



การศึกษากำล้างแบกทานของดินทรายจากผลการทดสอบ  
การเจาะหยั่งแบบเบาโดยพิจารณาอิทธิพล  
ของมุมปลายกรวยหัวหยั่ง



โดย  
ชูศักดิ์ ศิริรัตน์

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2557

DETERMINATION OF BEARING CAPACITY OF SANDY  
SOIL FROM LIGHT RAM SOUNDING TEST RESULTS  
FOCUS ON EFFECT OF CONE ANGLE

By

Chusak Kererat



Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2014

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้เงินสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นไปได้ด้วยดี

ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์  
พฤษภาคม 2557



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A31/2557

ชื่อโครงการ : การศึกษากำล้างแบกทานของดินทรายจากผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาโดยพิจารณาอิทธิพลของมุมมองศาลายกรวยหัวหยั่ง

ชื่อนักวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมมองศาลายกรวยสำหรับการทดสอบโดยใช้เครื่องมือการเจาะหยั่งแบบเบาและระดับน้ำใต้ดินต่อกำล้างแบกทานของดิน โดยการจำลองระดับน้ำใต้ดินและดินในสภาพแห้ง การศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างดิน 2 ชนิด คือดินทรายที่มีขนาดคละไม่ตี (SP) และดินทรายปนตะกอน (SM) จากผลการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบาพบว่าการเพิ่มขึ้นของมุมมองศาลายกรวยจะส่งผลให้จำนวนครั้งการตอกเพิ่มขึ้น โดยค่าปรับแก้จำนวนครั้งการตอกจากมุมมองศาลายกรวย 60 องศา เป็น 90 องศา และ 180 องศา เป็น 90 องศา มีค่าเท่ากับ 1.188 และ 0.878 ตามลำดับ และสามารถนำค่าจำนวนครั้งการตอกแปรผลเป็นค่ามุมเสียดทานภายในซึ่งสามารถใช้ในระดับความลึก 1 เมตร เป็นต้นไป ซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Peck, Hanson and Thornburn (1973) สำหรับอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินต่อกำล้างแบกทานในชั้นดินทรายที่มีขนาดคละไม่ตีที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน นั้นจะมีค่ากำล้างแบกทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 35-40 เมื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาพแห้ง สำหรับในดินทรายปนตะกอน ค่ากำล้างแบกทานลดลงร้อยละ 70-75 เมื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาพแห้ง และอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินในชั้นดินทรายปนตะกอนจะมีผลต่อกำล้างแบกทานของดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นไป 0.6 เมตร โดยลดลงเฉลี่ยร้อยละ 25-30 เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพดินแห้งที่มีความลึกเดียวกัน ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อฐานราก เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในงานก่อสร้างมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: มุมมองศาลายกรวย, ระดับน้ำใต้ดิน, การทดสอบหยั่งดินแบบเบา

E-mail Address : Chusak.k@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2556 – กันยายน พ.ศ. 2557

## Abstract

**Code of Project** : A31/2557  
**Project Name** : Determination of Bearing Capacity of Sandy Soil from Light Ram Sounding Test Results Focus on Effect of Cone Angle  
**Researcher Name** : Asst.Prof.Dr.Chusak Kererat

The Objective of this research was to study the effect of cone angle and water level on the bearing capacity of sandy soil layer. Two type of sandy soil which are poorly-graded soil (SP) and silty soil (SM) provided in the process of sandy soil preparation. The tasting results show that the adjusted factors of the bearing capacity for 60° cone and 180 ° cone to be that of 90° cone (standard) were 1.118 and 0.878 respectively. The correlation of the blows against the internal friction angle of sandy soil can be used for calculating the soil bearing capacity in the condition of the 1 m deep below the ground surface which corresponding to the advice of Peck, Hanson and Thornburn (1973). The soil bearing capacity of SP with water level increases 35-40 percent compering to dry soil and the bearing capacity of SM with water level decrease 70-75 percent compering to dry soil. The effect of the water level result in the decrease of the soil bearing capacity of 25-30 percent which result to 0.6 m above the water level compering to that of the dry soil at the same depth. Therefore, the calculation of the soil bearing capacity in the silty sandy soil layer should be considered the effect of the water level.

**Keywords:** Angle of Cone, Water Level, Light Weight Penetration Test

---

**E-mail Address** : Chusak.k@rmutr.ac.th

**Period of Project** : October 2013 – September 2014

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์	2
3. กรอบแนวคิดการวิจัย	2
4. ขอบเขตของการวิจัย	3
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
1. พืชขึ้นดินทรายประเทศไทย	4
2. การสำรวจขึ้นดิน	5
3. การเจาะหยั่งแบบเบา	8
4. การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน	12
5. เครื่องมือการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย	20
6. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบการเฉือนโดยตรง	24
7. ทฤษฎีความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานของเทอร์ซาก็	27
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>35</b>
1. ขั้นตอนการดำเนินการ	35
2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	36
3. การทดสอบทางกายภาพของดินทราย	40
4. การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบหาค่าลึงแบกทานของดินแบบหยั่งเบา	44
5. การทดสอบหาค่าลึงแบกทานของดินแบบหยั่งเบา	45
6. การทดสอบแรงเฉือนตรง	47
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์</b>	<b>51</b>
1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน	51
2. ผลการทดสอบหาค่าลึงแบกทานของดินแบบหยั่งเบา	52
3. ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง	62
<b>บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ</b>	<b>67</b>
1. สรุปผล	67
2. ข้อเสนอแนะ	68
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>69</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>71</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความเหมาะสมของวิธีการสำรวจและทดสอบชั้นดินในสนาม	7
2	การแบ่งแยกค่าความแข็งแรงของดินจากการทดสอบด้วย วิธี Kunselstab	10
3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $N$ กับความแข็งแรงของทราย	10
4	ค่าทั่วไปของมุมเสียดทาน ( $\phi$ และ $\phi_u$ ) สำหรับดินเม็ดหยาบชนิดต่างๆ	18
5	สัมประสิทธิ์กำลังแบกทาน ( $N_c$ , $N_q$ และ $N_\gamma$ ) สำหรับค่ามุมเสียดทานภายใน ต่างๆโดยเทอร์ซาคี	28
6	ชื่อย่อที่ใช้ในการทดสอบ	45
7	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-d	52
8	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-1.5	52
9	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-1.0	53
10	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-d	53
11	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-1.5	53
12	ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-1.0	53
13	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-d	62
14	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-1.5	62
15	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-1.0	63
16	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-d	64
17	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-1.5	65
18	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-1.0	66



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ขั้นตอนการสำรวจทางด้านธรณีเทคนิคสำหรับงานเขื่อน	6
2 เครื่องมือเจาะหยั่งแบบเบาด้วย Kunselstab	8
3 การแปรผลการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบา	11
4 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน	13
5 กระจบอกผ่ามาตรฐาน (Split Barrel, Spoon)	14
6 ตั้มรองตอกลูกตั้ม (Knock Block)	15
7 ชุดท้งตอกและเหล็กนำ (Drive Pipe Assembly)	16
8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ค่า $N$ กับค่าองค์ประกอบน้ำหนักบรรทุก $N_q$ และ $N_\gamma$ ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) สำหรับทราย	17
9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $N_{SPT}$ และค่า $\phi$ โดยประมาณ	18
10 โครงสร้างของเครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย	21
11 เครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย	22
12 กราฟความสัมพันธ์ค่าการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ ซี. บี. อาร์.	23
13 รูปแบบการจัดเตรียมดินสำหรับการทดสอบการเฉือนโดยตรง	24
14 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทรายแน่น (Dense Sand) และทรายหลวม (Loose Sand)	25
15 รูปแบบการวิบัติด้วยการเฉือน (General Shear Failure) สมมติฐานโดย Terzaghi สำหรับฐานรากแถบ	27
16 ผลกระทบของระดับน้ำต่อการหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานของดิน	30
17 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	36
18 ชุดทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง	37
19 ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน	37
20 ชุดทดสอบหาค่าล้งแบกทานของดินในสนามแบบหยั่งเบา	38
21 ชุดทดสอบแรงเฉือนตรง	38
22 อุปกรณ์สำหรับชั่งน้ำหนักและวัดขนาดตัวอย่างทดสอบ	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 บ่อทดสอบ ขนาด 1.00×1.00×1.80 เมตร	39
24 ตู้อบ	40
25 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	41
26 ขั้นตอนการทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง	42
27 ขั้นตอนการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน	43
28 การตากดินให้แห้ง	44
29 การเตรียมตัวอย่างดิน	45
30 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ	46
31 การดำเนินการทดสอบ	46
32 การเก็บตัวอย่างดิน	47
33 การวัดขนาดกล่องบรรจุตัวอย่าง	47
34 การประกอบกล่องบรรจุตัวอย่าง	48
35 การเตรียมตัวอย่างดินในกล่องบรรจุตัวอย่าง	48
36 การวางแผนกดทับบนผิวหน้าของตัวอย่างดิน	49
37 การทำความสะอาดกล่องบรรจุตัวอย่าง	49
38 การนำกล่องตัวอย่างใส่ในเครื่องทดสอบ	50
39 การปรับเข็มของมาตรวัดการยุบตัว	50
40 การหมุนมือจับเพื่อทดสอบแรงเฉือน	50
41 แผนภูมิการกระจายตัวของตัวอย่างดินชนิด SP และ SM	51
42 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินแห้งชนิด SP (SP-d)	55
43 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.5 เมตร จากผิวดิน (SP-1.5)	56
44 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.0 เมตร จากผิวดิน (SP-1.0)	56
45 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินแห้งชนิด SM (SM-d)	57

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.5 เมตร จากผิวดิน (SM-1.5)	57
47	กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.0 เมตร จากผิวดิน (SM-1.0)	58
48	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 60 องศา	59
49	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 90 องศา	59
50	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 180 องศา	60
51	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 60 องศา	60
52	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 90 องศา	61
53	กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 180 องศา	61
54	กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อมุมเสียดทานภายในของดิน SP (ช่วงความลึก 1 เมตร ขึ้นไป)	66
55	กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการต่อมุมเสียดทานภายในของดิน SM (ช่วงความลึก 1 เมตร ขึ้นไป)	66

## สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
$A_p$	พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
$A_s$	พื้นที่รับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็ม
$B$	ความกว้างฐานราก
$c$	หน่วยแรงยึดเกาะ
$D_f$	ความลึกของฐานราก
$N_c$ $N_q$ และ $N_\gamma$	สัมประสิทธิ์กำลังแบกทานเป็นฟังก์ชันในรูปของมุม $\phi$
$N_d$	ค่านับครั้งจำนวนตอกลูกตุ้มต่อระยะจมน้ำกรวย 20 เซนติเมตร (ครั้ง / 20 เซนติเมตร)
$K_{py}$	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบพาสซีฟ (Passive)
$L$	ความยาวฐานราก
$N$	ค่าทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน
$q_a$	ค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของดิน
$Q_u$	น้ำหนักสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของฐานราก
$R_w$	ค่าปรับแก้ลดผลกระทบระดับน้ำใต้ดิน
$R_{w1}$	แฟกเตอร์ลดค่าสำหรับระดับน้ำใต้ดินที่อยู่เหนือระดับฐานแผ่ของฐานราก
$R_{w2}$	แฟกเตอร์ลดค่าสำหรับระดับน้ำใต้ดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับฐานแผ่ของฐานราก
$S_a$	ค่าทรุดตัว (0.5-1.0 นิ้ว)
$S_u$	ค่าแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
$\gamma$	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน
$\gamma_b$	หน่วยน้ำหนักของดินจมน้ำ = $\gamma_{sat} - \gamma_w$
$\gamma_{e1}$	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดินที่วางอยู่เหนือระดับฐานแผ่ของฐานราก
$\gamma_{e2}$	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดินที่วางตัวอยู่ในช่วงความลึก B นับจากระดับฐานแผ่ของฐานราก
$\gamma_m$	หน่วยน้ำหนักขึ้นหรือหน่วยน้ำหนักอิมมิตัวของดินซึ่งวางตัวอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (กรณีที่ 1 หรือกรณีที่ 2)
$\gamma_{sat}$	หน่วยน้ำหนักอิมมิตัวของดินที่วางตัวอยู่ที่ระดับน้ำใต้ดิน (กรณีที่ 1 หรือกรณีที่ 2)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างอาคารต่าง ๆ นั้น ฐานรากถือว่าเป็นองค์อาคารที่สำคัญ และการออกแบบฐานรากมีความจำเป็นที่จะต้องทราบกำลังแบกทานของดินก่อน โดยกำลังแบกทานของดินนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบในสนาม สำหรับการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่นั้นจะทำการเจาะสำรวจดินและทดสอบในสนามแล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบฐานราก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ฐานรากเสาเข็ม แต่สำหรับอาคารขนาดเล็กหรืออาคารที่พักอาศัยทั่วไปที่ก่อสร้างในบริเวณที่ไม่ใช่ดินอ่อนมักจะใช้ฐานรากแผ่ การเจาะสำรวจดินสำหรับอาคารขนาดเล็กอาจเป็นการสิ้นเปลืองเกินไป ดังนั้นการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา (Light Ram Sounding Test) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถหา กำลังแบกทานของดินได้ โดยการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา นั้นสามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็ว ประหยัด และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีน้ำหนักเบาสามารถขนย้ายเข้าถึงสถานที่ต่างๆได้ง่าย จึงเหมาะสมกับงานขนาดเล็ก แต่ปัญหาคือมมูมปลายกรวยซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อทดสอบกับการแปรผล การทดสอบยังมีความไม่ชัดเจน เนื่องจากในปัจจุบันมมูมปลายกรวยที่ใช้ในการทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ มมูม 60 องศาตามมาตรฐานอเมริกา (ASTM) และมมูม 90 องศาตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN) โดยการทดสอบในปัจจุบันมักใช้มมูมปลายกรวย 60 องศา แต่ใช้มาตรฐานเยอรมัน ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่ถูกต้องจึงอาจทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมีความไม่ถูกต้องหรือผิดพลาดจากความเป็นจริง และการแปรผลด้วยสมการสำเร็จรูปนั้นเป็นสมการที่ได้จากผลการทดสอบในต่างประเทศซึ่งอาจไม่เหมือนกับดินในประเทศไทย นอกจากนี้ในต่างจังหวัดยังมีวิธีซึ่งใช้วิธีการทดสอบกำลังแบกทานของดินที่คล้ายกับการเจาะหยั่งแบบเบาโดยการใช้เหล็กขนาด 20 มิลลิเมตร และตอกด้วยค้อนปอนด์โดยเหล็กที่ใช้ตอกนั้นมีมมูม 180 องศา ซึ่งยังไม่มีทฤษฎีไหนมารองรับ

จากปัญหาที่ได้กล่าวมานี้จึงทำให้เกิดแรงจูงใจในการทำการศึกษาอิทธิพลขององศาปลายกรวยและระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อการทดสอบหยั่งดินแบบเบาโดยพิจารณาการแปรผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาเปรียบเทียบกับ การรับกำลังแบกทานของดินด้วยสมการของ Terzaghi ซึ่งอาศัยค่ามมูมเสียดทานภายในของดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้นั้นสามารถนำมาตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ในปัจจุบันได้ และสามารถนำผลการวิจัยไปเผยแพร่แก่วิศวกรโยธานายช่างท้องถิ่นหรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาได้ ทำให้เกิดความประหยัดและปลอดภัยของโครงสร้างฐานรากตามหลักทางด้านวิศวกรรม

## 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากำลั้งแบกทานของดินทรายจากผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาโดยแปรผลจากค่ามุมเสียดทานภายในของดิน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมปลายกรวยหัวหยั่งที่มีต่อกำลั้งแบกทานของดินทราย
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแปรผลและรายงานผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา
4. เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบฐานรากแผ่วางบนชั้นดินทราย
5. เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปเผยแพร่ถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่วิศวกรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา หรือตีพิมพ์เผยแพร่ หรือ/และนำเสนอระดับชาติ

## 3. กรอบแนวคิดการวิจัย

การทดสอบแบบการเจาะหยั่งแบบเบาเป็นการทดสอบสามารถดำเนินการได้ง่าย ขนย้ายได้สะดวก ใช้แรงงานผู้ทดสอบเพียง 2-3 คนเท่านั้น สามารถทดสอบได้ทั้งในบริเวณที่เป็นที่ราบและบริเวณเนินเขา แต่สำหรับการแปรผลการทดสอบซึ่งเป็นค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินยังคงอาศัยการอ้างอิงจากการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากต่างประเทศ และอีกทั้งยังต้องอ้างอิงกับผลการทดสอบการเจาะแบบทะลุทะลวงมาตรฐาน ซึ่งการทดสอบการเจาะแบบทะลุทะลวงมาตรฐานเองก็มีความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบอยู่แล้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นว่า การใช้ผลการทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในของดินจะทำให้ผลของการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินมีความถูกต้องมากกว่า อีกทั้งเนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบามีการใช้มุมปลายกรวยหัวหยั่งที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน โดยการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ของมุมเสียดทานภายในของดินกับผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาโดยพิจารณาอิทธิพลของมุมปลายกรวยหัวหยั่ง การพัฒนาการแปรผลการหาค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงการพัฒนาสมการและแผนภูมิสำหรับใช้หาค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินทราย โดยสุดท้ายจะจัดเผยแพร่เทคโนโลยีแก่ วิศวกรและหน่วยงานท้องถิ่น รวมทั้งผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาด้วย

#### 4. ขอบเขตการวิจัย

1. ดินทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินทรายในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
2. ทำการเจาะหยั่งแบบเบาโดยใช้เครื่องทดสอบ Kunzelstab มุมปลายกรวยหัวหยั่งที่ใช้ในการทดสอบที่เป็น 60 องศา 90 องศา และ 180 องศา
3. จำลองระดับน้ำที่ 1 เมตร และ 1.5 เมตร จากผิวดินและในสภาพแห้ง
4. การทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในของดินใช้วิธีการทดสอบแบบแรงเฉือนโดยตรง

#### 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกของแต่ละมุมปลายกรวยและมุมเสียดทานภายในของดินทรายไปใช้ในการหาค่ากำลังแบกทานของดินทรายโดยใช้ผลจากการทดสอบการเจาะแบบหยั่งเบาได้
2. ทราบเส้นกราฟเพื่อหาค่ากำลังแบกทานของดินสำหรับฐานรากแผ่ขนาดต่าง ๆ เพื่อมาประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินทรายโดยใช้ผลจากการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาได้
3. สามารถนำความรู้ความเข้าใจในการทดสอบเจาะหยั่งแบบเบาไปเผยแพร่ให้กับวิศวกรโยธา นายช่างท้องถิ่น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมโยธาเพื่อจะสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในการทำงานจริงได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย
4. เป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยในอนาคต



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปลายกรวยโดยใช้เครื่องทดสอบแบบหยั่งเบา และอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อกำลังแบกทานดิน ซึ่งการทดสอบเพื่อศึกษากำลังแบกทานของดินทรายจากผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา และจากการแปรผลค่ามุมเสียดทานภายในของดินเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบฐานรากแผ่ที่วางบนชั้นดินทราย โดยการทดสอบนั้นจะต้องทำโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อทำงานวิจัยในครั้งนี้โดยการทดสอบนั้นจะต้องทำการทดสอบแบบหยั่งเบาและทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อนำค่าที่ได้มาแปรผลเป็นค่ากำลังแบกทานด้วยทฤษฎีของ Terzaghi และจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบฐานรากตื้นได้จำเป็นที่จะต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการทดสอบกำลังแบกทานของดิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. พื้นที่ชั้นดินทรายประเทศไทย (ศิริณี และคณะ, 2556)

ดินทราย หมายถึง ดินที่มีเนื้อดินเป็นดินทรายหรือดินทรายปนดินร่วน เกิดเป็นชั้นหนา มากกว่า 200 เซนติเมตรจากผิวดิน บางพื้นที่หนามากกว่า 50 เซนติเมตรจากผิวดินที่รองรับด้วยชั้น ดานดินเหนียวหรือดินร่วน หรือพบชั้นดานอินทรีย์ภายในความลึก 100 เซนติเมตรจากผิวดิน ดิน ทรายพบทั่วไปในทุกภาคของประเทศไทย มีเนื้อที่ประมาณ 12.54 ล้านไร่ ส่วนใหญ่กระจายอยู่ใน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีดินทรายจัดทั้งหมด 7,127,085 ไร่ หรือ ประมาณร้อยละ 2.22 ของพื้นที่ทั้งประเทศ ดินทรายจัดแบ่ง เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 ดินทรายมีชั้นดาน พบมากบริเวณจังหวัดที่อยู่ติดฝั่งทะเลทางภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณ 7 แสนไร่ จะเกิดในสภาพแวดล้อมที่จำกัด สภาพที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดินชนิดนี้ จะต้องมียัตถุต้นกำเนิดที่เป็นหินทราย ภูมิภาคภาคชุ่มชื้นและเป็นที่ราบ องค์ประกอบทางแร่ของดิน เหล่านี้ มีแต่แร่ที่ไม่สลายตัวหรือสลายตัวได้ยากมาก มีบางแห่งเท่านั้นเป็นดิน ค่อนข้างใหม่ พบมีแร่ ที่สลายตัวบางชนิดเหลืออยู่ เช่น โพแทส (Potash) เฟลด์สปาร์ (Feldspars) และมัสโคไวต์ (Muscovite) ชนิดของแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะเป็นคาโอลิไนท์ (Kaolinite) สภาพของดินทั่วไปเป็น กรด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยน ประจุบวก (CEC) ต่ำ มีเปอร์เซ็นต์ของความอิ่มตัวด้วยประจุ บวกที่เป็นต่าง (BS) ต่ำ มีแร่ดินเหนียวน้อย อินทรีย์วัตถุในดิน เป็นตัวสำคัญในขบวนการเปลี่ยนแปลง ของดินและควบคุมการดูดซับต่าง ๆ



ขบวนการเกิดของดินชนิดนี้ คือการชะล้างเอาสารประกอบ ออร์กาโน มีทัลลิก จากดิน ชั้นบน A ลงไปสะสมในดิน ชั้นล่างจนทำให้เกิดเป็นชั้นดานของชุดดินบ้านทอน (Bh) หรือ Spondaic Horizon โลหะธาตุที่จับกับอินทรีย์วัตถุจะมีลูมิโนมเป็นส่วนใหญ่ และมีเหล็กเพียงเล็กน้อย กรดฟูลวิก เป็นตัวสำคัญในการจับตัวของลูมิโนมและเหล็ก การตกตะกอนของสารประกอบ ออร์กาโนมีทัลลิก

1.2 ดินทรายจัดที่ไม่มีชั้นดาน เป็นดินทรายที่พบทั่ว ๆ ไปตามชายหาดหรือชายฝั่งทะเล และพื้นที่เป็นทรายในภาคต่าง ๆ ดินประเภทนี้มีพื้นที่ 6,613,157 ไร่หรือประมาณร้อยละ 2.06 ของพื้นที่ทั้งประเทศ เป็นดินที่มีเกือบทุกภาคของประเทศ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้

## 2. การสำรวจชั้นดิน (วรากร, 2541)

การสำรวจชั้นดิน คือ กรรมวิธีการเจาะลงไปชั้นดิน เก็บตัวอย่างดิน ทดสอบคุณสมบัติดิน ในสนาม หยั่งชั้นดินจากผิวดิน หรือใช้เทคนิคอื่นๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งลักษณะชั้นดินทั้งทางแนวดิ่งและการเปลี่ยนแปลงทางแนวราบพร้อมทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และทางวิศวกรรมของชั้นดินนั้น เพียงพอในการที่จะใช้ออกแบบ หรือศึกษาทางด้านปฐพีกลศาสตร์ (วรากร และคณะ, 2525) Hunt (1984) กล่าวว่า การสำรวจชั้นดินมีจุดมุ่งหมายเพื่อจำแนกลักษณะทางธรณีวิทยาทั้งหมดที่ส่งผลต่อสิ่งปลูกสร้าง โดยอาจกล่าวได้ว่าวัตถุประสงค์ของการสำรวจชั้นดินเพื่อต้องการทราบ มีดังต่อไปนี้

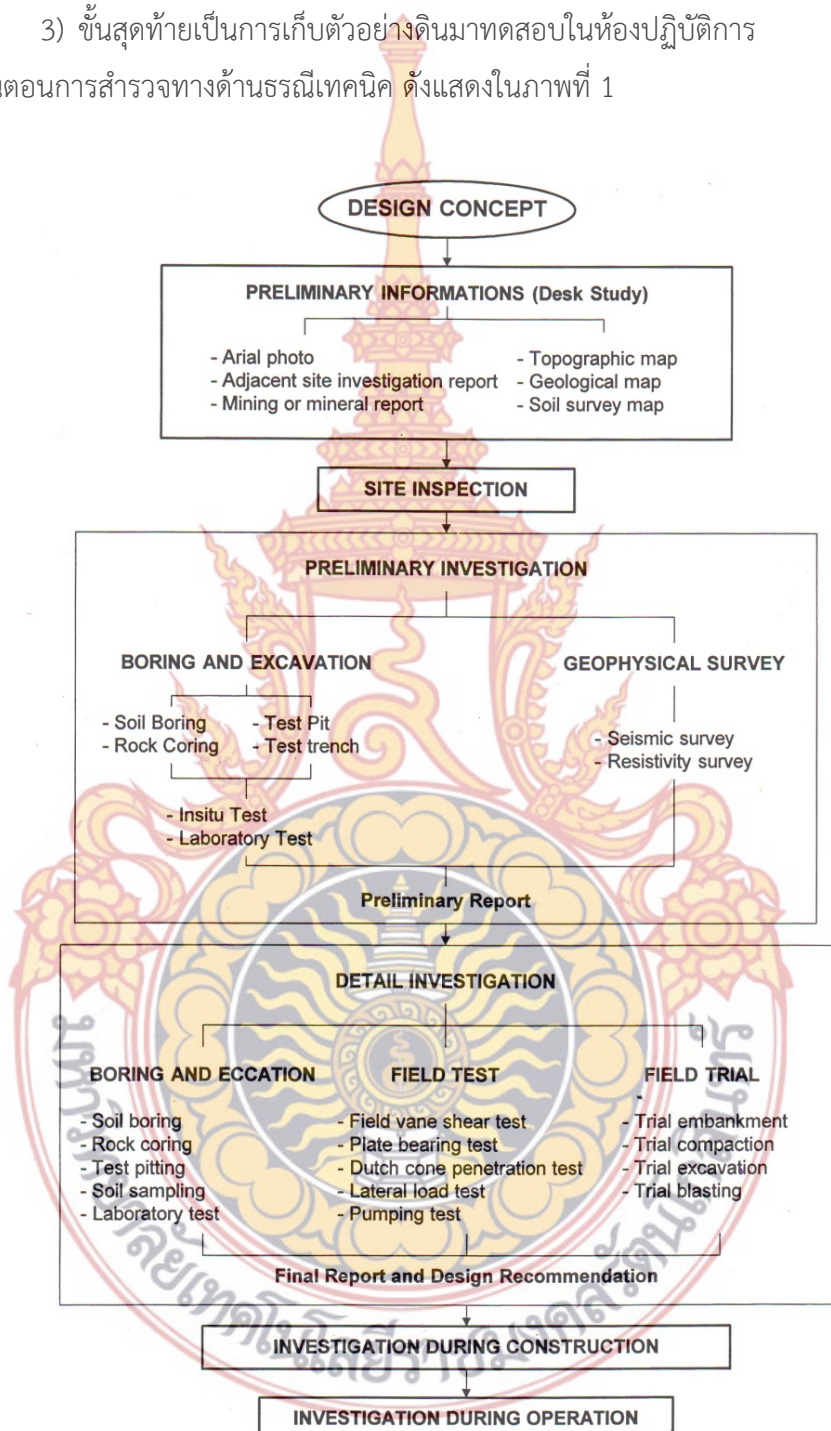
- 1) ลักษณะการวางตัวของชั้นดินในแนวราบและความหนาของแต่ละชั้นดิน อาจรวมถึงระดับชั้นหินฐานรากที่อยู่ภายในบริเวณฐานรากทำหน้าที่รับน้ำหนักจากสิ่งปลูกสร้าง
- 2) การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน เนื่องจากสภาพภูมิอากาศและการก่อสร้าง
- 3) ลักษณะทางธรณีวิทยาที่เสี่ยงต่อการพิบัติ (Geologic Hazard) รวมถึงลาดดินที่ไม่มั่นคง รอยเลื่อน (Fault) การทรุดตัวของดิน (Ground Subsidence) และสภาพแผ่นดินไหว
- 4) คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม

Hunt (1984) แบ่งขั้นตอนการสำรวจชั้นดินออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นแรกเป็นการสำรวจผิวดิน ทำการรวบรวมข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาที่ได้จากการศึกษาสภาพ ภูมิประเทศและประวัติความเป็นมาของการเกิดดินในบริเวณนั้นๆ ข้อมูลการเจาะสำรวจจากบริเวณข้างเคียง และอื่นๆที่จะนำไปสู่การประเมินชั้นดินล่วงหน้าได้ ซึ่งสามารถดำเนินงานได้ในสำนักงาน (Desk Study) โดยยังไม่ต้องออกสนามเพื่อวางแผนการสำรวจชั้นใต้ดินต่อไป
- 2) ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนการสำรวจใต้ดิน คือ การสำรวจและศึกษาสภาพธรรมชาติของชั้นดินรวมทั้งระดับน้ำใต้ดิน เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของดิน การสำรวจใต้ผิวดินยังประกอบด้วย

2 ส่วน คือ การสำรวจเบื้องต้น (Preliminary Exploration) และการสำรวจโดยละเอียด (Detailed Exploration)

3) ขั้นสุดท้ายเป็นการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับขั้นตอนการสำรวจทางด้านธรณีเทคนิค ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสำรวจทางด้านธรณีเทคนิคสำหรับงานเขื่อน

ที่มา: วรากร, 2541

วิธีการสำรวจและทดสอบชั้นดินในสนามที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีก็มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่างกัน ความเหมาะสมของการทดสอบดินในสนามด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 1 สำหรับการทดสอบ Dynamic Cone Penetration มีความเหมาะสมในการจำแนกชั้นดิน และสามารถใช้หาค่ามุมเสียดทานของดินทรายได้ดีพอสมควร

ตารางที่ 1 ความเหมาะสมของวิธีการสำรวจและทดสอบชั้นดินในสนาม

	Soil Identification	Establish vertical profile	Relative density $D_r$	Angle of friction $\phi$	Undrained shear strength $S_u$	Pore pressure $u$	Stress history OCR and $K_o$	Modulus: $E_s, G'$	Compressibility $m_v$ and $C_c$	Consolidation $c_h$ and $c_v$	Permeability $k$	Stress-strain curve	Liquefaction resistance	Reference (in chapter if not given)
Acoustic probe	C	B	B	C	C	—	C	C	—	—	—	—	C	Koerner and Lord (1986)†
Borehole permeability	C	—	—	—	—	A	—	—	—	B	A	—	—	ASTM STP No. 322, ASTM STP 417
Cone														
Dynamic	C	A	B	C	C	—	C	—	—	—	—	—	C	
Electrical friction	B	A	B	C	B	—	C	B	C	—	—	—	B	
Electrical piezo	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	B	A	
Electrical piezo/friction	A	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A	
Impact	C	B	C	C	C	—	C	C	C	—	—	—	C	Dayal and Allen (1973)
Mechanical	B	A	B	C	B	—	C	B	C	—	—	—	B	
Seismic CPT	C	C	C	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B	
down-hole														
Dilatometer (DMT)	B	A	B	C	B	—	B	B	C	—	—	C	B	
Hydraulic Fracture	—	—	—	—	—	B	B	—	C	C	—	—	—	
$K_o$ stepped blade	—	—	—	—	—	—	B	—	—	—	—	—	—	
Nuclear tests	—	—	A	B	—	—	—	C	—	—	—	—	C	ASTM STP 412
Plate load tests	C	C	B	B	C	—	B	A	B	C	C	B	B	ASTM D 1194
Pressure meter														
Ménard	B	B	C	B	B	—	C	B	B	—	—	C	C	
Self-boring	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	
Screw plate	C	C	B	C	B	—	B	A	B	C	C	B	B	Patrick et al. (1980), Dahlberg (1974, 1974a)
Seismic														
Cross-hole	C	C	B	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B	Woods (1986)†
Down-hole	C	C	C	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B	Woods (1986)†
Surface refraction	C	C	—	—	—	—	—	B	—	—	—	—	B	Leet (1950)
Shear														
Borehole	C	C	—	B	B	—	C	C	—	—	—	C	—	
Vane	B	C	—	—	A	—	B	—	—	—	—	—	—	
Standard penetration test (SPT)	B	B	B	C	C	—	—	—	C	—	—	—	A	

\* After Wroth (1984).

† In ASCE Conference: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, GT SP No. 6 (1986).

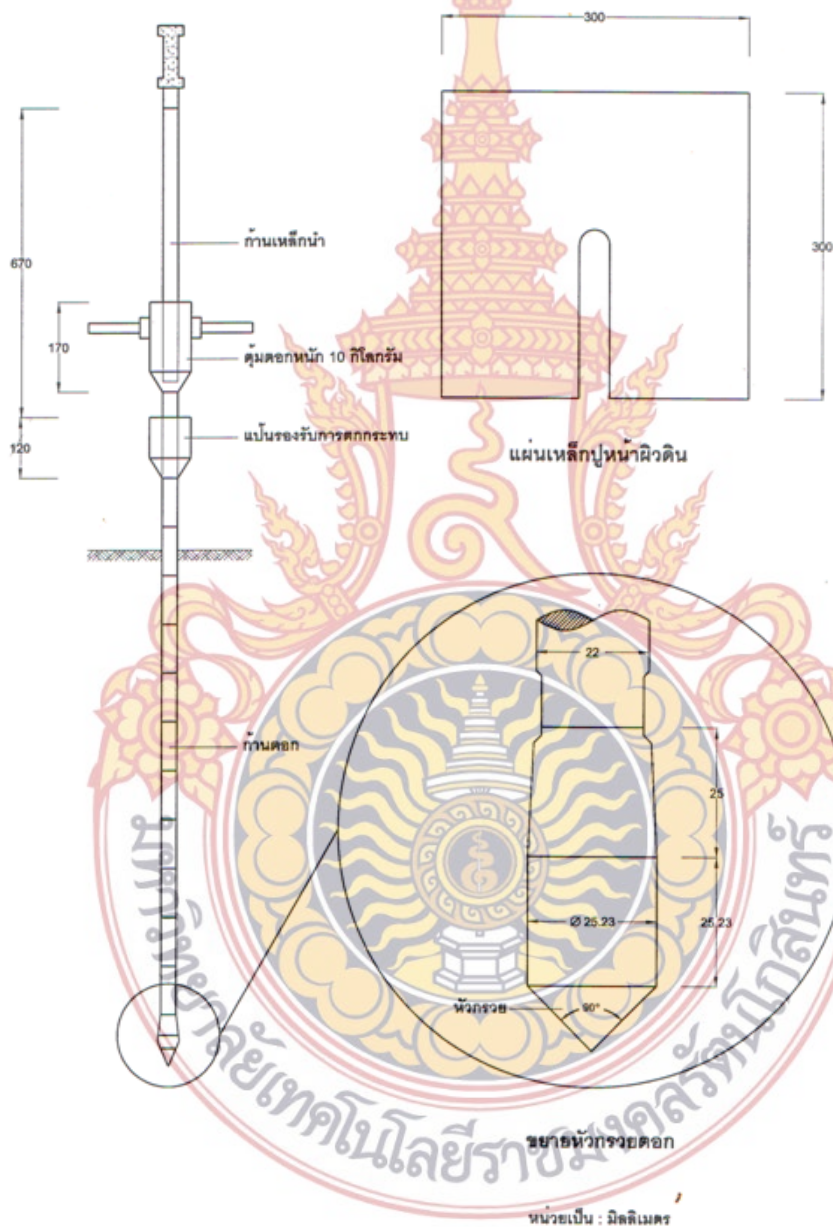
§  $c_h$  = vertical consolidation w/horizontal drainage;  $c_v$  = vertical consolidation w/vertical drainage.

Code: A = most applicable; B = may be used; C = least applicable.

ที่มา: Bowles, 1996

### 3. การเจาะหยั่งแบบเบา (Light Penetrometer) Kunselstab (ชูศักดิ์, 2555)

Kunselstab เป็นการทดสอบกำลังของดิน โดยใช้แท่งเหล็ก (ก้านเจาะ) ขนาด 22 มิลลิเมตร ที่มีปลายท้าวคดเป็นกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และใช้ตุ้มตอกน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ยกสูง 50 เซนติเมตร ตกลงไปพร้อมน้ำหนักจำนวนครั้งในช่วง 20 เซนติเมตร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ Standard Chart



ภาพที่ 2 เครื่องมือเจาะหยั่งแบบเบาด้วย Kunselstab  
ที่มา: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545

### 3.1 การแปรผลการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบา

การทดสอบ ใช้ผู้ปฏิบัติงาน 2-3 คน รวมทั้งผู้จัดบันทึกข้อมูล เมื่อเริ่มการทดสอบ ตอกยึดแผ่นฐาน (Base Plate) บนพื้น ต่อหัวกรวยที่ปลายล่างของก้านเจาะ ต่อชุดที่ตอกและก้านนำที่ปลายบน ยกลูกตุ้ม 50 เซนติเมตร (ที่รอยขีด) ปลดปล่อยอิสระ ตอกหัวกรวยลงไป在地面 นับจำนวนครั้งที่ลูกตุ้มตอกทุกๆระยะหัวกรวยจมที่รอยขีดที่ก้านเจาะ (0.2 เมตร) ในการตอกจะต้องตอกด้วยอัตราความเร็วประมาณ 3 ครั้ง/นาที โดยต่อเนื่อง ถ้าหยุดพักขาช่วงการตอก จะต้องหมายเหตุไว้เมื่อตอกหัวกรวยจนปลายบนของก้านตอกลดระดับหนึ่งที่ไม่สะดวกในการทำงานก็ต่อก้านตอกท่อนต่อไป ทดสอบจนถึงความลึกที่ต้องการหรือไม่สามารถตอกหัวกรวยลงไปได้ (Refusal) ถอนก้านตอกขึ้นพร้อมที่จะทดสอบหลุมต่อไป

ผลการทดสอบสามารถนำไปออกแบบฐานแผ่ได้โดยตรง เช่น การนำค่าผลการทดสอบออกแบบฐานแผ่ฐานเสาส่งไฟฟ้า เป็นต้น คำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยฐานแผ่ขนาด 2.0x2.0 ตารางเมตร อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ค่าทรุดตัวไม่เกิน 25 มิลลิเมตร หรืออาจใช้การอ่านค่าจากแผนภูมิ (Chart) ดังแสดงในภาพที่ 3

$$\text{ดินเหนียว (Clay) , } q_u = 1.92(N_d+0.954) \quad \text{ตัน/ตารางเมตร} \quad (1)$$

$$\text{ทราย (Sand) } q_u = 1.60(N_d+3.57) \quad \text{ตัน/ตารางเมตร} \quad (2)$$

การใช้สมการที่ (1) และ (2) อยู่ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

- 1) ถ้าฐานรากอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน ใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกครึ่งหนึ่งของค่าข้างบน
- 2) ใช้ส่วนปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) เท่ากับ 2.5
- 3) ค่า  $N_d$  เป็นค่าเฉลี่ยจากความลึก 0.5 เมตรเหนือฐานราก และลึก 1.0 เมตร ใต้ฐานราก

### 3.2 การใช้งานการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบา

ชนิดของดินที่เหมาะสมกับการใช้เครื่องมือ มีดังต่อไปนี้

- 1) กรวด (Gravel)
- 2) กรวดปนทราย (Sand-Gravel)
- 3) ทราย (Sand)
- 4) ทรายปนดินลูกรัง (Silty-Sand)
- 5) ดินลูกรังปนทราย (Sandy-Silt)
- 6) ดินลูกรังปนดินเหนียว (Clayed-Silt)

ชนิดของดินที่ไม่เหมาะสมกับการใช้เครื่องมือ มีดังต่อไปนี้

- 1) ดินเหนียว (Clay)
- 2) ดินเหนียวปนดินร่วน (Clay-Silt)

สำหรับการพิจารณาสภาพดินเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ได้จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การแบ่งแยกค่าความแข็งแรงของดินจากการทดสอบด้วย วิธี Kunselstab

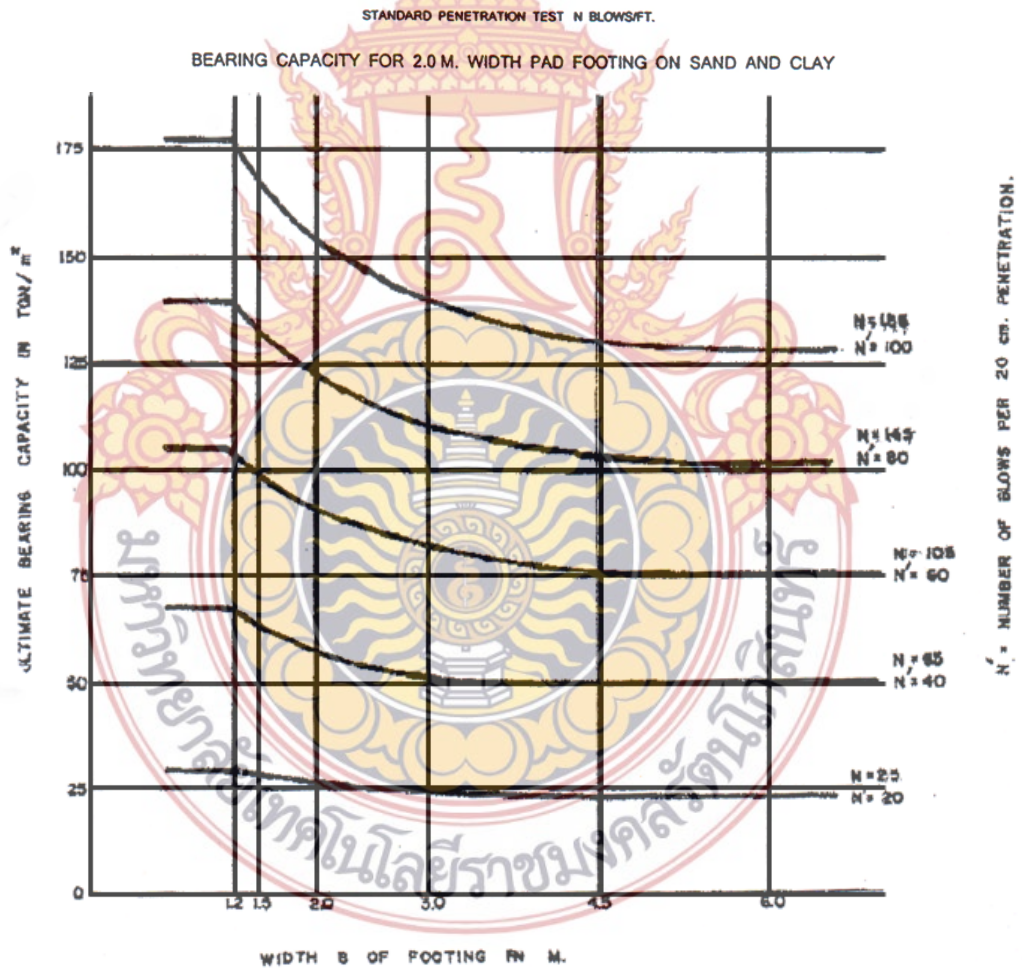
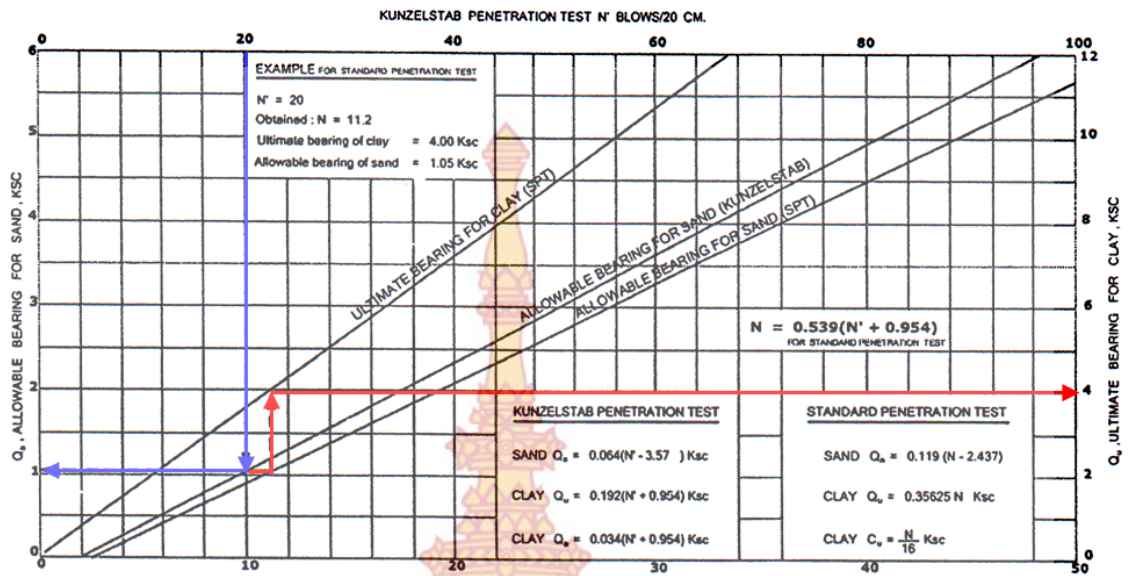
จำนวนครั้งที่ตอกต่อ 20 เซนติเมตร (N)	ดินทราย		จำนวนครั้งที่ตอกต่อ 20 เซนติเมตร (N)	ดินเหนียว	
	สภาพดิน	ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด $Q_u$ (ตัน/ตารางเมตร)		สภาพดิน	ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด $Q_u$ (ตัน/ตารางเมตร)
1-6	หลวมมาก	<3.90	1-3	อ่อนมาก	3.75-7.59
6-22	หลวม	3.90-23.10	3-6	อ่อน	7.59-13.35
22-95	แน่นปานกลาง	23.10-82.30	6-14	ปานกลาง	13.35-28.71
มากกว่า 95	แน่น	>82.30	14-39	แข็ง	28.71-53.67
			39-95	แข็งมาก	53.67-107.43
			มากกว่า 95	แข็งที่สุด	>107.43

ที่มา: ชูศักดิ์, 2555

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของทราย

N (blow/ft)	KPT (EGAT) (blow/ft)	Angle of internal friction $\phi$ (degree)	Relative density
0-4	0-6	25-30	Very loose
4-10	6-18	27-32	Loose
10-30	18-55	30-35	Medium
30-50	55-92	35-40	Dense
>50	>92	38-45	Very dense

ที่มา: ชูศักดิ์, 2555



ภาพที่ 3 การแปรผลการทดสอบการตอกหยั่งแบบเบา

ที่มา: พิณีจ, 2544

#### 4. การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (สถาพร, 2544)

การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน ถือกำเนิดที่ประเทศสหรัฐอเมริกา จากข้อมูลตอกเสาเข็มที่เมื่อตอกเสาเข็มลงยาก เสาเข็มนั้นจะสามารถรับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น ซึ่งจะควบคุมและตรวจสอบด้วยการวัดค่ายุบตัวหัวเสาเข็มต่อจำนวนครั้งลูกตุ้มตอก ต่อมาได้กำหนดกระบอกผ่า (Split Barrel) ขนาดน้ำหนักลูกตุ้ม และวิธีการทดสอบเป็นมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ASTM D-1586 เป็นต้น

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวัตถุประสงค์หลักของการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน ก็เพื่อหาข้อมูลชั้นดินที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพเพื่อไปทดสอบได้ ซึ่งจะเป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งดาน (Stiff to Hard Clay) และดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soil) อื่นๆ จากการที่ได้มีการใช้วิธีการตอกทะลวงแบบมาตรฐานมานานปี วิศวกรได้เพิ่มพูนประสบการณ์ (Empirical Formula) นับได้ว่าเป็นการทดสอบในสนามที่ได้รับความนิยมแพร่หลายที่สุด

##### 4.1 ความสำคัญของการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน

การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐานในปัจจุบันเป็นการทดสอบที่จะต้องกระทำควบคู่กับการเจาะสำรวจดิน ด้วยเหตุผลดังนี้

1) เป็นการทดสอบที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย วิศวกร ผู้รับจ้าง สถาปนิก และเจ้าของงาน จะสามารถตีความหมายค่าของการทดสอบนี้ได้ จึงทำให้รู้ความแข็งอ่อนของชั้นดินได้ทันที

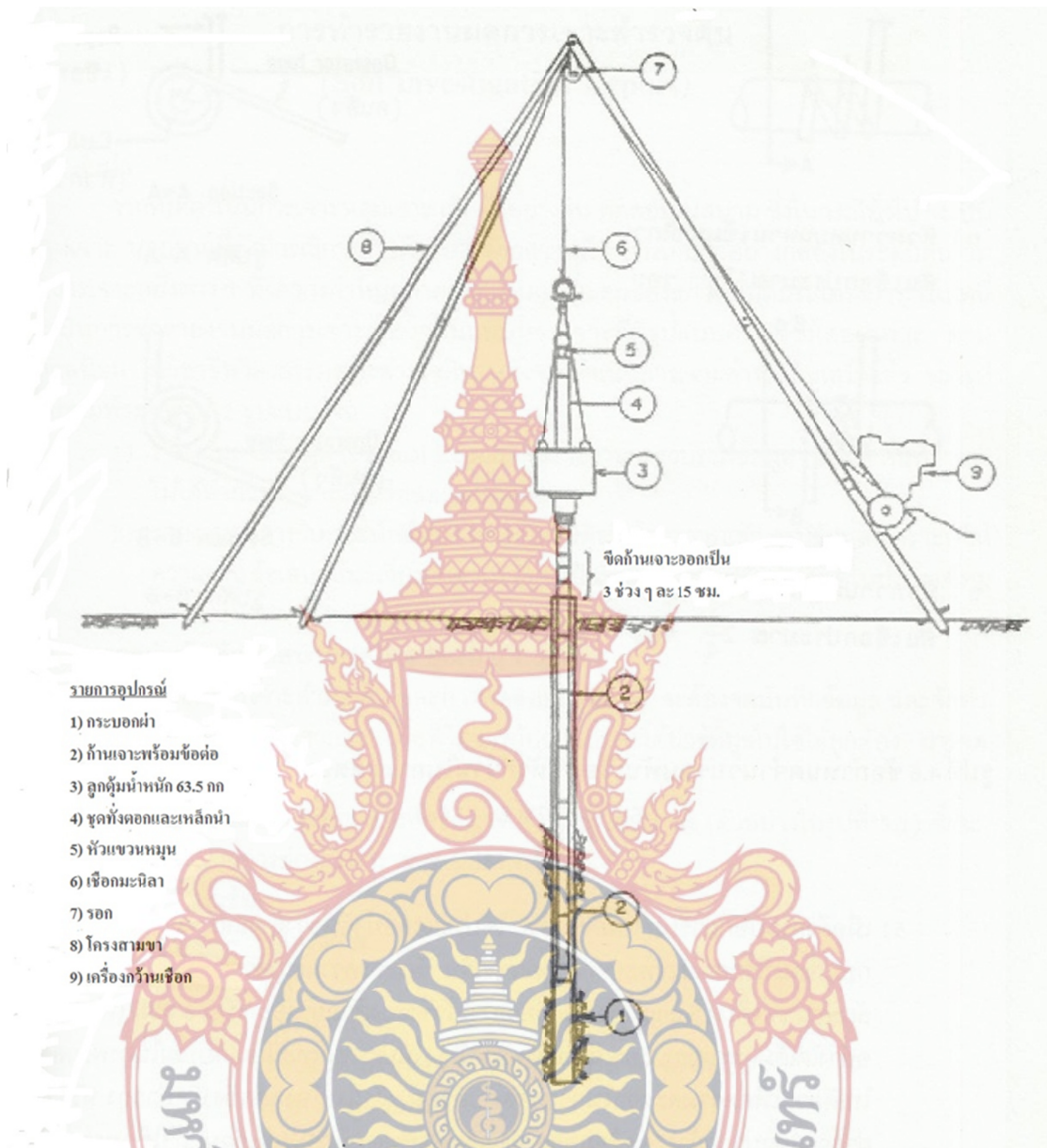
2) สำหรับดินที่มีเม็ดหยาบ (ทรายและกรวด) ที่ไม่สามารถจะเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพขึ้นมาทดสอบในห้องทดลองได้ จึงต้องทำการทดสอบชนิดนี้เพื่อที่จะได้ตัวอย่าง (แบบแปลงสภาพ) ขึ้นมา สำหรับการทดสอบทางกายภาพทั่วไป

3) การทดสอบวิธีนี้ได้ SPT-N (จำนวนครั้งลูกตุ้มตอกต่อระยะกระบอกผ่าจมลงไป 1 ฟุต) จากค่าที่ได้นี้ สามารถแปลงเป็นค่ากำลังของดินสำหรับนำไปใช้ออกแบบฐานราก

##### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

อุปกรณ์ทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน เมื่อประกอบติดตั้งในสนาม ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยปกติอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะกำหนดเป็นมาตรฐานแต่ในความเป็นจริงมีการใช้อุปกรณ์ที่แตกต่างกันบ้างในรายละเอียด สำหรับอุปกรณ์หลักประกอบด้วย





#### รายการอุปกรณ์

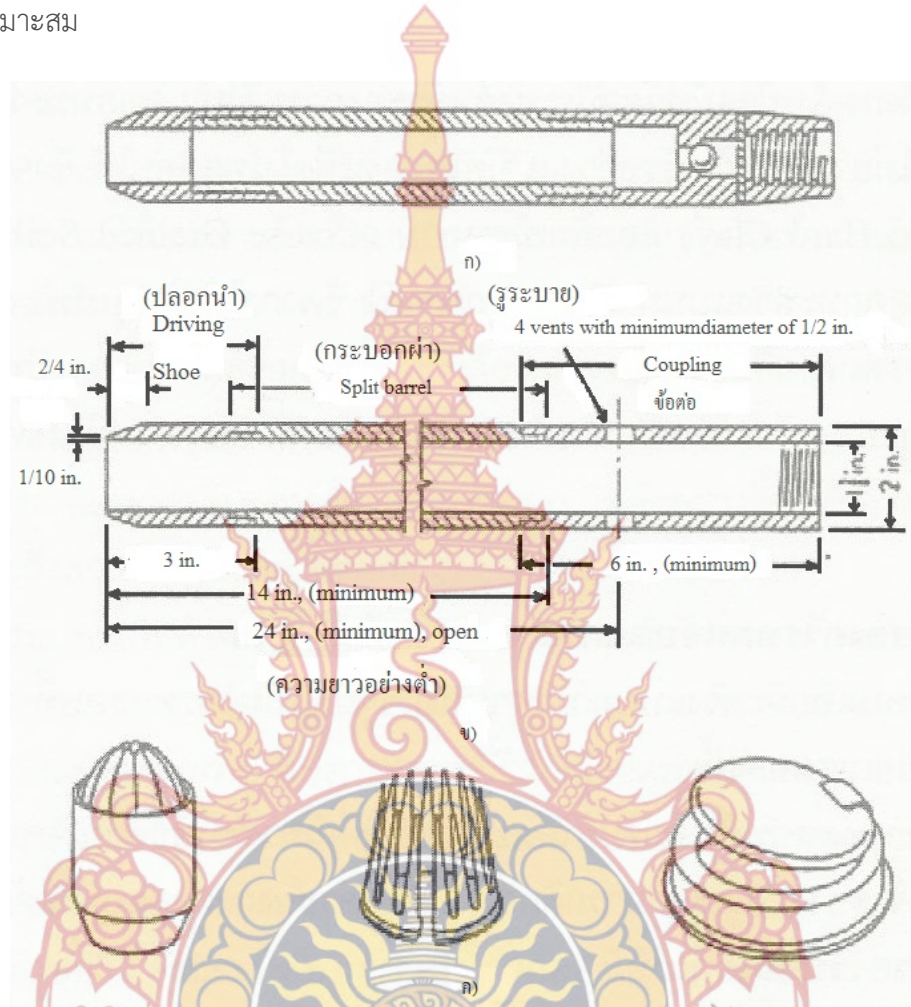
- 1) กระบอกร่อง
- 2) ก้านเจาะพร้อมข้อต่อ
- 3) ลูกตุ้มน้ำหนัก 63.5 กก
- 4) ชุดทั้งดอกและเหล็กนำ
- 5) หัวแขนหมุน
- 6) เชือกมะนิลา
- 7) รอก
- 8) โครงสามขา
- 9) เครื่องกว้านมือ

ภาพที่ 4 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน

ที่มา: สถาพร, 2544

1) กระบอกร่อง (Split Barrel-Spoon) ดังแสดงในภาพที่ 5 เป็นสองส่วนตลอดความยาวด้านข้าง ส่วนปลายทั้ง 2 เป็นเกลียวสำหรับขันปลายคมด้านล่างและหัวต่อส่วนบน กระบอกร่องมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $1 \frac{3}{8}$  นิ้ว (หรือ 1.5) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว กระบอกร่องสำหรับเก็บตัวอย่างยาวไม่ต่ำกว่า 18 นิ้ว ส่วนล่างมีปลายคมสำหรับนำตอกดิน (Driving Shoe) ขันต่อกับปลายกระบอกร่องด้วยเกลียว ทำจากเหล็กแข็งพิเศษและสามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อใช้จนสึก ส่วนหัวต่อบนมีวาล์วลูกปืน (Ball Valve) เพื่อช่วยเก็บตัวอย่างดินให้ติดดีขึ้น ปลายบนสุดเป็น

เกลียวสำหรับต่อเข้าเกลียวกันเจาะ นอกจากนี้ใจกรณีตอกเก็บตัวอย่างดินประเภทไม่เชื่อมแน่นมี ปัญหาเก็บตัวอย่างดินไม่ติด (No Recovery) จะสามารถติดตะกร้อช่วยเก็บดินชนิดต่างๆได้ตาม ความเหมาะสม



ภาพที่ 5 กระบอกผ่ามาตรฐาน (Split Barrel, Spoon)

- (ก) แบบกระบอกผ่า
- (ข) ขนาดของกระบอกผ่า
- (ค) ตะกร้อช่วยเก็บดินแบบต่างๆ

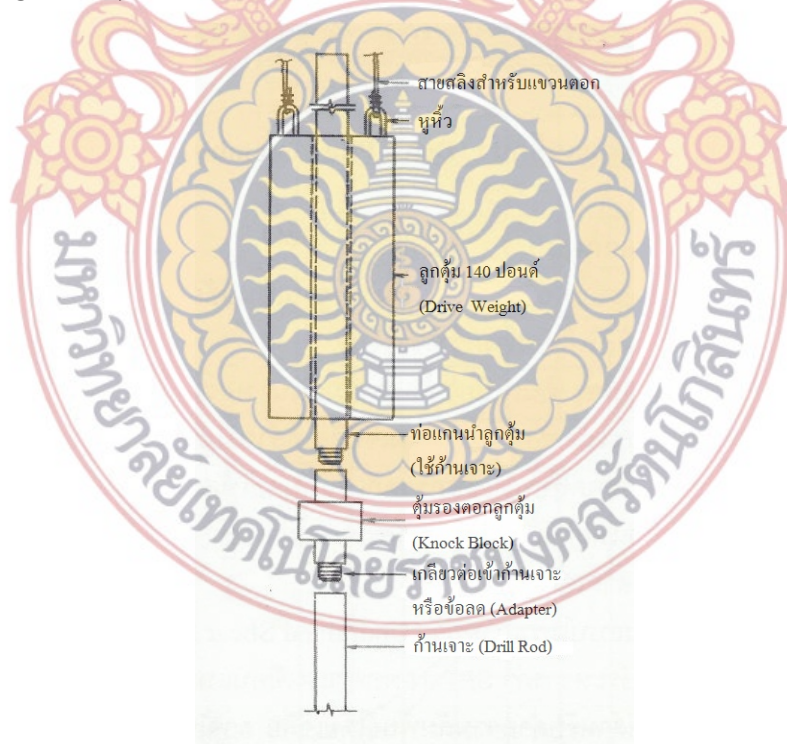
ที่มา: สถาพร, 2544

2) ลูกตุ้ม (Drive Weight) กำหนดน้ำหนักเดิม 140 ปอนด์ หรือ 63.5 กิโลกรัม ตรง กลางมีรูกลวง สำหรับสวมเหล็กนำขณะตอก พร้อมสายโซ่และหูหิ้ว มีใช้หลายรูปลักษณะ ส่วนมาก เป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวควบคุมให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด 63.5 กิโลกรัม อุปกรณ์กลไกตอกลูกตุ้มเพื่อให้ได้ระยะยกตามที่กำหนดจะต้องมีส่วนล่างต่อเข้ากับเกลียว กันเจาะ มี 2 ชนิดหลัก คือ

ก. แบบใช้มือ (Manual) เป็นแบบที่ง่าย ใช้ซีตระยะตกที่กำหนดบนท่อนำศูนย์ ลูกตุ้มเวลา ลูกตุ้มจะควบคุมให้ลูกตุ้มยกขึ้นถึงขีดกำหนด (30 นิ้ว) และจะปล่อยตก ไม่มีกลไกที่เสียหายง่าย แต่ผู้ปฏิบัติการพันเชือกที่หัวกว้าน (Cathead) ให้ถูกต้องตามกำหนด เพื่อให้ปล่อยลูกตุ้มตกอย่างอิสระ เป็นลูกตุ้มที่ในประเทศไทย

ข. แบบอัตโนมัติ (Automatic Trip Hammer) ออกแบบให้มีกลไกการปลดลูกตุ้มให้ได้ระยะตกที่กำหนด (30 นิ้ว) และสามารถปล่อยลูกตุ้มตกได้โดยอิสระได้ตามที่กำหนด มีการกำหนดใช้ลูกตุ้มอัตโนมัติในประเทศที่เจริญแล้ว ส่วนในประเทศไทยยังมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากกลไกจะมีส่วนเครื่องกลปลดปล่อยลูกตุ้มที่เสี่ยงต่อการชำรุด โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ในทุกระกัณฑ์ห่างไกล เมื่อกลไกเสียหายที่ซ่อมบำรุงลำบากสำหรับลูกตุ้มแบบปล่อยตกด้วยมือจะต้องมีส่วนประกอบในการต่อเข้ากับปลายบนก้านเจาะนำลูกตุ้มตกในแนวตั้ง ซึ่งในประเทศไทยมีใช้อยู่อย่างน้อย 2 แบบ คือ

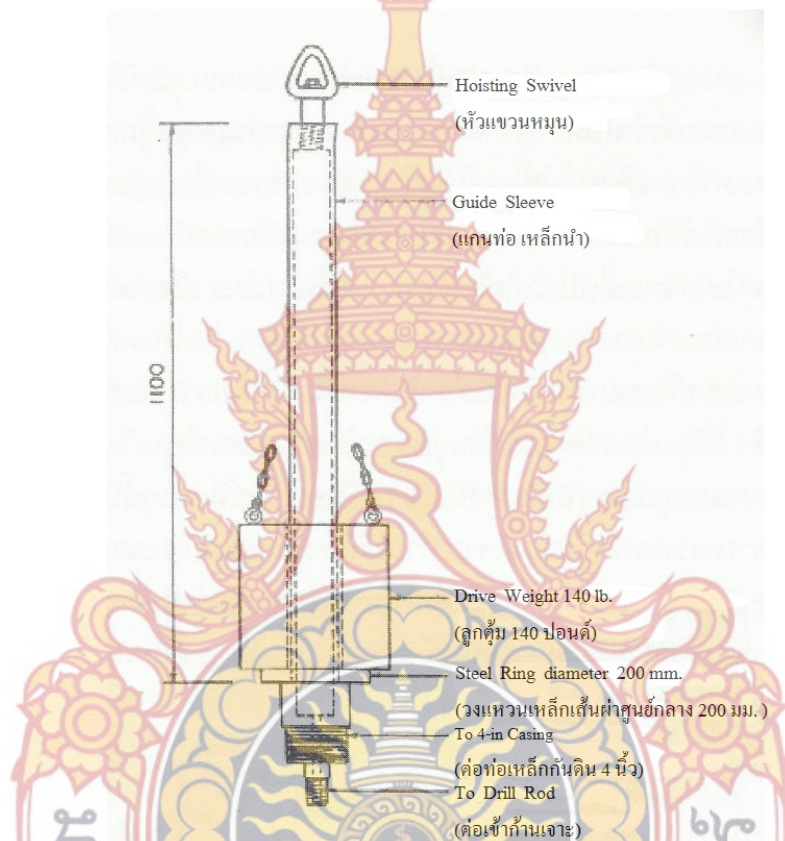
(1) แบบตุ้มรองตอกลูกตุ้ม (Knock Block) ดังภาพที่ 6 เป็นอุปกรณ์ที่ง่าย ๆ ขึ้นเดียวคือ ตุ้มรองตอกลูกตุ้ม ที่มารัดต่อเข้ากับก้านเจาะ ทำหน้าที่รองการตกกระแทกของลูกตุ้ม ถ้าจะใช้ตุ้มรองตอกลูกตุ้ม จะต้องออกแบบลูกตุ้มให้มีรูในใหญ่กว่าก้านเจาะเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ก้านเจาะสามารถนำตอกลูกตุ้มได้โดยไม่แกว่ง เป็นแบบที่มีความเหมาะสมใช้งานเจาะที่เบากว่า (Light Duty)



ภาพที่ 6 ตุ้มรองตอกลูกตุ้ม (Knock Block)

ที่มา: สถาพร, 2544

(2) แบบชุดทั้งตอกและเหล็กนำ (Drive Pipe Assembly) สำหรับการใช้งานหนัก (Heavy Duty) ประกอบด้วยท่อนำกลาง ส่วนกลางของส่วนบนมีเกลียวต่อเกลียวกัน เจาะทำด้วยท่อเหล็กขนาดใหญ่ ทำให้มีน้ำหนักสูงเป็นภาระในการขนย้าย และติดตั้งทดสอบ จึงต้องพิจารณาเลือกใช้ชนิดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับงานทดสอบ ตัวอย่างชุดทั้งตอกและเหล็กนำแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ชุดทั้งตอกและเหล็กนำ (Drive Pipe Assembly)

ที่มา: สถาพร, 2544

#### 4.3 การแปลผลการทดสอบ

จากการที่มีการใช้การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐานเป็นหลักในการเจาะสำรวจดิน จึงได้มีการนำผล SPT-N ที่ทดสอบไปใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังนี้

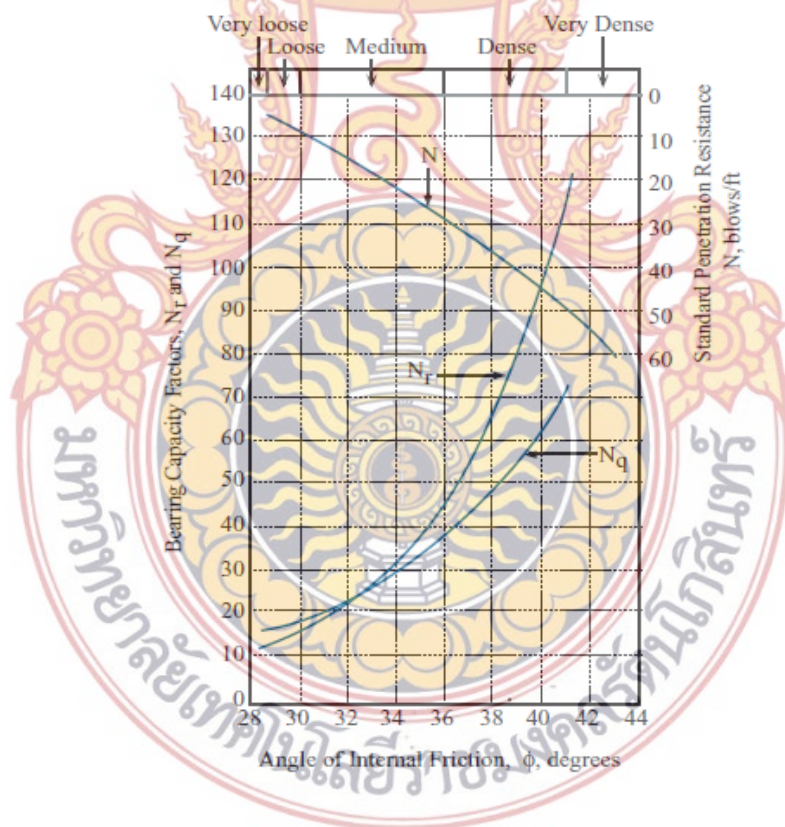
1) ใช้จำแนกความแข็ง-อ่อนของดินเหนียว และความแน่น-หลวมของดินเม็ดหยาบ (ทราย และกรวด) ซึ่งค่อนข้างเชื่อถือได้สำหรับทราย ส่วนดินเหนียวมีค่าไม่น่าเชื่อถือนัก การทดสอบในชั้นกรวดก็เช่นกันจะให้ค่าที่ไม่แน่นอน เนื่องจากกรวดอาจมีขนาดเม็ดใหญ่ และขวางปากกระบอกผ่าระหว่างการตอกทดสอบทำให้ได้ค่า SPT-N คลาดเคลื่อนได้

2) ใช้ประมาณค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดินเหนียว ได้มีผู้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N ต่อค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Terzaghi and Peck, 1948) แต่สำหรับค่าความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยอาจใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$S_u = N/1.5 \quad \text{ตัน/ตารางเมตร} \quad (3)$$

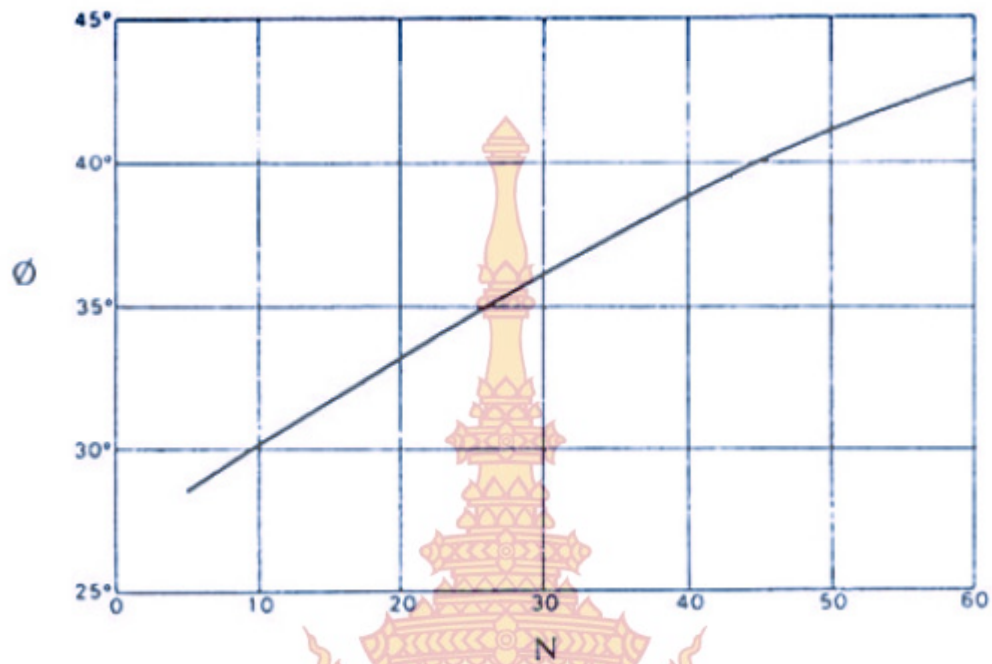
3) ใช้ประเมินน้ำหนักบรรทุกฐานราก โดยผลการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐานสามารถแปลงเป็นค่าคงตัวของดินสำหรับออกแบบฐานราก ซึ่งสามารถทำได้ 2 ทางคือ

ก. สำหรับดินเม็ดหยาบ นำค่า SPT-N ที่ทดสอบได้แปลงเป็นค่ากำลังของดินในรูปของมุมเสียดทาน (Friction Angle,  $\phi$ ) โดยอาศัยกราฟดังภาพที่ 8 หรือภาพที่ 9 (กำหนดให้  $c=0$ ) แล้วนำไปคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกทุกในสูตรการหาค่าน้ำหนักบรรทุกของฐานรากทั่วไป สำหรับค่ามุมเสียดทานของดินชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4



ภาพที่ 8 แผนภูมิความสัมพันธ์ค่า  $N$  กับค่าองค์ประกอบน้ำหนักบรรทุกทุก  $N_q$  และ  $N_r$  ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) สำหรับทราย

ที่มา: Peck et al., 1974



ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_{SPT}$  และค่า  $\phi$  โดยประมาณ  
ที่มา: Peck et al., 1974

ตารางที่ 4 ค่าทั่วไปของมุมเสียดทาน ( $\phi$  และ  $\phi_u$ ) สำหรับดินเม็ดหยาบชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	มุม $\phi$ (องศา)	มุม $\phi_u$ (องศา)
Sand : rounded grains		
Loose	28 to 30	
Medium	30 to 35	26 to 30
Dense	35 to 38	
Sand : angular grains		
Loose	30 to 35	
Medium	35 to 40	30 to 35
Dense	40 to 45	
Sandy Gravel	34 to 48	33 to 36

ที่มา: Peck et al., 1974

ข. สำหรับเม็ดดินเหนียว นำค่า SPT-N ที่ทดสอบได้ในสนามไปใช้ในสูตรเชิงประสพการณ์ (Empirical Formula) เพื่อคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกทุกโดยตรง และหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดจากการแปลงค่าดังวิธีในข้อ (ก) โดยการใช้สูตรเชิงประสพการณ์จะรวมถึงผลกระทบจากสภาวะการทดสอบในสนามไว้แล้วด้วย Thornburn and Mc Vicar (1971) แนะนำสูตรคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอกในดินเม็ดเหนียว ดังนี้

ค่าน้ำหนักบรรทุกเสียดทาน (Shaft Friction),

$$Q_s = 0.21NA_s \quad \text{ตัน} \quad (5)$$

จำกัดค่า  $q_s = 0.21N$  ไม่เกิน 10 ตัน/ตารางเมตร

ค่าน้ำหนักบรรทุกตุลา (End Bearing),

$$Q_b = 43NA_b \quad \text{ตัน} \quad (6)$$

(มาตรฐานญี่ปุ่น ใช้ค่า  $Q_b = 30NA_b$ ) (ชัยและนาซาวา, 2526)

จำกัดค่า  $q_b = 43N, 30N$  ไม่เกิน 1,000 ตัน/ ตารางเมตร

Meyerhof (1956) ได้ให้สูตรเชิงประสพการณ์สำหรับคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของดินเม็ดเหนียว สำหรับฐานรากแผ่ ดังนี้

$$q_a = 1.25N \times S_u \times R'_w \quad B < 4 \text{ ฟุต} \quad (7)$$

$$q_a = N \times \frac{S_u (B + 1)^2}{12B} \times 10R'_w \quad B > 4 \text{ ฟุต} \quad (8)$$

นอกจากนี้ค่า Standard Penetration Resistance ( $N_{SPT}$ ) สามารถคำนวณจากค่าที่ได้จากการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา Kunzelstab ( $N_{KPT}$ ) ดังนี้

$$N_{SPT} = 0.539(N_{KPT} + 0.954) \quad (9)$$

## 5. เครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย (Salgado et al., 2003)

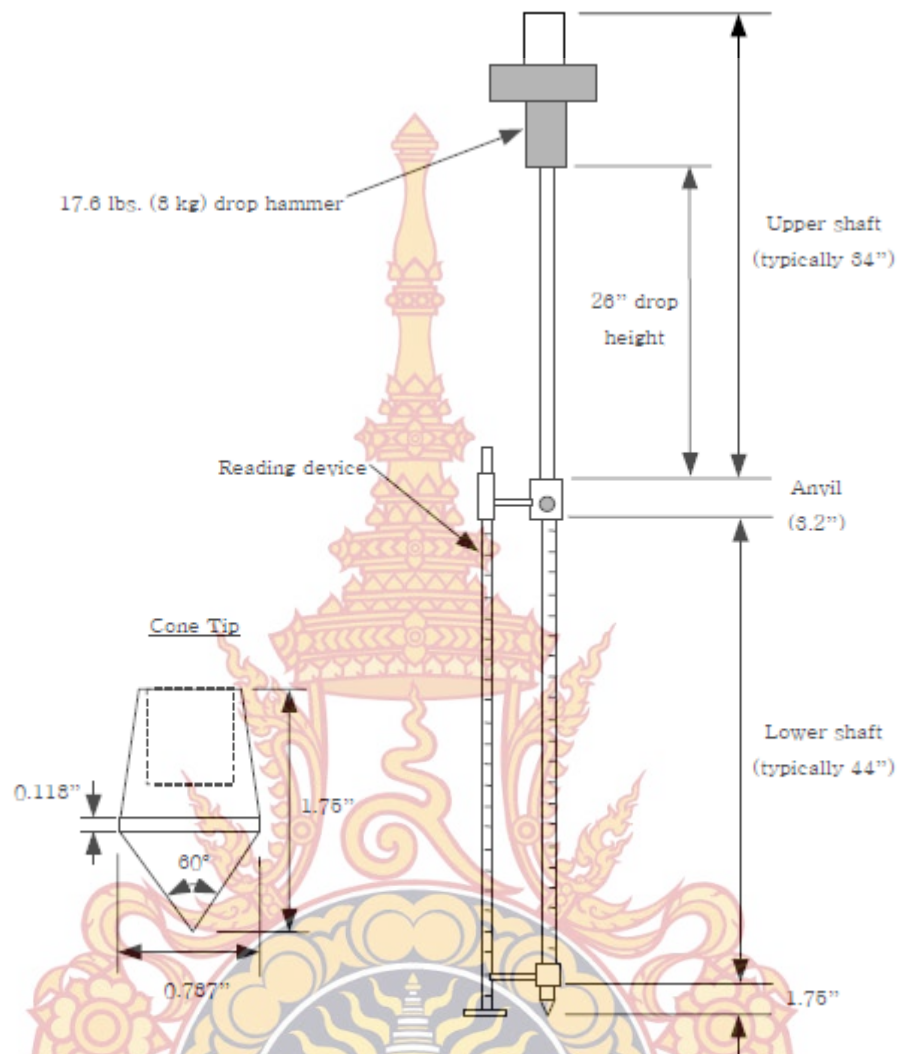
เครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวยเป็นเครื่องมือที่ออกแบบไว้สำหรับการทดสอบหาข้อมูลของชั้นดินหรือชั้นผิวจราจรในสนามโดยไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่าง การทดสอบสามารถทำได้อย่างต่อเนื่องจนถึงความลึก 0.80 เมตร และถ้าหากต่อก้านเหล็กเพิ่มเติมสามารถทำการทดสอบได้จนถึงความลึก 1.20 เมตร ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะบอกให้ทราบถึงลักษณะของชั้นดินว่ามีความแข็งแรงมากน้อยเพียงใด ความหนาของชั้นดินนั้น ๆ และความลึกของชั้นดินนั้น จากผิวดินที่ทำการทดสอบ ค่าความแข็งแรงจะบอกเป็นค่า ซี.บี.อาร์. โดยใช้กราฟของ Van Kuuren (1969.), Kley and Van Heerden (1983.) และ Smith and Pratt (1983.) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะมุมปลายกรวยที่ใช้

### 5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 10 ประกอบด้วยชุดชิ้นส่วนดังต่อไปนี้

- 1) ตุ่มเหล็กหนัก 8 กิโลกรัม
- 2) ก้านเหล็กนำตอกมีระยะตกกระทบ 57.5 เซนติเมตร
- 3) หัวเจาะมีมุมปลายกรวย 60 องศา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร
- 4) ก้านเหล็กสำหรับต่อกับหัวกรวยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 40 เซนติเมตร 1 ท่อน และยาว 90 เซนติเมตร 2 ท่อน
- 5) ทังตอกสำหรับรองรับตุ้มเหล็ก
- 6) ไม้บรรทัดเหล็ก ความยาว 1.0 เมตร





ภาพที่ 10 โครงสร้างของเครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย

ที่มา: Salgado et al., 2003

## 5.2 การทดสอบและการแปลผลการทดสอบ

การทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวยต้องใช้ผู้ทดสอบ จำนวน 3 คน โดยคนแรกจะเป็นผู้จับเครื่องมือให้ตั้งอยู่ในแนวตั้ง คนที่สองจะทำหน้าที่ยกลูกตุ้มเหล็ก และปล่อยให้ตกอิสระ ส่วนคนที่สามจะทำหน้าที่จดบันทึกข้อมูล โดยวิธีการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) เลือกตำแหน่ง จัดเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้ง อ่านค่าบนไม้บรรทัดเหล็กเป็นค่าก่อนทำการทดสอบ

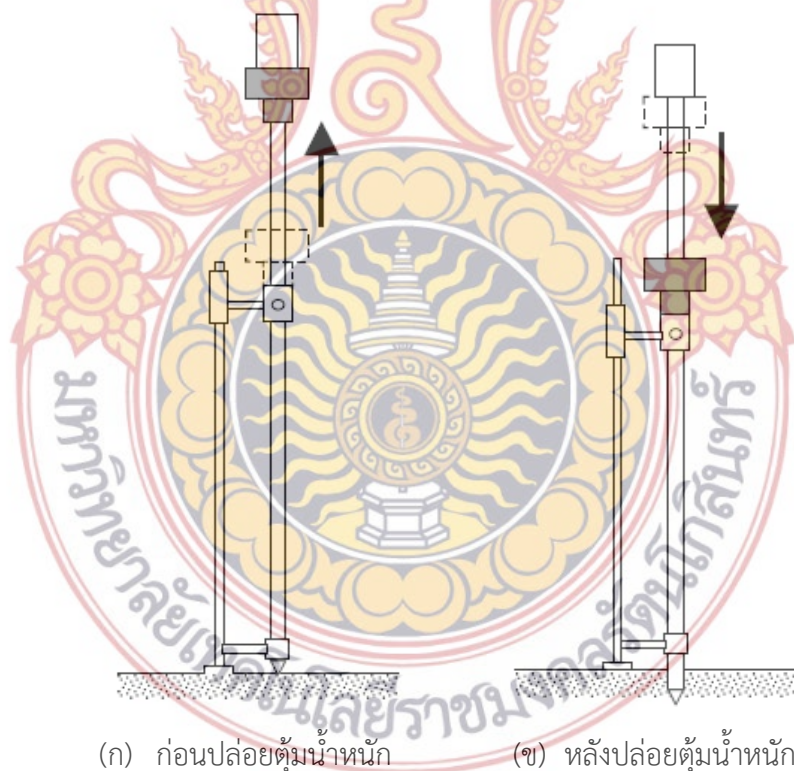
2) ยกลูกตุ้มขึ้นสัมผัสกับด้ามมือจับเบาๆ แล้วปล่อยให้ตกอิสระกระทบกับทั้งเหล็ก ซึ่งต่ออยู่กับก้านเหล็กและหัวกรวยทำให้จมลึกลงไปในดิน ดังภาพที่ 11

3) จดบันทึกค่าระยะการจมของหัวกรวยกับจำนวนครั้งที่ตุ้มเหล็กกระทบ โดยทำการทดสอบทุก ๆ ระยะ 10 เซนติเมตร หรืออาจจะใช้วิธีกำหนดจำนวนครั้งที่ตอก เช่น 5 ครั้ง หรือ 10 ครั้ง แล้วอ่านค่าการจมของหัวกรวย ในกรณีที่ดินอ่อนมากอาจจะทำให้การอ่านค่าการจมของหัวกรวยทุก 1 หรือ 2 ครั้งที่ตอก

4) การตอก้านเหล็ก ทำได้โดยการตอก้านเหล็กให้จมลึกลงในดินจนเหลือระยะระหว่างผิวที่ทำการทดสอบกับขีดอ่านประมาณ 40 ถึง 50 เซนติเมตร จึงทำการตอก้านเหล็กโดยหมุนคล้ายเกลียวก้านเหล็กพร้อมทั้งและยกบรรทัดเหล็กออกก่อน

5) ในกรณีพบชั้นดินแข็งมาก ๆ หรือพบก้อนกรวดหรือหินขนาดใหญ่ฝังขวางหัวกรวยไว้ ถ้าอัตราการจมของหัวกรวยน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร/ครั้ง หรือพบว่าการตอกจำนวน 20 ครั้ง ไม่สามารถอ่านค่าความเปลี่ยนแปลงระยะการจมได้ก็ให้หยุดทำการทดสอบ

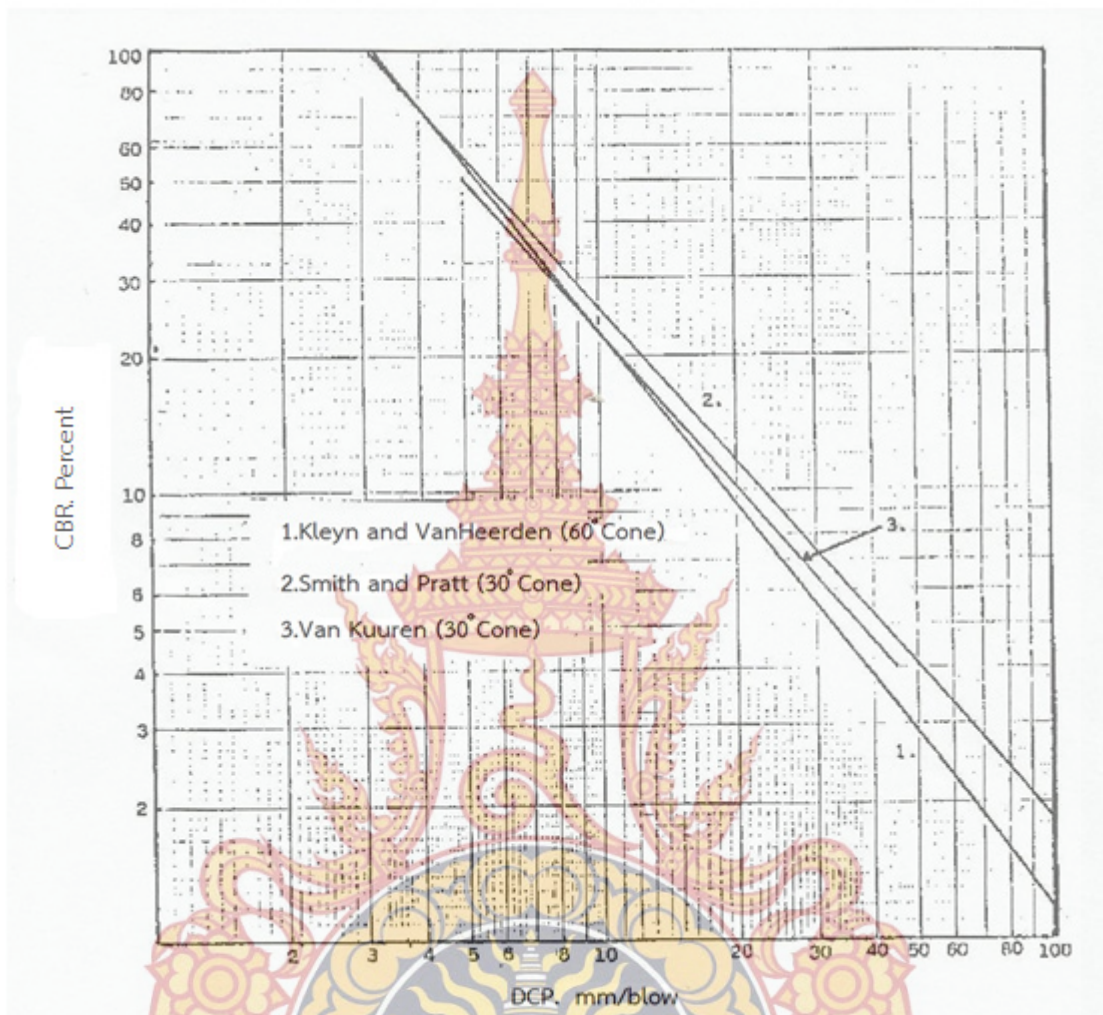
6) เมื่อทดสอบจนได้ข้อมูลเพียงพอแล้ว วิธีการถอนเก็บก้านเหล็กและหัวกรวยจะใช้ตุ้มเหล็กกระแทกด้ามจับมือเบาๆ หลายๆ ครั้ง จนกว่าก้านเหล็กและหัวกรวยขยับตัวขึ้นมา อย่าใช้วิธีกระแทกแรง เพราะอาจทำให้ด้ามจับชำรุดเสียหายได้



ภาพที่ 11 เครื่องมือทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย

ที่มา: Salgado et al., 2003

ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำมาแปลผลเพื่อหาค่าซี.บี.อาร์. ได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ค่าการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ ซี. บี. อาร์.

ที่มา: Salgado et al., 2003

### 5.3 ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือ

การทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ ควรคำนึงถึงข้อควรระวัง ดังนี้

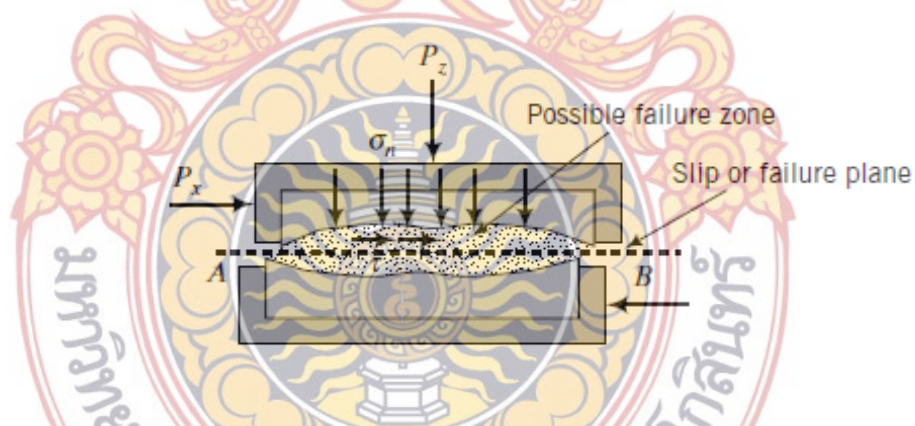
1) ก่อนทำการทดสอบต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าจุดต่อเกลียวต่างๆถูกขันจนแน่นดีแล้ว เพราะถ้าหากหลวมก็จะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดได้

2) การยกตุ้มเหล็กขึ้นจนสัมผัสกับด้านล่างของด้ามมือจำเป็นต้องระวังอย่าให้กระแทกแรง เพราะอาจทำให้ก้านเหล็กและหัวกรวยถอนตัวขึ้นทำให้ได้ข้อมูลที่ผิดพลาด

3) หัวกรวยเมื่อใช้งานนานๆจะมีการสึกหรอ ถ้าหากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกรวยเปลี่ยนแปลงเกินร้อยละ 10 หรือ 0.2 เซนติเมตร ต้องทำการเปลี่ยนโดยปกติจะทำการเปลี่ยนหัวกรวยหลังจากใช้งานในชั้นดินหรือผิวจราจรที่แข็งมากประมาณ 10 ครั้ง

#### 6. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบการเฉือนโดยตรง (ชูศักดิ์, 2554)

การทดสอบแบบนี้เป็นวิธีการทดสอบที่ถือได้ว่าเก่าแก่ที่สุดและมีรูปแบบการจัดชุดการทดสอบที่ง่ายที่สุด อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบคือ กล่องทดสอบแรงเฉือน (Shear Box) อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมก็ได้ โดยทั่วไปแล้วกล่องทดสอบแรงเฉือนมีขนาดประมาณ 3-4 ตารางนิ้ว (1935.48-2580.64 ตารางมิลลิเมตร) และสูงประมาณ 1 นิ้ว (25.4 มิลลิเมตร) โดยกล่องแรงเฉือนสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันส่วนล่างถูกยึดติดอยู่กับที่และส่วนบนสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแรงเฉือนที่กระทำ ในการทดสอบแรงกระทำตั้งฉาก (Normal Force) จะถูกปล่อยให้กระทำต่อตัวอย่างดินจากด้านบนของกล่องทดสอบแรงเฉือนด้วยน้ำหนักคงตัว (Dead Load) ค่าของแรงเค้นตั้งฉากสามารถหาได้จากน้ำหนักคงตัว ส่วนแรงเฉือนจะปล่อยให้กระทำกับส่วนบนของกล่องทดสอบแรงเฉือน ซึ่งจะเฉือนจนดินพังทลายตราบเท่าสำหรับค่าแรงเค้นหลัก ( $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างดินสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปแบบการจัดเตรียมดินสำหรับการทดสอบการเฉือนโดยตรง  
ที่มา: Budhu., 2011

การใช้ชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1) การควบคุมด้วยแรงเค้น (Stress Control Test) แรงเฉือนที่ใช้ในการทดสอบลักษณะนี้จะอาศัยน้ำหนักคงตัว (Dead Load) ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งทำให้ดินเกิดการพัง ซึ่งจะเกิดขึ้นตามระนาบรอยแบ่งของกล่องทดสอบแรงเฉือน หลังจากน้ำหนักคงตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั้นการเคลื่อนที่

ของกล่องทดสอบด้านบนจะถูกวัดโดยเกจวัดการเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal Dial Gauge) การเปลี่ยนแปลงความสูงตัวอย่างดินในระหว่างการทดสอบ (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) จะถูกวัดโดยเกจวัดการเคลื่อนที่ในแนวแนวตั้ง (Vertical Dial Gauge) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ด้านบนแผ่นถ่ายแรง (Loading Plate)

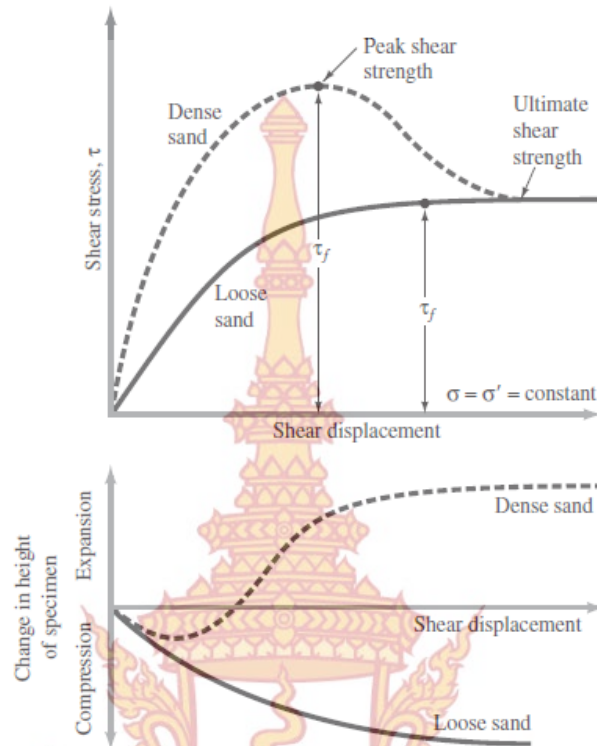
2) การควบคุมด้วยความเครียด (Strain Control) การทดสอบแบบนี้จะกำหนดอัตราการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนแบบคงที่ โดยอ่านเกจวัดการเคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งเกิดจากแรงที่กระทำผ่านมอเตอร์กับกล่องทดสอบด้านบน แรงเฉือนต้านทานจะมีค่าเท่ากับแรงเฉือนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สามารถวัดได้จากการอ่านค่าที่วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ในแนวนอน การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรสามารถวัดได้เช่นเดียวกับวิธีควบคุมด้วยแรงเค้น ข้อได้เปรียบของวิธีควบคุมด้วยความเครียดซึ่งทดสอบกับดินทรายแน่น สามารถหาค่าแรงเฉือนสูงสุด (แรงต้านทานที่จุดพังทลาย หรือ Peak Shear Resistance) พร้อมกับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่จุดสูงสุด (Peak) เป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนหลังจากจุดพังทลาย เรียกว่า Ultimate Shear Resistance โดยสามารถที่จะสังเกตได้จากกราฟในภาพที่ 14 ส่วนในการทดสอบควบคุมด้วยแรงเค้น จะสามารถหาได้แค่เพียงแรงเฉือนสูงสุดเท่านั้น

ค่าแรงเค้นตั้งฉาก (Normal Stress;  $\sigma$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{\text{แรงตั้งฉาก}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad (11)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าแรงเค้นเฉือน (Shear Stress;  $\tau$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\tau = \frac{\text{แรงเฉือน}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad (12)$$



ภาพที่ 14 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทรายแน่น (Dense Sand) และทรายหลวม (Loose Sand)

ที่มา: Das., 2008

จากภาพที่ 14 เป็นผลจากการทดสอบแบบควบคุมด้วยความเครียด สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สำหรับดินหลวม ค่าความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามค่าการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน จนกระทั่งถึงแรงเค้นที่จุดพังทลาย ( $\tau_f$ ) หลังจากนั้นค่าความเค้นเฉือนจะมีค่าในลักษณะคงที่ตลอด การเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน

2) สำหรับดินแน่น ค่าของความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามค่าการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน จนกระทั่งถึงแรงเค้นที่จุดพังทลาย ( $\tau_f$ ) เรียกว่า Peak Shear Strength หลังจากนั้นค่าของความเค้นเฉือนจะลดลงตามการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน จนถึงจุดสุดท้ายที่ค่าของความเค้นเฉือนจะเริ่มคงที่ ซึ่งเรียกความเค้นที่จุดนี้ว่า Ultimate Shear Strength



$$q_u = \frac{Q_u}{B} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (13)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์กำลังแบกทาน (Bearing Capacity Factor) สามารถหาได้จากตารางที่ 5 หรือหาจากสมการต่อไปนี้

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (14)$$

$$N_q = \frac{a_\theta^2}{2 \cos^2 (45 + \phi/2)} \quad (15)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \tan \phi \frac{K_p \gamma}{\cos^2 \phi} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_\theta &= e^{\eta \tan \phi} \\ \eta &= (0.75 - \phi/2) \end{aligned}$$

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์กำลังแบกทาน ( $N_c$ ,  $N_q$  และ  $N_\gamma$ ) สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในต่างๆ โดยเทอร์ซากิ

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.7	1.0	0.0
5	7.3	1.6	0.14
10	9.6	2.7	1.2
15	12.9	4.4	1.8
20	17.7	7.4	5.0
25	25.1	12.7	9.7
30	37.2	22.5	19.7
35	57.8	41.4	42.4
40	95.7	81.3	100.4
45	172.3	173.3	360.0
50	347.5	415.1	1072.8

ที่มา: Das., 2008



2) สมการสำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ฐานรากวงกลม และฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า  
(Equation for Square, Circular and Rectangular Foundation)

สมการกำลังแบกทานของเทอร์ซาก็ได้ถูกพัฒนาให้สามารถใช้ได้กับฐานรากชนิดอื่น โดยแนะนำในรูปของปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) ดังสมการต่อไปนี้

ก. ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Foundation)

$$q_u = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \quad (17)$$

ข. ฐานรากวงกลม (Circular Foundation)

$$q_u = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \quad (18)$$

ค. ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Foundation)

$$q_u = cN_c \left( 1 + 0.3 \frac{B}{L} \right) + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \left( 1 - 0.2 \frac{B}{L} \right) \quad (19)$$

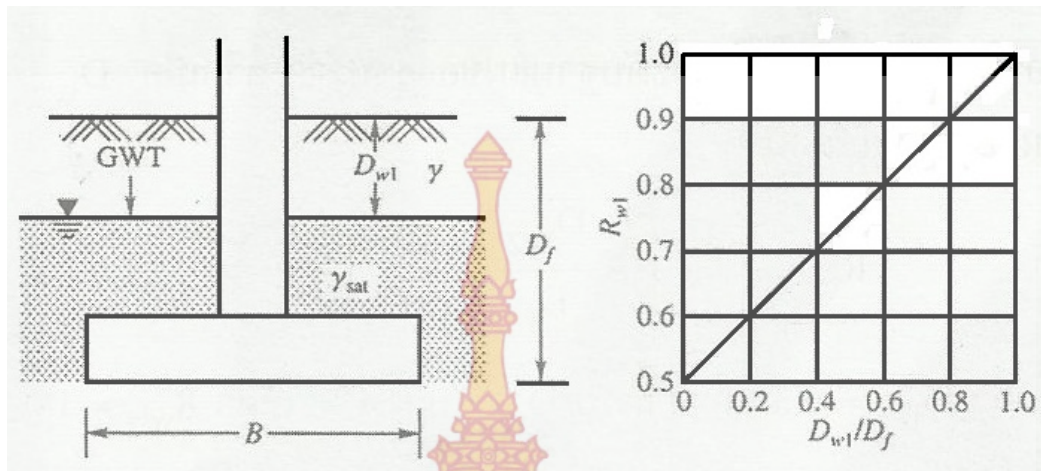
## 7.2 ผลกระทบของน้ำใต้ดินต่อความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทาน

สมการที่ได้จากที่ได้จากทฤษฎีซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของดิน ( $q_u$ ) ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความลึกต่ำจากฐานรากมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความกว้าง (B) ของฐานราก หรือความลึกของระดับน้ำจากผิวดินเท่ากับหรือมากกว่า (D+B) สมการหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานซึ่งมีผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี (ภาพที่ 16) ดังนี้

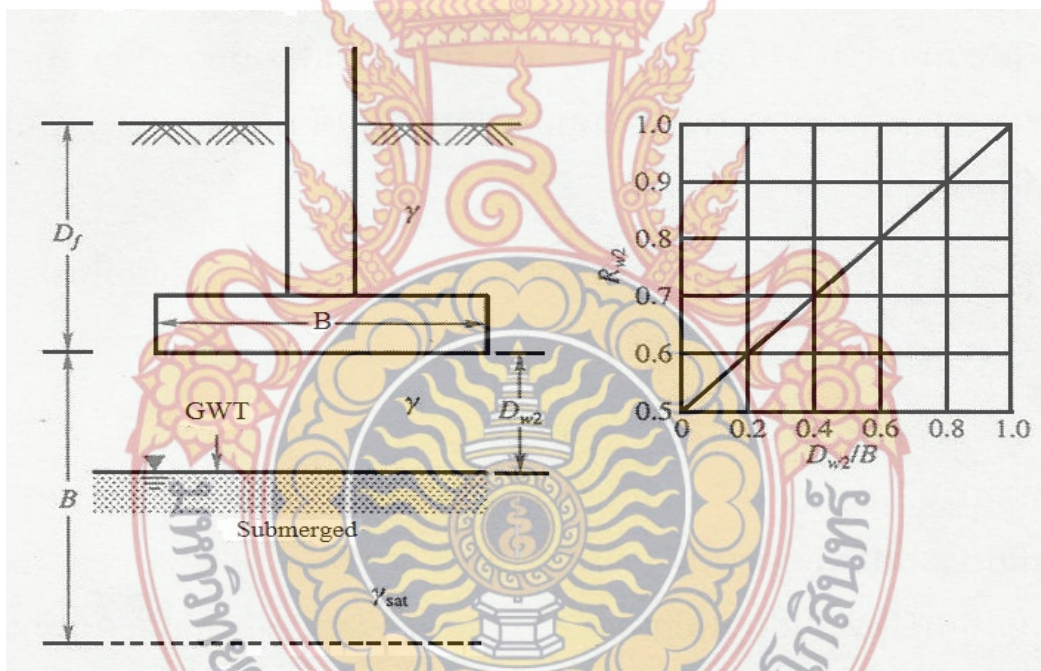
กรณีที่ 1 เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือฐานแผ่ของฐานราก

กรณีที่ 2 เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกในช่วงความกว้าง B ต่ำจากฐานราก

เราสามารถจะใช้ 2 วิธี สำหรับหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานซึ่งมีผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินดังต่อไปนี้



(ก) ระดับน้ำอยู่เหนือระดับฐานแผ่



(ข) ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับฐานราก

ภาพที่ 16 ผลกระทบของระดับน้ำต่อการหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานของดิน

ที่มา: Murthy., 2002

**วิธีที่ 1** สำหรับตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดินอยู่ในความลึก ( $D_f + B$ ) จัดรูปของสมการได้ ดังนี้

$$q_u = cN_c + \gamma D_f N_q R_{w1} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma R_{w2} \quad (20)$$

เมื่อ  $\gamma = \gamma_{sat}$  ใช้ทั้งในเทอมที่ 2 และเทอมที่ 3 ในสมการที่ (20)

กรณีที่ 1 เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือระดับฐานแผ่ของฐานราก หรือเมื่อ  $D_{w1}/D_f \leq 1$  ในภาพที่ 16(ก) โดยค่า  $R_{w1}$  หาได้ดังนี้

$$R_{w1} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{D_{w1}}{D_f} \right) \quad (21)$$

เมื่อ  $D_{w1}/D_f = 0$  จะได้ค่า  $R_{w1} = 1.0$

กรณีที่ 2 เมื่อระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าระดับฐานแผ่ของฐานราก หรือเมื่อ  $D_{w2}/B \leq 1$  ดังภาพที่ 16(ข) โดยค่า  $R_{w2}$  หาได้ดังนี้

$$R_{w2} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{D_{w2}}{D_f} \right) \quad (22)$$

เมื่อ  $R_{w2}/B = 0$  จะได้ค่า  $D_{w2} = 0.5$  และสำหรับ  $D_{w2}/B = 1$  จะได้ค่า  $R_{w2} = 1.0$

ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของ  $D_{w1}/D_f$  กับ  $R_{w1}$  และ  $D_{w2}/B$  กับ  $R_{w2}$  สำหรับสมการที่ (21) และสมการที่ (22) ตั้งอยู่บนพื้นฐานสมมติฐานที่ว่าหน่วยน้ำหนักจมน้ำของดิน (Submerged Unit Weight) เท่ากับครึ่งหนึ่งของหน่วยน้ำหนักอิ่มตัว (Saturated Unit Weight) และถือว่าดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินอิ่มตัว

วิธีที่ 2 จากสมการที่ (13) สำหรับฐานรากแถบสามารถเขียนได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$q_u = cN_c + \gamma_{e1} D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma_{e2} B N_\gamma \quad (23)$$

กรณีที่ 1 สมการสำหรับหาค่า  $\gamma_{e1}$  และ  $\gamma_{e2}$  เขียนได้ดังนี้

$$\gamma_{e1} = \gamma_b + \frac{D_{w1}}{D_f} (\gamma_m - \gamma_b) \quad (24)$$

$$\gamma_{e2} = \gamma_b \quad (25)$$

กรณีที่ 2 สมการสำหรับหาค่า  $\gamma_{e1}$  และ  $\gamma_{e2}$  เขียนได้ดังนี้

$$\gamma_{e1} = \gamma_b \quad (26)$$

$$\gamma_{e2} = \gamma_b + \frac{D_{w2}}{D_f} (\gamma_m - \gamma_b) \quad (27)$$

## 8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อัฐพล ศักดิ์มณี และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาเพื่อทำการพัฒนาเครื่องมือสำรวจและทดสอบชั้นดินในสนามที่มีน้ำหนักเบา ใช้งานง่าย สะดวกและสามารถแปลผลได้โดยไม่ต้องยุ่งยาก ซับซ้อน เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ของดิน และนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดและการออกแบบฐานรากที่รับน้ำหนักไม่มาก โดยเน้นที่ให้ความเหมาะสมในการใช้งานในประเทศไทย ทำโดยการจำลองสภาพชั้นดินที่ค่าความหนาแน่นต่างๆ เพื่อเลียนแบบสภาพดินตามธรรมชาติในถังเหล็กทรงกระบอก ใช้ชุดทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวย (Dynamic Cone Penetrometer) ซึ่งผลที่ได้สัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของทราย จากการจำแนกดิน ได้เป็นดินทรายที่ไม่ละเอียด (SP) และในส่วนของรูปแบบการพังทลายของทรายหลวมมีรูปแบบการพังทลายแบบเฉือนทะลุ (Punching Shear Failure) ส่วนของทรายแน่นเป็นการพังทลายด้วยการเฉือน (General Shear Failure) ทางด้านรัศมีการเคลื่อนตัวของทรายจะแปรผันตามความลึก คือ ถ้ายิ่งลึกจะมีการเคลื่อนตัวของทรายที่น้อย ส่วนแรงต้านที่กระทำต่อหัวกรวยยิ่งมูมยอดปลายกรวยที่มากขึ้นก็จะมีแรงต้านมากขึ้น โดยชุดทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวยเหมาะกับการทดสอบดินที่มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เกินกว่าร้อยละ 50

อัฐพล ศักดิ์มณี และคณะ (2546) ได้ทำการทดสอบการเจาะหยั่ง (Penetrometer) ด้วย Kunzelstab ซึ่งเป็นวิธีการหยั่งทดสอบชั้นดินในสนาม โดยใช้ลูกตุ้มกระแทกส่งหัวเจาะรูปกรวยผ่านชั้นดินลงไป ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของหัวเจาะจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของชั้นดิน ผลของการทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลัง ความหนาของชั้นดินและใช้ระบุชั้นดินอ่อนหรือชั้นดินแข็งได้ ซึ่งวิธีนี้สามารถทำการทดสอบได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าการเจาะสำรวจ ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการเจาะหยั่งด้วย Kunzelstab ในโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน และปรับปรุงแก้ไขอาคารเรียนในจังหวัดระยอง และการสำรวจลาดดินบริเวณน้ำตกกระทิง อุทยานแห่งชาติเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรีพบว่าสามารถใช้ระบุความหนาของชั้นดินแข็งได้เป็นอย่างดี

พิสาน หุ่นทรัพย์ (2549) ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าข้อมูล เพื่อนำมาพัฒนาและจัดสร้างเครื่องทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวยแบบเบา (Light-weight Dynamic Penetrometer Test) เพื่อช่วยในการทดสอบทำให้มีความเหมาะสมและคล่องตัวยิ่งขึ้นกับสภาพพื้นที่ภายในประเทศโดยมีการเลือกใช้วัสดุภายในประเทศเป็นหลัก โดยจากข้อมูลการทดสอบที่ได้นี้สามารถเป็นหลักการพื้นฐาน หรือเป็นต้นแบบในการนำไปพัฒนาจัดสร้างและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาช่วยในการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่หัวกรวย ที่ได้จากการทดสอบการเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ด้วยหัวกรวยแบบเบา กับค่าแรงต้านทานแรงเฉือนที่ใบพัดที่ได้จากการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินในสนาม (Field Vane Shear Test) ซึ่งทดสอบบริเวณโซนรังสิต และโซนบางพลีในสนาม พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกันโดยแสดงความสัมพันธ์ในแบบเส้นตรง

อัฐพล ศักดิ์มณี และคณะ (2549) ได้ทำการทดสอบหาความต้านทานของชั้นดินด้วยการตอกหยั่งแบบพลวัต ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นดินทราย ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการจำลองชั้นดินทรายแห้งและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การศึกษาขอบเขตอิทธิพลของการตอกและลักษณะการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสำหรับดินที่ระดับความแน่นต่างกัน โดยศึกษาถึงผลของมุมยอดของปลายกรวย ระดับพลังงานที่ใช้ในการตอกและน้ำหนักกดทับ และทำการทดสอบหาความต้านทานของชั้นดินด้วยเครื่องตอกหยั่งชั้นดินแบบพลวัตในแบบทดสอบทรงกระบอกกรวย ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของดินได้ จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบถึงขอบเขตอิทธิพลของการตอกและลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งจะเป็นการนำไปสู่การพัฒนาเครื่องทดสอบที่ความเหมาะสมที่การใช้งานต่อไป

ก้องรัฐ นกแก้ว และคณะ (2551) ได้นำเสนออิทธิพลปริมาณความชื้น (Water Content) ในดินต่อกำลังรับน้ำหนักฐานรากตึ้นบนชั้นดินเหนียวแข็งสกลนคร โดยทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบค่ารับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวแข็งสกลนครด้วยวิธีการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test)

ทำการทดสอบโดยยอมให้เกิดการทรุดตัวแบบไม่ระบายน้ำที่ค่าปริมาณความชื้นร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 36 จากนั้นจึงนำค่าหน่วยแรงยึดเกาะ (Cohesion,  $c_u$ ) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle,  $\phi_u$ ) ที่ได้ในแต่ละความชื้น วิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดด้วยสมการของ Hansen ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่าหน่วยแรงยึดเกาะลดลง ในขณะที่ค่ามุมเสียดทานภายในแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของฐานรากลดลงตามปริมาณความชื้นของดินที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่ค่าปริมาณความชื้น ร้อยละ 15 ร้อยละ 24 และร้อยละ 36 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของฐานรากเฉลี่ยจะมีค่าลดลงตามลำดับเท่ากับ 5.13, 3.02 และ 2.27 ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.48

ณรงค์ แก้ววิเศษ และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินในมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ระดับความลึกถึงชั้นดินแข็ง โดยใช้การทดสอบการตอกหยั่ง (Penetration Test) ด้วย Kunzelstab สำหรับเป็นฐานข้อมูลในการใช้งานทางด้านวิศวกรรม โดยทำการศึกษาตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 1.00 เมตร 2.00 เมตร และระดับความลึก 4.00 เมตร จากผิวดินเดิมโดยเก็บตัวอย่างดินในสภาพธรรมชาติโดยเก็บตัวอย่างดินในสภาพที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Samples) และทำการทดสอบการตอกหยั่งด้วย Kunzelstab ผลที่ได้ค่าความต้านทานแรงเฉือนจากการทดสอบวิธีแรงเฉือนตรง ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) อยู่ในช่วง 20-34 องศา ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน ( $c$ ) ประมาณ 0.518-1.232 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร อิทธิพลความชื้นในธรรมชาติต่อค่า  $N_{KPT}$  ในความชื้นประมาณร้อยละ 5-6 ค่าจำนวนครั้งการตอก ( $N_{KPT}$ ) อยู่ระหว่าง 30-80 ครั้งต่อ 200 มิลลิเมตร และค่าที่ได้นี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำงานทางด้านวิศวกรรมต่อไป

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินการ รวมถึงการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุทดสอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ขั้นตอนการดำเนินการ

การศึกษาครั้งนี้ มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษารวบรวมข้อมูลเนื้อหา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำราทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ รวมทั้งมาตรฐานในการทดสอบต่างๆ (ASTM)
- 2) ออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ ได้แก่ กรวยหัวหยั่งที่มีขนาดของมุมปลายกรวยที่ 60 องศา 90 องศา และ 180 องศา อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดิน รวมถึงออกแบบบ่อทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ และการทดสอบต่างๆ
- 3) จัดหาดินทรายโดยการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แล้วนำมาทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และการกระจายตัวของเม็ดดิน
- 4) สร้างอุปกรณ์ และบ่อทดสอบสำหรับใช้ในการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา
- 5) เตรียมตัวอย่างดินทรายในบ่อทดสอบ โดยควบคุมความหนาแน่นของชั้นดินให้มีความสม่ำเสมอตลอดความลึกที่ได้ออกแบบไว้
- 6) ดำเนินการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา โดยปรับเปลี่ยนกรวยหัวหยั่งที่มีขนาดของมุมปลายกรวยที่ 60 องศา 90 องศา และ 180 องศา บันทึกผลการทดสอบ และสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินรอบกรวยหัวหยั่งเนื่องจากอิทธิพลของมุมปลายกรวย พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาค่าความหนาแน่นจริงในสนาม
- 7) ทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในของดินทรายที่ความหนาแน่นต่างๆด้วยการทดสอบแบบแรงเฉือนโดยตรง โดยควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างดินตามแรงดันดินกดทับในแต่ละระดับตลอดความลึกที่ทำการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา
- 8) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแปลผลและรายงานผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา
- 9) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกและมุมเสียดทานภายในของดินทราย และอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดิน

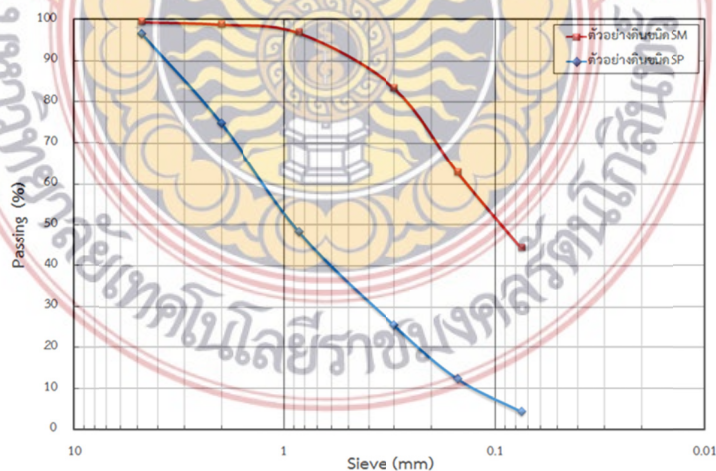
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน ผลการทดสอบกำลังแบกทานของดินในสนามแบบหยั่งเบา และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ ถูกนำมาจากแหล่งดินในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 2 ชนิด ซึ่งได้นำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ การทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน และการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวเพื่อนำไปใช้ในการจำแนกประเภทของดิน จากภาพที่ 41 เส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์มาตรฐาน มีค่าร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 44.39 สำหรับค่าขีดจำกัดความชื้นเหลว และขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ ร้อยละ 18.15 และร้อยละ 14.44 ตามลำดับและมีค่าดัชนีความเหนียว (PI) เท่ากับ 3.71 มีค่าความถ่วงจำเพาะ เป็น 2.68 ซึ่งนำไปใช้ในการจำแนกประเภทดินด้วยวิธี USCS แล้วจะได้เป็นดินทรายปนดินตะกอน (SM) ส่วนดินชนิดที่ 2 ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าร้อยละ 4.50 และมีค่า  $C_u = 10.305$  และ  $C_c = 0.855$  สำหรับค่าขีดจำกัดความชื้นเหลว และขีดจำกัดพลาสติก มีค่าเท่ากับ 0 และมีค่าความถ่วงจำเพาะ เป็น 2.66 ซึ่งนำไปใช้ในการจำแนกประเภทดินด้วยวิธี USCS แล้วจะได้เป็นดินทรายปนกรวด (SP)



ภาพที่ 41 แผนภูมิการกระจายตัวของตัวอย่างดินชนิด SP และ SM



## 2. ผลการทดสอบหาค่าลึ้มแบกทานของดินแบบหยั่งเบา

ผลการทดสอบหาค่าลึ้มแบกทานของดินในสนามแบบหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test) ซึ่งจำแนกตามองศาปลายกรวยหัวเจาะ และสภาพของระดับน้ำใต้ดินได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 7 ถึง ตารางที่ 12

ตารางที่ 7 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-d

Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SP-d-60	SP-d-90	SP-d-180
SP-d	0	0	0	0
	0.20	4	6	8
	0.40	7	13	14
	0.60	14	18	22
	0.80	18	23	28
	1.00	23	29	35
	1.20	27	31	38
	1.40	29	35	41
	1.60	33	40	46

ตารางที่ 8 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-1.5

Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SP-1.5-60	SP-1.5-90	SP-1.5-180
SP-1.5	0	0	0	0
	0.20	4	7	9
	0.40	8	13	16
	0.60	17	20	25
	0.80	24	26	28
	1.00	28	30	35
	1.20	30	38	42
	1.40	35	47	50
	1.60	45	54	59

ตารางที่ 9 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SP-1.0

Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SP-1.0-60	SP-1.0-90	SP-1.0-180
SP-1.0	0	0	0	0
	0.20	6	7	9
	0.40	12	15	16
	0.60	20	23	25
	0.80	26	28	29
	1.00	33	35	37
	1.20	36	40	45
	1.40	41	49	55
	1.60	54	65	77

ตารางที่ 10 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-d

Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SM-d-60	SM-d-90	SM-d-180
SM-d	0	0	0	0
	0.20	10	11	14
	0.40	17	18	20
	0.60	22	24	27
	0.80	25	29	33
	1.00	28	32	35
	1.20	32	35	38
	1.40	35	38	44
	1.60	40	45	52

ตารางที่ 11 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-1.5

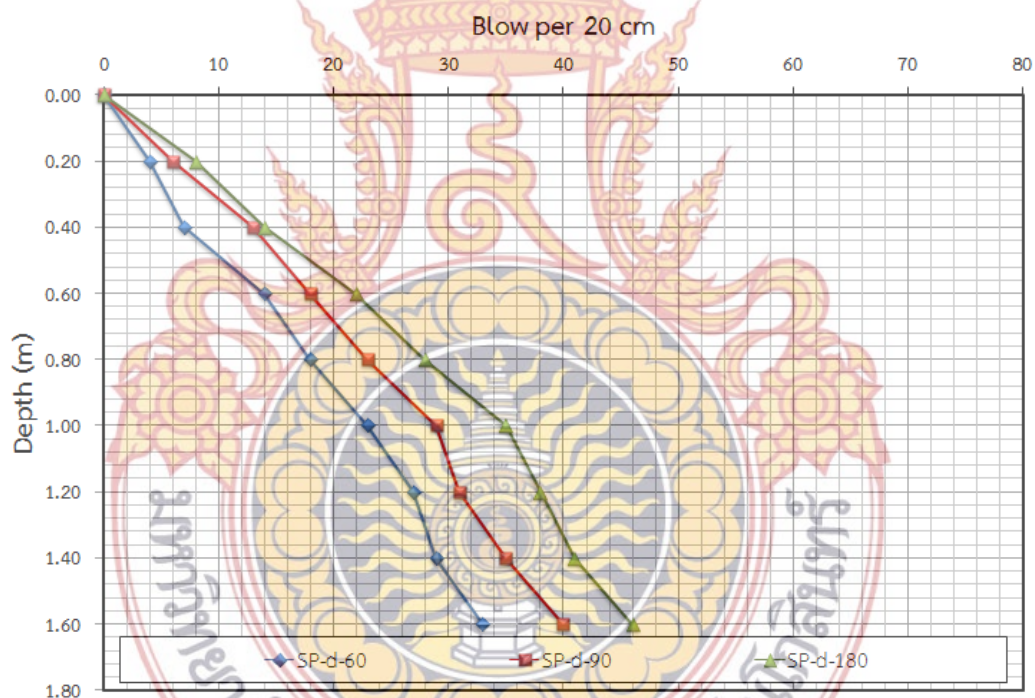
Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SM-1.5-60	SM-1.5-90	SM-1.5-180
SM-1.5	0	0	0	0
	0.20	10	11	13
	0.40	16	17	20
	0.60	21	22	24
	0.80	23	24	26
	1.00	25	26	30
	1.20	26	29	33
	1.40	24	27	30
	1.60	10	12	15

ตารางที่ 12 ค่าจำนวนครั้งการตอกหยั่งแบบเบาของตัวอย่างทดสอบชนิด SM-1.0

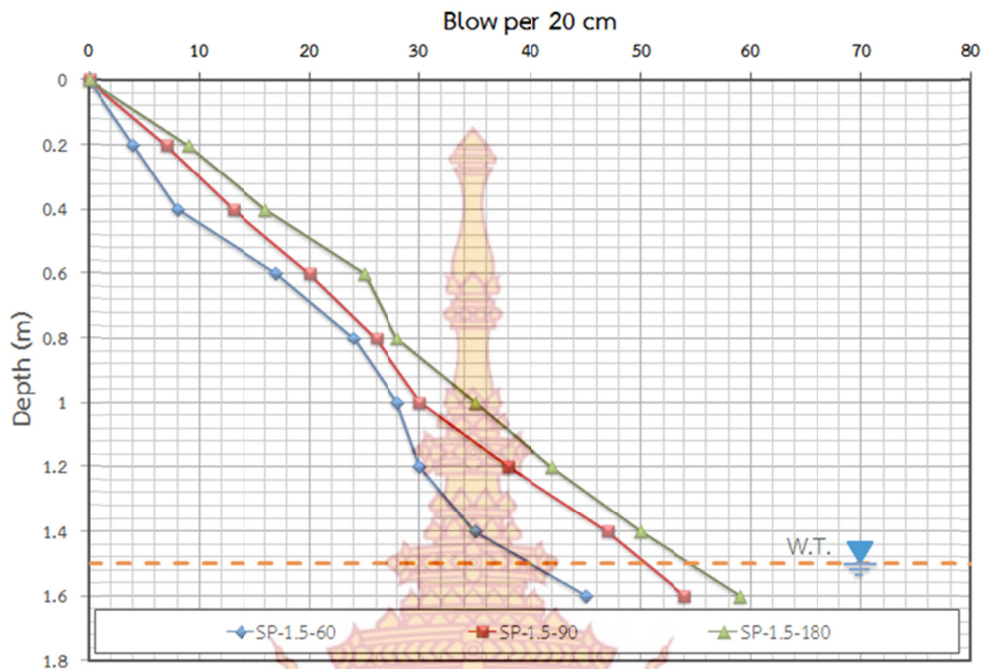
Type	Depth (m)	Blow per 20 cm		
		SM-1.0-60	SM-1.0-90	SM-1.0-180
SM-1.0	0	0	0	0
	0.20	10	11	12
	0.40	15	16	17
	0.60	17	19	21
	0.80	15	16	17
	1.00	8	9	10
	1.20	4	4	4
	1.40	4	4	4
	1.60	5	5	6

## 2.1 อิทธิพลขององศาปลายกรวยที่มีผลต่อจำนวนครั้งการตอก

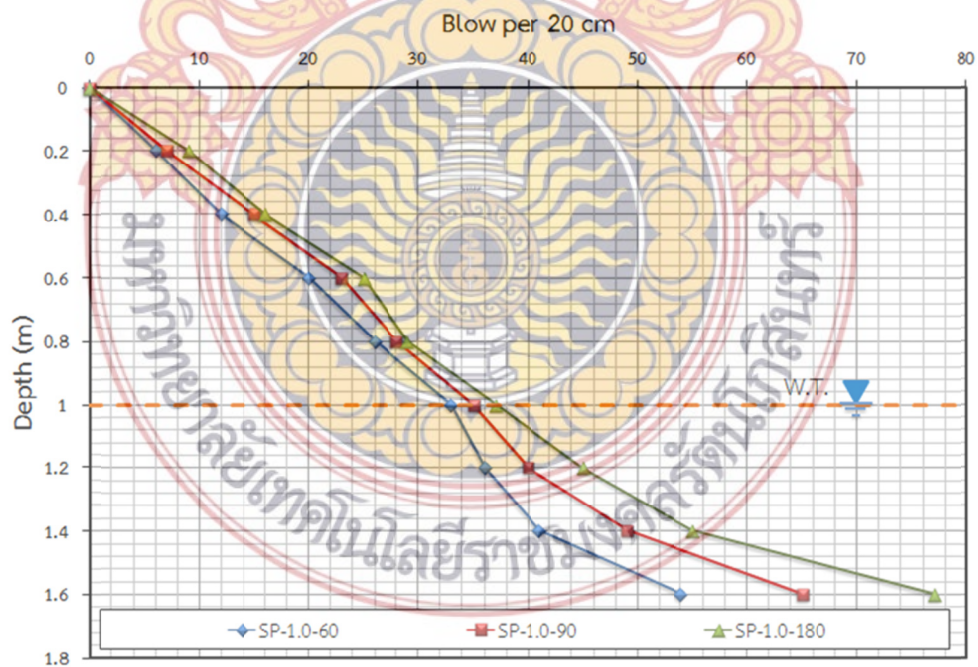
จากผลการทดสอบการตอกหยั่งดินแบบเบา เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลขององศาปลายกรวยที่มีค่าจำนวนครั้งการตอกที่แตกต่างกัน จากภาพที่ 42 ถึง ภาพที่ 47 แสดงถึงผลการทดสอบการตอกหยั่งด้วยองศาปลายกรวยขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 60, 90 และ 180 องศา เมื่อเปรียบเทียบแรงต้านของดินทรายที่กระทำต่อหัวกรวยพบว่ามุมองศาปลายกรวยที่มีค่าน้อยจะมีการทะลุทะลวงที่ดีกว่า กล่าวอีกนัยหนึ่งคือมุมองศาปลายกรวยที่น้อยจะมีแรงต้านของดินที่น้อยและส่งผลให้ได้จำนวนครั้งการตอกที่น้อยกว่ามุมองศาปลายกรวยที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกของตัวอย่างดิน SP และ SM นั้นเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วดิน SM จะมีค่าจำนวนครั้งการตอกที่มากกว่าดิน SP ในช่วงความลึกเดียวกันเนื่องจากดิน SM นั้นเป็นดินเม็ดละเอียดและมีช่องว่างภายในเม็ดดินที่น้อยกว่าดิน SP ซึ่งมีลักษณะเป็นดินเม็ดหยาบหรือกรวด



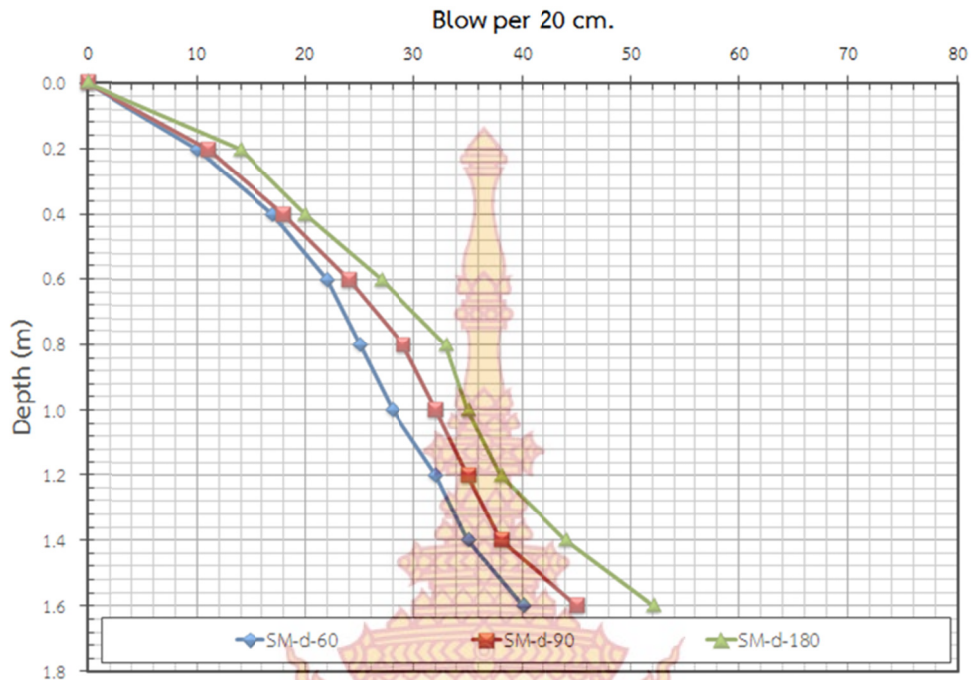
ภาพที่ 42 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินแห้งชนิด SP (SP-d)



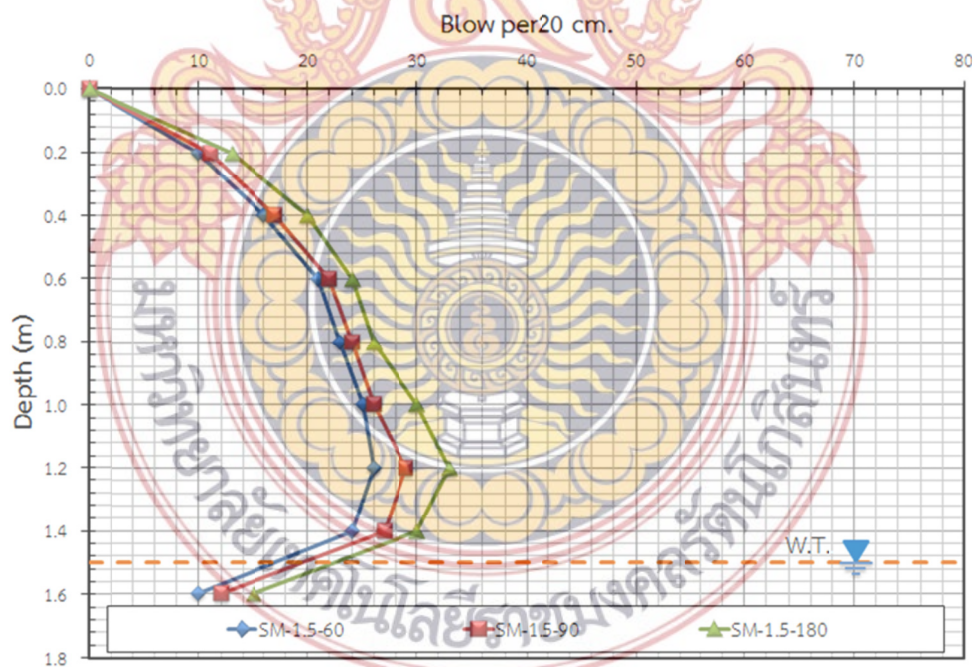
ภาพที่ 43 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.5 เมตร จากผิวดิน (SP-1.5)



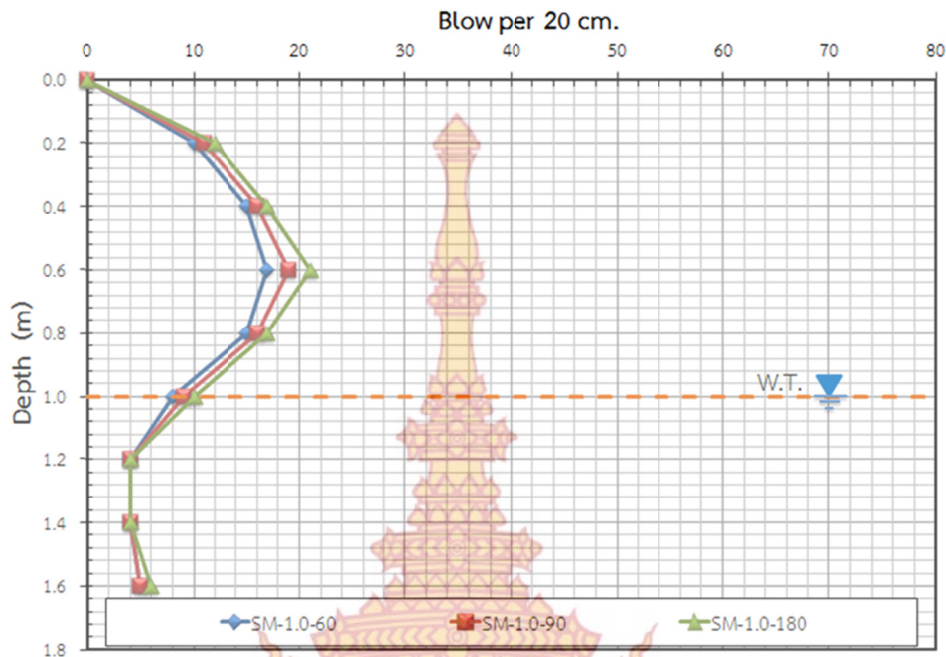
ภาพที่ 44 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.0 เมตร จากผิวดิน (SP-1.0)



ภาพที่ 45 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินแห่งชนิด SM (SM-d)



ภาพที่ 46 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.5 เมตร จากผิวดิน (SM-1.5)



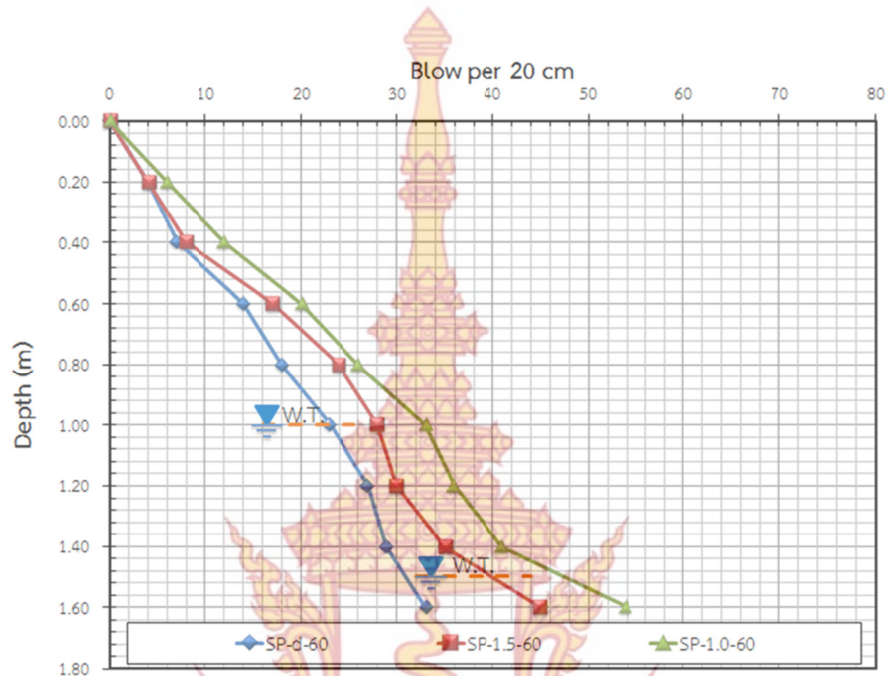
ภาพที่ 47 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีระดับน้ำใต้ดิน 1.0 เมตร จากผิวดิน (SM-1.0)

## 2.2 อิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อจำนวนครั้งการตอก

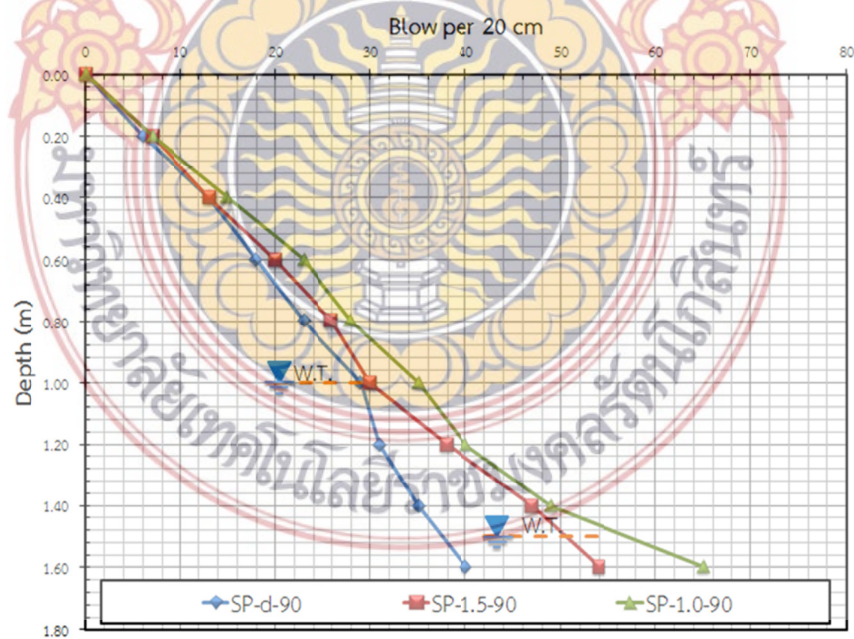
จากการเก็บตัวอย่างดินในถังทดสอบ และทำการเก็บตัวอย่างดินซึ่งอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินทำให้หน่วยน้ำหนักของดินมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่น้ำเข้าไปแทนที่ในช่องว่าง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 48 ถึง 53

จากผลการทดสอบการตอกแบบหยั่งเบาขึ้นแสดงให้เห็นว่าสภาพดินแข็งของทั้งตัวอย่างดินชนิด SP และ SM จะมีสัดส่วนของการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการตอกที่เพิ่มขึ้นตามความลึกของตัวอย่างทดสอบผลมาจากหน่วยแรงกดทับ (Overburden Stress) ของตัวอย่างดิน และในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่มีระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อตัวอย่างดินชนิด SP ส่งผลให้จำนวนครั้งการตอกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบในสภาพแห้งของตัวอย่างทดสอบชนิด SP ซึ่งจำนวนครั้งในการตอกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 35-40 เนื่องจากอิทธิพลของน้ำใต้ดินนั้นทำให้เม็ดทรายเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และทำให้สามารถรับกลับได้ดีขึ้น ส่วนในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่มีระดับน้ำใต้ดินของตัวอย่างชนิด SM นั้น มีอิทธิพลต่อจำนวนครั้งการตอกที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินแห้งของตัวอย่างทดสอบชนิด SM มีค่าจำนวนครั้งการตอกลดลงร้อยละ 70-75 เนื่องจากเป็นเม็ดดินละเอียดมีการซึมผ่านของน้ำได้ดี ทำให้น้ำระบายออกจากตัวอย่างดินได้ช้าและส่งผลให้จำนวนครั้ง

การตอกมีค่าลดลง โดยอิทธิพลความชื้นของระดับน้ำใต้ดินจากการทดสอบที่ส่งผลทำให้ค่ากำลังแบกทานของดินลดลง นั้นมีผลถึงระยะ 0.6 เมตร เหนือระดับน้ำใต้ดิน

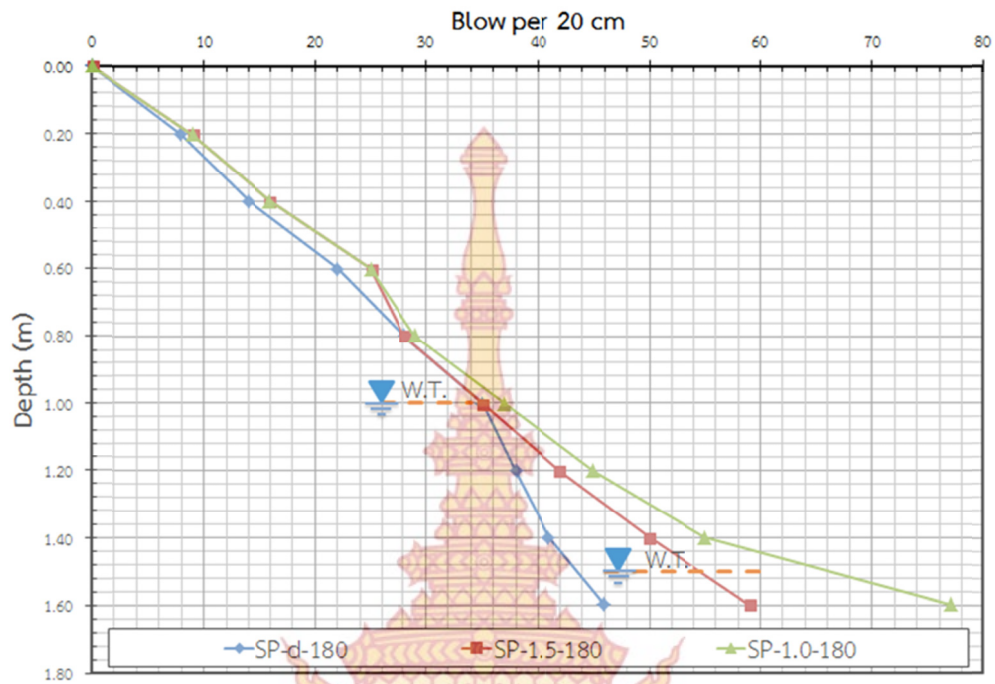


ภาพที่ 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 60 องศา

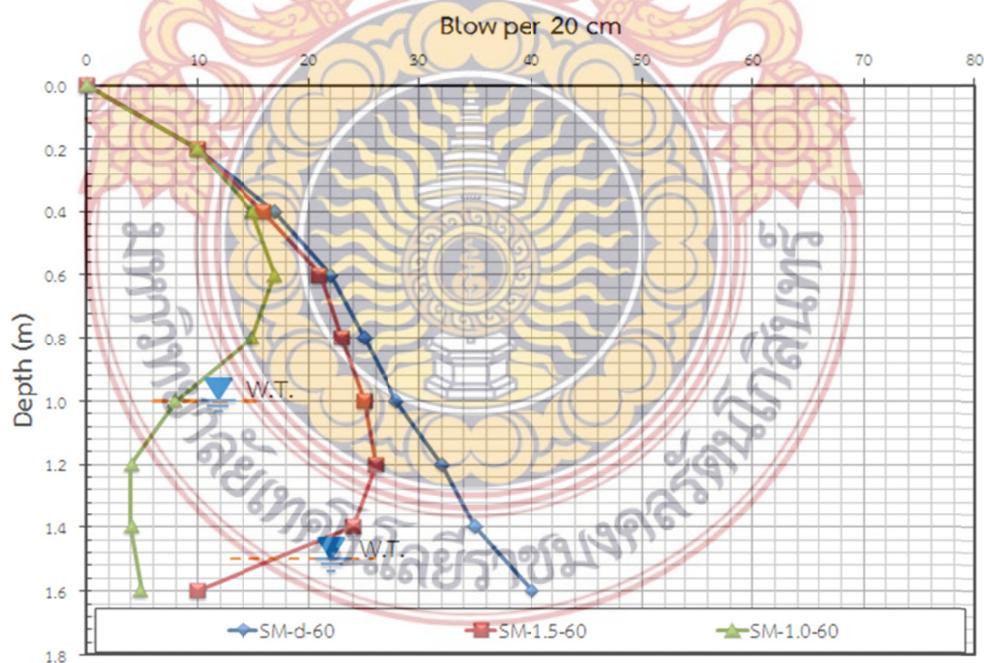


ภาพที่ 49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 90 องศา

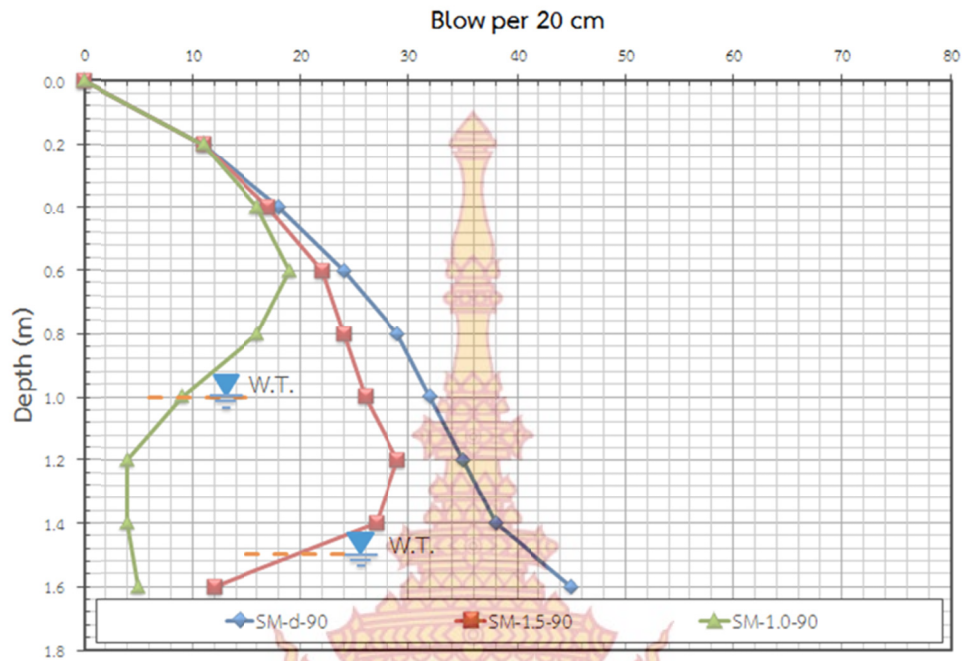




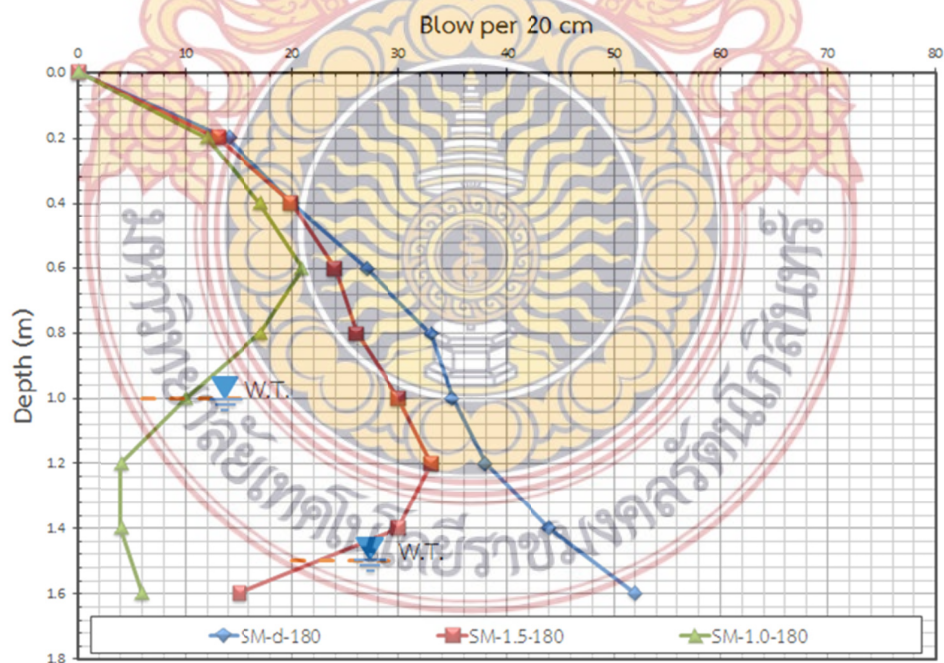
ภาพที่ 50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีมุมปลายกรวย 180 องศา



ภาพที่ 51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 60 องศา



ภาพที่ 52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 90 องศา



ภาพที่ 53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการตอกต่อความลึกของตัวอย่างดินชนิด SM ที่มีมุมปลายกรวย 180 องศา

### 2.3 ผลการเก็บตัวอย่างดินในถังทดสอบ

จากการทดสอบกำลังหากำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา โดยการทดสอบได้สมมุติความหนาแน่นของดินทั้ง 2 ชนิด คือชนิด SP และ SM ให้มีความหนาแน่นควบคุม 1.9 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความลึกเนื่องจากหน่วยแรงกดทับ (Overburden Stress) ในส่วนของสภาพที่มีระดับน้ำใต้ดินจะทำให้หน่วยน้ำหนักของดินนั้นเพิ่มขึ้นจากการที่น้ำเข้าไปอยู่ในช่องว่างภายในดิน และได้แสดงผลค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบกับความลึก ดังแสดงในตารางที่ 13 ถึง ตารางที่ 18

### 3. ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงโดยกำหนดความหนาแน่นและปริมาณความชื้นจากการเก็บตัวอย่างในถังทดสอบแล้วจึงนำมาทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อนำมาหาค่ามุมเสียดทานภายในและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างดิน

จากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนครั้งการตอกต่อ 20 เซนติเมตรและมุมเสียดทานภายในมีค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นตามความลึก เนื่องจากการทดสอบหากำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา นั้นจะทำให้การเก็บตัวอย่างดินทุกๆ 20 เซนติเมตร ตลอดช่วงความลึก โดยความหนาแน่นจากการเก็บตัวอย่างดินนั้นเพิ่มขึ้นแปรผันตามความลึก แต่ผลจากระดับน้ำใต้ดินนั้นไม่มีผลต่อมุมเสียดทานภายในของดิน SP เนื่องจากเป็นดินซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้ง่ายจึงทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในของตัวอย่างทดสอบ จึงทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 35-40 องศา โดยดิน SP ที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีลักษณะเป็น Angular Grains คือมีค่า  $Cu = 10.305$  เช่นเดียวกับดิน SM ที่มีค่า  $Cu > 1.5$  (เนื่องจากดิน SM มีค่าผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 10 จึงใช้ค่าร้อยละผ่านตะแกรงที่ร้อยละ 50 ในการหาค่า  $Cu$ ) และจำนวนครั้งการตอกมีค่าอยู่ระหว่าง 18-55 ครั้ง เป็นดินแน่นปานกลาง (Medium) มีค่ามุมเสียดทานภายใน 35-40 องศา ตามตารางที่ 2-3 และดิน SP ระดับน้ำใต้ดินไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมเสียดทาน ในส่วนของตัวอย่างดิน SM ค่ามุมเสียดทานภายในของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่ามุมเสียดทานภายในระหว่าง 7-9 องศา โดยค่ามุมเสียดทานภายในของดินนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจำนวนครั้งการตอกแล้วตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในบริเวณผิวดินนั้นดินมีการเคลื่อนตัวของเม็ดดินและมีหน่วยแรงกดทับและหน่วยแรงด้านข้างที่น้อย ดังนั้นจึงนำข้อมูลการทดสอบดินแห่งที่ความลึก 1 เมตร เป็นต้นไป มาเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการตอกต่อมุมเสียดทานภายในของดิน ดังแสดงในภาพที่ 54 ถึง ภาพที่ 55 ซึ่งกราฟดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อประมาณค่ามุมเสียดทานของดินจากค่าจำนวนครั้งการตอกของการทดสอบหยั่งดินแบบเบา ของมุมมองศาลายกรวย 60, 90 และ 180 ได้

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-d

Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )			N <sub>KPT</sub>		
				Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	SP-d-60	SP-d-90	SP-d-180
SP-d	0.2	0	1.91	0.106	36.97	4	6	8
	0.6	0	1.93	0.160	37.64	14	18	22
	1.0	0	1.95	0.136	37.90	23	29	33
	1.4	0	1.96	0.134	39.86	29	35	41

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-1.5

Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )			N <sub>KPT</sub>		
				Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	SP-1.5-60	SP-1.5-90	SP-1.5-180
SP-1.5	0.2	0	1.91	0.106	36.97	4	7	9
	0.6	0	1.93	0.159	37.72	17	20	25
	1.0	0	1.95	0.134	38.37	28	30	35
	1.4	12.47	2.09	0.179	38.99	35	47	50

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SP-1.0

Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	N <sub>KPT</sub>		
						SP-1.0-60	SP-1.0-90	SP-1.0-180
SP-1.0	0.2	0	1.91	0.106	36.87	6	7	9
	0.6	0	1.93	0.159	37.88	20	23	25
	1.0	8.36	1.97	0.085	38.40	33	35	37
	1.4	13.06	2.06	0.185	40.31	41	49	55

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-d

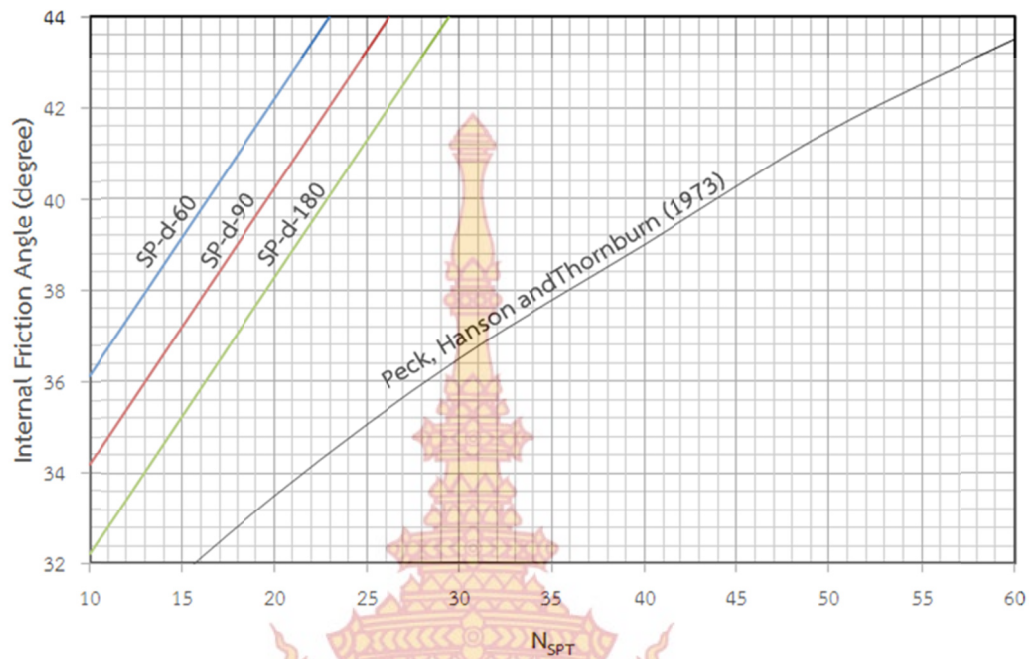
Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	N <sub>KPT</sub>		
						SM-d-60	SM-d-90	SM-d-180
SM-d	0.2	0	1.91	0.145	36.97	10	11	14
	0.6	0	1.94	0.145	37.13	22	24	27
	1.0	0	1.95	0.245	39.88	28	32	35
	1.4	0	1.96	0.209	39.73	35	38	44

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-1.5

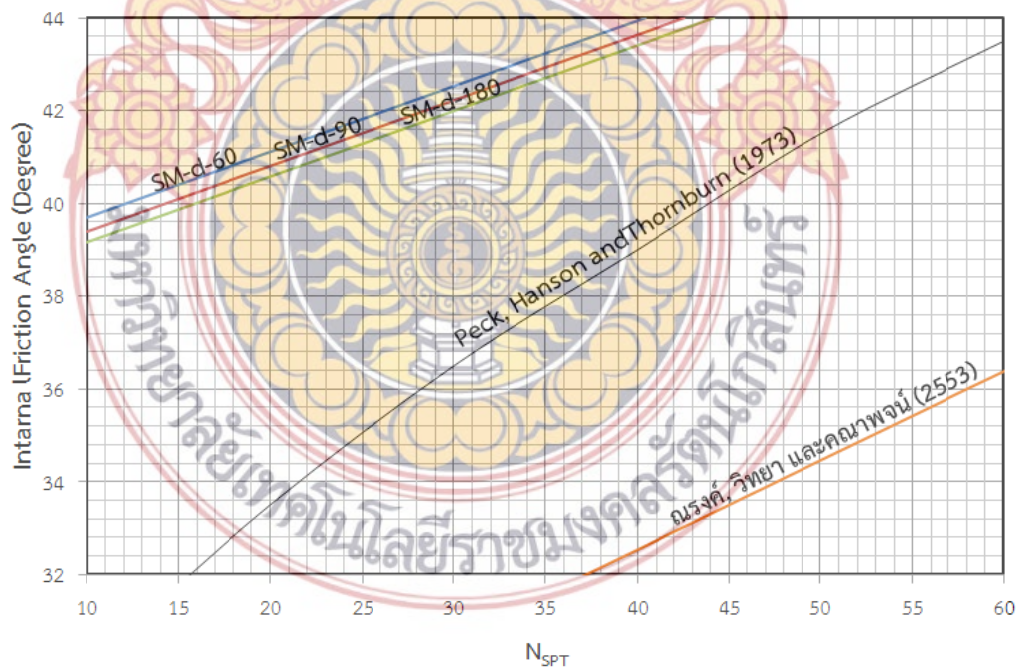
Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	N <sub>KPT</sub>		
						SM-1.5-60	SM-1.5-90	SM-1.5-180
SM-1.5	0.2	0	1.91	0.145	36.97	10	11	13
	0.6	0	1.93	0.145	37.13	21	22	24
	1.0	0	1.95	0.245	39.88	25	26	30
	1.4	14.29	2.08	0.036	7.40	24	27	30

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างดิน SM-1.0

Type	Depth	Moisture Content (%)	Density (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle	N <sub>KPT</sub>		
						SM-1.0-60	SM-1.0-90	SM-1.0-180
SM-1.0	0.2	0	1.91	0.145	36.97	10	11	12
	0.6	0	1.93	0.145	37.13	17	19	21
	1.0	8.12	1.97	0.035	7.72	8	9	10
	1.4	16.28	2.06	0.031	8.98	4	4	4



ภาพที่ 54 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่การตอกต่อมัมเสียดทานภายในของดิน SP (ช่วงความลึก 1 เมตร ขึ้นไป)



ภาพที่ 55 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่การตอกต่อมัมเสียดทานภายในของดิน SM (ช่วงความลึก 1 เมตร ขึ้นไป)

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผล

1.1 การทดสอบตอกหยั่งดินแบบเบาของดินชนิด SP และ SM เป็นชนิดดินที่ลักษณะเม็ดดินมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม (Angular Grains) และมีความหนาแน่นปานกลางมีค่ามุมเสียดทานภายใน 35-40 องศา (Murthy, 2002) สำหรับตัวอย่างดินชนิด SP ที่มีระดับน้ำใต้ดิน ค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าระหว่าง 38- 40 องศา และดินชนิด SM ที่มีระดับน้ำใต้ดินค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าระหว่าง 7-9 องศา และสามารถนำค่ามุมเสียดทานภายในจากช่วงความลึก 0.8-1.6 เมตร มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการตอกของมูมองศาปลายกรวย 60, 90 และ 180 ต่อมุมเสียดทานภายในของดินได้

1.2 จำนวนครั้งการตอกจากการทดสอบหยั่งดินแบบเบาเมื่อใช้มูมองศาปลายกรวยที่แตกต่างกันทำให้มีจำนวนครั้งการตอกที่แตกต่างกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของมูมองศาปลายกรวยจะส่งผลให้จำนวนครั้งการตอกเพิ่มขึ้น และในการแปลงค่าจำนวนครั้งการตอกของดินจากองศาปลายกรวย 60 องศา เป็น 90 องศา และ 180 องศา เป็น 90 องศา มีค่าเท่ากับ 1.188 และ 0.878 ตามลำดับ (มูมองศา 90 องศา เป็นมูมองศาตามมาตรฐานการทดสอบ) จากผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินต่อความสามารถรับน้ำหนักแบกทานของดินทรายที่มีขนาดละเอียดนั้นจะมีค่ากำลังแบกทานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาพแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 35-40 และในดินทรายปนตะกอน ค่ากำลังแบกทานของดินลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาพแห้ง โดยลดลงร้อยละ 70-75

1.3 การออกแบบฐานรากแผ่ที่วางอยู่บนชั้นดินทรายปนตะกอน ที่มีระดับน้ำใต้ดินนั้นควรพิจารณาถึงความลึกของระดับน้ำใต้ดินในบริเวณที่ก่อสร้าง และควรจะมีการทดสอบหยั่งดินแบบเบาเพื่อสามารถประมาณค่ากำลังแบกทานของดิน และสามารถนำค่าจำนวนครั้งการตอกแปรผลเป็นค่ามุมเสียดทานภายใน ซึ่งสามารถใช้ในระดับความลึก 1 เมตร เป็นต้นไป เนื่องจากมีค่าจำนวนครั้งการตอกที่มีค่ามากกว่าช่วงความลึก 0-0.8 เมตร โดยมีค่าที่สอดคล้องกับข้อเสนอของ Peck et al. (1973) เพื่อใช้ในการประมาณค่ากำลังรับแรงแบกทานของดิน ในกรณีที่มีระดับน้ำใต้ดินใกล้กับบริเวณฐานรากโดยระดับน้ำใต้ดินนั้นอาจส่งผลให้กำลังแบกทานของดินลดลง และอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อกำลังแบกทานของดินทรายปนตะกอนมีระยะ 0.6 เมตร เหนือระดับน้ำใต้ดิน



## 2. ข้อเสนอแนะ

2.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งอาจแตกต่างจากที่ใช้งานจริง ดังนั้น แนวทางในการทำวิจัยเกี่ยวกับ การทดสอบหากล้างแบกทานของดินในสนามแบบหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test) ต่อไป เพื่อพัฒนาเครื่องมือให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาหรือปรับแต่งเพิ่มเติมในหัวข้อเสนอแนะต่อไปนี้

2.2 การทดสอบในการจำลองสภาพของตัวอย่างของดินโดยการทดสอบหากล้างแบกทานของดินในสนามแบบหยั่งเบา โดยมีการทดสอบมุมมองศาลายกรวยถึง 3 แบบโดยมีความหนาแน่นที่เท่ากัน และทดสอบในความหนาแน่นที่แตกต่างกันเพื่อจะสามารถเห็นความแตกต่างเนื่องจากความหนาแน่นของดินได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำได้มีความถูกต้องมากขึ้น

2.3 การทดสอบในการจำลองสภาพของตัวอย่างของดินที่มีระดับน้ำใต้ดินนั้นที่ระดับต่างๆ ของตัวอย่างดินชนิด SM และ SP ควรมีการตรวจสอบในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ที่อาจมีผลกับตัวอย่างดินที่จะเสียหายของชั้นดิน และความหนาแน่นที่ได้กำหนดไว้ที่ความหนาแน่น 1.9 ตัน/ตารางเมตร ก่อนทำการทดสอบแบบหยั่งเบา ที่ได้ค่าที่ต่างจากความเป็นจริงได้

2.4 การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวก้านเจาะ เนื่องจากในสถานะใช้งานจริง การทดสอบดินในระดับลึกต้องมีการต่อก้านเจาะ ดินสามารถถล่มลงไปในรูตอกและเกิดแรงเสียดทานขึ้นบนผิวก้านเจาะได้ ซึ่งจะส่งผลต่อผลของดาร์ทดสอบเป็นอย่างมาก

2.5 การทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาในถังทดสอบ ควรที่จะมีความลึกในการทดสอบที่มากขึ้นเพื่อจะสามารถนำมาพิจารณาค่าต่างๆ และจะได้ค่าที่ใกล้เคียงสามารถแปลผลได้ง่ายและความแม่นยำของค่าสูง



## บรรณานุกรม

- ก้องรัฐ นกแก้ว และ ศุภกิจ นนทนานันท์. **อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินต่อกำลังรับน้ำหนักฐานรากตึ้นบนดินเหนียวแข็งสกลนคร.** ชลบุรี : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, 2551.
- ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. **ปฐพีกลศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2554.
- ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. **คู่มือปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, 2555.
- ณรงค์ แก้ววิเศษ, วิทยา วิภาทิน และ คณาพจน์ สุตรขวัญ. **“การหาคุณสมบัติของดินโดยใช้ผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบา.”** ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2553.
- พินิจ ธรรมธสิริ. **“แนวทางการสำรวจดินในประเทศไทย.”** การอบรม การประยุกต์ใช้ผลการสำรวจดินเพื่อการออกแบบ. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2544.
- พิสาน หุ่นทรัพย์. **“การพัฒนาเครื่องทดสอบน้ำหนักเบาเจาะหยั่งแบบพลศาสตร์ สำหรับวัดความต้านทานของชั้นดินเหนียวอ่อน.”** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต, 2549.
- วรากร ไม้เรียง. **“วิศวกรรมเขื่อนดิน.”** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ไลบราลี นาย, 2541.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. **แนวทางการตรวจสอบชั้นดินเพื่อองานฐานราก.** กรุงเทพมหานคร : บริษัท จุดทอง จำกัด, 2545.
- ศิริณี วงศ์กระจ่าง และปัญญา รัตน์ทิ. **“การจัดการดินทรายจัด เพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร.”** วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ฉบับพิเศษ (2556) : 184-194.
- สถาพร คูวิจิตรจากรุ. **การเจาะสำรวจดินทางวิศวกรรม : การเจาะสำรวจ เก็บตัวอย่าง และการทดสอบในสนาม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- อัฐพล ศักดิ์มณี และ ก่อโชค จันทรวงศ์. **การสำรวจชั้นดินด้วยเครื่องตอกหยั่งชั้นดินขนาดเบา.** กรุงเทพมหานคร : การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- อัฐพล ศักดิ์มีถิ. “การพัฒนาเครื่องหยั่งชั้นดินขนาดเบาในการสำรวจชั้นดินเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- อัฐพล ศักดิ์มีถิ และ ก่อโชค จันทรวงกูร. การต้านทานของการตอกหยั่งชั้นดินแบบพลวัตในชั้นดินทราย. ภูเก็ต : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2549.
- Bowles, Joseph E. **Foundation Analysis and Design**. New York : McGraw-Hill, 1996.
- Budhu, M. **Soil Mechanics and Foundations**. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey : John Wiley & Sons, 2011.
- Das, B.M. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. 3<sup>rd</sup> ed. Ontario : Thomson Learning, 2008.
- Murthy, V.N.S. **Geotechnical Engineering**. New York : Marcel Dekker, 2002.
- Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thronburn, T.H. **Foundation Engineering**. New York : Wiley and Son, 1974.
- Salgado. R. and S. Yoon. **Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment**. Publication FHWA/IN/JTRP-2002/30. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2003.



ประวัตผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ศิริรัตน์
2. ตำแหน่งปัจจุบัน รองคณบดีประจำพื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล  
ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110  
โทรศัพท์ 032-618500 ต่อ 4042  
E-mail : chusak.k@rmutr.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
  - ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
  - ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
  - ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (เกียรตินิยม อันดับ2) สาขาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
เทคโนโลยีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศธุรกิจ  
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
5. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ
  - การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Microsoft Visual Basic)
  - การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา
  - ธรณีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (Geo-environment Engineering)
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

  - 1) การพัฒนาโปรแกรมคำนวณวงรอบและเส้นชั้นความสูงด้วยภาษาวิซวลเบสิก  
แหล่งทุน : งบวัสดุฝึกแผนกวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2544
  - 2) โครงการวิจัยศึกษาการนำฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับการสอบทางคอมพิวเตอร์  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545

- 3) โครงการศึกษาผลกระทบของอุทกภัย ระยะเวลา และสารอินทรีย์ ต่อการอบดินเพื่อใช้หาค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545
  - 4) เครื่องมือทดสอบกำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549
  - 5) การพัฒนาสื่อผสมร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
  - 6) การสร้างสื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ตร่วมกับโปรแกรมทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
  - 7) การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบวัสดุก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา  
ประยุกต์ร่วมกับการใช้สื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ต  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
  - 8) การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินผสมซีเมนต์และเบนโทไนท์เพื่อการป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดิน  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
  - 9) การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้าแก๊สผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดล้อม  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ปี 2556
- ผู้ร่วมโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน
- 1) โครงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2547
  - 2) โครงการศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าการใช้ PVD และ Cement Column ในการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม  
แหล่งทุน : สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ประจำปี 2549
  - 3) การพัฒนาขึ้นรูปวัสดุแผ่นวัสดุผสมจากเส้นใยมะพร้าว-พลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่องานวัสดุก่อสร้างและหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์  
แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2549
  - 4) การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยโปรแกรมภาษาวิซวลเบสิก 6.0  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
  - 5) การพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากเส้นใยมะพร้าวผสมยางธรรมชาติ  
แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2551

- 6) การออกแบบจุดต่อโครงสร้างเหล็กโดยวิซวลเบสิก 6 V.2.1  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
- 7) การสร้างแบบจำลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในดินผ่านกำแพงดินซีเมนต์  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2552
- 8) การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการสร้างบ่อทดสอบในสนาม  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2553
- 9) การพัฒนาแนวคิดการนำเข้าข้อมูลแบบกราฟฟิกเพื่อพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กร่วมกับโครงสร้างเหล็ก  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ปี 2556

