การศึกษาเปรียบเทียบแผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด

THE COMPARATIVE STUDY OF SLOPE STABILITY CHARTS

อภินิติ โชติสังกาศ [1] , ผศ.ดร ก่อโชค จันทวรางกูร [2]

นักวิจัย[1] , ผู้ช่วยศาสตราจารย์[2]

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ: ในปัจจุบันได้มีผู้คิดค้นแผนภูมิเสถียรภาพของความลาดไว้เป็นจำนวนมากซึ่งในแต่ละแผนภูมิมีความแตกต่างทั้งสมมุติฐานและข้อจำกัดในการใช้ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการเลือกใช้แผนภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบแผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเพื่อช่วยในการตัดสินใจ

ในการศึกษาได้เปรียบเทียบแผนภูมิของ Taylor, Janbu, Bishop & Morgenstern, Hoek & Bray และCousin ในลักษณะการวิเคราะห์แบบ Total Stress (ϕ=0) และ Effective Stress (ϕ>0) ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยใช้วิธีการศึกษาด้วยวิธี Parameter Study เปรียบเทียบความถูกต้องของค่า Factor of Safety ที่ได้จากแผนภูมิต่างๆกับโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด 2 โปรแกรมคือ โปรแกรม RE5 ใช้ในกรณีไม่มีน้ำมาเกี่ยวข้องและ PCSTABL ใช้ในกรณีมีน้ำมาเกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเปรียบเทียบได้ข้อสรุปว่า ในทุกกรณีของทุกแผนภูมิได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) ใกล้เคียงกับค่าจากโปรแกรมวิเคราะห์ (error< $\pm$10%) ยกเว้นแผนภูมิของ Hoek & Brayซึ่งให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีแนวโน้มต่ำกว่าประมาณ 20 % ส่วนในกรณีที่มีผลจากแรงดันน้ำภายใน ถ้าผู้ออกแบบใช้ค่า Pore pressure ratio, R_u ในการวิเคราะห์แผนภูมิของ Cousin จะมีความสะดวกในการใช้ที่สุด แต่ถ้าใช้ลักษณะของเส้นระดับน้ำ แผนภูมิของ Janbu จะมีความเหมาะสมที่สุด และนอกจากนั้นแผนภูมิของ Janbu ยังมีความคลอบคลุมมากที่สุดและเป็นแผนภูมิที่แนะนำให้ใช้

ABSTRACT: Charts for investigating the stability of simple homogeneous earth slopes have been available for many years. These charts have some differences in assumptions and advantages as well as certain limitations . This, therefore, makes designers or engineers difficult to choose the appropriate one.

The purpose of this study is to compare these charts (i.e. Taylor's, Janbu's, Bishop & Morgenstern's, Hoek & Bray's, and Cousin's) in terms of safety factor's accuracy with the stability analysis programs (RE5 and PCSTABL) by using the method of Parametric Study and also in terms of difficulties in calculation together with the restriction of their use. The study is based on both total stress analysis (ϕ=0) and effective stress analysis (ϕ>0) of slopes with and without water.

The results show that in any case all charts give a satisfactory safety factor (error < $\pm$10 %) except for Hoek & Bray's charts which tend to give conservative values (error < -20 %). For the case with the effect of pore water pressure on the slope, Cousin's charts are the most suitable for using the pore pressure ratio, R_u. But for using the phreatic surface or water table, Janbu's charts are considered the most useful charts.

KEYWORDS: Slope stability charts, Slope stability analysis

For further details, contact *Mr. Apiniti Jotisankasa 34/57 Vibhavadee 60 Laksri Bangkok 10210*

1. บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในขั้นต้นของลาดดินเนื้อเดียวเนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็วและสะดวกผู้ใช้สามารถคำนวณค่าสัดส่วนความปลอดภัยได้โดยขั้นตอนการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน

ทั้งนี้ เนื่องจากได้มีผู้คิดค้นแผนภูมิขึ้นมาเป็นจำนวนมากซึ่งแต่ละแผนภูมิจะมีความแตกต่างทั้งสมมุติฐานและข้อจำกัดในการใช้ และอาจก่อให้เกิดความสับสนในการเลือกใช้แผนภูมิให้เหมาะสมกับสภาพความเป็นจริงในการใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบแผนภูมิเสถียรภาพของลาดดินทั้งในด้านความถูกต้องและข้อจำกัดในการใช้

2. แผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด

การใช้แผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดนั้นโดยทั่วไปจะแบ่งลักษณะการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีด้วยกันคือ กรณีวิเคราะห์แบบ Total stress (ϕ=0) ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ลาดดินเป็นดินเหนียวอ่อน และกรณีวิเคราะห์แบบ Effective stress (ϕ>0) โดยแผนภูมิที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบครั้งนี้ประกอบไปด้วยแผนภูมิของ Taylor, Janbu, Bishop&Morgenstern, Hoek&Bray และ Cousin ทั้งนี้แต่ละแผนภูมิจะสามารถใช้ได้ในช่วงค่าความลาดชันและค่ากำลังของดินที่แตกต่างกันในกรณีต่างๆ ซึ่งได้สรุปช่วงที่สามารถอ่านค่าจากแผนภูมิได้ไว้ในตารางที่1

ตารางที่ 1 ช่วงที่แผนภูมิต่างๆอ่านค่าได้

กรณีค่า ϕ=0					
ช่วงที่อ่านค่าได้	Taylor	Bishop	Janbu	Hoek&Brey	Cousin
ความชันของลาดดิน β	5-90	*	5-90	10-90	5-45
อัตราส่วนความลึกถึงชั้นแข็ง (Depth factor)	0-5	*	0-∞	**	0-0.5
* *แผนภูมิของ Bishop&Morgenstern อ่านค่าได้เฉพาะกรณีค่า ϕ>0*					
** *แผนภูมิของ Hoek&Bray มีสมมุติฐานการพังแบบ Toe circle*					
กรณีค่า ϕ>0					
ช่วงที่อ่านค่าได้	Taylor	Bishop	Janbu	Hoek&Brey	Cousin
ความชันของลาดดิน β	***	10-25	10-90	10-90	5-45
อัตราส่วนความลึกถึงชั้นแข็ง (Depth factor)	***	0-0.5	****	****	0-0.5
$c/\gamma H\tan\phi$	***	0-0.6	0.02-∞	0-∞	0.02-∞
*** *แผนภูมิของ Taylor ในกรณีค่า ϕ>0 ต้องอาศัยการ trial&error ทำให้ขั้นตอนการคำนวณยุ่งยากและไม่เหมาะสมในการใช้*					
**** *แผนภูมิของ Janbu และ Hoek&Bray มีสมมุติฐานการพังแบบ Toe circle*					

ในขั้นตอนการคำนวณค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, F) นั้นเกือบทุกแผนภูมิ (ยกเว้นแผนภูมิของ Bishop) ผู้ใช้จะสามารถคำนวณได้จากค่า Stability Number, N ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ $c/\gamma HF$ หรือ $\gamma HF/c$ แล้วแต่แผนภูมิแต่ละแผนภูมิ โดยค่า Stability Number จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆดังสมการที่ I

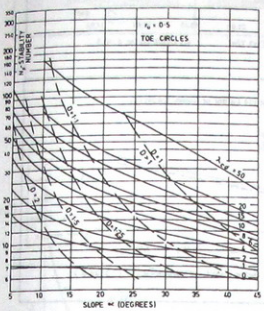
Stability Number, $N = N(\beta, \lambda, U, D)$ (1)

β คือ มุมเอียงของลาดดิน

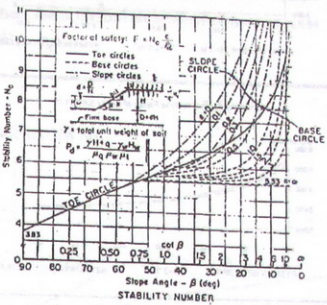
D คือ ค่า Depth factor หรืออัตราส่วนของความสูงของลาดดินกับความลึกจากตีนลาดดินถึงชั้นแข็ง

λ คือ ผลจากส่วนที่เป็นคุณสมบัติของดินและความสูงของลาดดินซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $c/\gamma H \tan\phi$ หรือ $\gamma H \tan\phi / c$ แล้วแต่แผนภูมิ

U คือ ผลจากแรงดันน้ำใต้ดิน ซึ่งในแผนภูมิของ Cousin และ Bishop จะใช้ค่า Pore pressure ratio, R_u ส่วนแผนภูมิของ Janbu และ Hoek จะใช้ค่าระดับน้ำใต้ดินและลักษณะของน้ำใต้ดินเป็นตัวกำหนด



ก) แผนภูมิของ Cousin กรณี r_u=0.5 Toe circle



ข) แผนภูมิของ Janbu กรณี ϕ=0

รูปที่ 1 ตัวอย่างแผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด(COUSINS 1978; JANBU 1954)

3. ขอบเขตและวิธีในการศึกษา

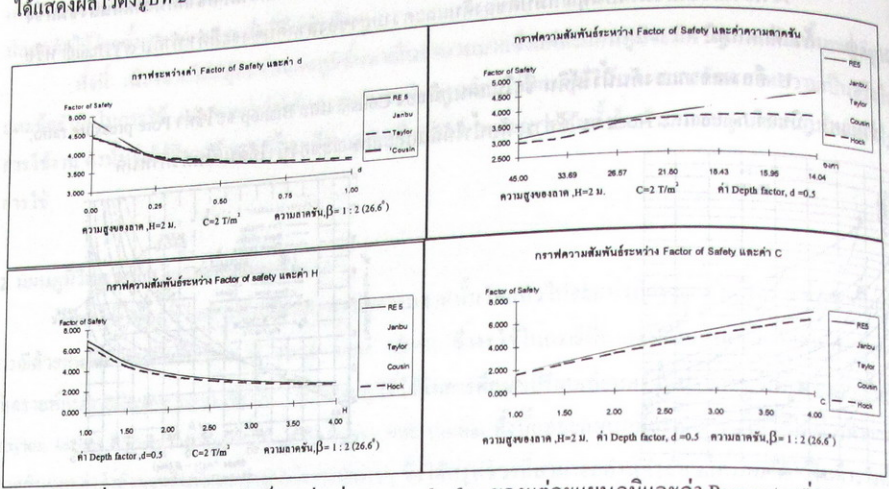
การศึกษาเปรียบเทียบแผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดนี้กำหนดให้ลาดดินที่จะศึกษามีลักษณะของลาดดินเป็นดินเนื้อเดียว (Homogeneous slope) และดินเป็นชนิด Isotropic soil ลักษณะการเคลื่อนพังของลาดดินเป็นชนิด Rotation slip และไม่ให้มีแรงภายนอกกระทำกับลาดดิน โดยในขั้นตอนการศึกษาใช้วิธี Parametric study ซึ่งเป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆว่ามีผลต่อความแตกต่างของค่า Factor of Safety ที่อ่านได้จากแผนภูมิกับค่าที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ (RE5 และ PCSTABL) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธี Simplified Bishop ในการวิเคราะห์ว่าจะมีค่าแตกต่างกันอย่างไรในช่วงใด โดยได้ทำการศึกษาลาดดินในกรณี Total stress (ϕ=0) และ Effective stress (ϕ>0) รวมทั้งลาดดินที่มีผลจากแรงดันน้ำภายในลาดดินและภายนอกลาดดินด้วย

4. การศึกษาแผนภูมิเสถียรภาพของความลาดกรณีไม่มีน้ำในลาดดิน

ในการศึกษาแผนภูมิเสถียรภาพของความลาดกรณีที่ไม่มีน้ำในลาดดินนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือกรณี Total stress (ϕ=0) และ Effective stress (ϕ>0) โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน RE5 ได้ผลดังนี้

4.1 กรณี Total stress ($\phi = 0$)

ในกรณี Total stress ได้ศึกษาโดยใช้วิธี Parametric study เปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละแผนภูมิซึ่งได้แสดงผลไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of safety ของแต่ละแผนภูมิและค่า Parameter ต่างๆ

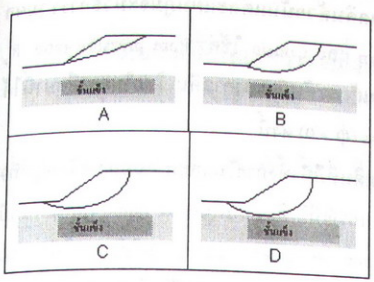
จากกราฟในรูปที่ 2 พบว่าในกรณี Total stress($\phi = 0$) ทุกแผนภูมิให้ค่า Factor of safety ที่ใกล้เคียงกัน (error น้อยกว่า 5 %) ยกเว้นแผนภูมิของ Hoek&Bray ซึ่งจะได้ค่าค่อนข้างต่ำ (error ประมาณ 7-15 %)

4.2 กรณี Effective stress ($\phi > 0$)

ในกรณี Effective stress (ϕ>0) นั้นความแตกต่างที่เห็นได้ชัดในแต่ละแผนภูมิก็คือสมมุติฐานของรูปแบบการพังของลาดดิน ซึ่งแต่ละแผนภูมิจะมีสมมุติฐานแตกต่างกันดังรูปที่ 3 โดยแผนภูมิของ Janbu และ Hoek&Bray มีสมมุติฐานตามรูป A และ B แผนภูมิของ Bishop&Morgenstern มีสมมุติฐานตามรูป C และ D ส่วนแผนภูมิของ Cousin จะมีสมมุติฐานทุกแบบทั้ง A B C และ D

ทั้งนี้จากการคำนวณเสถียรภาพของความลาดหลายๆกรณีโดยใช้โปรแกรม RE5 พบว่าลักษณะการพังของลาดดินจะขึ้นอยู่กับเทอมไร้หน่วย $c/\gamma H\tan\phi$ มุมเอียงของลาดดิน,β และค่า Depth factor,d จึงได้ทำการทดลองหาช่วงของค่าที่แบ่งลักษณะการพังโดยกำหนดค่า $c/\gamma H\tan\phi$ ขึ้นมาแล้วสังเกตลักษณะการพังจากโปรแกรมซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4

การศึกษาในกรณี Effective stress ($\phi > 0$) นี้จะเป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบว่าหากสมมุติฐานของรูปแบบการพังของแผนภูมิแตกต่างจากรูปแบบที่คำนวณได้ตามโปรแกรมวิเคราะห์(RE5) แล้วค่า Factor of safety ที่ได้จะแตกต่างกันเพียงใด ซึ่งศึกษาโดยกำหนดลาดดินซึ่งมีลักษณะการพังทั้ง 4 แบบแล้วอ่านค่า Factor of safety ของแต่ละแผนภูมิมาเปรียบเทียบกัน



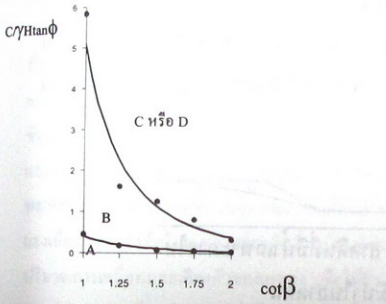
A Toe Sliding (TS) เป็น Toe circle แบบที่แนวของ Failure Surface ไม่มีการวกกลับ ลักษณะใกล้เคียงกับ Angle of Repose มากซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของดินที่มีค่า ϕ สูง

B Toe Circle (TC) คล้าย toe Sliding แต่จะมีการวกกลับของแนวของFailure Surface เป็นลักษณะเฉพาะของดินที่มีค่า ϕ ค่อนข้างสูง

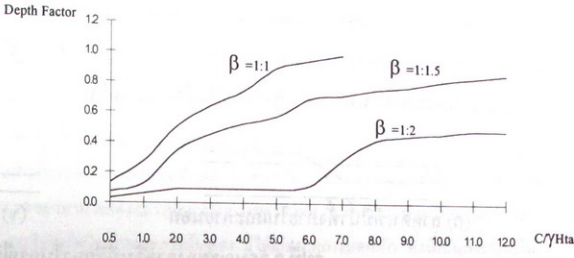
C Base Circle (BC) เป็นลักษณะที่แนวของ Failure Surface ตัดในส่วนของBase ของลาดดินแต่ไม่ตัดลงไปถึงชั้นแข็งของลาดดินเป็นลักษณะเฉพาะของดินที่มีค่า C ค่อนข้างสูง

D Full Circle (FC) เป็น Base Circle ที่แนวของ Failure Surface ตัดลงมาถึงชั้นแข็งของลาดดินเป็นลักษณะเฉพาะของดินที่มีค่า C สูง

รูปที่ 3 ลักษณะของ Failure Surface แบบต่างๆ



(ก) ช่วงที่จะเกิดการพังแบบต่างๆ



(ข) ค่า Depth factor ในกรณีการพังแบบ C และ D

รูปที่ 4 การทำนายลักษณะการพังแบบต่างๆ

จากผลที่ได้สรุปได้ว่า แผนภูมิของ Janbu และ Hoek&Bray ให้ค่าที่ค่อนข้าง Conservative (ต่ำกว่าค่าจาก RE5) โดยค่า Error จะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อสมมุติฐานของแผนภูมิไม่ตรงกับลักษณะการพังจริง (กรณี C และ D) ซึ่งค่า Error ของแผนภูมิ Janbu มีค่าน้อยกว่า -10 % ส่วนของ Hoek&Bray จะอยู่ในช่วง –10 ถึง –20 %

ในกรณีแผนภูมิของ Bishop ซึ่งมีสมมุติฐานเป็นแบบ C และ D ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจาก RE5 ในทุกกรณี แต่อย่างไรก็ตามช่วงที่แผนภูมิ Bishop อ่านค่าได้นั้นค่อนข้างน้อย(ดูตารางที่ 1) อีกทั้งขั้นตอนการคำนวณค่อนข้างยุ่งยากจึงไม่เป็นที่นิยมใช้นัก ส่วนแผนภูมิของ Cousin นั้นให้ค่าใกล้เคียงกับค่าจาก RE5 มากที่สุดเนื่องจากมีสมมุติฐานการพังทุกรูปแบบ

สรุปโดยรวมในกรณี Effective Stress แผนภูมิทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถใช้ได้แม้ว่าสมมุติฐานของแผนภูมิจะไม่ตรงกับลักษณะการพังจริง โดยบางแผนภูมิอาจให้ค่าที่มีความปลอดภัยสูงกว่าเมื่อสมมุติฐานไม่ตรงเท่านั้น

5. การศึกษาแผนภูมิเสถียรภาพของความลาดกรณีมีน้ำในลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีที่มีน้ำในลาดดินด้วยนั้นแต่ละแผนภูมิจะมีวิธีการรวมผลกระทบจากน้ำที่แตกต่างกันไปโดยแผนภูมิของ Bishop&Morgenstern และ Cousin ใช้ค่า Pore pressure ratio, R_u ส่วนแผนภูมิของ Janbu และ Hoek&Bray ใช้ระดับและลักษณะของเส้นระดับน้ำของลาดดิน โดยในการศึกษานี้ได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณีคือ Total stress (ϕ=0) และ Effective stress ($\phi > 0$) ดังนี้

กรณี Total stress (ϕ=0) กรณีนี้จะทำการศึกษาเฉพาะลาดดินที่มีน้ำทั้งภายในและภายนอกลาดดิน(รูปที่9 ก) เนื่องจากแรงดันน้ำภายในลาดดินจะไม่มีผลต่อกำลังของดิน ซึ่งในกรณีนี้มีเพียงแผนภูมิของ Janbu เพียงแผนภูมิเดียวที่รวมผลจากน้ำภายนอกไว้ จากการศึกษาเปรียบเทียบค่า Factor of safety จากแผนภูมิกับจากโปรแกรมวิเคราะห์ (PCSTABL) โดยวิธี Parametric study พบว่าค่าที่ได้จากแผนภูมิของ Janbu มีค่าที่ใกล้เคียงกับโปรแกรม (error <5 %)

กรณี Effective stress ($\phi > 0$) กรณีนี้ได้ทำการศึกษาทั้งกรณีรูปที่ 9ก และ ข โดยเปรียบเทียบค่า Factor of safety จากแผนภูมิกับโปรแกรมวิเคราะห์ (PCSTABL) เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของการใช้ค่า Pore pressure ratio, R_u และการใช้ลักษณะของระดับน้ำเป็นตัวรวมผลกระทบจากแรงดันน้ำภายใน โดยกำหนดลาดดินตัวอย่างซึ่งมีลักษณะน้ำภายในแตกต่างกันขึ้นมาซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าทุกแผนภูมิให้ค่าที่ถูกต้องเพียงพอโดยให้ค่า Factor of safety ที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับกรณีที่ไม่มีน้ำในลาดดิน

(ก) ลาดดินที่มีน้ำทั้งภายในและภายนอก (ข) ลาดดินที่มีน้ำเฉพาะภายใน

รูปที่ 9 ลักษณะของลาดดินที่ศึกษาในกรณีมีน้ำในลาดดิน

6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเปรียบเทียบแผนภูมิวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดนี้พบว่า แม้ว่าแผนภูมิแต่ละแผนภูมิจะมีสมมุติฐานในการคำนวณที่แตกต่างกัน แผนภูมิทุกแผนภูมิก็ให้ค่า Factor of safety ที่ถูกต้องเพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Error <10%) ยกเว้นเพียงแผนภูมิของ Hoek ซึ่งให้ค่าที่มีแนวโน้มต่ำกว่าประมาณ 20 % ซึ่งก็ยังอยู่ในด้านปลอดภัย (Conservative)

อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเลือกใช้แผนภูมิในการวิเคราะห์ ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาน่าจะเป็นความง่ายในการอ่านค่าและความคลอบคลุมในกรณีต่างๆ ซึ่งในกรณีนี้แผนภูมิของ Janbu เป็นแผนภูมิที่คลอบคลุมกรณีต่างๆมากที่สุด ทั้งกรณีมีน้ำภายในและภายนอกลาดดิน กรณีมีแรงกระทำบนลาดดิน และกรณีพิจารณาผลจาก Tension crack จึงเป็นแผนภูมิที่แนะนำให้ใช้ อนึ่ง ถ้าผู้ออกแบบต้องการรวมผลจากแรงดันน้ำภายในในรูปของ Pore pressure ratio, R_u แผนภูมิของ Cousin จะเป็นแผนภูมิที่ใช้งานได้ง่ายและเหมาะสมในการใช้ที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. JANBU, Stability analysis of slopes with dimensionless parameters, Cambridge, Massachusetts , 1954.
2. COUSINS, Stability charts of simple earth slope, Journal of the geotechnical Engineering division, 1978.