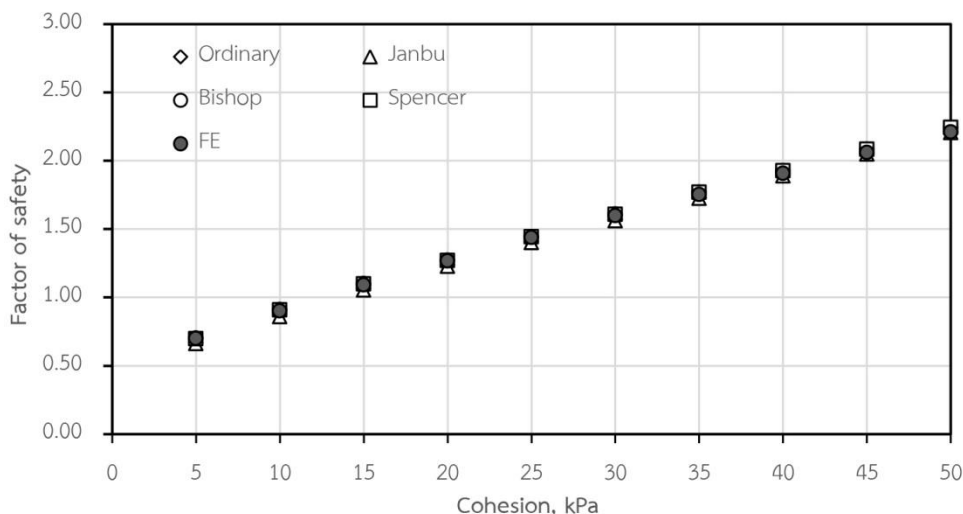
และค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีผลต่อการคำนวณโดยตรง จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวโดยค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 0°

NO.	Unit Weight (kN/m^3)	Cohesion (kN/m^2)	ϕ degree	Factor of Safety, FS				
				Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	FE
1	20	5	0	0.146	0.143	0.146	0.146	0.132
2	20	10	0	0.292	0.287	0.292	0.292	0.254
3	20	15	0	0.438	0.433	0.438	0.438	0.403
4	20	20	0	0.584	0.578	0.584	0.584	0.537
5	20	25	0	0.730	0.723	0.730	0.730	0.675
6	20	30	0	0.876	0.869	0.876	0.876	0.806
7	20	35	0	1.022	1.014	1.022	1.022	0.941
8	20	40	0	1.168	1.159	1.168	1.168	1.079
9	20	45	0	1.314	1.305	1.315	1.315	1.221
10	20	50	0	1.461	1.449	1.461	1.461	1.332

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยว โดยค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 20°

NO.	Unit Weight (kN/m^3)	Cohesion (kN/m^2)	ϕ degree	Factor of Safety, FS				
				Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	FE
1	20	5	20	0.670	0.662	0.701	0.698	0.700
2	20	10	20	0.877	0.860	0.911	0.908	0.902
3	20	15	20	1.062	1.053	1.100	1.098	1.091
4	20	20	20	1.236	1.228	1.271	1.270	1.267
5	20	25	20	1.410	1.402	1.443	1.442	1.438
6	20	30	20	1.570	1.560	1.609	1.608	1.598
7	20	35	20	1.729	1.724	1.768	1.769	1.752
8	20	40	20	1.889	1.889	1.925	1.925	1.907
9	20	45	20	2.048	2.048	2.083	2.083	2.060
10	20	50	20	2.207	2.205	2.240	2.242	2.211



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงยึดเหนี่ยวโดย $\phi = 20^\circ$

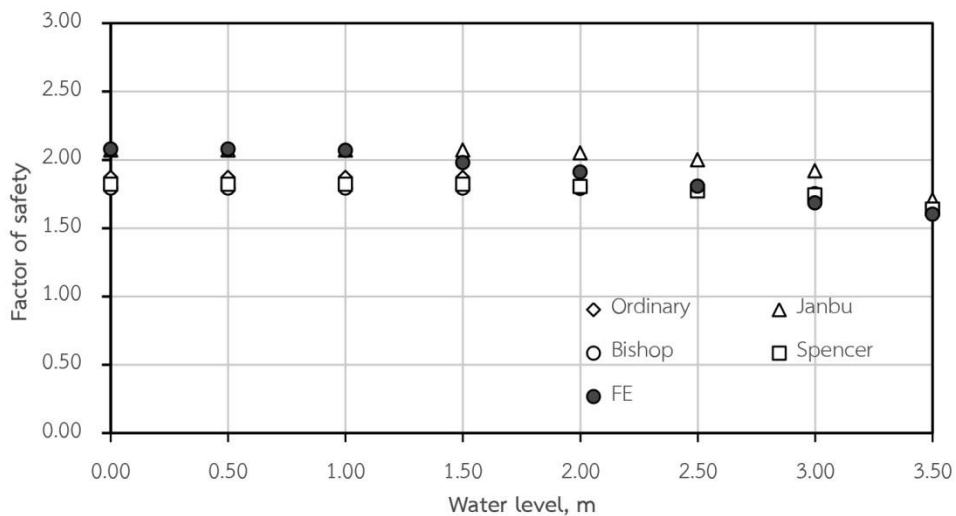
3.3 ผลการวิเคราะห์ความลาดชันคันดินป้องกันน้ำท่วม

ผลการศึกษาอิทธิพลของระดับน้ำในการวิเคราะห์ความลาดชัน โดยใช้หน้าตัดคันดินป้องกันน้ำท่วม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยทั้งสองวิธีมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อระดับน้ำในคันดินมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าลดลงมาตามค่าระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 8 เนื่องจากแรงจากน้ำหนักและการไหลของน้ำ เปลี่ยนเป็นแรงกระทำต่อคันดินทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าลดลง โดยวิธี Janbu มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่สูงที่สุด ส่วนวิธี Bishop วิธี Ordinary และวิธี Spencer มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยใกล้เคียงกัน ซึ่งแต่ละทฤษฎีของวิธีสมมูลขีดจำกัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแตกต่างกันไม่มากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ การคำนวณวิธีสมมูลขีดจำกัดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยคงที่ในช่วงที่ระดับน้ำ

มีระดับต่ำกว่า 2.00 เมตร และมีค่าลดลงเมื่อมีระดับน้ำสูงกว่า 2.00 เมตร ขึ้นไป แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ลดลงตั้งแต่เริ่มมีระดับน้ำสูง 0.50 เมตร และค่อย ๆ ลดลงตามระดับน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าระดับน้ำมีผลต่อการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า สาเหตุเป็นเพราะการแบ่งชิ้นส่วนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบ 15-Node Triangular Element, Coarse Mesh Generation จะมีความละเอียดและสอดคล้องกับธรรมชาติ [10] มากกว่าวิธีสมมูลขีดจำกัดที่เป็นการแบ่งชิ้นส่วนเพียงแค่ระนาบเดียว ซึ่งเมื่อมีน้ำมากจะทำให้แต่ละชิ้นส่วน ชิ้นส่วนของไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการกระจายแรงที่ดีกว่า เนื่องจากว่าแรงได้ถ่ายเข้าสู่เม็ดดินขนาดเล็กทุกทิศทาง และมีการคำนวณโดยใช้หลัก C- ϕ reduction [11] ที่จะมีความละเอียดกว่าวิธีสมมูลขีดจำกัดที่บางวิธีเป็นการคำนวณแบบ Trial and Error ที่มีความยุ่งยากซับซ้อน เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลที่ละเอียดกว่า เมื่อมีระดับน้ำใด ๆ มาเกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 6 และแนวการเคลื่อนพังของ

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของคันดินป้องกันน้ำท่วม

Water Level (m)	Safety of Factor				
	Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer	FE
0.00	1.871	2.072	1.792	1.820	2.079
0.50	1.871	2.072	1.792	1.820	2.078
1.00	1.871	2.072	1.792	1.820	2.069
1.50	1.871	2.072	1.792	1.820	1.979
2.00	1.804	2.050	1.790	1.805	1.910
2.50	1.786	2.001	1.790	1.772	1.808
3.00	1.733	1.920	1.752	1.743	1.686
3.50	1.612	1.709	1.611	1.640	1.602



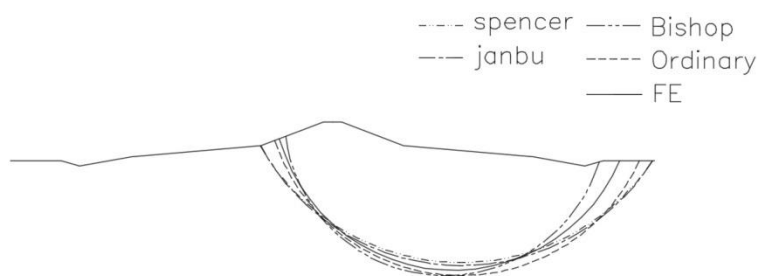
รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกับค่าระดับน้ำของคันดินป้องกันน้ำท่วม

คันดินตัวอย่าง เมื่อระดับน้ำเท่ากับ 0.00 เมตร แนวการเคลื่อนพังจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งวิธีสมมูลชิดจำกัด และ ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 และเมื่อระดับน้ำเพิ่มมากขึ้นจนไปถึงระดับสูงสุดของคันดิน (3.50 เมตร) แนวการเคลื่อนพังก็มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งวิธีสมมูลชิดจำกัด และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยแนวของการเคลื่อนพังไปผ่านที่ชั้นดินชั้นสุดท้ายเนื่องจากเป็นชั้นดินอ่อนที่สุด ซึ่งเคลื่อนพังได้

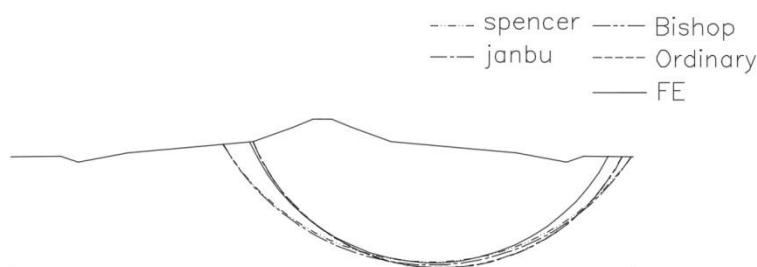
ง่ายที่สุด สำหรับผลกระทบของค่าโมดูลัสของยัง (Young Modulus, E_{ur}) ที่เป็นปัจจัยที่ต่างกันของโปรแกรม KUSlope และ โปรแกรม Plaxis นั้น ผลการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสของยังมีผลต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่น้อยมาก ค่าโมดูลัสต้องเปลี่ยนแปลงค่าอย่างมาก ถึงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเปลี่ยนแปลง สาเหตุเป็นเพราะว่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้วิธี C- ϕ reduction

ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และค่ามุมของแรง
เสียดทานภายในจะมีผลต่อการคำนวณโดยตรงมาก

กว่าค่าโมดูลัสของยัง



รูปที่ 7 แนวการเคลื่อนพังของคันดินป้องกันน้ำท่วมกรณีที่มีระดับน้ำมากกระทำต่ำสุด (0.00 เมตร)



รูปที่ 8 แนวการเคลื่อนพังของคันดินป้องกันน้ำท่วมกรณีที่มีระดับน้ำมากกระทำสูงสุด (3.50 เมตร)

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินระหว่างวิธีสมมูลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่สมเหตุสมผลกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด ดังที่แสดงในการศึกษาด้วยวิธีต่าง ๆ กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจากงานวิจัยที่ผ่านมา วิธีการคำนวณทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีสมมูลขีดจำกัดถือว่ามีความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา มีความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละทฤษฎี กรณีวิเคราะห์ด้วยหน้าตัดตัวอย่าง โดยเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติของดิน ผล

ที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ต่ำกว่าวิธีสมมูลขีดจำกัดอยู่เล็กน้อย โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของดินวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเป็นเพราะว่าค่ามุมของแรงเสียดทานภายในและค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินนั้น การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลต่อการคำนวณโดยตรงมากกว่าการคำนวณด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด ตามหลักการวิธี C- ϕ Reduction ที่เป็นการใช้หลักการลดทอนค่ากำลังของตัวแปร $\tan \phi$ และ C ลงจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในและค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย และจากการศึกษาค้นดินป้องกันน้ำท่วม จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระดับ

น้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำ แต่วิธีสมดุสิตจำกัดค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับน้ำสูงกว่า 2.00 เมตรขึ้นไป ทำให้สรุปได้ว่าระดับน้ำมีผลต่อการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่าวิธีสมดุสิตจำกัด และสำหรับผลกระทบของค่าโมดูลัสของยัง (Young Modulus, E_{ur}) ที่เป็นปัจจัยที่ต่างกันของโปรแกรม KUslope และโปรแกรม Plaxis นั้น สรุปได้ว่าค่าโมดูลัสของยังมีผลต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่น้อยมาก เป็นเพราะว่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้วิธี C- ϕ Reduction ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และค่ามุมของแรงเสียดทานภายในจะมีผลต่อการคำนวณโดยตรงมากกว่าค่าโมดูลัสของยัง ซึ่งทั้งการศึกษาทั้ง 3 กรณี ทำให้สรุปได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่สมเหตุสมผลกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุสิตจำกัด ทั้งนี้ในบทความนี้เป็นการศึกษาในกรณีดินถมเท่านั้น สำหรับงานดินขุด ค้นดินที่เกิดจากธรรมชาติ หรือกรณีอื่น ๆ ต้องศึกษาแยกเป็นอีกกรณีเพื่อหาข้อสรุปต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ไวส โปรเจ็ค คอนซัลต์ติง จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลเจาะสำรวจดินตัวอย่างทั้งหมดเพื่อนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยในครั้งนี้ จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. รายการอ้างอิง

- [1] พัลลภ วิสุทธิ์เมธาบุญกุล, 2558, คู่มือวิศวกรรมฐานราก, ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 792 น.
- [2] วีรยา ฉิมอ้อย, 2544, การวิเคราะห์และออกแบบฐานราก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 289 น.

- [3] Whitman, R.V. and Bailey, W.A., 1967, Use of computers for slope stability analysis, J. Soil Mech. Found. Div. 93(SM4): 475-498.
- [4] รัฐธรรม อิศโรฬาร, มปป., คู่มือการใช้โปรแกรม KUslope version 2.0, ภาควิชาวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 45 น.
- [5] Spencer, E., 1967, A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces, Géotechnique 17(1): 11-26.
- [6] Brinkgreve, R.B.J., 2002, PLAXIS 2D Version 8 Manual, A.A. Balkema Publishers, Netherlands, 202 p.
- [7] Roscience, Inc., 2001-2004, Application of the Finite Element Method to Slope Stability, Roscience, Inc., Toronto.
- [8] ฝ่ายวิศวกรรมปฐพี, 2555, รายงานผลการเจาะสำรวจดิน ค้นดินป้องกันน้ำท่วม สนามบินสุวรรณภูมิ, บริษัทไวส โปรเจ็ค คอนซัลต์ติง จำกัด, กรุงเทพฯ.
- [9] Geotechnical Info, Young's Modulus of Soil, Available Source: http://www.geotechnicalinfo.com/youngs_modulus.Html.
- [9] สุขเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2550, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 196 น.
- [10] วารุณี กะการดี, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และรัฐธรรม อิศโรฬาร, 2556, การศึกษาความเหมาะสมของ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดงานชุดโดย
เปรียบเทียบวิธีสมมูลจำกัด ไฟไนต์เอลิเมนต์ และ
สมมูลจำกัดร่วมกับการพิจารณาหน่วยแรงในมวล

ดิน, น. 339-346, การประชุมวิชาการวิศวกรรม
โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, โรงแรมดิเอ็มเพรส
เชียงใหม่, เชียงใหม่.