

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประเมินชั้นดินและค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ด้วยการทดสอบการเจาะสำรวจแบบหยั่งเบา

จิติพร พันธุ์ท่าช้าง*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลชางเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

รับบทความ 19 ธันวาคม 2560; ตอรับบทความ 8 พฤษภาคม 2561

บทคัดย่อ

บทความนี้ประยุกต์ใช้การเจาะสำรวจแบบหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test (KPT) or Light Penetrometer) เพื่อหาแรงต้านทานการตอกหยั่ง ศึกษาลักษณะการวางตัวชั้นดิน ตลอดจนหาคุณสมบัติความแข็งแรง และกำลังแบกทานของดินฐานราก โดยใช้พื้นที่ศึกษาที่จังหวัดเชียงราย โดยตรวจสอบลาดดินถมรองรับอาคารที่พบการเคลื่อนตัว การศึกษานี้ นำค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่ง N_{KPT} ประเมินความหนาชั้นดิน และใช้ค่าปรับแก้ N'_{KPT} วิเคราะห์หาค่ากำลังของดินฐานราก และแรงแบกทานที่ยอมให้จากทฤษฎีเชิงประสบการณ์ การทดสอบ KPT จำนวน 13 หลุมทดสอบ ระยะห่าง 4.00 เมตร ในจุดวิกฤตที่พบการเคลื่อนตัว พบว่า ชั้นดินรองรับที่มีความลึก 1.00-5.00 เมตร มีค่าแรงแบกทานที่ยอมให้เท่ากับ 1.53 ตันต่อตารางเมตร ที่ความลึก 5.00-6.60 เมตร มีค่าแรงแบกทานที่ยอมให้เท่ากับ 17.06 ตันต่อตารางเมตร การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้วิเคราะห์ด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือนและชั้นดินจากผลการทดสอบ KPT ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย พบว่า ลาดดินมีแนวโน้มเกิดพิบัติกรณีพิจารณาอิทธิพลของน้ำใต้ดิน จากผลการศึกษาพบว่า KPT สามารถนำไปใช้ในการแยกความหนาชั้นดิน ประเมินความแข็งแรงกำลังรับแรงแบกทานของฐานราก การตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดิน อีกทั้งการทดสอบด้วย KPT แสดงถึงประสิทธิภาพ, การประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาเมื่อเทียบกับการสำรวจในสนามแบบอื่นๆ

คำสำคัญ : การเจาะสำรวจแบบหยั่งเบา; เจาะสำรวจดิน; การวางตัวของชั้นดิน; กำลังแบกทานที่ยอมให้; เสถียรภาพของลาดดิน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 5392 1444, ไลน์อีเมลล์: Thitibhorn@rmutl.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Evaluation of Soil Profile and Allowable Bearing Capacity of Soil Using Kunzelstab Penetration Test, KPT

Thitibhorn Phantachang^{*}

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai, 50300

Received 19 December 2017; Accepted 8 May 2018

Abstract

This study applied the Kunzelstab Penetration Test (KPT) or Light Penetrometer to examine penetration resistance values, geological profiles and estimate shear strength properties of soils. KPT tests were carried out on steep slopes that exhibit potential slope movement in Chiang Rai Province. The principal uses of the KPT are examined; i.e. correction method for N'_{KPT} , soil profile and allowable bearing capacity of soil foundation. KPT tests were conducted at 13 boreholes, each measuring 4.00 m long along the crown of the slope. The results indicated the uncompacted layer and located the firm layer of soil foundation. The average allowable bearing capacities were 1.53 t/m² at depth of 1.00-5.00 m and 17.06 t/m² for 5.00-6.00 m depth respectively. Furthermore, this paper presents an analysis of the stability of a slope with the shear strength parameters of the soil and the geological profile were defined based on the results of KPT. The results of factor of safety were below the stable value for analysis cases with groundwater table. Test results demonstrate the usefulness of the KPT method in geotechnical investigations to estimate soil profile and bearing capacity efficiently and economically. This approach is also less time consuming compared to other geotechnical site investigation methods.

Keywords: Kunzelstab Penetration Test; Soil Boring; Soil Profile; Allowable Bearing Capacity; Slope Stability

^{*} Corresponding Author. Tel.: +66 5392 1444, E-mail Address: Thitibhorn@rmutl.ac.th

1. บทนำ

การเคลื่อนพังของลาดดินในพื้นที่ภาคเหนือ เนื่องจากลาดดินตามธรรมชาติ หรือลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้นที่ลดเสถียรภาพภายหลังฝนตกหนัก หรือผลกระทบจากแผ่นดินไหวทำให้ดินสูญเสียกำลังและนำไปสู่การเคลื่อนตัวของลาดดินที่ก่อความเสียหาย เป็นปัญหาสำคัญที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในเขตพื้นที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือนและลาดดินในพื้นที่เป็นวงกว้าง การประเมินความแข็งแรงของลาดดินด้วยวิธีการเจาะสำรวจแบบ หยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test (KPT) หรือ Light Penetrometer) จึงมีส่วนสำคัญในการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณทางวิศวกรรม ตลอดจนประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อใช้ในการประเมินการรับแรงของฐานราก และลักษณะการวางตัวของชั้นดินในพื้นที่ลาดชัน อีกทั้งในบริเวณที่มีข้อจำกัดพื้นที่ทดสอบ เครื่องมือ เวลา และงบประมาณ ด้วยลักษณะของเครื่องมือ KPT มีน้ำหนักที่เบา ขนาดเล็ก สะดวกในการขนย้าย จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างฐานรากขนาดเล็ก และสำรวจในพื้นที่ลาดชัน [1], [2]

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการเคลื่อนตัวของมวลดินในพื้นที่อาคารปฏิบัติการทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงราย ตำแหน่งอาคารตั้งอยู่บนภูมิประเทศเป็นพื้นที่ดินถมสูงกว่า 14 เมตร บนฐานรากดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกสูง และ ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ วางตัวสภาพลวม โดยพบว่าภายหลังเหตุการณ์ฝนตกต่อเนื่อง ระดับน้ำใต้ดินยกกระดับสูงขึ้น ส่งผลให้มวลดินฐานรากอยู่ในสภาพที่อิ่มน้ำ เกิดการสูญเสียกำลังระหว่างเม็ดดิน จนนำไปสู่การเคลื่อนตัวและพิบัติของแผ่นคอนกรีตลาดคานผิวหน้า

ลาดดิน โดยตรวจพบการเคลื่อนตัวและรอยแยกของแผ่นคอนกรีตทับหน้า จึงได้ดำเนินการสำรวจในพื้นที่ใกล้เคียงตำแหน่งฐานรากอาคาร และพื้นที่บริเวณพบการเคลื่อนตัวของมวลดิน มีการตรวจสอบกำลังต้านทานดินฐานราก เพื่อประเมินค่ากำลังด้วยการเจาะหยั่งเบา KPT แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

บทความวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอวิธีการประเมินค่ากำลังฐานรากจากการสำรวจด้วยวิธีการเจาะหยั่งเบา KPT โดยนำเสนอผล และแปลผล เพื่อนำข้อมูลที่ได้ประกอบการพิจารณาหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน และเป็นแนวทางเบื้องต้นให้วิศวกรนำผลทดสอบในสนามไปใช้ในการวิเคราะห์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแนะนำการใช้งานการทดสอบ KPT ในการเจาะสำรวจดินเพื่องานฐานราก [1] โดยนำเครื่องมือการเจาะแบบหยั่งเบา ที่ปลายเป็นทรงกรวย (Cone Head) ทำมุม 60 องศา มีค้อนตอก(Pile Hammer) น้ำหนัก 10 กิโลกรัม สอดบนก้านเจาะ (Rod) เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ปลดตอกอิสระที่ระยะยก 50 เซนติเมตรบนแกนนำเหล็ก (Guide Rod) แสดงในรูปที่ 1(ก) ใช้ในการประเมินความลึกและความแข็งแรงของชั้นดิน เพื่อกำหนดตำแหน่งฐานรากเสาไฟฟ้า ได้สรุปเป็นทฤษฎีเชิงประสบการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างการจำนวนครั้งการตอก และกำลังรับแรงเฉือนของดิน

Karerat [3] ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานของดินทรายปนตะกอน (SM) โดยพิจารณาอิทธิพลของมุมที่หัวหยั่งที่ 60, 90 และ 180 องศา และอิทธิพลของน้ำใต้ดินต่อค่าแรงแบกทาน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มมุมมองปลายกรวยทำให้จำนวนครั้งการตอกเพิ่มและเสนอค่าคงที่ปรับแก้จากค่ามุมมองของหัวหยั่งที่ใช้ทดสอบ ร่วมกับการพิจารณาอิทธิพลของน้ำใต้ดินที่มีผลกับการตอกหยั่งด้วย KPT

S. Pengsri and A. Jeamwattanareak [4] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง KPT และ Standard Penetration Test (SPT) ทดสอบในสนาม โดยเปรียบเทียบมุมมองคาของหัวหยั่ง KPT มุม 60 องศา และ 90 องศา ผลการศึกษาพบว่า มุมองศาของหัวหยั่งที่เพิ่มทำให้จำนวนครั้งการตอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงต้านที่หัวหยั่ง โดยสรุปค่าความสัมพันธ์ N_{KPT} และ N_{SPT} สำหรับหัวหยั่ง 60 องศา มีค่าเท่ากับ $N_{SPT} = 0.242N_{KPT}$ 60° , $N_{SPT} = 0.139N_{KPT}$ 60° และ $N_{SPT} = 0.056N_{KPT}$ 60° สำหรับดินที่ไม่ทราบชนิด, ดินทรายและดินเหนียวตามลำดับ

Kongkitkul et al. [5] กล่าวถึงการปรับค่า N_{KPT} และการนำทฤษฎีเชิงประสภการณ์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานราก ด้วยสมการที่ (1) และ (2)

$$N'_{KPT} = N_{KPT} \quad \text{เมื่อ } N_{KPT} \leq 15 \quad (1)$$

$$N'_{KPT} = 15 + 0.50 (N_{KPT} - 15), \quad \text{เมื่อ } N_{KPT} > 15 \quad (2)$$

เมื่อ N_{KPT} และ N'_{KPT} คือ จำนวนครั้งของการตอกด้วยการเจาะแบบหยั่งเบาก่อนและหลังการปรับแก้ค่า

Sakmanee and Chantawarangul [2] กล่าวถึงค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ (Allowable Bearing Capacity, Q_u) ในดินทรายและดินเหนียวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4)

$$Q_u = 0.64 (N_{KPT} - 3.57) \quad \text{ดินทราย} \quad (3)$$

$$Q_u = 0.34 (N_{KPT} + 0.954) \quad \text{ดินเหนียว} \quad (4)$$

เมื่อ Q_u คือ ค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ มีหน่วยเป็นตันต่อตารางเมตร

R. Isaroranit and GERD [6] พัฒนาโปรแกรม KU Slope ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินแบบสองมิติ ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) โปรแกรม

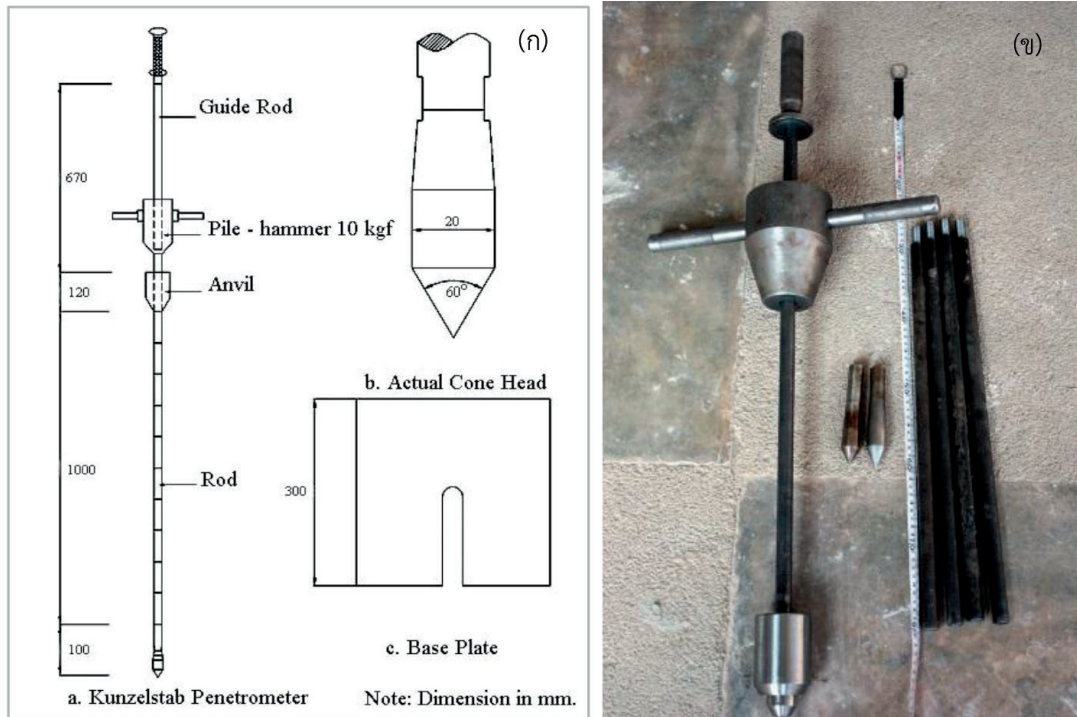
สามารถวิเคราะห์รูปแบบการพิบัติของมวลดินได้ทั้งรูปแบบเป็นส่วนโค้ง (Circular) และไม่เป็นส่วนโค้ง (Non-circular) และเพิ่มความสามารถในการจำลองรากพืช เพื่อศึกษาผลในด้านเสถียรภาพของลาดดิน

P. Rattanasuwan and W. Punurai [7] วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทางรถไฟบริเวณภาคเหนือตอนล่างใช้โปรแกรม KU Slope เพื่อวิเคราะห์สาเหตุและเสนอแนะวิธีแก้ไขป้องกัน โดยแปรผลการทดสอบการเจาะหยั่งมาตรฐาน Standard Penetration Test (SPT) เพื่อแปรผลค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดิน (Undrained Shear Strength) ใช้ในการวิเคราะห์

P. Tunmung and W. Chimoye [8] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินตัวอย่าง และคันดินป้องกันน้ำท่วมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม KU Slope และ Plaxis โดยพิจารณาผลกระทบจากน้ำใต้ดินด้วย ผลการศึกษาพบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกัน โดยค่ามุมเสียดทานภายในมีผลต่อค่า F.S. มากกว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวในมวลดิน

การสำรวจแบบหยั่งเบาได้ทำการทดสอบบริเวณลาดดินรองรับอาคารปฏิบัติการ มทร.ล้านนา เชียงราย จำนวน 5 หลัง ฐานรากวางบนดินถมบดอัดและดินตัดสภาพหลวม ความสูง 14 เมตร ผิวหน้าลาดดินปิดทับด้วยแผ่นคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดเซาะผิวหน้าแนวการทดสอบ KPT ความยาว 48 เมตร จำนวน 13 หลุมทดสอบหมายเลข BH01-BH13 ตามลำดับ กำหนดแนวทดสอบบริเวณหน้าอาคารปฏิบัติการมีระยะห่าง 4 เมตร โดยปลายกรวยของ KPT ใช้ความกว้างของมุมเท่ากับ 60 องศา รูปที่ 1(ข)

รูปที่ 2(ก) แสดงการกำหนดแนวทดสอบ และระยะห่างระหว่างหลุมเจาะสำรวจ 4.0 เมตร รูปที่ 2(ข-ค) แสดงอุปกรณ์ทดสอบ และการตอกทดสอบเก็บข้อมูลที่ทุกระยะจุ่ม 20 เซนติเมตร แล้วบันทึกค่าจำนวนครั้ง



รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบแบบหยั่งเบา Kunzelstab Penetration Test (KPT) หรือ Light Penetrometer (ก) เครื่องทดสอบ [1] (ข) เครื่องมือทดสอบ KPT ที่ใช้ในการวิจัย

ต่อระยะการจม (Bow Count, N_{KPT}) โดยผลทดสอบ N_{KPT} จะถูกนำไปปรับแก้ข้อมูลที่ได้ เพื่อทราบการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน, ความหนาชั้นดิน, กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ (Q_u) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินถล่ม

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติพื้นฐาน

การเจาะสำรวจด้วยสว่านมือ (Hand Auger) เพื่อศึกษาชั้นดินฐานรากร่วมกับการขุดเปิดหน้าดินบริเวณฐานราก ในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว) เก็บตัวอย่างแปรสภาพและคงสภาพนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (Index Properties) และคุณสมบัติด้านกำลังของดิน (Strength Properties) โดยคุณสมบัติพื้นฐานได้ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific

Gravity of Soil) กระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis) พิกัดอัลเทอร์เบอร์ก (Atterberg Limits Test) และการจำแนกชนิดของดินด้วยระบบ Unified Soil Classification (USCS)

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในตารางที่ 1 และการกระจายขนาดเม็ดดินในรูปที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าที่ B01 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินมีค่าเฉลี่ย 2.68 เป็นดินตะกอนมีความเป็นพลาสติกสูง (MH) แทรกด้วยชั้นดินเหนียว (CH) ที่ความลึก 2.00-2.50 เมตร ค่า $W_{LL} = 37-69\%$, $W_{PL} = 20-39\%$ และ $PI = 17-30\%$ สำหรับหลุมสำรวจ B02 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินมีค่าเฉลี่ย 2.68 เป็นดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ค่า $W_{LL} = 34-42\%$, $W_{PL} = 18-24\%$ และ $PI = 16-20\%$ โดยลักษณะดินทั้งสองหลุมลักษณะดินทั้งสองหลุมไม่พบน้ำใต้ดินแต่มีปริมาณความชื้นตาม

ธรรมชาติจากเขตน้ำซึม (Capillary Fringe) ด้วยอิทธิพลของน้ำใต้ดิน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน ด้วยวิธีแรงเฉือนตรง ค่ากำลังรับแรงเฉือนสภาพธรรมชาติ และสภาพชุ่มน้ำ มีค่ากำลังรับแรงเฉือน Friction Angle, $\phi = 23.96$ องศา และ Cohesion, $C = 1.08$ ตันต่อตารางเมตร และ $\phi = 17.53$ องศา และ $C = 1.83$ ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ [9]

3.2 การแปรผลการทดสอบการเจาะแบบหยั่งเบา

ผลการทดสอบ KPT แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งที่จมทุก 20 เซนติเมตร Blow Count (N'_{KPT}) เมื่อผ่านการปรับแก้จากสมการที่ (1) และ (2) ในรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ (N'_{KPT}) และความลึกทดสอบ จากข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจ BH01-BH13 พบการกระจายของข้อมูลมีความแปรปรวนในระดับความลึก 3.00-7.50 เมตร โดยสามารถแยกผลทดสอบค่า

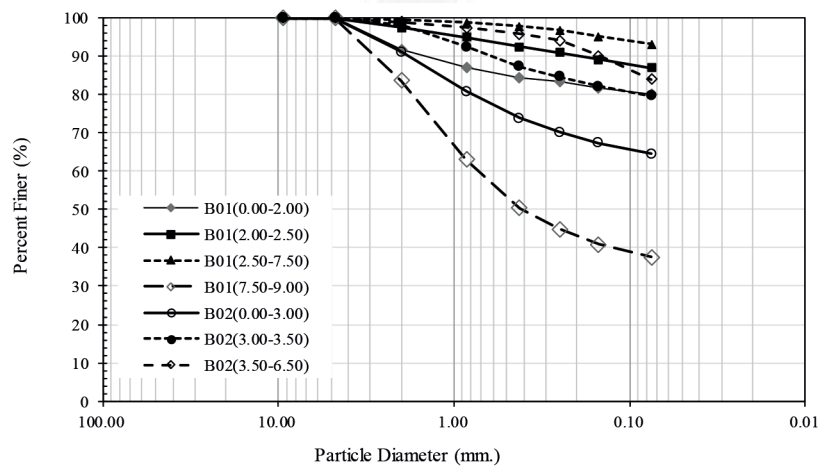
(N'_{KPT}) ของชั้นดินได้ 2 กลุ่มข้อมูลคือ 1) BH01-BH08 และ 2) BH09-BH13 แสดงในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ Meyerhof [10] กล่าวถึงจำนวนครั้งการเจาะหยั่งโดย KPT เมื่อค่า N'_{KPT} ต่ำกว่า 6 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ดินอยู่ในสภาพหลวมมาก (Very Loose), 6-18 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ดินอยู่ในสภาพหลวม (Loose) และ 18-55 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ดินอยู่ในสภาพแน่นปานกลาง (Medium) จากรูปที่ 4(ก) ข้อมูลชุดที่ 1 ทดสอบตำแหน่ง BH01-BH08 พบว่า บริเวณแนวเจาะในกลุ่มข้อมูลชุดแรกพบชั้นดินที่ค่าเฉลี่ยของ N'_{KPT} ต่ำกว่า 6 ดินฐานรากอยู่ในสภาพหลวมมาก ที่ความลึกชั้นดินที่ 1.50-3.00 เมตร แล้วเพิ่มแรงต้านตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ข้อมูลชุดที่ 2 (ข้อมูล BH09-BH13) พบค่า N'_{KPT} กระจายในช่วงค่า 6-18 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร จากระดับผิวดินถึงระดับความลึก 6.50 เมตร บอกระดับสภาพชั้นดินอยู่ในสภาพหลวมถึงหลวมมาก และมีแรงต้านค่าการทะลวงของหัวกรวยทดสอบที่ค่อนข้างต่ำ เป็นชั้นหนากว่า 6.00 เมตร



รูปที่ 2 การสำรวจด้วยการเจาะหยั่งเบา (ก) แนวตำแหน่งการทดสอบ (ข) การทดสอบ KPT (ค) กรวยทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกชนิดของดิน

BH No.	Depth (m)		GS	Atterberg Limits			Sieve Analysis (%Passing)		USCS
	From	To		W_{LL}	W_{PL}	PI	% Sand	% Fine	
B01	0.00	2.00	2.69	69	39	30	100.00	79.94	MH
B01	2.00	2.50	2.69	61	22	39	100.00	86.94	CH
B01	2.50	7.50	2.67	57	30	27	100.00	93.06	MH
B01	7.50	9.00	2.69	37	20	17	100.00	37.59	SC
B02	0.00	3.00	2.69	38	18	20	100.00	64.53	CL
B02	3.00	3.50	2.67	34	18	16	100.00	79.60	CL
B02	3.50	6.50	2.68	42	24	18	100.00	83.96	CL



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

ประเมินค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดินโดยพิจารณาพร้อมกับข้อมูลเจาะสำรวจ B01 นำค่า N'_{KPT} เป็นค่า N_{SPT} ตามข้อเสนอแนะ [4] และปรับแก้ผลกระทบต่าง ๆ ของเครื่องมือ SPT เป็น N_{60} ปรับแก้ผลจากความดันกดทับ C_N เป็นค่า N_{160} ตามข้อเสนอแนะของ Das [11] คำนวณค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction Angle, ϕ) ได้เท่ากับ 27.9 องศา ด้วยสมการของ Terzaghi and Peck [12] โดยแสดงค่าตลอดความลึกการทดสอบในรูปที่ 4(ค)

จากสภาพการเคลื่อนตัวสูงสุดและร่องรอยการแตกบนแผ่นคอนกรีตผิวหน้า สอดคล้องกับผลทดสอบ KPT ที่เปลี่ยนจำนวนครั้งการตอกที่ตำแหน่ง BH08 และ BH09 ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลทั้งสองแนวทดสอบคำนวณค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้

รูปที่ 5 แสดงค่า N'_{KPT} หลุมทดสอบ BH08 และ BH09 ค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ที่ปลาย Q_u จากสมการที่ (3) เมื่อพิจารณาผลทดสอบเทียบกับความลึก พบว่าค่าแรงแบกทานที่ยอมให้ที่ปลาย

ของกรวยทดสอบมีค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้โดยเฉลี่ย Q_u ที่ระดับความลึก 1.00-5.00 เมตรเท่ากันคือ 1.53 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความลึกที่ 5.00-6.60 เมตร เฉลี่ยเท่ากับ 17.06 ตันต่อตารางเมตร โดย BH08 พบชั้นดินอ่อนแทรกตัวที่ระดับความลึก 1.000-3.00 มีค่า เฉลี่ยเท่ากับ 0.70 ตันต่อตารางเมตร เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นค่าแรงแบกทานที่ยอมให้เพิ่มเป็น 33.22 ตันต่อตารางเมตร จากค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ สรุปได้ว่าด้วยความหนาของชั้นดินกำลังต่ำของกลุ่ม BH09 ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินใต้ฐาน นำไปสู่การพิบัติของลาดดินรองรับอาคารที่ชัดเจน

เมื่อพิจารณาจากการออกแบบกำหนดโดย Thai Government Ministerial Regulation [13] ระบุค่ากำลังรับแรงแบกทานของดินที่ยอมให้สำหรับดินอ่อนหรือดินถมไว้แน่นตัวเต็มที่ มีค่าไม่เกินว่า 2 ตันต่อตารางเมตร พบว่าค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ในพื้นที่ศึกษามีค่าต่ำกว่า 1.3-2.8 เท่าจากข้อกำหนดการออกแบบ จากผลศึกษาของ Karerat [3] พบว่า น้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อการทดสอบ KPT โดยให้ค่าร้อยละที่แตกต่างถึง 70-75 จากผลทดสอบดินสภาพแห้ง ดังนั้นการใช้ผล KPT ควรพิจารณาผลของเนื่องจากฤดูกาลและสภาพน้ำใต้ดินด้วย

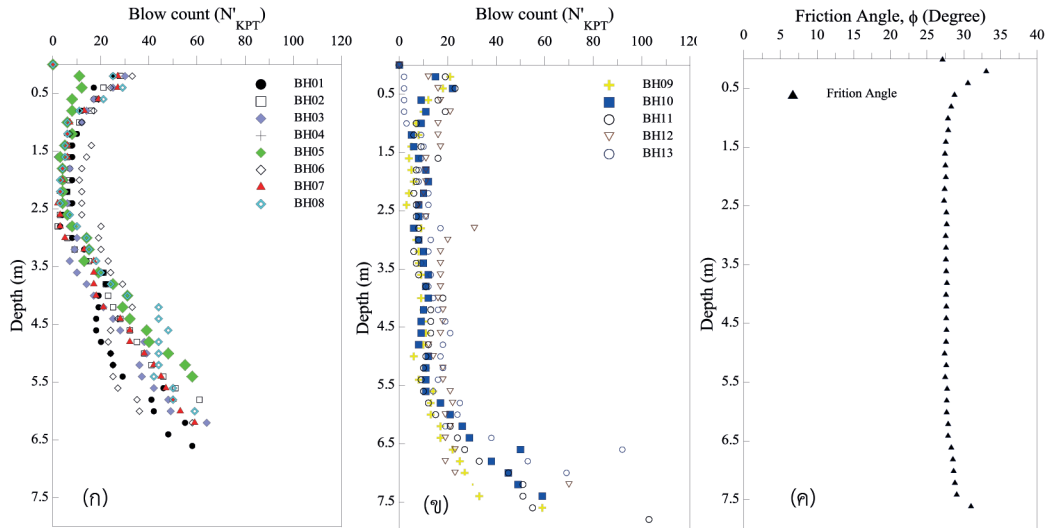
ผลการเจาะหยัง N'_{KPT} ค่าจำนวนครั้งการตอกสามารถนำข้อมูลมาเขียนเส้นชั้นการกระจายของจำนวนครั้งในการตอกตลอดแนวทดสอบในรูปที่ 6 เพื่อใช้ประเมินความหนาของชั้นดินฐานราก พบว่าดินฐานรากในช่วงต้นเป็นชั้นดินที่อยู่ในสภาพหลวมและมีกระเปาะดินที่อยู่ในสภาพหลวมมากแทรกตัวอยู่ โดยพบชั้นดินที่แน่น ($N'_{KPT} > 55$ ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร) ที่ความลึก 6.00 เมตร สำหรับหลุมทดสอบ BH01-BH08 และลึกกว่า 7.50 เมตรที่หลุมทดสอบ BH09-BH13

บ่งถึงความไม่สม่ำเสมอในการบดอัดดินฐานรากรองรับอาคาร และลักษณะความไม่ต่อเนื่องของการวางตัวชั้นดินที่ตำแหน่ง BH08-BH09

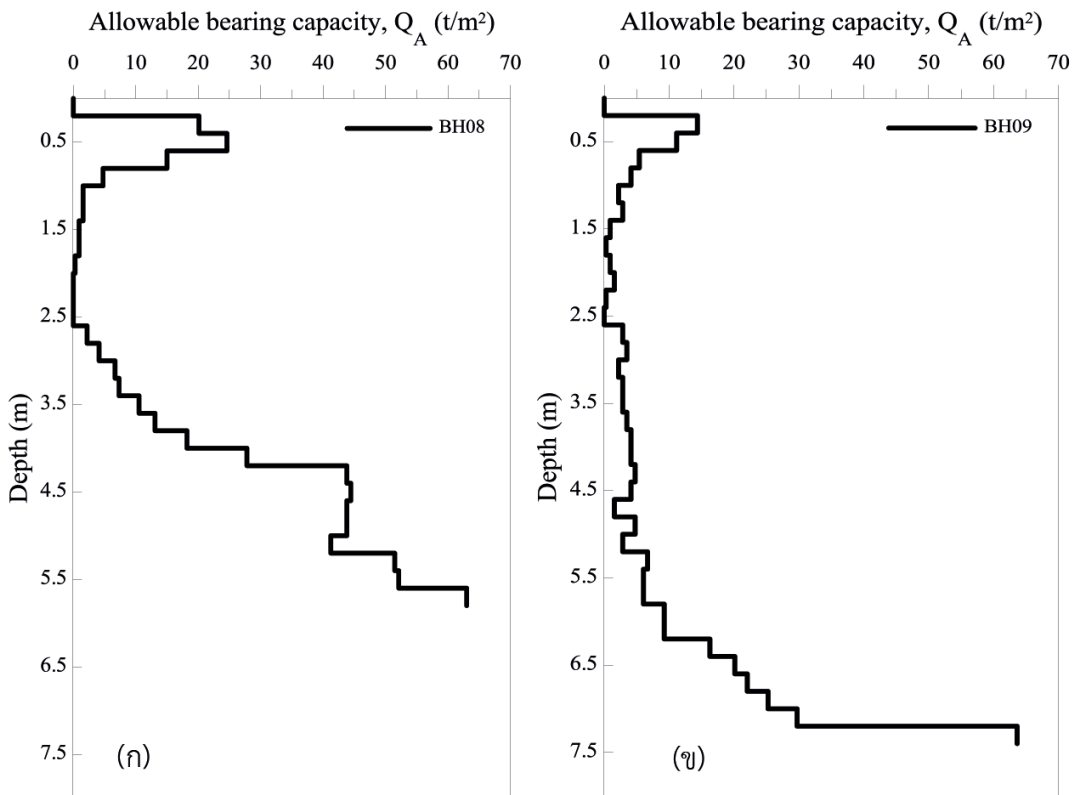
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม KU Slope

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อประเมินค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) โดยใช้ข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ประกอบด้วย สภาพการวางตัวของชั้นดิน และลักษณะกายภาพของลาดดิน (Soil Profile and Slope Geometry) ค่าหน่วยน้ำหนัก, ค่ากำลังรับแรงเฉือน และน้ำหนักโครงสร้างอาคารที่กระทำ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ นำเข้าและประมวลผลด้วยโปรแกรม KU Slope โดยเลือกวิธีในการคำนวณคือ 1) วิธี Ordinary Method of Slices, OMS 2) วิธี Simplified Bishop 3) วิธี Simplified Janbu และ 4) วิธี Spencer เพื่อเปรียบเทียบผลค่าอัตราส่วนปลอดภัย โดยเลือกหน้าตัดที่ BH09 เป็นหน้าตัดวิกฤตพิจารณาปัจจัยของน้ำใต้ดินที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาด

ค่าคุณสมบัติเพื่อใช้วิเคราะห์ สำหรับชั้นดินถมแปรผลจาก KPT ร่วมกับผลเจาะสำรวจ B01 จำแนกเป็นชั้นดินตะกอนทราย โดยแบ่งชั้นดิน 2 ชั้น สำหรับดินชั้นที่ 1 ที่ระดับ 0.00-6.50 เมตร ค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน ϕ มีค่า 27.9 องศา ค่าหน่วยน้ำหนักดิน 1.80 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ดินชั้นที่ 2 ความลึก 6.50-14.00 เมตร ค่า ϕ เฉลี่ย = 35 องศา ค่าหน่วยน้ำหนักดินเท่ากับ 1.85 ตันต่อลูกบาศก์เมตร จากสภาพชั้นดินชั้นบนที่ประเมินค่ากำลังด้วย KPT มาพิจารณาโดยศึกษาผลของค่า ϕ มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย



รูปที่ 4 ผลการทดสอบด้วย KPT ความสัมพันธ์ระหว่าง Blow count (N'_{KPT}) และความลึกการสำรวจ (ก) กลุ่มสำรวจ BH01-BH08 (ข) กลุ่มสำรวจ BH09-BH13 (ค) Friction Angle



รูปที่ 5 กำลังรับแรงแบกทานที่ปลาย (Allowable Bearing Capacity) (ก) หลุมทดสอบ BH08 และ (ข) BH09

ด้วยวิธีการ Parametric Study ให้ครอบคลุมช่วงของค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 25-35 องศา เพื่อศึกษาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เปลี่ยนไปกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน การวิเคราะห์พิจารณา ร่วมกับฐานรากที่รองรับอาคารขนาด 2.00x2.00 เมตร กำหนดให้มีน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอที่ฐานเท่ากับ 10 ตันต่อตารางเมตร

ในรูปที่ 7 แสดงหน้าตัดการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วย KU Slope และค่าคุณสมบัติของดินเพื่อประกอบการวิเคราะห์ จำนวน 1 หน้าตัด โดยการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยพิจารณา 2 กรณี คือ ไม่พิจารณาอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดิน และพิจารณาอิทธิพลของน้ำใต้ดิน

สำหรับการประเมินค่าอัตราปลอดภัยของลาดดิน Wyllie et al. [14] แนะนำสำหรับความค่าความปลอดภัยที่น้อยที่สุด (Minimum Total Safety Factor) สำหรับลาดดินถาวร ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.30-1.50

การวิเคราะห์ด้วยวิธี OMS ใช้กับรูปแบบการพิบัติของดินแบบ Circular โดยใช้หลักการสมดุลงของแรงไม่พิจารณาแรงเสียดทานด้านข้างของมวลดินและแรงกระทำด้านข้าง, Simplified Janbu วิเคราะห์ได้ทั้ง Circular และ Non-circular ใช้หลักการสมดุลงของแรง โดยไม่พิจารณาแรงเฉือนระหว่างมวลดิน สำหรับวิธี Simplified Bishop ใช้หลักการสมดุลงโมเมนต์ โดยมีสมมติฐานแรงกระทำแนวอนมีเฉพาะแรงดันดินด้านข้าง และวิธี Spencer ใช้หลักการสมดุลงของแรง และสมดุลงโมเมนต์ โดยมีสมมติฐานแรงเฉือนระหว่างมวลดินมีค่าคงที่ตลอดความยาวของลาด [15]

ผลการวิเคราะห์สรุปในตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และค่า ϕ ในรูปที่ 8 พบว่า การพิจารณาช่วงค่าของมุมเสียดทานภายใน 25-35 องศา ค่า F.S. ของลาดดินแปรผันในช่วงค่า 0.969-1.401 (Simplified Bishop), 1.016-1.432 (Simplified Janbu) และ 1.014-1.431 (Spencer)

กรณีที่มีอิทธิพลจากน้ำใต้ดินพบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงมากกว่าร้อยละ 30 ในการวิเคราะห์ทุกวิธี โดยมีช่วงค่าเท่ากับ 0.615-0.873 (Simplified Bishop), 0.659-0.939 (Simplified Janbu) และ 0.666-0.951 (Spencer) เมื่ออัตราส่วนปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1.0 ลาดดินเกิดการพิบัติ และคำนวณด้วยวิธี OMS ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุดเมื่อเทียบกับทุกวิธี สำหรับค่า ϕ ที่เท่ากับ 27.9 องศา มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.127 ที่สอดคล้องกับ พฤติกรรมจริงที่พบว่าความเสียหายของลาดดิน ด้วยอิทธิพลของน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงตามฤดูกาลทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงมีค่าเท่ากับ 0.742 ที่แสดงการพิบัติของลาดดิน

จะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์ด้วยการนำผลจาก KPT มาเทียบเคียงคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของมวลดิน พบว่าให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าเล็กน้อยแต่เป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินความปลอดภัยในเบื้องต้น ทั้งนี้ ผู้วิเคราะห์ควรพิจารณาในการทำการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติ (Parametric Study) และปัจจัยเนื่องจากรูปร่างน้ำใต้ดิน หรือการเปลี่ยนแปลงน้ำตามฤดูกาลที่จะช่วยให้การวิเคราะห์ใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

4. สรุป

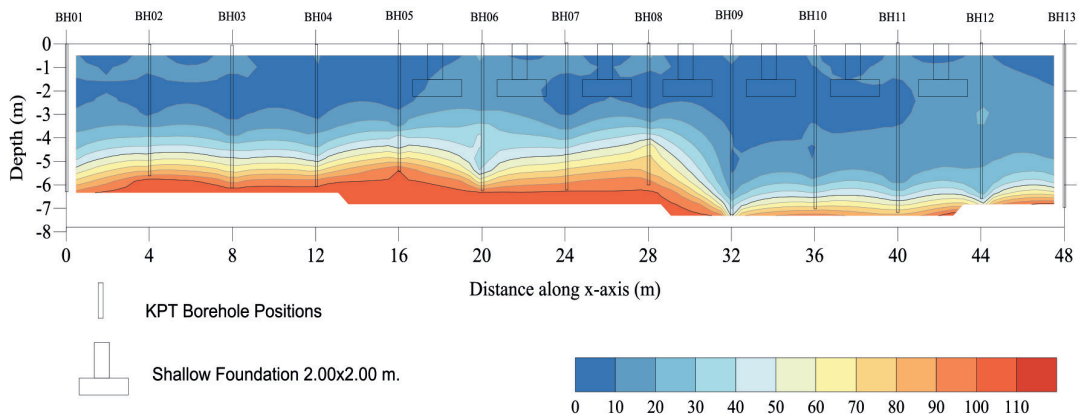
ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบการตอกหยั่ง KPT ในสนามบนลาดดินชนิดดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกสูง (MH) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) พบว่าที่หลุม BH01-BH08 ชั้นดินสภาพหลวมมีความหนาชั้นดิน 4.00 เมตร และที่หลุม BH09-BH13 ดินสภาพหลวมมาก ความหนาชั้นดิน 6.50 เมตร ผลทดสอบ KPT สามารถนำไปประเมินความหนาชั้นดิน และเลือกหน้าตัดวิกฤต เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความปลอดภัย การทดสอบด้วย KPT ยังมีความแปรปรวนอยู่มากจำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงค่าปรับแก้ที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน

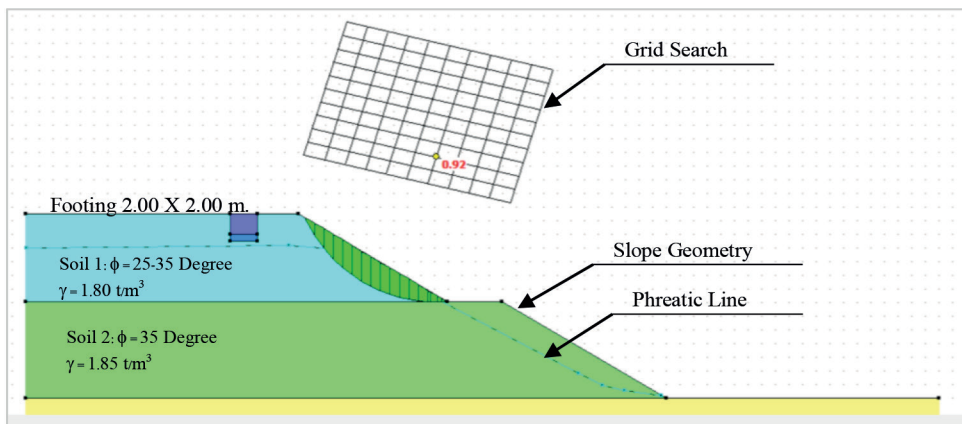
2. ผลการทดสอบ KPT สามารถนำไปประเมินค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ Q_u ของฐานรากด้วยทฤษฎีเชิงประสบการณ์ เพื่อประเมินเบื้องต้น เช่น ประกอบการพิจารณาขนาดฐานรากต้นสำหรับอาคารขนาดเล็ก หรือใช้ในการตรวจสอบค่าอัตราส่วนปลอดภัยภายหลังการใช้งานฐานราก เป็นต้น

3. ผลการตอกหยั่งด้วย KPT ให้ผลการทดสอบแรงต้านที่ปลายต่อนื่องตลอดความลึกชั้นดิน เหมาะสำหรับการทดสอบในดินทราย ดินสภาพหลวม หรือมีระดับน้ำใต้ดินสูง ที่ยากต่อการทดสอบและเก็บตัวอย่างคงสภาพ วิธีทดสอบนี้สะดวก เครื่องมือเคลื่อนย้ายง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบตอกหยั่งอื่นๆ

4. การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อวิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดิน ด้วยค่าพารามิเตอร์จาก KPT จากการเปรียบเทียบด้วยวิธีการวิเคราะห์ 4 วิธี ด้วย KU Slope คือ 1) วิธี Ordinary Method of Slices, OMS 2) วิธี Simplified Bishop 3) วิธี Simplified Janbu และ 4) วิธี Spencer พบว่า ค่า F.S. อยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ ทั้งนี้การพิจารณานำผล KPT ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน ต้องมีการพิจารณาค่าปรับแก้ที่เหมาะสม และทำการศึกษาผลการเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของกำลังรวมทั้งผลปัจจัยจากน้ำใต้ดิน เพื่อให้ค่าที่ใกล้เคียงความถูกต้องยิ่งขึ้น



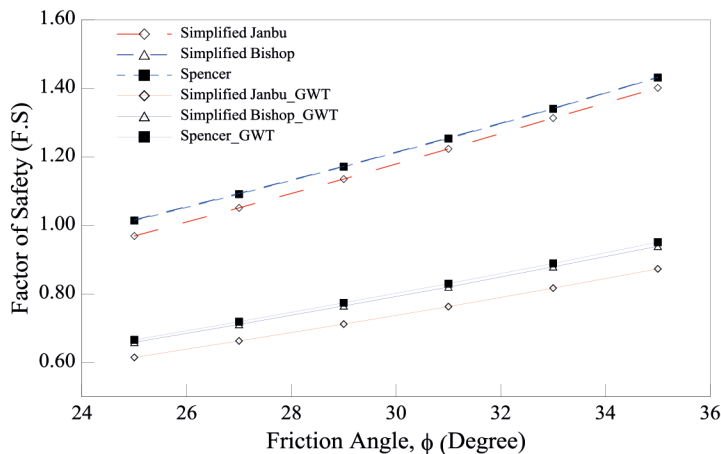
รูปที่ 6 เส้นชั้นความสูงของจำนวนการตอก N'_{KPT}



รูปที่ 7 แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินกรณีมีอิทธิพลของน้ำใต้ดิน ด้วย KU Slope

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้วยโปรแกรม KU Slope

Friction Angle, ϕ (Degree)	กรณีไม่พิจารณาอิทธิพลน้ำใต้ดิน				กรณีพิจารณาอิทธิพลน้ำใต้ดิน			
	1. Method of Slices	2. Simplified Bishop	3. Simplified Janbu	4. Spencer	1. Method of Slices	2. Simplified Bishop	3. Simplified Janbu	4. Spencer
25.0	0.976	0.969	1.016	1.014	0.587	0.615	0.659	0.666
27.0	1.057	1.051	1.093	1.091	0.632	0.663	0.711	0.719
27.9	1.095	1.088	1.128	1.127	0.652	0.684	0.735	0.742
29.0	1.142	1.135	1.172	1.171	0.678	0.712	0.765	0.774
31.0	1.230	1.223	1.255	1.253	0.726	0.763	0.820	0.830
33.0	1.316	1.313	1.341	1.340	0.776	0.817	0.879	0.889
35.0	1.404	1.401	1.432	1.431	0.828	0.873	0.939	0.951



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินไม่พิจารณาและพิจารณาผลของน้ำใต้ดิน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จากงบประมาณแผ่นดิน โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้มีส่วนร่วมที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงตาม

วัตถุประสงค์ หน่วยงานนวัตกรรม ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คุณอนุชา อินแปง, คุณอภิรักษ์ บุญดี และคุณประวิทย์ มโนวัลย์ และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำที่มีค่าต่อบทความ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] EGAT, *Soil exploration by Kunzelstab penetration test* Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1980.
- [2] A. Sakmanee, K. Chantawarangul, "Soil exploration by dynamic light penetrometer," in *Proceedings of 41st Kasetsart University Annual Conference*, Bangkok, Thailand, 2003, pp. 490-497.
- [3] C. Karerat, "Bearing capacity investigation of silty sandy soil layer using Kunzelstab test," *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 16, no. 19, pp. 57-61, 2016.
- [4] S. Pengsri and A. Jeamwattanareak, "The Correlations between KPT and SPT," B.S. thesis, Burapha University, Chonburi, Thailand, 2013.
- [5] W. Kongkitkul, S. Srisakorn, T. Chantachot, S. Youwai, P. Jongpradist and C. Bunjongruksa, "Evaluation of guy anchorage strength in clay for transmission Tower," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 41, no. 4, pp. 564-570, 2013.
- [6] KU Slope Version 2.1 Manual, Isaroranit R. and Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD), Bangkok, Thailand, 2009. [Online]. Available: http://www.gerd.eng.ku.ac.th/About_us/Download/Program/KUSlope_2/KUSlope%20%20Manual.pdf
- [7] P. Rattanasuwan and W. Punurai, "Slope Stability Improvement of Railway Embankment," *Research and Development Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 07-14.
- [8] P. Tunmung and W. Chimoye, "Comparisons of Analysis Results of Slope Stability between Limit Equilibrium Method and Finite Element Method," *Journal of Science and Technology Thammasat University*, vol. 12, no. 1, pp. 184-196.
- [9] T. Phantachang and A. Jotisankasa, "Investigation of Slope Instability of a Concrete -Faced Slope in Chiangrai." in *Proceedings of International Conference on Slope 2010 : Geotechnique and Geosynthetics for Slopes*, Chiang Mai, Thailand, 2010, pp. 41-46.
- [10] G.G. Meyerhof, "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 82, no. 1, pp. 1-19, 1956.
- [11] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed. Boston: PWS, 1997.
- [12] K. Terzaghi and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York: Wiley, 1987.
- [13] Thai Government, Ministerial Regulation no. 6, B.E.2527 (1984), "Issued In Accordance With The Building Control Act", B.E.2522 (1979).
- [14] D. C. Wyllie and C. W. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed. London: Spon Press, 2004.
- [15] D. H. Cornforth, *Landslides in Practice: Investigation, Analysis and Remedial Preventative Options in Soils*, 1st ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.