

วิธีอย่างง่ายในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเหนียวที่กำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก

วรรณวรงค์ รัตนานิคม¹ และสยาม ยัมศิริ^{1*}

wanwarangr@eng.buu.ac.th¹, ysiam@buu.ac.th^{1*}

¹ หน่วยงานวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

(Received: 27-Jun-2023 Revised: 5-Sep-2023 Accepted: 14-Sep-2023)

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมีความสำคัญมากในงานด้านวิศวกรรมปฐพี ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในงานขุดและถม การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจะช่วยให้สามารถกำหนดรูปร่างของลาดดินที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการก่อสร้างใหม่ และช่วยประเมินความเสี่ยงของเสถียรภาพลาดดินในโครงสร้างเดิม นอกจากนี้ยังสามารถช่วยในการประเมินกำลังของดินในกรณีที่เกิดการวิบัติได้จากการคำนวณย้อนกลับ ปัจจุบันมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหลากหลายวิธี โดยแต่ละวิธีมีสมมติฐาน ข้อจำกัดและความซับซ้อนที่แตกต่างกันออกไป การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยละเอียดส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือคำนวณ เช่น ซอฟต์แวร์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัดหรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่งผลให้การประเมินเสถียรภาพลาดดินเบื้องต้นในหน้างานทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับชั้นดินเหนียวที่กำลังเพิ่มขึ้นตามความลึกโดยวิธี Morgenstern and Price และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่าง ๆ ได้แก่ มุมลาดเอียง, ความสูงของลาดดิน, ความลึกของชั้นดินแข็ง, น้ำหนักบรรทุก และรอยแตกเนื่องจากแรงดึง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเบื้องต้น จากผลการวิจัยพบว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีมีน้ำหนักบรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง และกรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก แต่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงมีค่าต่ำ แต่สำหรับกรณีที่มีทั้งน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกเนื่องจากแรงดึง ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 ในกรณีที่มุมลาดเอียงสูง

คำสำคัญ: ความลาด เสถียรภาพ แผนภูมิเสถียรภาพความลาด ดินเหนียว กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

Simplified Method for Analyzing Slope Stability of Clay Layer of Increasing Strength With Depth

Wanwarang Ratananikom¹ and Siam Yimsiri^{1*}
wanwarangr@eng.buu.ac.th¹, ysiam@buu.ac.th^{1*}

¹ Sustainable Civil Engineering and Infrastructure Research Unit, Burapha University

(Received: 27-Jun-2023 Revised: 5-Sep-2023 Accepted: 14-Sep-2023)

Abstract

Stability analysis of slopes plays a crucial role in geotechnical engineering which is often associated with excavation and filling works. It helps designing the layout of a newly constructed slope and assessing the risk of failure of an existing slope. Moreover, it enables a strength of soil of a failed slope to be back-calculated. Nowadays, there are a number of slope stability analysis methods, each of which has different hypothesis, limitations, and complexities. Most detailed slope stability analyses involve computational tools, i.e. computer software with a finite element or limit equilibrium methods. As a result, an initial assessment of slope stability on site is difficult in practice. Therefore, the objective of this research is to propose a set of slope stability charts for homogeneous clay with increasing strength with depth by Morgenstern and Price method. It also considers the factors affecting slope stability such as slope angle, slope height, depth of firm subsoil, surcharge factor, and tension crack factor. The result will be beneficial for preliminary estimation of slope stability analysis. Based on the findings, the slope stability chart developed in this study is considered reliable for practical applications. Errors of safety factors analyzed from the research are low in case of (i) the surcharge factor without considering the tension crack factor and (ii) the tension crack factor without considering the surcharge factor. Nevertheless, it is important to note that the safety factors obtained in this research are comparatively lower than those derived from the GeoStudio 2012 analysis when considering both the surcharge factor and tension crack factor simultaneously, particularly in situations with steep slope angles.

Keywords: slope, stability, slope stability chart, clay, undrained shear strength

1. บทนำ

ลาดดินเป็นสภาพที่เกิดขึ้นเมื่อดินมีความต่างระดับเนื่องจากงานขุดหรืองานถมดิน มวลดินบริเวณลาดดินมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง ลาดดินจะมีเสถียรภาพอยู่ได้ก็ต่อเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่ามากเพียงพอที่จะต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลหรือการวิบัติ สาเหตุของการเลื่อนไถลของลาดดินอาจเกิดจากการรบกวนจากภายนอก เช่น การขุดดินที่ด้านล่างของลาดดิน, การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ (pore water pressure), หรือการค่อยๆ สูญเสียกำลังของดิน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วการเลื่อนไถลของลาดดินเกือบทุกกรณีก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือการวิบัติจะเริ่มจากการเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึงที่บริเวณส่วนบนของลาดดิน ระหว่างการเลื่อนไถลส่วนบนของลาดดินจะเคลื่อนตัวลงในขณะที่ส่วนล่างจะบีบอัดตัว ดังนั้นหากผิวเดิมของลาดดินเป็นระนาบภายหลังจากการเลื่อนไถล ผิวดินจะมีลักษณะคล้ายรูปตัว S

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมีความสำคัญมากในงานด้านวิศวกรรมปฐพี ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับงานถมหรืองานขุดสำหรับโครงสร้างต่างๆ เช่น ทางหลวง, ทางรถไฟ, หรือคลอง การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะช่วยให้สามารถกำหนดรูปร่างของลาดดินที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ ช่วยประเมินความเสี่ยงของเสถียรภาพลาดดินในโครงสร้างเดิม รวมถึงช่วยประเมินกำลังของดินเมื่อเกิดการวิบัติ

ปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมีด้วยกันหลากหลายวิธีและแต่ละวิธีมีสมมติฐานข้อจำกัดและความซับซ้อนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งวิธี method of slice เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะแบ่งมวลดินที่อยู่เหนือระนาบการเลื่อนไถล (slip surface) เป็นชิ้นส่วนย่อยตามแนวตั้ง โดยสามารถสมมุติระนาบการเลื่อนไถลเป็นแบบวงกลม (circular slip surface) หรือไม่เป็นวงกลม (non-circular slip surface) วิธี circular slip surface จะพิจารณาสมมูลของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของ

วงกลมของมวลดินทุกชิ้นส่วน ส่วนวิธี non-circular slip surface สามารถพิจารณาสมมูลของแรงอย่างเดียว หรือสมมูลของแรงและโมเมนต์พร้อมกัน นักวิจัยจำนวนมากได้เสนอสมการการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยอาศัยหลักการเหล่านี้ [1-3] อย่างไรก็ตามจากสมการที่ซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทางคอมพิวเตอร์ เช่น ซอฟต์แวร์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลชุดจำกัดหรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่งผลให้การประเมินเสถียรภาพลาดดินเบื้องต้นในหน้างานทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นในกรณีที่มีรูปแบบโครงสร้างลาดดินและคุณสมบัติดินที่ไม่ซับซ้อนวิธีการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพลาดดินที่เสนอในรูปแบบแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Slope stability chart) จะสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหาง่ายขึ้น

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพลาดดินเบื้องต้นอย่างรวดเร็ว แผนภูมิเสถียรภาพความลาดเริ่มต้นพัฒนาโดย Taylor [4, 5] สำหรับดินเหนียวเนื้อเดียวแบบหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดยใช้พื้นฐานของหลักการวิวงกลมเสียดทาน (friction circle method) และกำหนดให้ระนาบการเคลื่อนตัวเป็นแบบวงกลม กำลังการรับแรงเฉือนของดินเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ แผนภูมิเสถียรภาพความลาดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (N_s) ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (β), มุมเสียดทาน (ϕ) และ depth factor (D) โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาดนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความสูงวิกฤตของความลาด (H_c) และอัตราส่วนปลอดภัย (FS)

ต่อมาได้มีการพัฒนาแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาลาดดินอย่างต่อเนื่อง [6-8] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยแรกที่ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัญหาลาดดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึกคือ Gibson และ Morgenstern [9] ซึ่งนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และมุมลาดเอียง (β) สำหรับกรณีที่ดินมีกำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับศูนย์ที่ผิวดิน งานวิจัยนี้ถูกพัฒนาต่อโดย Hunter และ Schuster

[10] เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาของลาดดินที่มีค่ากำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมากกว่าศูนย์ที่ผิวดินได้ โดยการวิเคราะห์ของทั้งสองการศึกษานี้มีตัวแปรเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัวคือ strength gradient parameter (M) อย่างไรก็ตามทั้งสองการศึกษานี้ยังคงไม่ได้พิจารณาถึงระดับน้ำใต้ดินที่ต้องเผชิญบริเวณนอกลาดดิน รวมถึงปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกทุกบริเวณเนินดินและผลของรอยแตกเนื่องจากแรงดึงของลาดดินซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ได้ Koppula [11] ได้ทำการวิเคราะห์ optimization ในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ของ [10]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับชั้นดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึกที่สามารถมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมากกว่าศูนย์ที่ผิวดินได้ และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว, ค่าความลาดเอียง, ความสูงของลาดดิน ความลึกของชั้นดินแข็ง, น้ำหนักบรรทุก และปัจจัยของรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (โดยไม่ได้พิจารณาระดับน้ำใต้ดินที่ต้องเผชิญบริเวณนอกลาดดิน)

3. ขอบเขตการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

ส่วนที่ 1 ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (วิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัย FS) ในกรณีชั้นดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก คือ มุมเสียดทานภายในของดินเท่ากับศูนย์ (friction angle, $\phi = 0$) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength, s_u) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยใช้วิธี Morgenstern and Price และแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดิน (ดูรูปที่ 1) ได้แก่

1. ปัจจัยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ คือ พิจารณากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน (s_{u0}) เท่ากับ 10 kPa และความเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่เพิ่มขึ้นตามความลึก (Δs_u) ระหว่าง 1 ถึง 5 kPa/m

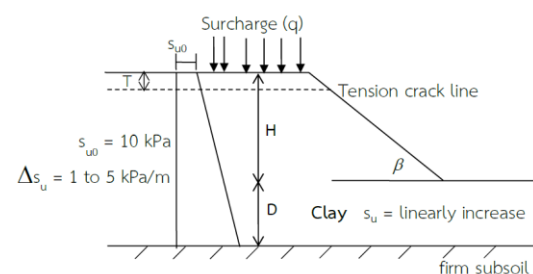
2. ปัจจัยค่าความลาดเอียง คือ พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน (β) ระหว่างมุม 0° ถึง 90°

3. ปัจจัยความสูง (depth factor, D/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของชั้นดินแข็ง (depth of firm subsoil, D) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 5

4. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (surcharge, q) และน้ำหนักของลาดดิน (weight of soil, γH) ระหว่าง 0 ถึง 0.5

5. ปัจจัยของรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (tension crack factor, T/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของ tension crack (T) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 0.5

ส่วนที่ 2 นำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหรืออัตราส่วนปลอดภัย FS ของทุกกรณี (ส่วนที่ 1) มาสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Slope stability chart) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีชั้นดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก



รูปที่ 1 รูปแบบและลักษณะของลาดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

4. ผลการศึกษา

จากการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสร้างเป็นกรณีเพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้วยโปรแกรม GeoStudio 2012 จำนวน 15,000 กรณี จากนั้นนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหรืออัตราส่วนปลอดภัยของทุกกรณีมาสร้างเป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีลาดดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังนี้

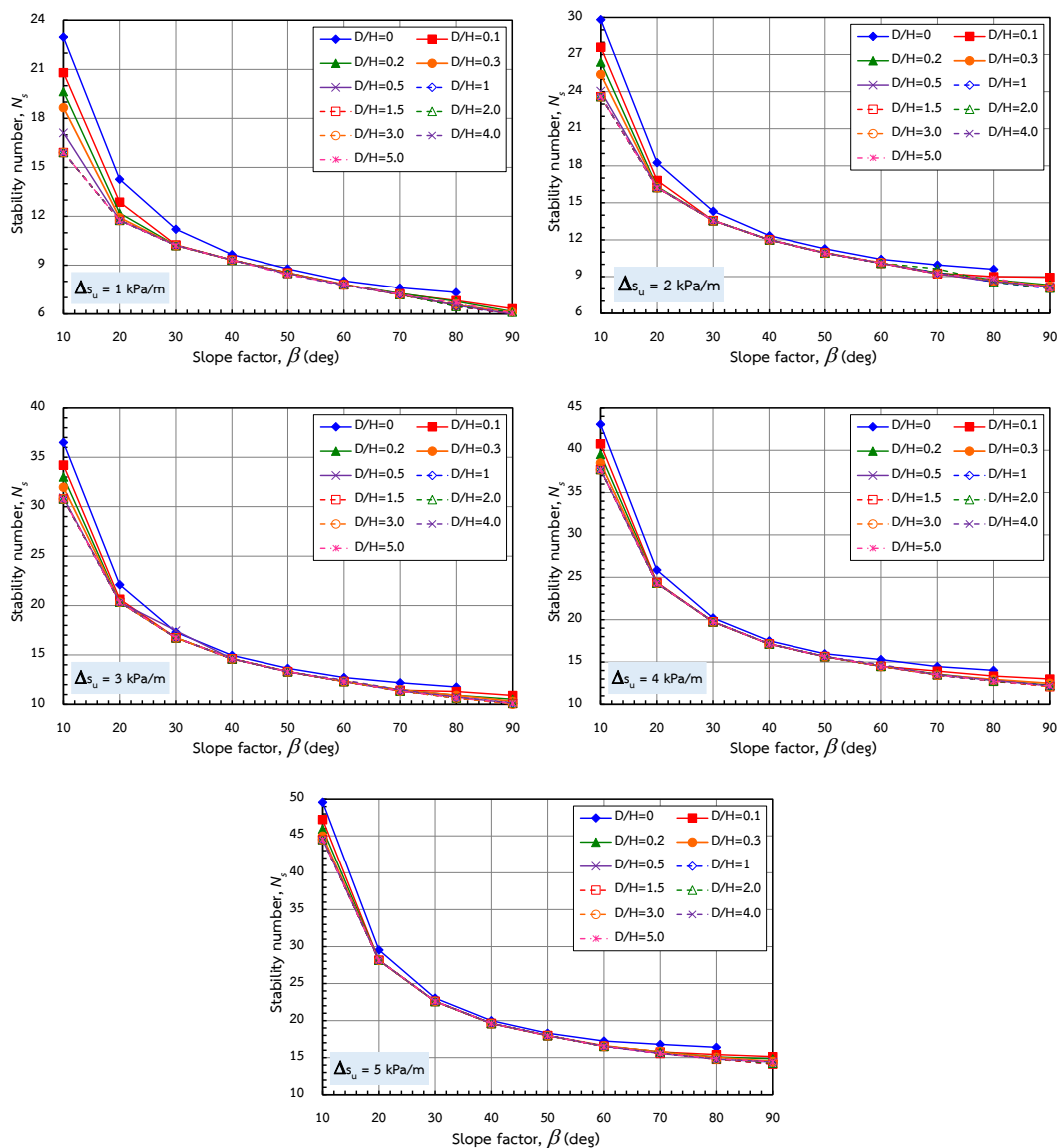
4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดพื้นฐาน (ไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและไม่มีการแยกเนื่องจากแรงดึง)

ผลการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพลาดดินเหนียวมีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวดิน (s_{u0}) เท่ากับ 10 kPa และ Δs_u ระหว่าง 1 ถึง 5 kPa/m ($\phi=0^\circ$, γ คงที่) ในกรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและไม่มีการแยกเนื่องจากแรงดึง สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาด ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความ

ลาด (stability factor, N_s) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดเอียง (β) และปัจจัยความสูง (D/H) ค่าความสูงวิกฤตของความลาด (H_c) และอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$H_c = N_s \frac{s_{u0}}{\gamma} \quad (1)$$

$$FS = \frac{H_c}{H} \quad (2)$$



รูปที่ 2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของชั้นดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก
กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุก และไม่มีการแยกเนื่องจากแรงดึง

4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีมีปัจจัย น้ำหนักบรรทุกและรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

เพื่อให้การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพลาดดินครอบคลุม (i) ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก และ (ii) ปัจจัยของรอยแตกเนื่องจากแรงดึง ผู้วิจัยจึงได้สร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยดังกล่าวดังสมการที่ (3)

$$FS = \mu_q \mu_t FS_0 \quad (3)$$

เมื่อ FS = ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (กรณีมีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกเนื่องจากแรงดึง)

FS_0 = ค่าอัตราส่วนปลอดภัยพื้นฐาน (ไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง โดยวิเคราะห์จากรูปที่ 2 และสมการที่ 2)

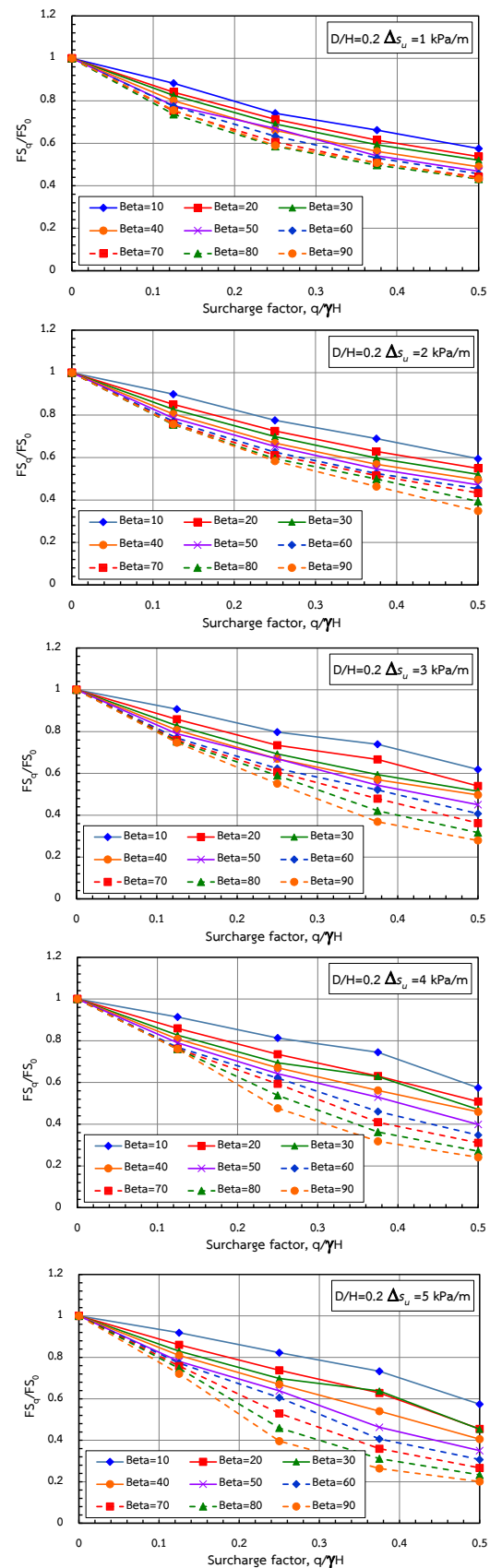
μ_q = ค่าปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก

μ_t = ค่าปรับแก้ปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

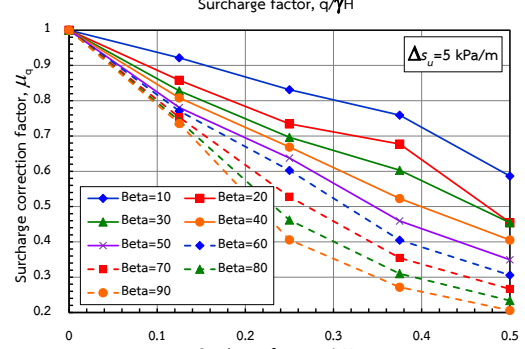
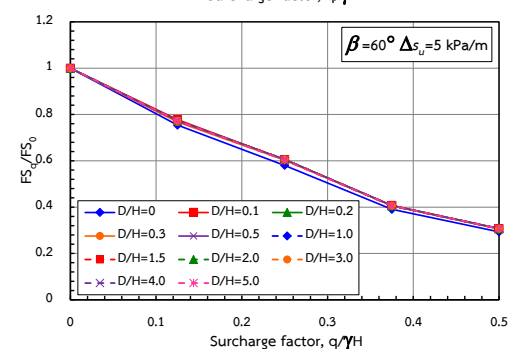
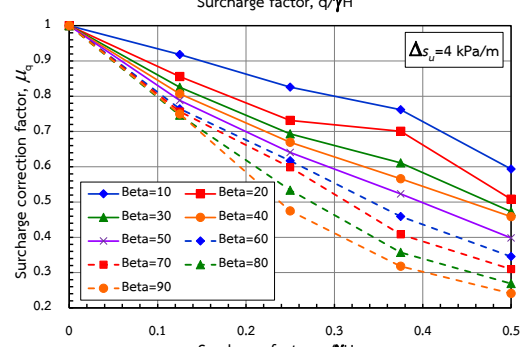
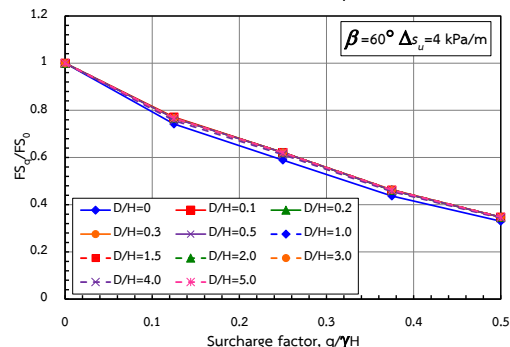
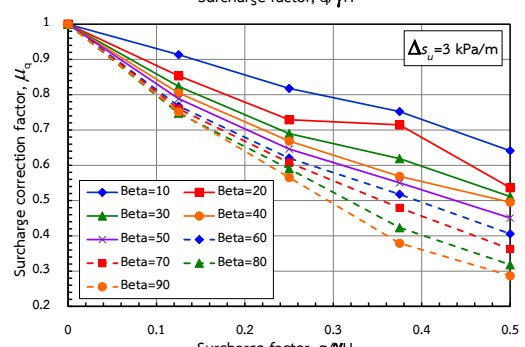
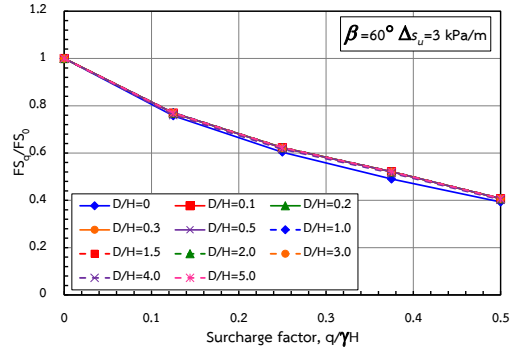
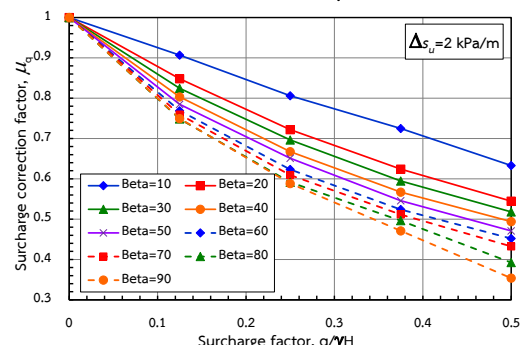
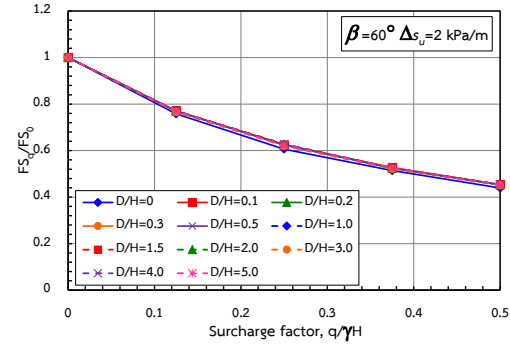
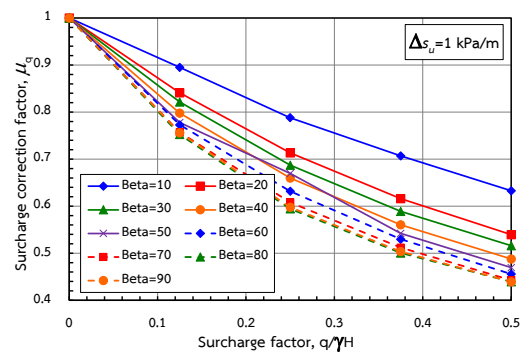
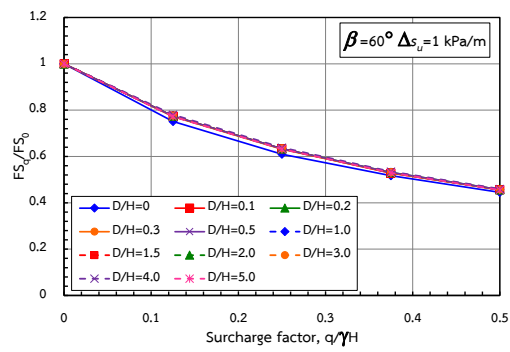
โดยค่าปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (μ_q) และค่าปรับแก้ปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (μ_t) สามารถวิเคราะห์ได้จากแผนภูมิปรับแก้ดังต่อไปนี้

4.2.1 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัย น้ำหนักบรรทุก

แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุกถูกวิเคราะห์มาจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยน้ำหนักบรรทุก ($q/\gamma H$) และ FS_q/FS_0 (สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยในกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกและไม่มีน้ำหนักบรรทุกที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม GeoStudio 2012) ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3 (β แปรผัน, $D/H=0.2$) และรูปที่ 4 ($\beta=60^\circ$, D/H แปรผัน)



รูปที่ 3 ผลของปัจจัยน้ำหนักบรรทุกต่อค่าอัตราส่วน
ปลอดภัย FS_q/FS_0 (β แปรผัน $D/H=0.2$)



รูปที่ 4 ผลของปัจจัยน้ำหนักบรรทุกต่อค่าอัตราส่วน
ปลอดภัย FS_u/FS_0 ($\beta=60^\circ$ D/H แปรผัน)

รูปที่ 5 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก

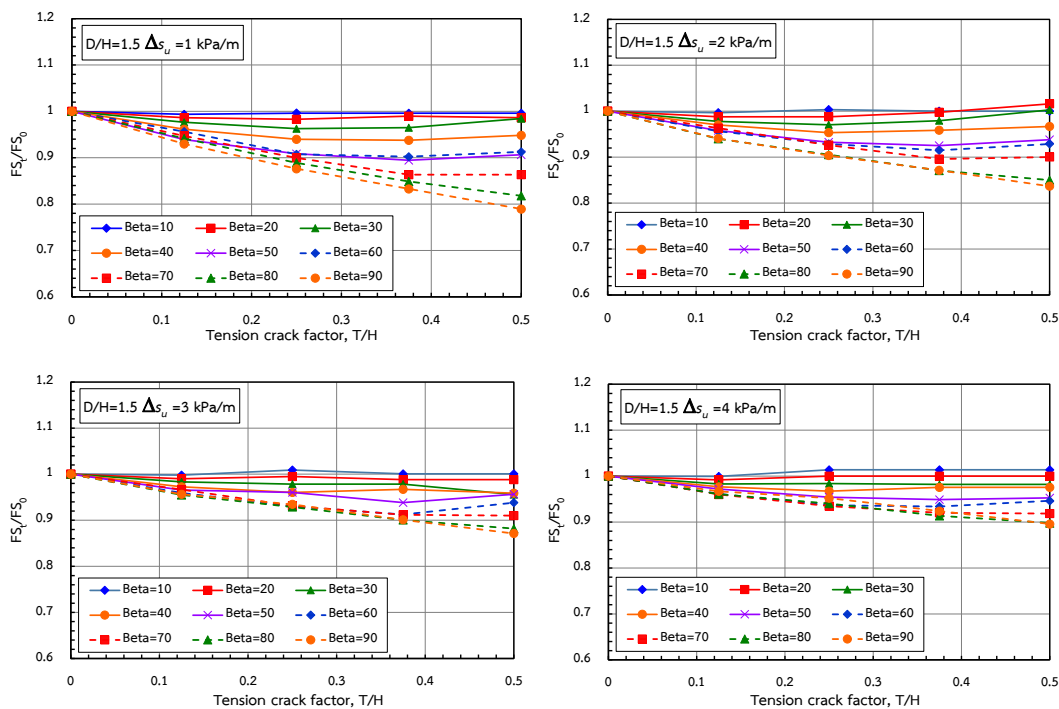
จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่าเมื่อลาดดินมีน้ำหนักรรทุกกระทำเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละกรณีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ไม่มีน้ำหนักรรทุกกระทำ นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีน้ำหนักรรทุกกระทำจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมลาดเอียง (β) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 3) แต่มีแนวโน้มคงที่เมื่อปัจจัยความสูง (D/H) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4) นั้นหมายความว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีน้ำหนักรรทุกกระทำแปรผันตามมุมลาดเอียงแต่ไม่แปรผันตามปัจจัยความสูงของลาดดิน ดังนั้นแผนภูมิปรับแก้ปัจจัยความสูงจึงถูกวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยของ FS_u/FS_0 (นิยามเป็นสัญลักษณ์ μ_u) ที่ค่ามุมลาดเอียงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5

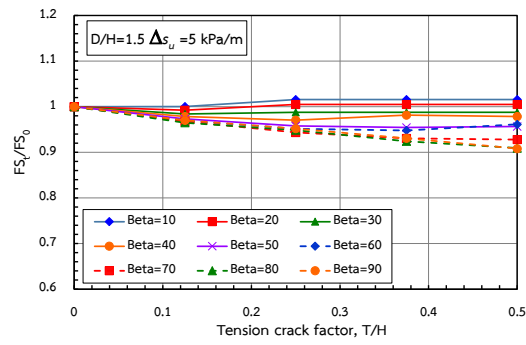
4.2.2 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอย

แตกเนื่องจากแรงดึง

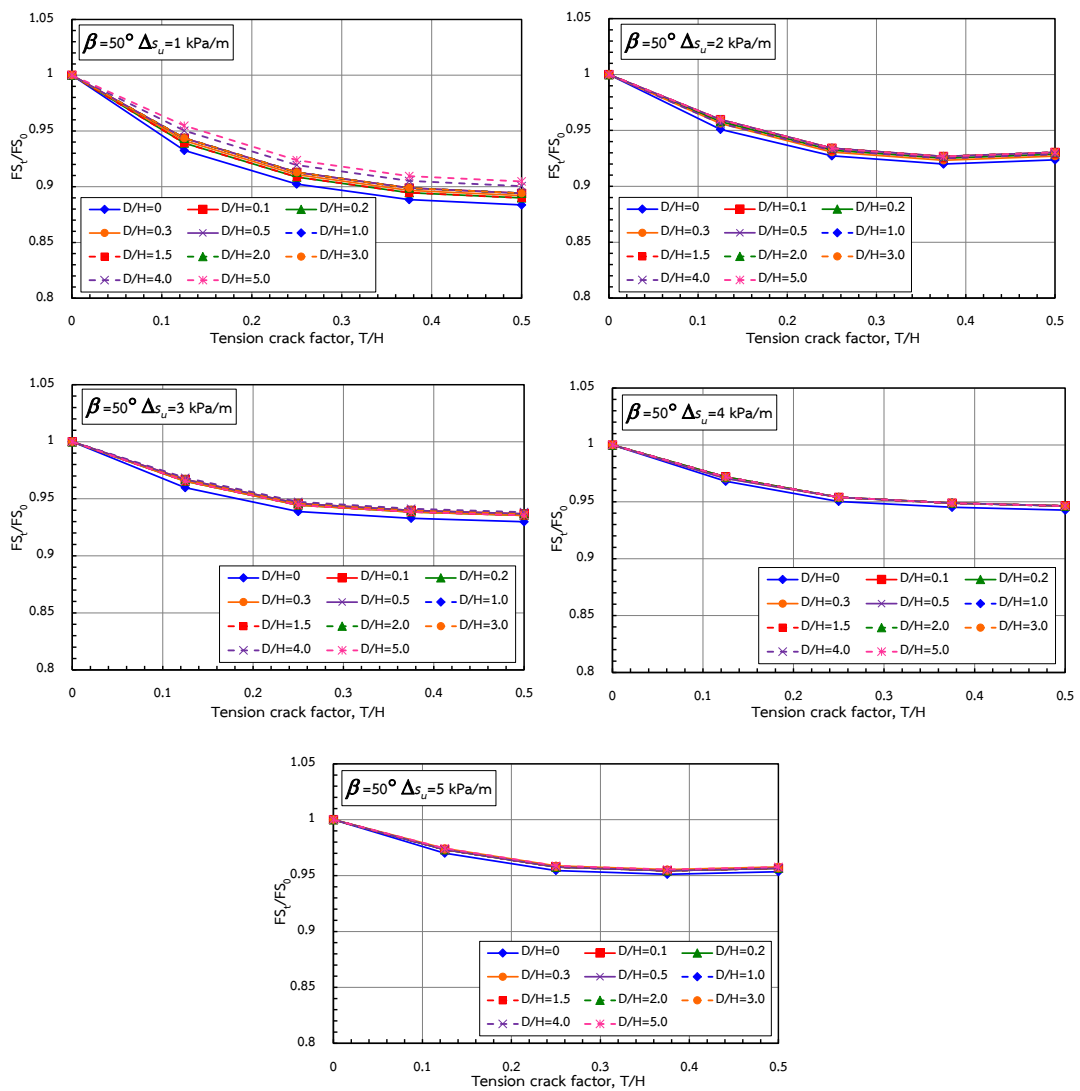
แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึงถูกวิเคราะห์มาจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (T/H) และ FS_u/FS_0 (สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยในกรณี

ที่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงและไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม GeoStudio 2012) ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6 (β แปรผัน, D/H=1.5) และ รูปที่ 7 ($\beta=50^\circ$, D/H แปรผัน) พบว่า เมื่อลาดดินมีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละกรณีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง นอกจากนั้นค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมลาดเอียง (β) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 6) แต่มีแนวโน้มคงที่เมื่อปัจจัยความสูง (D/H) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 7) นั้นหมายความว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงแปรผันตามมุมลาดเอียงแต่ไม่แปรผันตามปัจจัยความสูงของลาดดิน ดังนั้นแผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึงจึงถูกวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยของ FS_u/FS_0 (นิยามเป็นสัญลักษณ์ μ_u) ที่ค่ามุมลาดเอียงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8

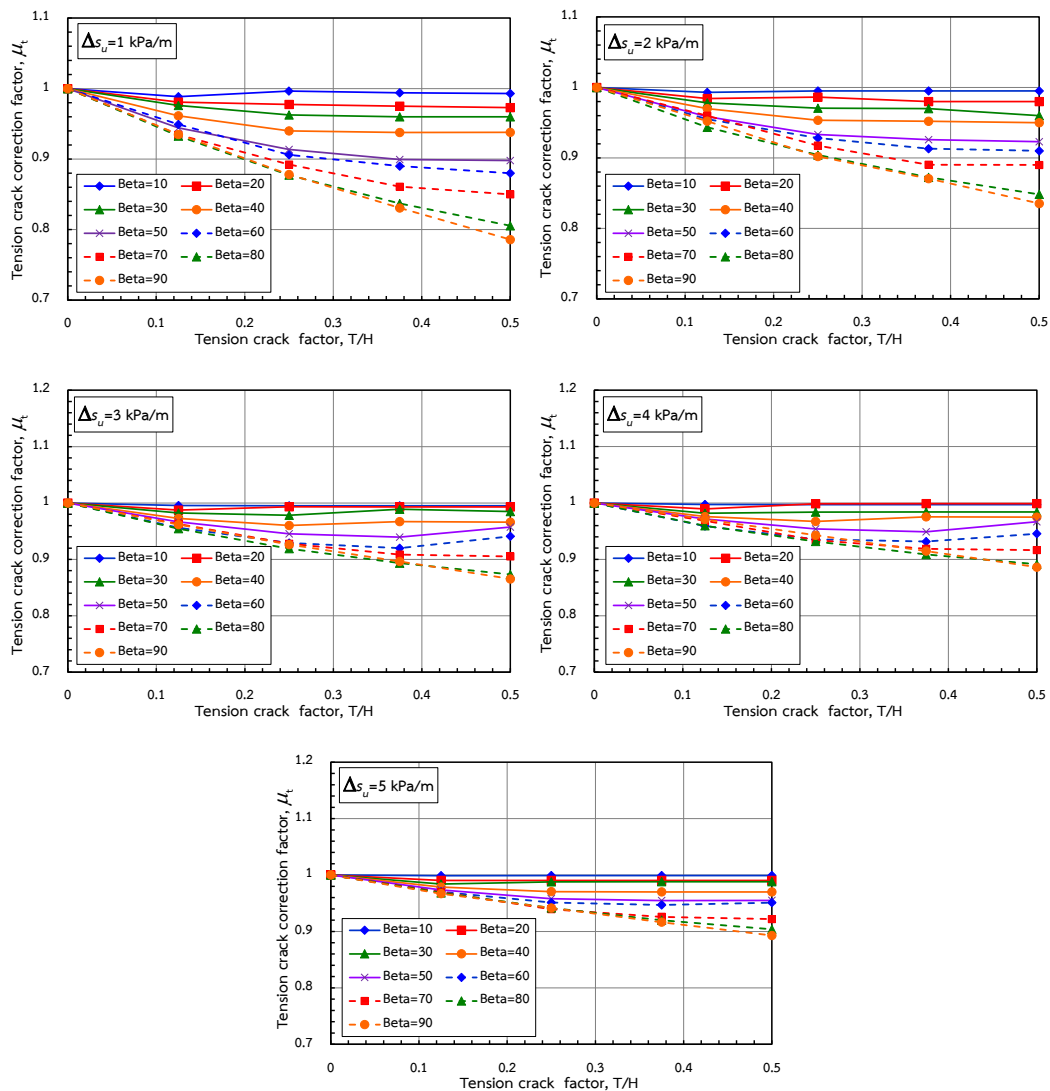




รูปที่ 6 ผลของปัจจัยของรอยแตกเนื่องจากแรงดึงต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_u/FS_0
(β แปรผัน $D/H=1.5$)



รูปที่ 7 ผลของปัจจัยของรอยแตกเนื่องจากแรงดึงต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_u/FS_0
($\beta=50^\circ$ D/H แปรผัน)



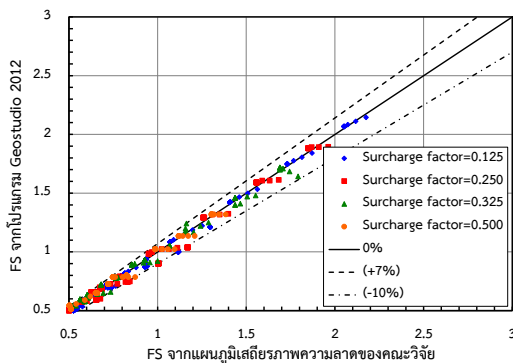
รูปที่ 8 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012

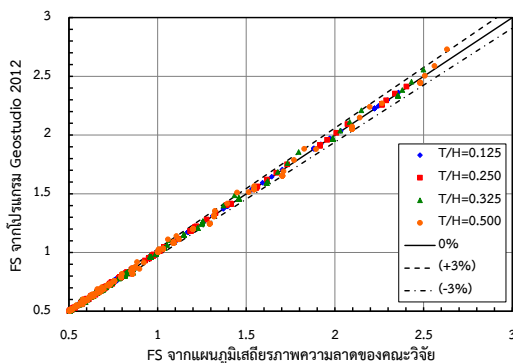
ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 9,000 กรณี ประกอบด้วย (i) β เท่ากับ 10° , 20° , 30° , 40° , 50° และ 60° , (ii) D/H เท่ากับ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 และ 5, (iii) $q/\gamma H$ เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5, (iv) T/H เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5, และ (v) Δs_u เท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 kPa/m

รูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +7% ถึง -10% รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหนักรรทุก แต่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +3% ถึง -3% และเมื่อพิจารณาปัญหากรณีที่ทั้งน้ำหนักรรทุกและมีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (รูปที่ 11) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นคืออยู่ระหว่าง

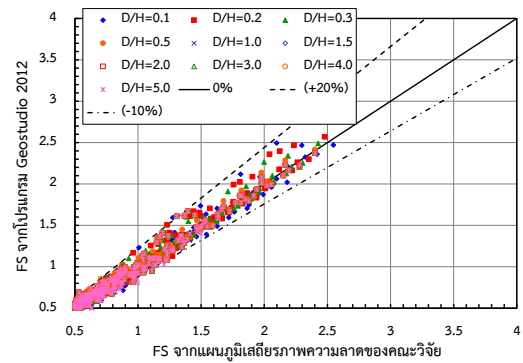
+20% ถึง -10% อย่างไรก็ตามแม้ว่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาดจะมีค่าค่อนข้างสูง แต่จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะ lower prediction คือ ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 นั้นหมายความว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดนี้ยังคงใช้งานได้อย่างปลอดภัย แต่อาจส่งผลทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้นเพราะความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าของค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากการใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัย



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรบรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหนักรบรรทุก แต่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรบรรทุกและ มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนอแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับลาดดินเหนียวมีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึกที่ใช้งานง่าย และสามารถพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักรบรรทุกและรอยแตกเนื่องจากแรงดึงที่ใช้สำหรับงานงานถมหรืองานขุดสำหรับโครงสร้างต่างๆ ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีมีน้ำหนักรบรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง และกรณีมีน้ำหนักรบรรทุก แต่มีรอยแตกเนื่องจากแรงดึงมีค่าต่ำ แต่สำหรับกรณีที่ทั้งน้ำหนักรบรรทุกและรอยแตกเนื่องจากแรงดึง ความคลาดเคลื่อนโดยส่วนใหญ่มีลักษณะ lower prediction คือผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 ในกรณีที่มุมลาดเอียงสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565” เลขที่สัญญา วรรณ.60/2565 และได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการจัดตั้งหน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bishop AW, Morgenstern N. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*. 1960;10(4):129–50.
- [2] Morgenstern NR. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. *Geotechnique*. 1963;13(2):121–31.
- [3] Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*. 1967;17(1): 11-26.
- [4] Taylor DW. Stability of earth slopes. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*. 1973;24(3):337-86.
- [5] Taylor DW. *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, Hoboken, NJ; 1948.
- [6] Michalowski RL. Stability charts for uniform slopes. *J Geotech Geoenviron Eng*. 2002;128 (4):351–5.
- [7] Baker, R. 2003. A second look at Taylor’s stability chart. *J. Geotech. Geoenviron. Eng*. 129: 1102–1108.
- [8] Li AJ., Merifield RS., Lyamin AV. Three-dimensional stability charts for slopes based on limit analysis method. *Can. Geotech*. 2010;47:1316-34.
- [9] Gibson RE., Morgenstern N. A note on the stability of cuttings in normally consolidated clay. *Géotechnique*. 1962;2:212–6.
- [10] Hunter JH., Schuster RL. Stability of simple cuttings in normally consolidated clays. *Geotechnique*. 1968;18(3):372–8.
- [11] Koppula SD. On stability of slopes in clay with linearly increasing strength. *Can. Geotech*. 1983;21(3):577-81.