



การประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักชั้นดินเหนียวแข็งด้วยวิธีการตอกหยั่งเบา

EVALUATION OF BEARING CAPACITY IN HARD CLAY SUBSOIL WITH KUNZELSTAB PENETRATION TEST

อรุณเดช บุญสูง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Corresponding author: a.boonsung9@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นดิน โดยวิธีการทดสอบตอกหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test, KPT) และนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) จากผลการศึกษาพบว่า การคาดคะเนลักษณะชั้นดินจากผลการทดสอบตอกหยั่งเบา บ่งชี้ถึงชั้นดินที่มีความระดับแข็งกว่าการคาดคะเนจากผลการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐานที่ระดับความลึกเดียวกัน ในช่วงร้อยละ 48 – 98 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (N_{SPT}) และการทดสอบตอกหยั่งเบา (N_{KPT}) ทั้งในกรณีที่ไม่มีค่าการปรับแก้ (N) และค่าที่ปรับแก้ (N') มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในลักษณะเชิงเส้น (Linear) ดังนี้ $N_{SPT} = 0.0423N_{KPT} + 10.455$
คำสำคัญ : กำลังต้านทานแรงเฉือน, การทดสอบตอกหยั่งเบา, วิศวกรรมฐานราก, การทดสอบในสนาม

ABSTRACT

This paper presents the results of Shear Strength evaluation in hard clay subsoil with Kunzelstab Penetration Test (KPT). The results of the KPT will be compared with the standard penetration test (SPT). The results showed that the prediction of the soil layer characteristics from KPT shows the characteristics of the soil layer that is more stiffness than the prediction of results from SPT at the same depth. The relationship between the standard penetration test (N_{SPT}) and the Kunzelstab Penetration Test (N_{KPT}) both in the without corrected (N) and corrected value (N') tends to be consistent. In addition, relationships between N_{SPT} and N_{KPT} in the form of linear equations. The comparison of the application of KPT and SPT results in shallow foundation designs showed the consistent results.

KEYWORDS: Shear Strength, Kunzelstab Penetration Test, Foundation Engineering, In-Situ Test

1. บทนำ

การขยายตัวของชุมชนเมืองทำให้เกิดความต้องการการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานรวมไปถึงสิ่งปลูกสร้างเพื่อการอยู่อาศัย สิ่งสำคัญที่โครงสร้างเหล่านี้จำเป็นต้องพิจารณาคือความปลอดภัยภายใต้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม ชั้นดินในสภาพธรรมชาติมีความแปรปรวนค่อนข้างมากทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาออกแบบโครงการก่อสร้างเพื่อให้สิ่งปลูกสร้างนั้นคงอยู่และใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ กำลังรับน้ำหนักของชั้นดินมักถูกพิจารณาให้มีความสำคัญเป็นอันดับแรกๆ เนื่องจากส่งผลต่อชนิดและรูปแบบการก่อสร้างฐานราก วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมน้อยอย่างแพร่หลายในระดับหนึ่งคือ การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) โดยมีสามขา เครื่องก้าน บี้มน้ำ และถังตกตะกอน ในกรณีที่เจาะในชั้นดินอ่อนจำเป็นต้องใช้ปลอกเหล็กกันดินพัง จากองค์ประกอบข้างต้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการทดสอบมีจำนวนมากส่งผลให้ใช้เวลาในการดำเนินการนานและไม่สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อเข้าทดสอบในพื้นที่คับแคบหรือพื้นที่ปาร์กทึบได้โดยสะดวก วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประเมินค่ากำลังการรับน้ำหนักของชั้นดินภายใต้ข้อจำกัดเชิงพื้นที่และการขนย้ายคือ การทดสอบตอกหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test, KPT) โดยจะใช้แรงกระแทกก้านเจาะที่มีหัวเจาะรูปกรวยเคลื่อนผ่านชั้นดินโดยประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินเช่นเดียวกับวิธีการตอกทะลวงแบบมาตรฐานแต่มีข้อได้เปรียบกว่า เนื่องจากอุปกรณ์มีน้ำหนักเบาจึงเคลื่อนย้ายได้สะดวกใช้แรงงานในการทดสอบน้อย วิธีการไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน

บทความฉบับนี้เป็นนำเสนอผลการศึกษา การแปลผลค่ากำลังรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ชั้นดินและความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT) กับการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (SPT) เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงพฤติกรรมด้านกำลังของชั้นดินจากการทดสอบที่แตกต่างกัน อันจะนำไปใช้สู่การเลือกใช้วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักชั้นดินได้อย่างเหมาะสมทำให้การออกแบบมีความถูกต้องและปลอดภัย

2. ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบตอกหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test, KPT) หรือวิธี Light Ram Sounding Test เป็นวิธีการหยั่งทดสอบชั้นดินในสนาม เพื่อประเมินค่ากำลังด้านทานที่ปลายหัวเจาะรูปกรวย (Cone Head) โดยไม่เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ก้านเจาะ การทดสอบ Kunzelstab เป็นไปตามมาตรฐาน DIN 4094 (Swedish Geotechnical Institute, 1989) ของประเทศเยอรมัน โดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไป ซึ่งแรงด้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลังและความหนาของชั้นดินได้โดยผลของการทดสอบที่ได้สามารถบ่งชี้คุณลักษณะของชั้นดินโดยสังเขป สำหรับในประเทศไทยยังไม่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากนักทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยนิยมใช้การทดสอบนี้เพื่อการออกแบบฐานรากเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในเขตพื้นที่ปาร์ก บริเวณภูเขาสูง หรือบริเวณที่ห่างจากถนนมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีน้ำหนักเบาสามารถขนย้ายได้โดยสะดวกประกอบกับวิธีการทดสอบทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าวิธีการอื่นๆ การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Bearing Capacity, Q_u) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) และ (2) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 1 และ 2 ในการคาดคะเนคุณลักษณะของชั้นดิน [1]

$$Q_u = 1.6(N' - 3.57) \text{ t/m}^2 \quad (\text{for Sand}) \quad (1)$$

$$Q_u = 1.92(N' + 0.954) \text{ t/m}^2 \quad (\text{for Clay}) \quad (2)$$

$$N' = 15 + 0.5(N-15) \quad \text{ในกรณีที่ } N > 15 \quad (3)$$

เมื่อ Q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด (t/m^2)

N' = ค่าปรับแก้จำนวนครั้งของการตอกค้ำต่อระยะจม 20 cm

N = จำนวนครั้งต่อ 20 cm. จากการตอกในสนาม

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของทราย [2]

N (Blows/ft)	KPT (EGAT)	Friction Angle, ϕ (Degree)	Relative Density
0 – 4	0 – 4	25 – 30	Very Loose
4 – 10	6 – 4	27 – 32	Loose
10 – 30	18 – 4	30 – 35	Medium
30 – 50	55 – 4	35 – 40	Dense
> 50	> 92	38 – 45	Very Dense

(Meyerhof, 1956)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว [3]

N (Blows/ft)	KPT (EGAT)	UCS , Q_u (t/m^2)	Relative Density
< 2	0 – 3	< 2.5	Very Soft
2 – 4	3 – 6	2.5 – 5.0	Soft
4 – 8	6 – 14	5.0 – 10.0	Medium Stiff
8 – 15	14 – 27	10.0 – 20.0	Stiff
15 – 30	27 – 55	20.0 – 40.0	Very Stiff
> 50	> 55	> 40.0	Hard

(Terzaghi, Peck, 1967)

อดีตจนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากหลายโดยเป็นการมุ่งเน้นศึกษาการแปลผลการทดสอบและอิทธิพลของการปรับแต่งเครื่องมือทดสอบ KPT ในมิติต่างๆ ดังนี้ จูดิพร พันธุ์ท่าช้าง [4] ศึกษาการประเมินชั้นดินและค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ยอมรับให้โดยการทดสอบเจาะแบบหยั่งเบาเพื่อศึกษาลักษณะการเรียงตัวและคุณสมบัติด้านกำลังของชั้นดินในชั้นดินถมที่เกิดการเคลื่อนตัว ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินรองรับที่ความลึก 1.00 – 5.00 m มีค่าแรงแบกทานที่ยอมรับให้เท่ากับ 1.53 t/m^2 ที่ระดับความลึก 5.00 – 6.00 m มีค่าแรงแบกทานที่ยอมรับให้เท่ากับ 17.06 t/m^2 อีกทั้งการทดสอบนี้ยังสามารถแยกความหนาของชั้นดินได้

C. Kererat [5] ศึกษากำลังแบกทานของดินทรายด้วยการทดสอบ KPT โดยพิจารณาอิทธิพลของมุมมองศาลายกรวยและระดับน้ำใต้ดิน การศึกษาครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างดินทรายปนตะกอน (SM) เป็นตัวแทนดินทราย การทดสอบได้จำลองให้ดินอยู่ในสภาพแห้งและมีระดับน้ำใต้ดิน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของมุมมองศาลายกรวยจะส่งผลให้จำนวนครั้งการตอกเพิ่มขึ้น โดยค่าปรับแก้จำนวนครั้งการตอกจากมุมมองศาลายกรวย 60 องศา เป็น 90 องศา และ 180 องศา เป็น 90 องศา มีค่าเท่ากับ 1.188 และ 0.878 ตามลำดับ อิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังแบกทานของดิน ลดลงร้อยละ 70 - 75 เมื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาพแห้ง และมีผลต่อกำลังแบกทานของดินที่อยู่เหนือ ระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับ 0.6 เมตร โดยลดลงเฉลี่ยร้อยละ 25 - 30 เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพดินแห้งที่มีความลึกเดียวกัน

สิทธิภัทร์ และคณะ [6] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงด้านการเคลื่อนที่ของหัวกรวยที่ได้จากการทดสอบ KPT โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบมุมของหัวกรวย 60° และ 90° ผลการศึกษาเปรียบเทียบมุมของหัวกรวย 60° และ 90° ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ไม่ทราบชนิดชั้นดิน กรณีชั้นดินทราย และกรณีชั้นดินเหนียว ผลการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากหัวกรวยทดสอบ 90° มีค่าสูงกว่าหัวกรวยทดสอบ 60° ในทุกกรณี โดยมีความแตกต่างเฉลี่ยประมาณ 10% ในกรณีที่ไม่ทราบชนิดชั้นดิน, 15% ในกรณีชั้นดินทราย และ 2.1% ในกรณีชั้นดินเหนียว ตามลำดับ

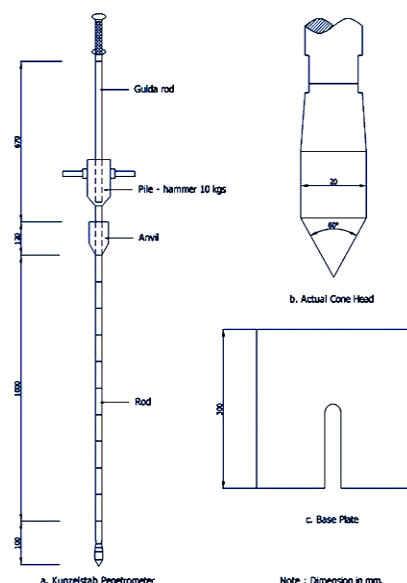
Kongkitkul W and el at.[7] ได้ศึกษาการทดสอบ KPT เพื่อประเมินค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครเพื่อใช้ในการออกแบบสมอยึดโยงใน โครงการก่อสร้างเสาตอม่อแบบตอม่อแบบผูกเงิน ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในสนามจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ประเมินทางทฤษฎี ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบในสนามจะมีค่าเท่ากับ 70% ของค่าทางทฤษฎีโดยประมาณ ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการที่มวลดินถูกรบกวนให้เกิดการแปลงสภาพระหว่างกระบวนการติดตั้งสมอยึดโยง

วีระพงษ์และสิริธัญญา [8] ศึกษาการทดสอบ KPT โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการใช้หัวกรวยที่ทำมุม 60° และ 90° โดยได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ การหาความแตกต่างของผลการทดสอบสำหรับดินในธรรมชาติ ซึ่งเลือกพื้นที่ศึกษาบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ในช่วงดินเหนียวความลึก 2.20 เมตรแรกและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการจำลองชั้นทรายในกระสอบ ผลการศึกษาพบว่าหัวทดสอบที่ทำมุม 90° ให้ผลที่สูงกว่าหัวทดสอบที่ทำมุม 60° ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงต้านทานที่ปลายทดสอบมากกว่าโดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของชั้นเหนียวที่ทดสอบในสนาม มีค่าเฉลี่ย 15.586% และในชั้นทรายที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าความแตกต่างกันสูงสุด 30 % ดังนั้นเมื่อนำมาวิเคราะห์ตามสมการของ EGAT (1980) ทำให้ค่า SPT-N ที่ได้จากหัวทดสอบ 90° มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 14-20% และค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ขอมให้ (Allowable Bearing Capacity, Q_a) มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 14-25%

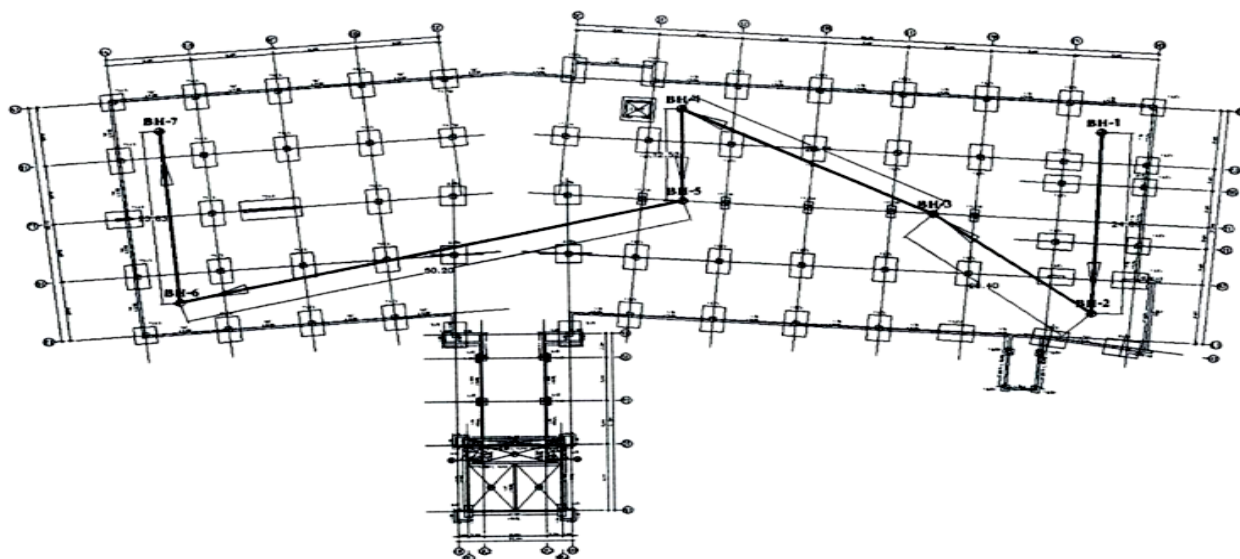
3. วิธีการ (Methodology)

อุปกรณ์ทดสอบตอกหยั่งแบบประกอบไปด้วยหัวเจาะรูปกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm มีมุมที่ปลาย 60° ก้านเจาะ (Rod) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ค้อนตอก (Pile Hammer) น้ำหนัก 10 kg ระยะชก 50 cm แท่นรองตอก (Anvil) แผ่นเหล็กรองพื้นปรับระดับ (Base Plate) ซึ่งเครื่องมือการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยการยึดหัวกรวยเหล็ก

ให้ติดกับปลายของท่อนเหล็ก จากนั้นนำทั้งเหล็กมาขีดยกับปลายด้านบนแล้วนำท่อนเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กนำ (Guide Rod) พร้อมดื่มน้ำหนักมาขีดยติดกับทั้งเหล็กซึ่งได้วางแผ่นเหล็กควบคุมการตอก (Base plate) บนพื้นดินตรงตำแหน่งที่ต้องการจะทำการทดสอบจัดชุดทดสอบให้อยู่ในแนวตั้งแล้วเริ่มนับจำนวนครั้งที่การจมน้ำหนักทุกๆ 20 cm และบันทึกผลการทดสอบ รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการทดสอบตอกทะลวง (SPT) และ การทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT) เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักของชั้นดินในสนามบริเวณโครงการก่อสร้างอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ณ ตำรา่งทุ่งกะโด้



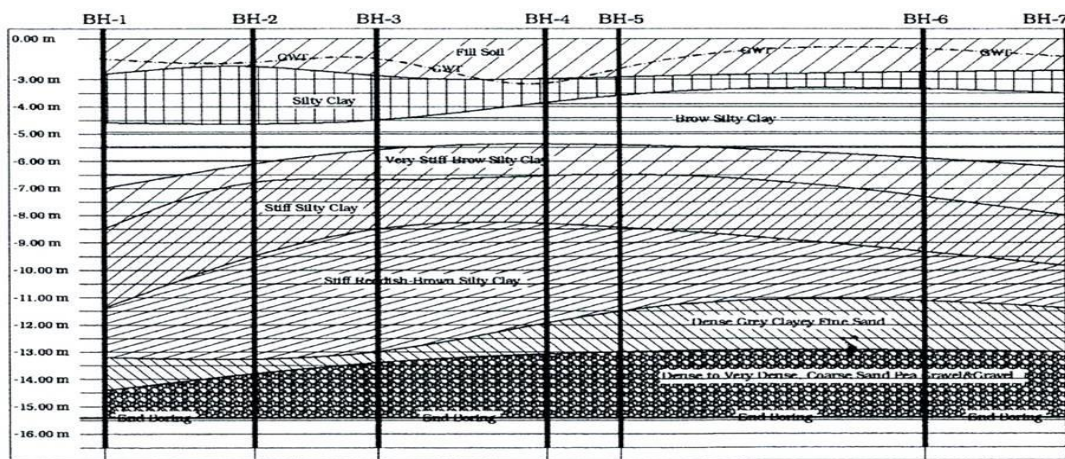
รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบ Kunzelstab Penetration Test (EGAT, 1980)



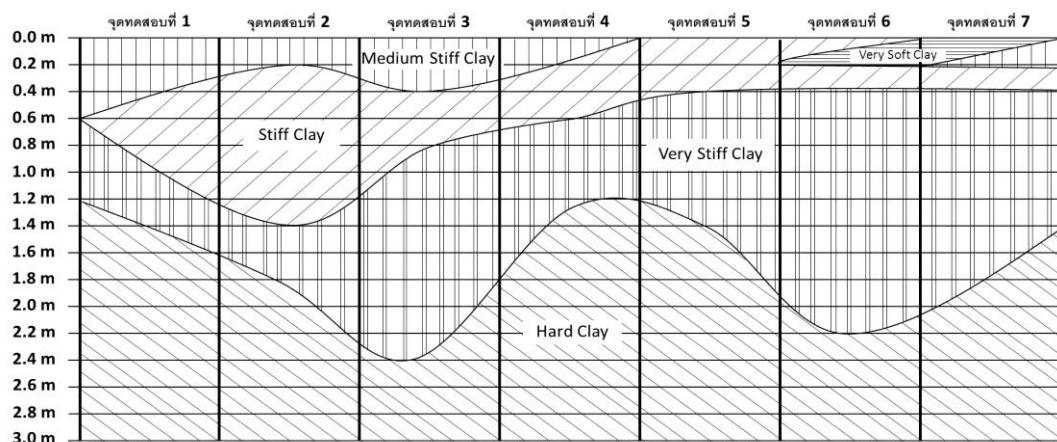
รูปที่ 2 ตำแหน่งการทดสอบประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักโดย SPT และ KPT

4. ผลการศึกษา

ผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ณ ตำบองทุ่งกะโล่ พบว่าชั้นดินมีความซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีการจัดเรียงตัวของดินเหนียว (Clay) ตะกอนทราย (Silt) หรือ ดินเหนียวปนตะกอนทราย (Silty Clay) สลับกันตลอดความลึก ตั้งแต่ใต้ระดับดินถม - 3.00 m จนถึงระดับ - 13.00 m โดยที่ระดับความลึก - 14.00 m ชั้นดินเปลี่ยนแปลงเป็นชั้นทรายและกระจายทอดตัวทั่วบริเวณจนกระทั่งพบชั้นทรายแน่นปนกรวด (Dense Sand-Gravel) ในระดับความลึกที่ - 13.50 m โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 3 การคาดคะเนลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินโดยนำผลการทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT) เทียบเคียงกับความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว [3] จะสามารถบ่งชี้คุณลักษณะของชั้นดินได้โดยสังเขปในรูปของความแน่น โดยพบว่าค่าการตอกทะลวงมีค่าที่สูงมากที่ระดับความลึก 3.00 เมตร จากระดับดินเดิมซึ่งเป็นค่าที่สูงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจึงหยุดการทดสอบที่ระดับความลึกนี้



รูปที่ 3 การคาดคะเนลักษณะชั้นดินจากผลการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (SPT) [9]



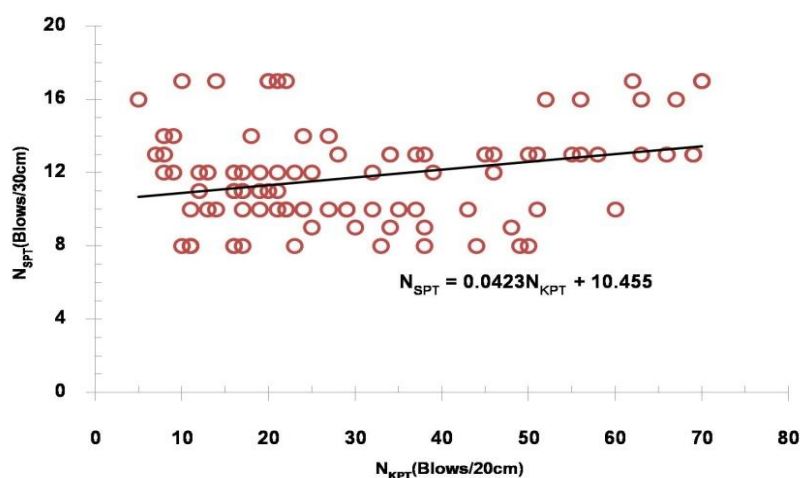
รูปที่ 4 การคาดคะเนลักษณะชั้นดินจากผลการทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT)

รูปที่ 4 แสดงการคาดคะเนลักษณะชั้นดินจากผลการทดสอบ KPT พบว่าลักษณะชั้นดินมีความซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดความลึกที่ทดสอบเช่นเดียวกับกับผลการทดสอบ SPT โดยที่ระดับความลึก 0.00 – 1.00 m จากระดับดินเดิมบ่งชี้ว่าชั้นดินมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียวอัดตัวแน่นปานกลางถึงดินเหนียวอัดตัวแน่น (Medium to Stiff Clay) ที่ระดับความลึก 1.00 – 2.00 m บ่งชี้ว่าเป็นชั้นดินเหนียวแน่นมาก (Very Stiff Clay) และที่ระดับความลึก 2.00 – 3.00 m บ่งชี้ว่าเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Hard Clay) เมื่อเปรียบเทียบการคาดคะเนลักษณะชั้นดินระหว่างจากการทดสอบทั้ง 2 วิธีพบว่า การคาดคะเนลักษณะชั้นดินจากผลการทดสอบ KPT บ่งชี้ถึงชั้นดินที่มีระดับความแข็งมากกว่าการคาดคะเนจากผลการทดสอบ SPT ที่ระดับความลึกเดียวกันดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 โดยรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการ SPT (N_{SPT}) และค่าการทดสอบ KPT (N_{KPT}) โดยสามารถคำนวณค่า N_{SPT} ในรูปของผลการทดสอบ KPT ดังแสดงในสมการที่ 4 รูปที่ 6 แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{KPT} กับ N_{SPT} ในพื้นที่ต่างๆ โดยครอบคลุมลักษณะชั้นดินแบบทรายปนตะกอนทราย ดินเหนียวปนทราย ทรายปนดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอนทราย [3][10][11] และ [12] โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{KPT} กับ N_{SPT} มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการแปลผลการทดสอบระหว่างการตอกหยั่งเบาและการตอกทะลวง

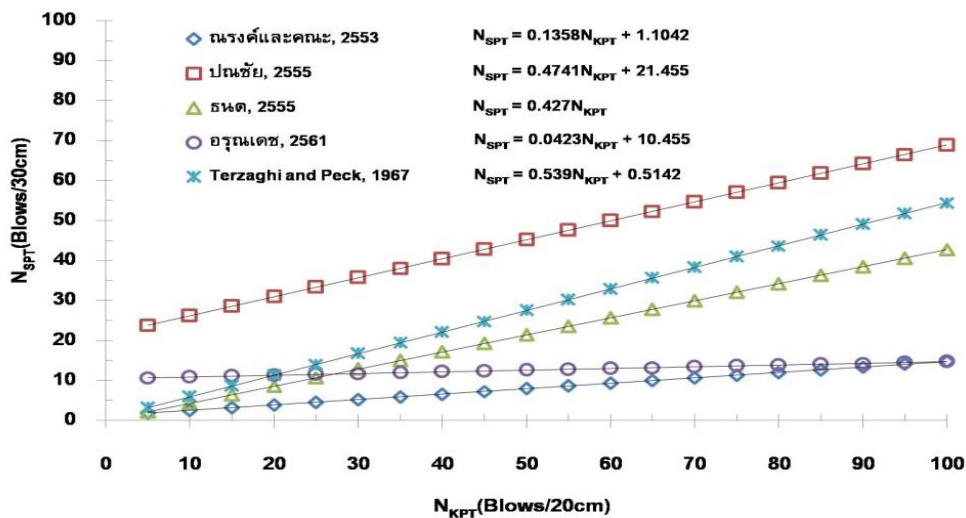
ระดับความลึก	การทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT)		การทดสอบตอกทะลวง (SPT)	
	ลักษณะชั้นดิน	กำลังรับน้ำหนัก	ลักษณะชั้นดิน	กำลังรับน้ำหนัก
0.00 – 1.00 m	ดินเหนียวอัดตัวแน่นปานกลางถึงอัดตัวแน่น	$Q_u = 13 - 29 \text{ t/m}^2$, $Q_u = 29 - 42 \text{ t/m}^2$	ดินเหนียวอัดตัวแน่น	$Q_u = 10 - 20 \text{ t/m}^2$
1.00 – 2.00 m	ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	$Q_u = 42 - 69 \text{ t/m}^2$	ดินเหนียวอัดตัวแน่น	$Q_u = 10 - 20 \text{ t/m}^2$
2.00 – 3.00 m	ดินเหนียวแข็ง	Q_u มากกว่า 69 t/m^2	ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	$Q_u = 20 - 40 \text{ t/m}^2$

$$N_{SPT} = 0.0423N_{KPT} + 10.455 \quad (4)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบตอกหยั่งเบา (N_{KPT}) กับการทดสอบตอกทะลวง (N_{SPT})

จากการเปรียบเทียบข้อมูลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ SPT และ KPT ในอดีตที่ผ่านมา กับผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าในกรณีชั้นดินเหนียวแข็ง ผลการทดสอบ SPT และ KPT มีการตอบสนองในรูปของจำนวนครั้ง การตอก (N-Blow) ที่ใกล้เคียงกันมาก โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีที่ค่อนข้างจะแบนราบ ทั้งนี้ คาดว่าเป็นผลมาจากพลังงานที่ใช้ในการตอกทดสอบของทั้ง 2 วิธีถูกต้านทานไว้ด้วยตัวประกอบด้านกำลัง (Strength Parameter) ที่แข็งแรงของชั้นดินเหนียวแข็งไว้ทั้งหมดจึงไม่ส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure, ΔU) เพิ่มขึ้นในระหว่าง ที่มีแรงกระทำจากน้ำหนักตุ้มตอก ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบในชั้นดินทรายปนตะกอนทราย ดินเหนียว ปนทราย ทรายปนดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอนทราย



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{KPT} กับ N_{SPT}

นอกจากความพยายามในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT กับ KPT แล้วนั้นยังพบว่า A.jotisanksa et al. [13] ได้ใช้เครื่องมือทดสอบเพื่อประเมินคุณลักษณะของชั้นดินในสนามซึ่งได้แก่ การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยใช้ใบพัด (Filed Vane Shear, FV) การทดสอบเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นพื้นผิวทางธรณีฟิสิกส์ (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) ที่พัฒนาวิธีการทดสอบและการแปลผลโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [14,15] และการทดสอบตอกหยั่งเบา (KPT) เพื่อศึกษาการตอบสนองภาคสนามของเขื่อนกั้นน้ำภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ในพื้นที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินโดย SASW จะให้ค่าที่สูงกว่า FV เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากน้ำหนักดินกดทับจากตัวเขื่อนกั้นน้ำ (Overburden Pressure) โดยลักษณะความต้านทานจำนวนครั้งในการตอก (N-Blow) จากการทดสอบ KPT ให้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกับความต้านทานความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity) จากการทดสอบ SASW ตลอดความลึก แต่ทั้งนี้ก็ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ KPT และ SASW ในรูปของความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินได้อย่างชัดเจนเนื่องจากสมมติฐานในการทดสอบและช่วงหรือความละเอียดในการวัดผลมีความแตกต่างกันอย่างมาก

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลการทดสอบดอกล้างเบ้า (KPT) ในชั้นดินเหนียวแข็งเพื่อประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินพบว่า จำนวนครั้งในการทดสอบ (N-Blow) ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบการดันทะลวงมาตรฐาน (SPT) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น หากนำผลการทดสอบดังกล่าวแปรความโดยใช้ตารางที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N-Blow กับความแข็งแรงของดินเหนียวที่นำเสนอโดย Terzaghi, Peck (1967) จะพบว่า ผลการทดสอบโดย KPT จะแสดงคุณสมบัติด้านกำลังที่มีความแข็งแรงสูงกว่า การคาดคะเนด้วยผลจากการทดสอบ SPT ที่ความลึกเดียวกัน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการทดสอบดอกล้างเบ้าเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถนำไปใช้เพื่อประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักชั้นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับวิธีนี้สามารถทดสอบได้รวดเร็วและเครื่องมือทดสอบมีน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบในสนามรูปแบบอื่นๆ จึงเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญในการเลือกใช้งาน แต่ทั้งนี้ผู้ทดสอบจำเป็นต้องเข้าใจถึงข้อจำกัดบางประการของวิธีการทดสอบ อันนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้องต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ที่ได้ให้อาณัติเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] EGAT. Soil exploration by Kunzelstab penetration test Elec-tricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1980.
- [2] Meyerhof, G.G. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1956, 82(1), pp. 1–19.
- [3] K. Terzaghi and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York: Wiley, 1987.
- [4] Phantachang, T. Evaluation of Soil Profile and Allowable Bearing Capacity of Soil Using Kunzelstab Penetration Test, *KPT. RMUTP Research Journal*, 2018, 12(2), pp. 60 – 72.
- [5] C, Kererat. Bearing capacity investigation of silty sandy soil layer using Kunzelstab test. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2016, 16(19), pp. 57 – 61.
- [6] Eua-Apiwatch, S. Jeamwattanareak, A. and Pengsri, S. The Correlations between KPT and SPT for Burapha University Subsoil. In: *20th nation convention on civil engineering conference*, Chonburi, 8 – 10 July 2015, pp. 1 – 5.
- [7] Kongkitkul, W. et al. Evaluation of Guy Anchorage Strength in Clay for Transmission Tower. *Journal of Testing and Evaluation*, 2016, 41(4), pp. 564 – 570.
- [8] Krasaetheep, W. and Thongchart, S. A Comparasion of Cone tip in Kunzelstab Penetration Test (KPT). In: *17th nation convention on civil engineering conference*, Udontani, 9 – 11 May 2012, pp. 1 – 8.
- [9] Lampang Soil Test and Construction ., Ltd. *soil exploration report building*: Social Sciences Project, 2010.
- [10] Kaewwiset, N. Wiphawin, W. and Sutrawan, K. *The correlation between engineering properties of KKKU soil and results of kunzelstab penetration test*. Bachelor Engineering Project, khon kaen university, 2010

-
- [11] Chanchiao, P. *Relationship Between Kunzelsab Number and Unconfined Compressive Strength for Stiff Chiang Mai Clay*. Bachelor Engineering Project, Chiangmai University, 2012.
- [12] On-ur, T. *Relationship Between Kunzelsab Number and SPT Number for Stiff Chiang Mai Clay*. Bachelor Engineering Project, Chiangmai University, 2012.
- [13] A.Jotisankasa, S.Pramusandi, S.Nishimura and S.Chaiprakaikew. Field Response of an Instrumented Dyke subjected to Rainfall. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2019, 50(1), pp. 1 – 12
- [14] Nazarian, S., Stokoe, K.H.II and Hudson, W.R. Use of Spectral Analysis of Surface Waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transportation Research Record*, 1983, 930: pp. 38 – 45
- [15] Joh, S.-H. *Advances in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements*. PhD. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1996