การหาความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบตอกหยั่งแบบเบา กับ การตอกทดสอบมาตรฐาน ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติจากฐานข้อมูลการทดสอบจริงในสนาม เพื่อใช้ในงานออกแบบฐานรากระดับตื้น

Determination of relationship between dynamic probe light and standard penetration test by statistical analysis of field load tests for applying to shallow foundation designs

ธนกฤต โรจนชัยศรี[1,*] และ ฐิรวัตร บุญญะฐี[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: rojanachaisri.t@gmail.com*

บทคัดย่อ

การออกแบบทางวิศวกรรมปฐพีทุกชนิดจำเป็นจะต้องทราบข้อมูลพื้นฐานต่างๆเพื่อใช้เป็นสมมุติฐานหรือเงื่อนไขในการออกแบบ ข้อมูลพื้นฐานอันหนึ่งซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบได้แก่ ภาคตัดของดิน ซึ่งแสดงถึงประเภทและคุณสมบัติของดิน ณ ความลึกระดับต่างๆ ในปัจจุบันมักจะดำเนินการทดสอบด้วยวิธีการตอกทดสอบมาตรฐาน(SPT) อย่างไรก็ตามการทดสอบแบบนี้เหมาะสำหรับดำเนินการในบริเวณที่รถยนต์สามารถเข้าถึงได้ เพราะต้องขนอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมากและมีค่าใช้จ่ายในการขนย้ายสูง ในกรณีที่ต้องการสำรวจในช่วงความลึกไม่มากหรือ ต้องการสำรวจเพียง 2~3 ตำแหน่งต่อการขนย้ายหนึ่งครั้ง อาจใช้วิธีการอื่นๆ ที่ทำได้สะดวกว่า เช่น วิธีการทดสอบตอกหยั่งแบบเบา (DPL, EN ISO 22476) ซึ่งอุปกรณ์มีน้ำหนักเบาและสามารถขนย้ายด้วยจำนวนคน 1~2 คน ในการศึกษานี้ได้ทำประเมินอิทธิพลจากแรงเสียดทานระหว่างก้านเจาะกับชั้นดินโดยรอบว่ามีผลต่อค่าตรวจวัดตามวิธีการตอกหยั่งแบบเบาอย่างไร โดยผู้ศึกษาได้ทำการวัดพลังงานระหว่างการตอกในช่วงความลึกต่างๆ เปรียบเทียบกับพลังงานบนผิวดิน เพื่อนำไปปรับปรุงสมการสหสัมพันธ์ระหว่างผลการตอกทดสอบมาตรฐานและผลการทดสอบตอกหยั่งแบบเบาให้ดีขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: การเจาะสำรวจดินระดับตื้น, การทดสอบตอกหยั่งแบบเบา, การวัดพลังงาน

Abstract

Properties and variation of subsoils are usually required for a geotechnical design. This information can be obtained from various tests including the standard penetration test (SPT) which may be the most common technique in Thailand. Due to its weight, the SPT is only suitable for car accessible areas and also requires a certain cost for the mobilization of equipment. For shallow or low number investigations, the tests that can be operated and mobilized by 1~2 people such as dynamic probe light tests (DPL, EN ISO 22476) may be more appropriate. In this study, the influence of friction between test rod and surrounding ground to the DPL test results is investigated using a DPL apparatus with energy measurement sensors. The comparisons are also made between SPT and DPL results for developing an empirical relationship between standard penetration test and dynamic probe test under working environment in Thailand.

Keywords: boring shallow soil, Dynamic probe light, Energy measurement

1. บทนำ

โดยทั่วไปในงานโครงสร้างขนาดเล็กวิศวกรจะเลือกใช้ฐานรากตื้นในการออกแบบ โดยฐานรากตื้นมีความสำคัญในการถ่ายแรงจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินซึ่งควรจะสร้างลงในชั้นดินที่มีกำลังค่อนข้างสูงโดยจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ วิธีที่นิยมใช้และเป็นมาตรฐานในการหาประเภทและคุณสมบัติของดินตามลำดับความลึกต่างๆ ได้แก่ การตอกทดสอบมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) แต่การทดสอบนี้มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบต่อพื้นที่ค่อนข้างสูง ไม่เหมาะสำหรับงานระดับตื้น จึงมีเครื่องมือทดสอบขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับการเจาะสำรวจดินระดับตื้นหลากหลายวิธีได้แก่ คุนเซลสเตป(Kunzelstab), การเจาะหยั่งด้วยหัวกรวย(Cone penetration test, CPT), การตอกหยั่งแบบเบา(Dynamic probe light, DPL) วิธีที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การตอกหยั่งแบบเบา ซึ่งเป็นวิธีการตอกทดสอบหยั่งแบบเบา ตามมาตรฐาน EN ISO 22476 โดยมีงานวิจัยที่ได้จัดทำแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการตอกหยั่งแบบเบาและ การตอกทดสอบมาตรฐาน[3] สำหรับการออกแบบฐานรากตื้น

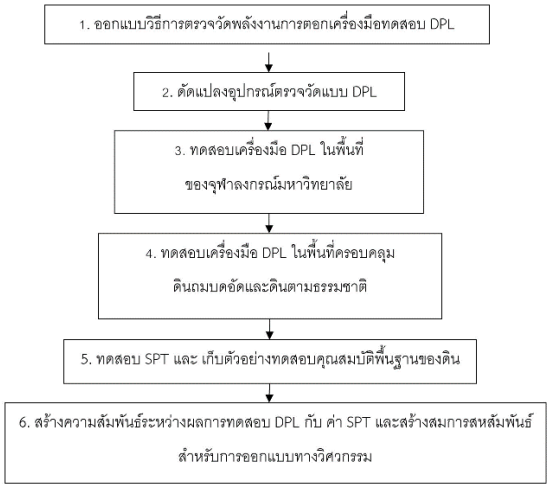
โดยการทดสอบจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อก้านเจาะสามารถหมุนได้แบบอิสระหรือสามารถยกออกได้ด้วยมือเมื่อการทดสอบเสร็จสิ้น[9] ได้มีการเสนอวิธีการแก้ข้อผิดพลาดขึ้นมาหลายวิธีจากงานวิจัยต่างๆ[6] ได้เสนอวิธีหมุนสลับระหว่าง กรวยขนาดใหญ่ ก้านขยาย และปลอกด้านนอกเพื่อลดแรงเสียดทานของผิว แต่วิธีนี้ต้องใช้เวลานาน และ เกิดแรงเสียดทานระหว่างก้านเจาะขึ้นมาแทน Baudrillard [2] ได้ใช้วิธีการเติมช่องว่างด้วยวิธีโคลนเจาะอย่างต่อเนื่องโดยใช้หัวกรวยขนาดใหญ่ โดยในช่องว่างจะฉีดโคลนผ่านแท่งขยายแบบกรวยอย่างต่อเนื่องจะช่วยป้องกันแรงเสียดทานระหว่างผิว

แต่วิธีนี้ต้องทำหัวฉีดแบบพิเศษขึ้นทำให้ไม่เหมาะสมในบางกรณี[5] ใช้วิธีวัดพลังงาน SPT เพื่อวัดพลังงานด้วยวิธี แรง-ความเร็ว (EFV) ในการคำนวนพลังงาน[12] บ่งบอกว่าวิธีวัดพลังงานนี้มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำมากที่สุดในการประมาณค่าพลังงานระหว่างการแผ่กระจายของคลื่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการวัดพลังงานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการตอกทดสอบมาตรฐานและการตอกหยั่งแบบเบา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือทดสอบ DPL – SPT โดยการใช้วิธีการวัดพลังงาน ในงานออกแบบฐานรากระดับตื้น

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

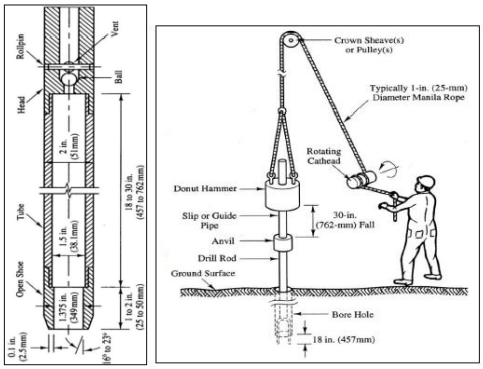
รายละเอียดขั้นตอนการทำงานวิจัย พร้อมทั้งตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านวิศวกรรมของตัวอย่างทดสอบ สำหรับงานออกแบบฐานรากตื้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การตอกทดสอบมาตรฐาน

การตอกทดสอบมาตรฐานมีค่ามาตรฐานเช่น ASTM D-1586 และ BN EN ISO 22476-3 มาตรฐานการทดสอบ SPT กำหนดไว้ว่า การทดสอบใช้กระบอกเก็บตัวอย่างมาตรฐานที่เรียกว่า split-spoon (ดังแสดงในรูปที่ 2a) มีระยะการตอกลงในชั้นดินเท่ากับ 450 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) น้ำหนักค้อนเท่ากับ 630 N (140 ปอนด์) มีระยะทิ้ง เท่ากับ 760 มิลลิเมตร (1 ฟุต) แสดงภาพจำลองอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2b



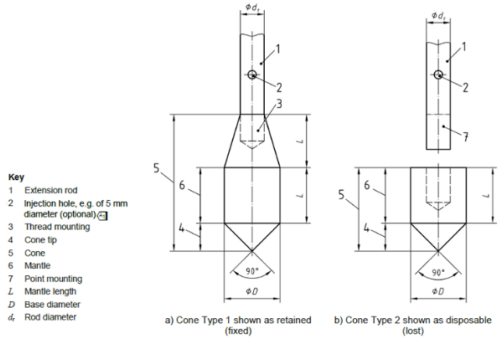
(a) กระบอกมาตรฐาน (b) อุปกรณ์ทดสอบ SPT

รูปที่ 2 การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) [8]

การตีความจากผลการทดสอบ SPT ในทางปฏิบัติมีอยู่ 2 ประเภท คือ การนำค่า N ไปหาค่ากำลังแบกทานของฐานรากโดยตรง หรือการนำค่า N ไปหาค่าพารามิเตอร์กำลังของดิน เช่น มุมแรงเสียดทาน (Ø) หรือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (qu) ก่อนจากนั้นจึงนำไปออกแบบฐานรากต่อไป

2.2 การตอกหยั่งแบบเบา

อุปกรณ์การทดสอบแบบ DPL มีที่มาจากการทดสอบแบบ Kunzelstab (KPT) ซึ่งใช้กันอยู่ในประเทศเยอรมันตามมาตรฐาน DIN-4094 ต่อมาเมื่อได้มีการรวมประเทศต่างๆ ในยุโรปเข้าเป็นสหภาพยุโรป จึงได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบกลาง (Eurocode) และได้ผนวกวิธีการทดสอบแบบ KPT เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบที่เรียกว่า Dynamic probing [4] ซึ่งมีขนาดอุปกรณ์แตกต่างๆ กันไปตามความลึกที่ต้องการทดสอบ โดยการทดสอบแบบ DPL เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์ขนาดเล็กและเบาที่สุดในกลุ่มการทดสอบประเภทนี้



รูปที่ 2 มาตรฐานเครื่องมือทดสอบ Dynamic probe light (DPL) [4]

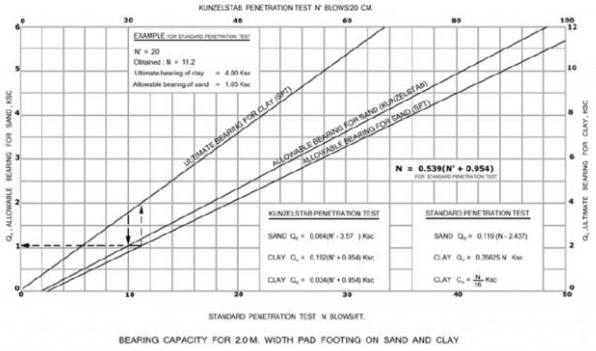
Dynamic Probing Apparatus	Sym-bol	Unit	DPL (light)
Driving device			
hammer mass, new	m	kg	10 ± 0,1
height of fall	h	mm	500 ± 10
Anvil			
diameter	d	mm	$50<d<D_h$ [a]
mass (max.)	m	kg	6
(guide rod included)			
90° Cone			
nominal base area	A	cm^2	10
base diameter, new	D	mm	35,7 ± 0,3
base diameter, worn (min.)		mm	34
mantle length (mm)	L	mm	35,7 ± 1
length of cone tip		mm	17,9 ± 0,1
tip max. permissible wear		mm	3
Drive rods [c]			
mass (max)	m	kg/m	3
diameter OD (max)	d_r	mm	22
Specific work per blow	$\frac{mgh/A}{E_m}$	kJ/m^2	49

รูปที่ 3 คุณสมบัติตามมาตรฐานของเครื่องมือทดสอบ DPL [4]

โดยได้ดัดแปลงอุปกรณ์ตรวจวัดให้เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติโดยไม่ต้องใช้คนจับทำให้ลดข้อผิดพลาดเนื่องจากการวัดระยะยก และ ความสม่ำเสมอของการกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบ DPL [4]

การทดสอบ DPL มีหลักการในการทดสอบใกล้เคียงกับการทดสอบ SPT การทดสอบทั้งสองแบบอาศัยการนับจำนวนครั้งในการตอกด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานเพื่อทำให้หัวเจาะจมลงไปในดินตามความลึกที่ต้องการ ดังนั้นจึงน่าจะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบทั้งสองแบบได้ โดยกระบวนการสร้างกราฟความสัมพันธ์จะหาได้จากการทดสอบ DPL และ SPT ในปริมาณมากเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพร้อมทั้งครอบคลุมพื้นที่ดินถมบดอัดและดินตามธรรมชาติเช่นเดียวกับวิธีการแปลผลตามรายงานของกฟผ.[3] ซึ่งได้กระทำไว้กับการทดสอบแบบ KPT ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้เมื่อสามารถแปลงผลจากการทดสอบ DPL ไปเป็นผลการทดสอบแบบ SPT ในรูปแบบกราฟก็จะสามารถนำไปหาประมาณหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบฐานรากหรือโครงสร้างระดับตื้นเช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ มุมแห่งความเสียดทานของดิน ฯลฯ จากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical formula) ที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้ว โดยผลการศึกษาระบุค่ากำลังของดินกับค่าจำนวนการตอกจากเครื่องมือทดสอบ KPT และ SPT ครอบคลุมดินเหนียวและดินทราย [7],[10]

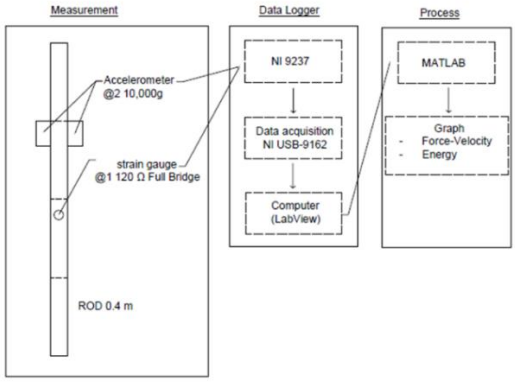


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกและกำลังของดินสำหรับทราย กับดินเหนียว [3]

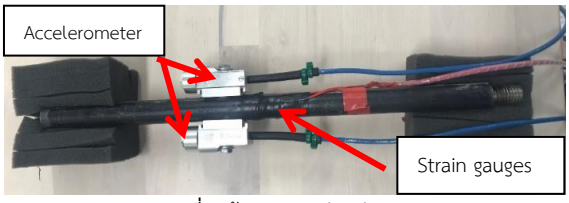
2.3 วิธีการตรวจวัดพลังงาน

ในงานส่วนนี้ได้ออกแบบวิธีการตรวจวัด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 6

1. การตรวจวัดสัญญาณ ออกแบบรูปแบบการวัดพลังงานด้วยการประดิษฐ์อุปกรณ์เพิ่มเติมในก้านเจาะใช้สำหรับวัดพลังงานการตอก ด้วยเครื่องมือวัดความเร่ง 2 ตัว และ เครื่องโหลดเซลล์ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 7
2. การปรับสภาพสัญญาณและเก็บข้อมูล ปรับสภาพสัญญาณด้วยโมดูลวัดสัญญาณรุ่น NI 9237 ที่ตรวจวัดสัญญาณแบบ Strain โมดูลตรวจวัดนี้ต้องทำงานร่วมกับโปรแกรมเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมาเองสำหรับโครงการนี้ด้วยภาษา LabView โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้สำหรับรับสัญญาณจากเซนเซอร์ 3 ชิ้น แล้วบันทึกผลเพื่อการประมวลผลในขั้นต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลรูปแบบกราฟเพื่อการตรวจสอบในสนามระหว่างการตรวจวัดได้ด้วย
3. การประมวลผลสัญญาณ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากขั้นตอนก่อนหน้าจะถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อแปลงเป็นข้อมูลดังต่อไปนี้ 1. แรงกดในก้านเจาะ F(t) โดยการแปลงผลจาก strain gauge จำนวน 4 ตัว 2. ความเร็วของการสั่นในก้านเจาะ v(t) โดยการแปลงผลจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 6 รูปแบบการวัดพลังงานเครื่องมือทดสอบ DPL

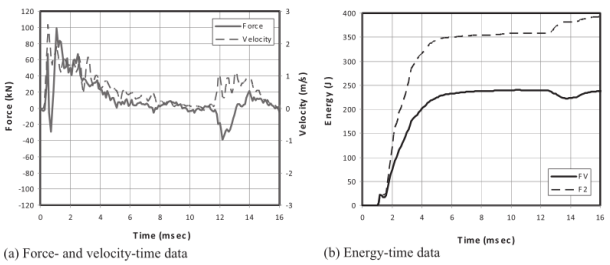


รูปที่ 7 ก้านทดสอบวัดพลังงาน

2.4 การคำนวนพลังงาน

การตรวจวัดพลังงานที่ SPT และ DPL โดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดความแรงและความเร็วเข้าที่ก้านเจาะของเครื่องมือทดสอบ DPL,SPT แล้วนำอุปกรณ์ที่ดัดแปลงแล้วไปใช้ตรวจวัดพลังงานการตอกที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการตกกระทบของตุ้มน้ำหนัก โดยพลังงานการตอกได้จากการคำนวณจากสมการที่ (1) ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4633 โดยรูปแบบการตรวจวัดพลังงานออกมาในรูปแบบกราฟดังแสดงในรูปที่ 8

$$E = \int_0^{max} F(t)v(t)dt \qquad (1)$$



รูปที่ 8 การตรวจวัดแรงและความเร็วของก้านเจาะเพื่อนำไปคำนวณพลังงานการตอกที่เกิดขึ้นจริง [11]

โดยในการตรวจวัดพลังงานที่ SPT ใช้การคำนวนการปรับแก้พลังงานที่ 60 เปอร์เซ็นต์ (N_{60}) จากสมการที่ (2)

$$N_{60} = n * \frac{E_m}{E_{60}} \% \qquad (2)$$

N_{60} = ค่า N ที่พลังงาน 60 เปอร์เซ็นต์

E_m = พลังงานจากการวัดในสนาม

E_{60} = พลังงานที่ 60 เปอร์เซ็นต์

2.5 สถานที่ทดสอบ

ทำการทดสอบตอกหยั่งแบบเบาและตอกทดสอบมาตรฐาน ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครทั้งหมด 10 จุดทดสอบ ในช่วงความลึก 0-5 เมตร โดยแสดงพิกัดที่ได้ทำการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1

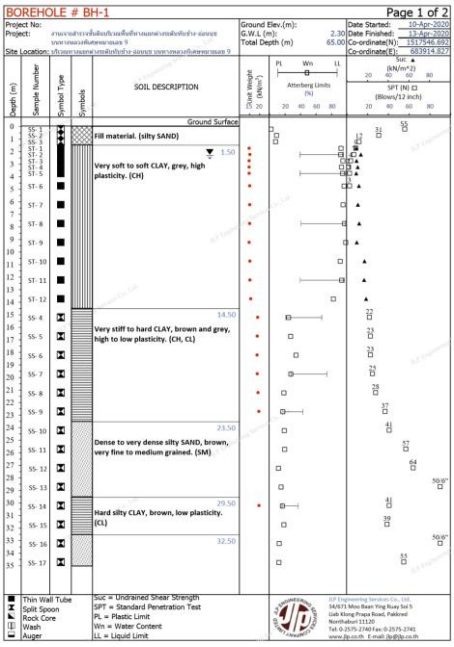
ตารางที่ 1 รายละเอียดจุดทดสอบในกรุงเทพมหานคร 10 จุด

จังหวัด	กรุงเทพมหานคร	
ตำแหน่ง	สถานที่	พิกัด (ละติจูด/ลองติจูด)
1	เมืองทองธานี BP-1	13.899458,100.544400
2	เมืองทองธานี BP-2	13.903697,100.543609
3	เมืองทองธานี BP-3	13.910078,100.544388
4	เมืองทองธานี BP-4	13.916088,100545094
5	เมืองทองธานี BP-5	13.918177,100.545621
6	บางนา BP-2	13.661250,100.637694
7	สามย่าน BP-1	13.734027,100.524447
8	สามย่าน BP-2	13.734056,100.524653
9	อ่อนนุช BP-1	13.721214,100.700836
10	อ่อนนุช BP-2	13.719462,100.700694
11	อ่อนนุช BP-3	13.716758,100.700915
12	อ่อนนุช BP-4	13.713370,100.700613

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบการตอกทดสอบมาตรฐาน

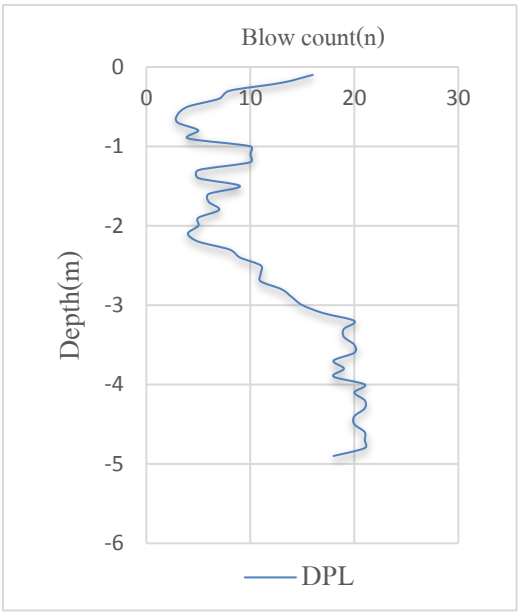
การตอกทดสอบมาตรฐาน ทดสอบทั้งหมด 10 หลุมเจาะ นำค่า N_{spt} ที่ระยะ 0-5 เมตร จากโครงการเจาะสำรวจดินในกรุงเทพมหานครทั้งสิ้น 3 โครงการ ได้แก่ 1. โครงการเมืองทองธานี 2. โครงการบางนา 3. โครงการทางแยกต่างระดับ ทับช้าง-อ่อนนุช



รูปที่ 9 รายงานผลการเจาะสำรวจดินทางแยกต่างระดับ ทับช้าง-อ่อนนุช หลุมเจาะ BH 1

3.2 ผลการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบา

จากการเข้าไปทดสอบร่วมกับโครงการเจาะสำรวจดิน ได้ค่าทดสอบ DPL เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบ ผลทดสอบ SPT ทั้งหมด 10 จุดทดสอบ ในระดับความลึก 0-5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 10



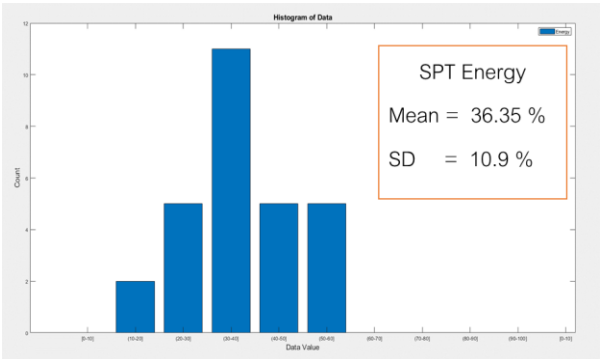
รูปที่ 10 การทดสอบตอกหยั่งแบบเบา ที่ โครงการบางนา BH 2

3.3 ผลการทดสอบพลังงานตอกทดสอบมาตรฐานตามชนิดตุ้มตอก

การทดสอบวัดพลังงานตอกทดสอบมาตรฐานในงานวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบทั้งหมด 2 หลุมตอกทดสอบ โดยในการตอกทดสอบมาตรฐาน ใช้ตุ้มตอกทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่ โดนัท และ เซฟตี้ ซึ่งข้อมูลทดสอบวัดพลังงานที่วัดได้จากการทดสอบ มีดังนี้ 1.ตุ้มตอกทดสอบโดนัท ได้ค่าทดสอบจำนวน 34 ข้อมูล และทดสอบในช่วง 1-5 เมตร 2.ตุ้มตอกทดสอบเซฟตี้ ได้ค่าทดสอบจำนวน 28 ข้อมูล และทดสอบในช่วง 1-5 เมตร โดยจะแสดงกราฟแท่งพลังงานประสิทธิผลตามชนิดตุ้มตอกดังต่อไปนี้

3.3.1 ตุ้มตอกแบบโดนัท

การทดสอบตุ้มตอกมาตรฐาน ด้วย ตุ้มตอกโดนัท ทั้งหมด 34 ข้อมูล เมื่อนำผลการทดสอบมาแสดงในกราฟแท่งเพื่อดูข้อมูลการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลได้ดังแสดงในรูปที่ 11

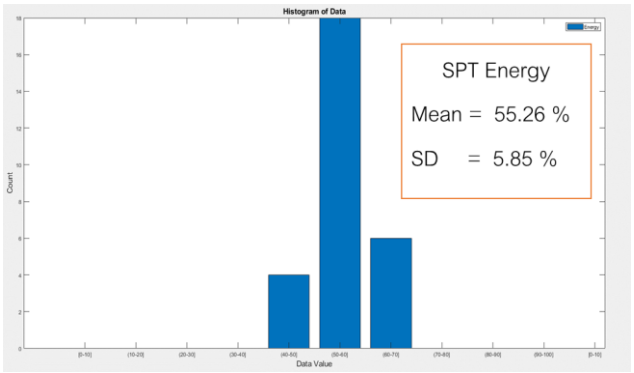


รูปที่ 11 ค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัท

จากรูป การกระจายตัวของพลังงานด้วยตุ้มตอกโดนัทเป็นรูปแบบการกระจายตัวปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย อยู่ที่ 36.35% และ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 10.90%

3.3.2 ตุ้มตอกแบบเซฟตี้

การทดสอบตุ้มตอกมาตรฐาน ด้วย ตุ้มตอกเซฟตี้ ทั้งหมด 34 ข้อมูล เมื่อนำผลการทดสอบมาแสดงในกราฟแท่งเพื่อดูข้อมูลการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลได้ดังแสดงในรูปที่ 12

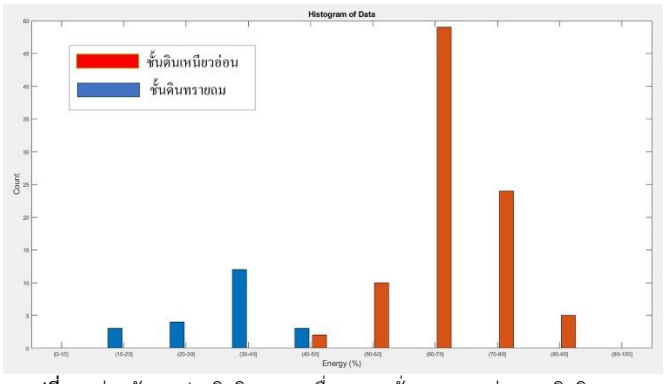


รูปที่ 12 ค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้

จากรูป การกระจายตัวของพลังงานด้วยตุ้มตอกเซฟตี้เป็นรูปแบบการกระจายตัวปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย อยู่ที่ 55.26% และ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 5.85%

3.4 ผลการทดสอบพลังงาน DPL แบ่งตามลักษณะชั้นดิน

จากผลรายงานเจาะสำรวจดินมีผลทดสอบหาคุณสมบัติของดินด้วยวิธีการ Unified Soil Classification ผลทดสอบในช่วง 1-5 เมตร ได้ดิน 2 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียวอ่อน มีจำนวนข้อมูล 90 ข้อมูล อยู่ในช่วงความลึก 2-5 เมตร ดินทรายถม มีจำนวนข้อมูล 22 ข้อมูล อยู่ในช่วงความลึก 1-2 เมตร สำหรับทดสอบหาพลังงานดังแสดงในรูปที่ 13

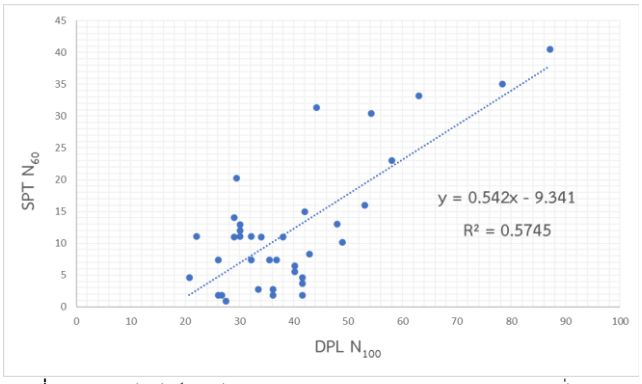


รูปที่ 13 ค่าพลังงานประสิทธิผลของเครื่องตอกหยั่งแบบเบาแบ่งตามชนิดดิน

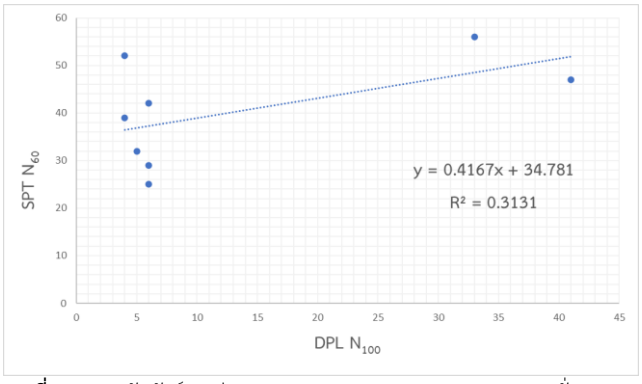
จะพบว่าค่าพลังงานที่ชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าพลังงานอยู่ที่ 67.07% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 7.76% ชั้นดินทรายถม มีค่าพลังงานอยู่ที่ 31.96% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6.96%

3.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากพลังงานการทดสอบ SPT ของตุ้มตอก โดนัท และ เซฟตี้ ผลการทดสอบค่าพลังงานประสิทธิผล ได้ 36.35% และ 55.26% ตามลำดับ ต้องปรับแก้พลังงานไปที่ 60% จากสมการที่ 2 จะได้ค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้พลังงาน ซึ่งมีค่าดังนี้ 0.607 สำหรับตุ้มตอกโดนัท และ 0.921 สำหรับตุ้มตอกเซฟตี้ ส่วนค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้การทดสอบ DPL จะแบ่งตามชนิดดินจะปรับแก้ที่ 100 เปอร์เซ็นต์เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ซึ่งมีค่าดังนี้ 0.670 สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน 0.319 สำหรับชั้นดินทรายถม เมื่อปรับแก้เสร็จสิ้นจากทั้งหมด 10 ชุดข้อมูล จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอกทดสอบมาตรฐาน และการตอกหยั่งแบบเบา ในชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอกทดสอบมาตรฐาน และการตอกหยั่งแบบเบา ในชั้นดินทรายถม

จากการนำข้อมูลค่า N_{dpl} และ N_{60} มาวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง N_{dpl} และ N_{60} ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับผลวิเคราะห์ดินเหนียวอ่อน จำนวน 36 ผลข้อมูล

$$N_{60} = 0.542N_{dpl} - 9.341 \quad (3)$$

สำหรับผลวิเคราะห์ดินทรายถม จำนวน 8 ผลข้อมูล

$$N_{60} = 0.417N_{dpl} + 34.781 \quad (4)$$

4. บทสรุป

จากผลการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้

1. ค่าพลังงานประสิทธิผลที่วัดได้จากเครื่องตอกทดสอบมาตรฐานเท่ากับ 36.35% สำหรับตุ้มตอกโดนัท 55.26% สำหรับตุ้มตอกเซฟตี้ และค่าพลังงานประสิทธิผลจากเครื่องตอกหยั่งแบบเบาแบ่งตามชนิดชั้นดิน เท่ากับ 67.07% สำหรับดินเหนียวอ่อน
2. กราฟเปรียบเทียบค่าทดสอบเครื่องตอกหยั่งแบบเบากับเครื่องตอกทดสอบมาตรฐานจากการปรับแก้พลังงาน สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน จะได้สมการดังนี้ $N_{60} = 0.542N_{dpl} - 9.341$ โดยมีค่าความแปรปรวน $R^2 = 0.5745$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลการกระจายออกจากเส้นแนวโน้มอยู่ในช่วงกว้าง แต่แนวข้อมูลอยู่รวมกลุ่มในช่วงแนวโน้ม คิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ของข้อมูลทั้งหมด จึงสรุปได้ว่างานประเมินสหสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบดินเหนียวอ่อน เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานฐานรากระดับตื้นพื้นที่ดินเหนียวอ่อน
3. กราฟเปรียบเทียบค่าทดสอบเครื่องตอกหยั่งแบบเบากับเครื่องตอกทดสอบมาตรฐานจากการปรับแก้พลังงาน สำหรับชั้นดินทรายถม จะได้สมการดังนี้ $N_{60} = 0.4167N_{dpl} + 34.781$ โดยมีค่าความแปรปรวน $R^2 = 0.3131$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลการกระจายออกจากเส้นแนวโน้มค่อนข้างมาก เนื่องจากข้อมูลที่ทดสอบมีจำนวนน้อยและข้อมูลอยู่ในช่วงความลึกต่ำทำให้เกิดข้อผิดพลาดในหลายๆปัจจัย สมการที่ได้จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ตามสัญญาหมายเลข 62-E204000-11-IO. SS03E3008481-CU

เอกสารอ้างอิง

[1] สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2557). ปฐพีกลศาสตร์ : หลักการพื้นฐาน พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ISBN 978-974-03-03243-5

[2] Baudrillard, J. (1974) . New development in dynamic penetration testing. Proc. 1st Eur. Symp. on Penetration Testing, Stockholm 2.2, 25–32.

[3] EGAT (1980)., Soil Exploration by Kunzelstab Penetration Test, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT),(in Thai).

[4] EN ISO 22476-2. (2013). Geotechnical investigation and testing — Field testing, (January).

[5] Lukiantchuki, J. A., Bernardes, G. P., & Esquivel, E. R. (2017). Energy ratio (ER) for the standard penetration test based on measured field tests. Soils and Rocks, 40(2), 77–91.

[6] Meardi, G. & Gadsby, J. W. (1971). Discussion: The correlation of cone size in the dynamic cone penetration test with the standard penetration test. Ge´otechnique 21, No. 2, 184–190.

[7] Meyerhof, G.G. (1965). Shallow Foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 91(SM2), 21-31.

[8] Sarker, D., & Abedin, Z. (2015). Applicability of Standard Penetration Test in Bangladesh and Graphical Representation of SPT-N Value. International Journal of Science and Engineering Investigations, 4(41).

[9] Cearns, P J & McKenzie, A (1988). Application of dynamic cone penetrometer testing in East Anglia. Proceedings, Geotechnology Conference: Penetration Testing in the UK, Birmingham, London: Thomas Telford, pp 123-127.

[10] Terzaghi and Peck. (1997). Soil mechanics in engineering practice. Engineering Geology, 48(1–2), 149–150.

[11] Yimsiri, S. (2013). Energy ratio of SPT practice performed in Thailand, (Eit 2005), 391–397.

[12] Youd, T., Bartholomew, H., & Steidl, J. (2008). SPT hammer energy ratio versus drop height. Journal of Geotechnical and ..., (March), 397–400.