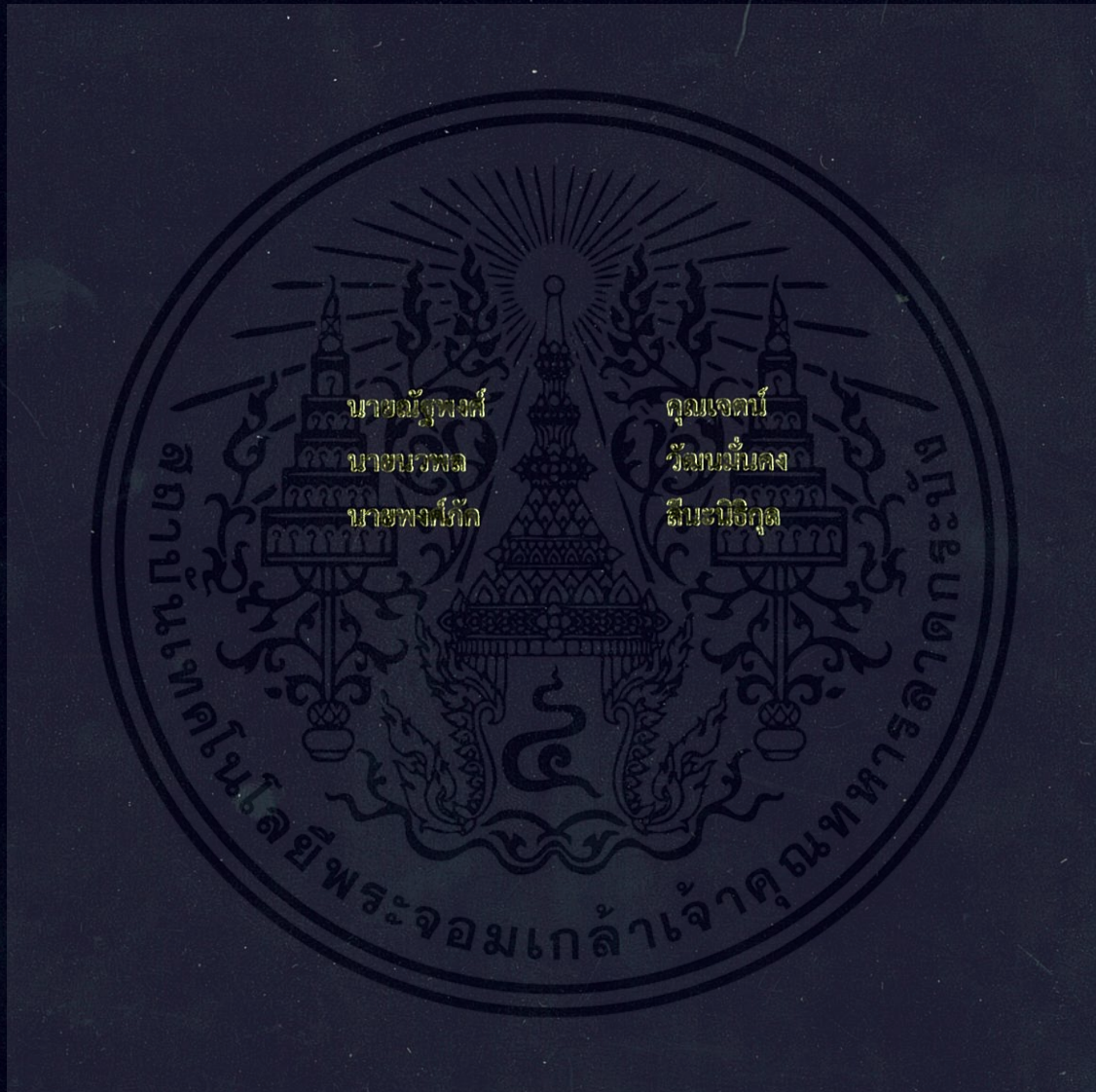


การศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อปรับปรุงคุณภาพดิน
ด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก

THE STUDY OF SETTLEMENT BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY BY
SOIL IMPROVEMENT HVDM TECHNIQUE IN MODEL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อปรับปรุงคุณภาพดิน
ด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก

THE STUDY OF SETTLEMENT BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY BY
SOIL IMPROVEMENT HVDM TECHNIQUE IN MODEL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF SETTLEMENT BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY BY
SOIL IMPROVEMENT HVDM TECHNIQUE IN MODEL



Mr. NATTHAPON KUNCHED
Mr. NAVAPON WATTANAMUNKONG
Mr. PONGPUK LEENANITHIKUL

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING , FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก
The Study of Settlement Behavior of Soft Bangkok Clay by Soil Improvement HVDM Technique in Model

คณะผู้จัดทำโครงการ นายณัฐพงศ์ คุณเจตน์ รหัส 53010471
นายนवल วัฒนมั่นคง รหัส 53010824
นายพงศ์ศักดิ์ สิ้นะนิธิกุล รหัส 53011034

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. สุพจน์ ศรีนิล
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ. สุพจน์	ศรีนิล	
ผศ.ดร. ธนาถ	คงสมบูรณ์	
ผศ. สมเกียรติ	ขวัญพลักษณ์	
อ. ปรีชานันท์	ศิริแก้ว	
อ. อุปะ	ศิริแก้ว	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 25 มีนาคม 2557 เวลา 18.00 น. ห้อง CV - 201
สถานที่สอบ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(.....)

(ผศ. สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 31 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพฤติกรรมกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก			
คณะผู้จัดทำโครงการ	นายณัฐพงศ์	คุณเจตน์	รหัส	53010471
	นายนवल	วัฒน์มันคง	รหัส	53010824
	นายพงศ์ภาค	สินะนิธิกุล	รหัส	53011034
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. สุพจน์	ศรีนิล		
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา			
ปีการศึกษา	2556			

บทคัดย่อ

ในอดีตจนถึงปัจจุบันปัญหาการหดตัวของดินถือเป็นปัญหาสำคัญของงานก่อสร้าง ส่งผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายอย่างมาก วิศวกรจึงพยายามหาแนวทางในการลดผลกระทบจากการหดตัวของดินรวมทั้งเพิ่มกำลังของดินเพื่อให้สามารถรับแรงแบกทานของโครงสร้างได้เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเร่งเค้นน้ำออกจากมวลดิน โดยการดูดน้ำออกจากมวลดินด้วยระบบสุญญากาศกำลังสูงร่วมกับการทุบอัดดิน (High Vacuum Densification Method , HVDM) วิธีการนี้ได้คิดค้นและพัฒนามาจากประเทศจีน ซึ่งมีผลเป็นที่ยอมรับว่าสามารถเพิ่มกำลังของดินและสามารถเร่งการหดตัวของดินในระยะเวลาอันรวดเร็วได้

โครงการวิจัยพิเศษนี้จะศึกษาพฤติกรรมกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อน เมื่อถูกปรับปรุงด้วยวิธี HVDM ได้ศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.5 เซนติเมตรและสูง 29 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง เป็นแบบจำลองพลาสติกกระบอกปิด โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ความลึก 2 - 4 เมตร ซึ่งมีค่าปริมาณความชื้นในมวลดินประมาณ 130 - 150 % ซึ่งทำการระบายน้ำจากตัวอย่างดินโดยใช้ปั๊มสุญญากาศในการเค้นดูดน้ำในแนวตั้ง ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ 1 , 2 และ 3 ค่าการหดตัว (เนื่องมาจากน้ำหนักของตัวดิน) จะเริ่มช้าลงเรื่อยๆ เมื่อค่าปริมาณความชื้นเข้าใกล้ค่า Liquid limit และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่ามากที่สุดที่ช่วงระดับบนและลดลงตามระดับชั้นความลึกของดิน ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่มีค่าแปรผกผันกัน

Title	THE STUDY OF SETTLEMENT BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY BY SOIL IMPROVEMENT HVDM TECHNIQUE IN MODEL		
Name	Mr. NATTHAPONG KUNCHED	53010471	
	Mr. NAVAPON WATTANAMUNKONG	53010824	
	Mr. PONGPUK LEENANITHIKUL	53011034	
Advisor	Asst. SUPOT SRINIL		
Degree	Bachelor of Engineering		
Department	Civil Engineering		
Year	2013		

ABSTRACT

Nowadays the settlement is main problem of construction work. It is effect to damage structure. So the engineers try to find the alternative for reduce ground settlement and increase strength of the soil to be able to take more loading on structure. At the time, have a technique that developed for adjust the quality of soil by HVDM. HVDM technique was invented and developed from China. It is can increase strength of soil and rush the settlement within short time

The objective of this study to study about settlement behavior of soft Bangkok clay by soil improvement HVDM technique in model. The method of this study used a small modeling which diameter was equal to 25.5 cm and height was equal to 29 cm. There were 3 models that were plastic and closed system models. This study use soft Bangkok clay that had a depth 2-4 m. and amount of soil moisture tension around 130-150%. (The drainage of models used vacuum in vertically)

The result showed that models 1, 2 and 3 present the settlement (Because of the weight of the soil) was decelerated. And we found that if amount of moistness got near to liquid limit, the value of clay's shear strength was increase at the upper section and decrease in depth of the soil. Which related to amount of soil moisture tension that inverse variation.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุพจน์ ศรีนิล ที่ให้คำปรึกษา คอยชี้แนะ ช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดทั้งให้ความรู้และประสบการณ์แก่คณะของข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูง

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่มีพระคุณ ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์, ผศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์ , อ. ปรีชานันท์ ศรีแก้ว , อ. อุบะ ศิริแก้ว และบรรดาคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ด้านต่างๆทั้งในด้านวิชาการและประสบการณ์ในการทำงานและความรู้ทั่วไปแก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาทุกท่านเพื่อนำไปใช้ในการทำงานต่างๆ หากเอกสารเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับไว้สำหรับคำติชมและพร้อมรับฟังจากผู้อ่านทุกท่าน

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ที่ได้มอบความรักและคอยเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอดสำหรับคณะข้าพเจ้าจนทำให้เอกสารนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นายณัฐพงศ์ คุณเจตน์
นายนवल วัฒนมั่นคง
นายพงศ์ภัก ลินะนิธิกุล
คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 ความหมายของดิน	4
2.2 ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร (Bangkok clay)	6
2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM	7
2.4 อิทธิพลความลึกและพลังงานเนื่องจากการทุบอัดดิน	12
2.5 พลังงานจากระบบสุญญากาศ	13
2.6 การทรุดตัวของดิน (Settlement)	14
2.7 การทดสอบแรงเฉือน ด้วย Pocket Vane Shear (Torvane)	15
2.8 ปริมาณน้ำในดิน (Water Content)	17
2.9 ขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit)	18
2.10 เครื่องมือสำหรับใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมของดิน	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	24
3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	25
3.3 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัสดุ - อุปกรณ์	27
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	32

สารบัญ (ต่อ)

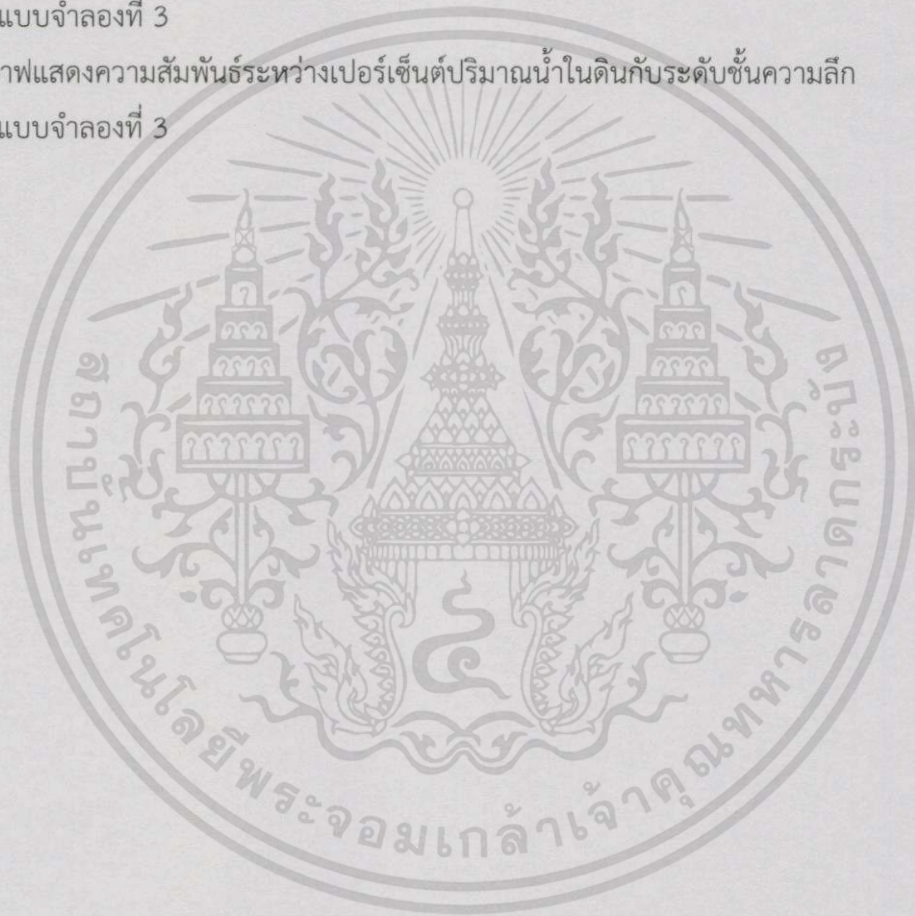
	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	
4.1 ความสัมพันธ์ของการทรุดตัวของดินกับปริมาณความชื้นในดินและเวลา	33
4.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนและปริมาณความชื้นในดินตามแต่ละระดับชั้น (Model 3)	37
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	42
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แสดงผลการทดสอบ	43
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดสอบ	46
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง Pocket Vane Shear	49

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของดิน	5
2.2 รูปตัดแสดงลักษณะชั้นดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , 2520)	6
2.3 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่โครงการก่อสร้างท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ	7
2.4 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิค HVDM (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)	8
2.5 แถวของท่อสุญญากาศและท่อระบายน้ำในแนวราบ (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)	8
2.6 แนวโน้มของความดันน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงไป ในการปรับปรุงคุณภาพดินของ โครงการก่อสร้างท่าเรือนิ่งโบ ด้วยเทคนิค HVDM (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)	10
2.7 ประสิทธิภาพในการกระจายความเครียดเนื่องจากมีชั้นดินแข็งอยู่ด้านบนชั้นดินเหนียว	11
2.8 กราฟแสดงช่วงการทรุดตัวของแต่ละประเภท	14
2.9 Torvane (ก) , การทดสอบ (ข)	15
2.10 Pocket Vane Shear	17
2.11 สถานภาพของมวลดิน	19
3.1 แบบจำลองขนาดเล็กการทดสอบ HVDM	25
3.2 ก้านลูกโป่ง	27
3.3 สายยาง	27
3.4 Geotextile	28
3.5 ปี่มสุญญากาศ	28
3.6 ถังอัดความดัน	29
3.7 ตุ่มน้ำหนัก	29
3.8 แบบจำลองที่ติดตั้งพีโซมิเตอร์(1)	30
3.9 แบบจำลองที่ติดตั้งพีโซมิเตอร์(2)	30
3.10 เครื่องปั้นดิน	31
3.11 ทราโยอิมตัว	31
4.1 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรดินส่วนปริมาตรดินเดิม (V/Vo) กับปริมาณความชื้น (W%)	33
4.2 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น W% กับระยะเวลา	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวสะสมกับระยะเวลา ตารางเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณ	34
4.4 Model 3	36
4.5 แบ่งช่วงระดับชั้นของดิน แบบจำลองที่ 3	37
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับระดับชั้นความลึก ในแบบจำลองที่ 3	38
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในดินกับระดับชั้นความลึก ในแบบจำลองที่ 3	38



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลจำเพาะของใบพัดแต่ละขนาด	16
3.1 คุณสมบัติของปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง	28
4.1 ตารางสรุปผลการทดลอง	35
4.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและปริมาณความชื้นในดินแต่ละระดับชั้นดินของแบบจำลองที่ 3	36
4.3 ตารางแรงเฉือนและเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในดินตามแต่ละระดับชั้น	39



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

พื้นที่ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นที่ราบลุ่มครอบคลุมพื้นที่แม่น้ำขนาดใหญ่หลายสาย ทำให้เกิดการตกตะกอนของดินทับถมบริเวณปากแม่น้ำ ทำให้ดินมีลักษณะกายภาพเป็นดินเหนียวอ่อนมีเม็ดดินขนาดเล็ก มีปริมาณน้ำมาก เมื่อได้รับน้ำหนักทำให้เกิดการทรุดตัวสูง ส่งผลก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนดินนี้มีความเสียหายเป็นมูลค่ามหาศาล จึงได้มีการหาแนวทางลดผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน วิธีการที่นิยมใช้ คือ การปรับปรุงคุณภาพดินก่อนเริ่มการก่อสร้างโดยการเร่งการทรุดตัวของดินก่อน มีจุดประสงค์เพื่อลดการทรุดตัวของดินภายหลังการก่อสร้างเสร็จสิ้นไปแล้ว และเพิ่มความแข็งแรงของดินเพื่อให้สามารถรับแรงแบกทานของโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น ทำให้ลดโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างที่วางตัวอยู่บนดินได้ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเร่งการทรุดตัวก่อนก่อสร้าง นั้นมีหลายวิธีและได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เช่น

1. วิธี Preload การใช้น้ำหนักกดทับลงบนชั้นดินล่องหน้า
2. วิธี Preload + Prefabricated vertical drain (PVD) การใช้น้ำหนักกดทับลงบนชั้นดินล่องหน้าร่วมกับแผ่นระบายน้ำในแนวดิ่ง
3. วิธี Preload + Vacuum Consolidation + Prefabricated vertical drain (PVD) การใช้น้ำหนักกดทับลง บนชั้นดินล่องหน้าร่วมกับการดูดน้ำออกจากมวลดินโดยใช้ปั๊มสุญญากาศและแผ่นระบายน้ำในแนวดิ่ง
4. วิธี Dynamic Compaction การใช้ตุ้มน้ำหนักทิ้งลงกระทบบนผิวดิน

วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น ก็มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดตามปัจจัยต่างๆ ที่แตกต่างกันไป ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเร่งเอาน้ำออกจากมวลดิน คือ การดูดน้ำออกจากมวลดินด้วยปั๊มสุญญากาศกำลังสูงร่วมกับการทุบอัดดิน (High Vacuum Densification Method , HVDM) ซึ่งเป็นนวัตกรรมการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนที่ประเทศจีนและประเทศในภูมิภาคเอเชียนำไปใช้ในหลายโครงการ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและยังใช้เวลาน้อยในการปรับปรุงคุณภาพดินบนพื้นที่ขนาดใหญ่อีกด้วย

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยวิธี High Vacuum Densification Method (HVDM) เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินแบบใหม่ที่ประเทศจีนเริ่มใช้เมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคนี้ได้นำมาใช้อย่างแพร่หลายในโครงการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ในประเทศจีน เทคนิคนี้มีหลักการโดยอาศัยระบบสุญญากาศกำลังสูงร่วมกับเทคนิคการทุบอัดดิน ในการเร่งการระบายน้ำออกจากมวลดินแล้วจึงใช้ระบบสุญญากาศกำลังสูงดูดน้ำออกจากมวลดินภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว เพื่อตอบสนองการพัฒนาการก่อสร้างที่เน้นความปลอดภัย ประหยัดต้นทุนและเวลาเป็นสำคัญ ซึ่งเทคนิคนี้ยังไม่เป็นที่รู้จักมากนักในประเทศไทย ฉะนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินในประเทศไทย

พื้นที่ดินกรุงเทพมหานครมีคุณสมบัติทางกายภาพเป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งเหมาะกับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี HVDM งานวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาและออกแบบลักษณะการทำงานของเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก เพื่อศึกษาพฤติกรรมและแนวโน้มการทรุดตัวของดินหลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM ซึ่งผลจากงานวิจัยในครั้งนี้อาจจะเป็นแนวทางสำหรับพิจารณาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเทคนิค HVDM ต่อไปในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ด้วยเทคนิค HVDM
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรม แนวโน้ม การทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ถูกรบกวนเมื่อปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี High Vacuum Densification Method (HVDM) ในแบบจำลองขนาดเล็ก โดยใช้ดินที่ทดสอบเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. คิดค้นหัวข้อ วัตถุประสงค์งานวิจัยที่จะทำการศึกษา ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา
2. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี หลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและเลือกพื้นที่การทดลอง
3. วางแผน ออกแบบการปฏิบัติงานในสนาม
4. เตรียมวัสดุ-อุปกรณ์ และติดตั้งวัสดุ-อุปกรณ์ในสนาม
5. เริ่มทำการศึกษา ทดลอง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลก่อน ระหว่าง และหลังการทดลอง
6. รวบรวมผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรูปเล่มงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพิจารณา ประยุกต์และนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM มาใช้ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้
2. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรม แนวโน้ม การทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ถูกรบกวนซึ่งเกิดจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM ในแบบจำลองขนาดเล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ความหมายของดิน

ดิน หมายถึง วัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสลายตัวทางกายภาพ และทางเคมีของหิน และแร่ รวมกับสารอินทรีย์ ที่เกิดจากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์เป็นผิวชั้นบนที่หุ้มห่อโลก ซึ่งดินจะมีลักษณะและคุณสมบัติต่างกันไปในที่ต่างๆ ตามสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ วัตถุต้นกำเนิดสิ่งมีชีวิตและระยะเวลาการสร้างตัวของดิน

2.1.1 ประเภทของดิน

ดินเหนียว เป็นดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่น สามารถปั้นเป็นก้อนหรือค้ำเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แต่สามารถอุ้มน้ำ ดูดซับ และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดี เหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าวเพราะเก็บน้ำได้นาน

ดินร่วน เป็นดินที่เนื้อดินค่อนข้างละเอียดนุ่มมือในสภาพดินแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพดินชื้นจะยืดหยุ่นได้บ้าง เมื่อสัมผัสหรือค้ำดินจะรู้สึกนุ่มมือแต่อาจจะรู้สึกสากมืออยู่บ้างเล็กน้อย เมื่อกำดินให้แน่นในฝ่ามือแล้วคลายมือออก ดินจะจับกันเป็นก้อนไม่แตกออกจากกัน เป็นดินที่มีการระบายน้ำได้ดีปานกลาง จัดเป็นเนื้อดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก

ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 เนื้อดินมีการเกาะตัวกันหลวมๆ มองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที

2.1.2 ส่วนประกอบของดิน

ดินประกอบด้วยเนื้อดินหรือเม็ดดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งในช่องว่างอาจจะเต็มไปด้วยน้ำหรืออากาศ ใดๆอย่างหนึ่ง หรือมีทั้งน้ำและอากาศปนกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ดินประกอบด้วย

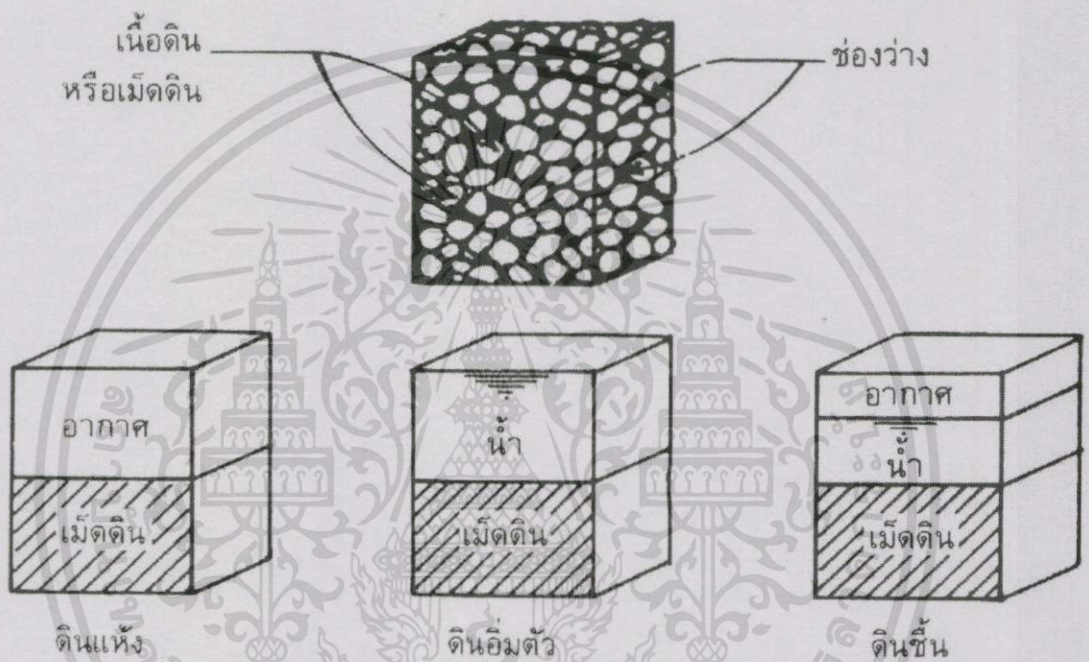
1. ของแข็ง คือ เนื้อดินหรือเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นแร่ธาตุต่างๆ
2. ของเหลว ซึ่งจะอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นน้ำ
3. ก๊าซ ซึ่งจะอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นอากาศ

ถ้าช่องว่างเต็มไปด้วยอากาศ เรียกว่า ดินแห้ง (Dry soil)

ถ้าช่องว่างเต็มไปด้วยน้ำ เรียกว่า ดินอิ่มตัว (Saturated soil)

ถ้าช่องว่างมีทั้งน้ำและอากาศ เรียกว่า ดินชื้นหรือดินเปียก (Partially saturated soil หรือ Moist soil หรือ Wet soil)

ส่วนต่างๆ ที่ประกอบเป็นดินนี้ สามารถเขียนเป็นรูปผังได้ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของดิน

2.1.3 ดินทางด้านวิศวกรรม

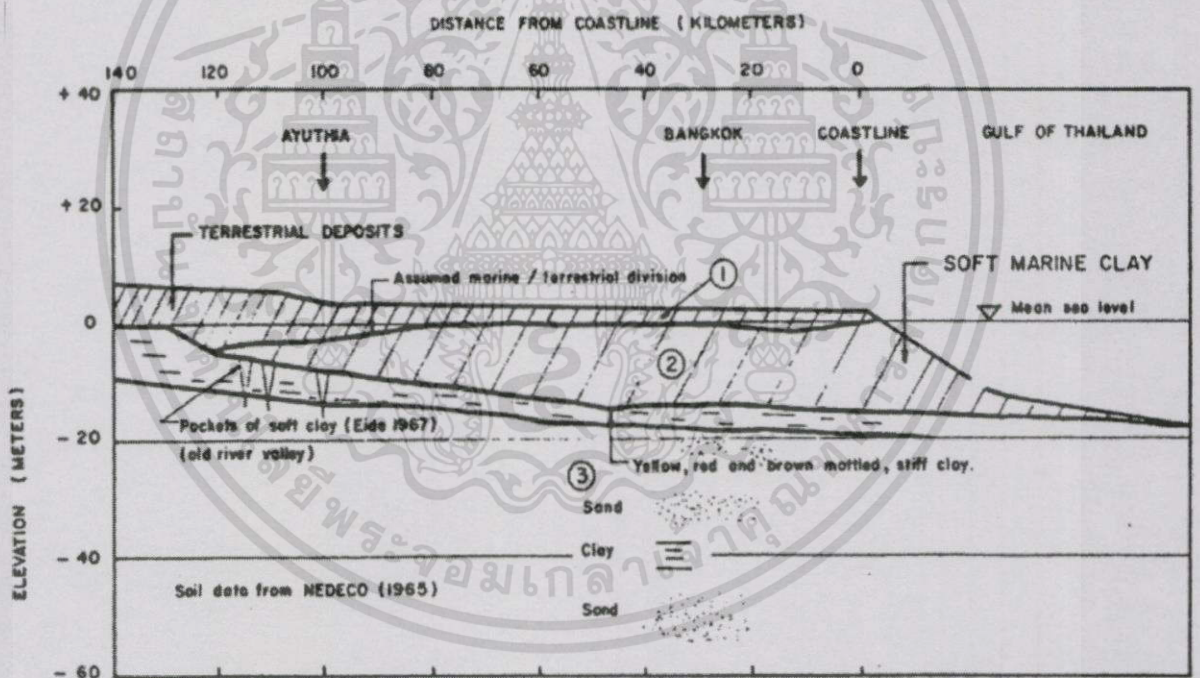
ดิน เป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานในงานวิศวกรรมโยธา ใช้เป็นวัสดุถมในงานก่อสร้างต่าง ๆ เช่น งานถมยกระดับบริเวณอาคาร ถนน เขื่อน และใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับทำอิฐหรือ ในบางกรณีอาจเพิ่มวัสดุอื่น เช่น ปูนขาว เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติในการรับกำลังได้มากขึ้นเพื่อผลทางด้านวิศวกรรม บางวัฒนธรรมนำดินมาปั้นเป็นตัวบ้านที่อยู่อาศัยโดยตรง

2.2 ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร (Bangkok clay)

ชั้นดินกรุงเทพมหานครมีลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไป ประกอบด้วยชั้นหินแข็งดินดานที่ความลึกที่อาจมากกว่า 1.5 กม. ถัดขึ้นมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับชั้นทรายหนาประมาณ 14–20 ม. ถัดขึ้นมาเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 14–18 ม. และส่วนบนสุดเป็นชั้นเปลือกแข็งหนาประมาณ 3–5 ม.

ชั้นดินเหนียวแข็งสลับชั้นทรายเกิดจากการตกตะกอนในน้ำจืดและในน้ำทะเลเป็นเวลายาวนานทำให้ชั้นดินมีลักษณะสลับกันอย่างไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน แต่เชื่อว่าชั้นดินเหนียวแข็งเกิดก่อนชั้นเหนียวอ่อนข้างบนมาเป็นเวลานานมาก และเคยเป็นผิวดินมาก่อน

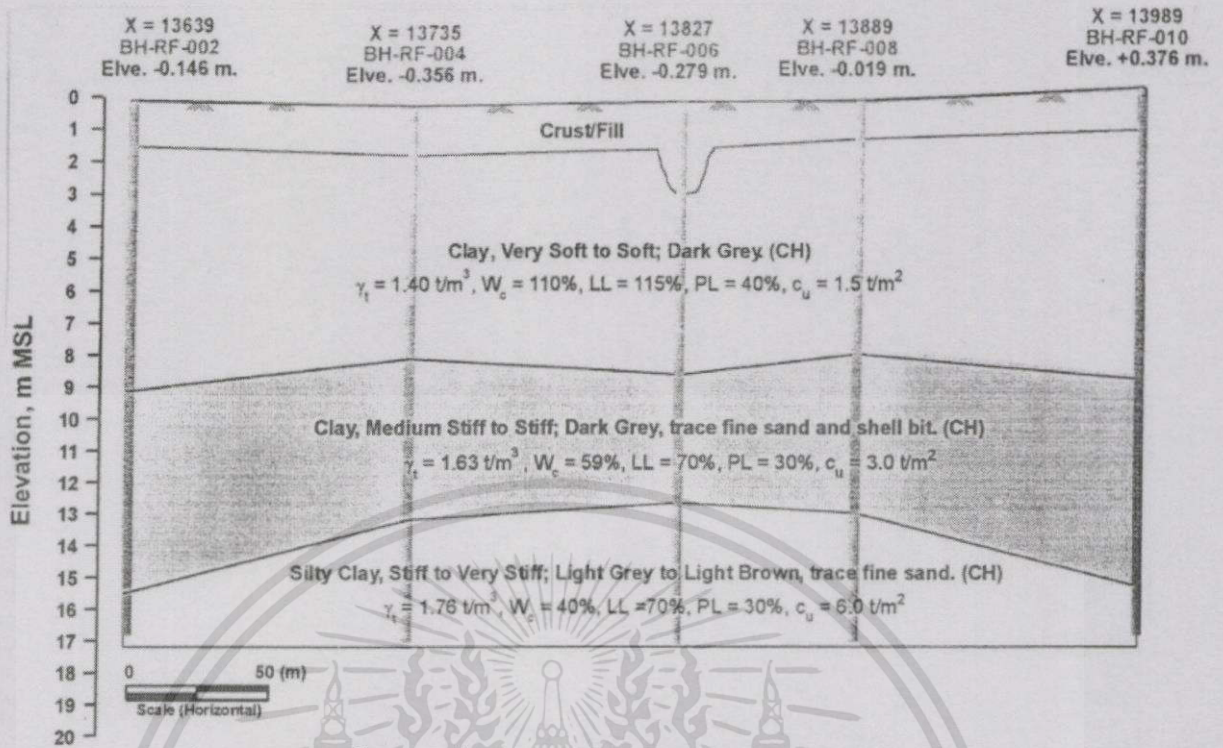
ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากเกิดจากการตกตะกอนในน้ำทะเล เนื่องจากในยุคหนึ่งระดับน้ำทะเลเกิดการเปลี่ยนแปลงยกตัวสูงขึ้น จึงเกิดการตกตะกอนสะสมบริเวณปากอ่าว สำหรับความไวตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนในบางพื้นที่คาดว่าเกิดจากการถูกชะล้าง (Leaching) ปริมาณเกลือออกจากน้ำในโพรงดิน ทำให้โครงสร้างดินสูญเสียเสถียรภาพ



รูปที่ 2.2 รูปตัดแสดงลักษณะชั้นดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , 2520)

ชั้นดินเปลือกแข็งเกิดจากการแปรสภาพของชั้นดินเหนียวอ่อน อันเป็นผลมาจากการซึมผ่านของน้ำตามรูเล็กๆ (Capillary Action) และการเกิดสูญเสียน้ำจากมวลดิน (Desiccation) เนื่องจากแสงแดด



รูปที่ 2.3 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่โครงการก่อสร้างท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)

ในสมัยอดีตนั้นการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวชุ่มน้ำเราอาจจะใช้สุญญากาศหรือการถม น้ำหนักกดทับร่วมกับระบบสุญญากาศ ซึ่งประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าวจะขึ้นกับว่าดินเหนียวมี ความสามารถซึมผ่านได้ดีแค่ไหน ระดับความต้องการของการปรับปรุงดิน และช่วงระยะเวลา อย่างไรก็ตาม กิติเมื่อช่วงต้นปี 2000 ได้เริ่มมีการพัฒนาเทคนิค HVDM โดยมี Mr. Shi-Long Xu เป็นผู้ถือ สิทธิบัตร HVDM มีความโดดเด่นในการผสมผสานระหว่าง การใช้สุญญากาศกับการบดอัดแบบไดนา มิก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและใช้ระยะเวลาอันสั้นในการปรับปรุงดินกว่าวิธีการปรับปรุงแบบอื่นๆ

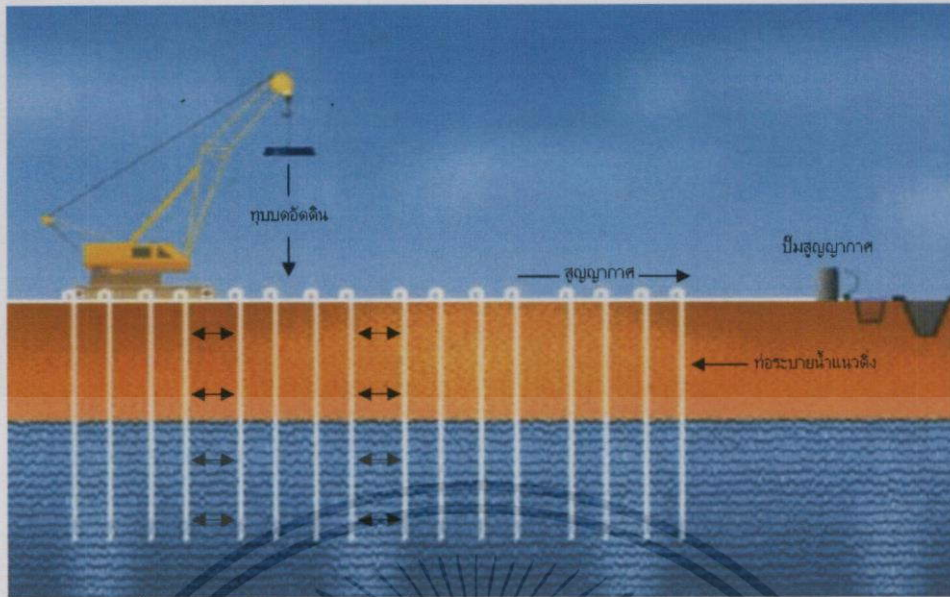
2.3.1 หลักการทำงานของเทคนิค HVDM

HVDM สามารถกล่าวได้ว่า เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเร่งระบายน้ำออก จากมวลดินได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการการยุบอัดคายตัว และการเพิ่มความหนาแน่นให้แก่ดิน

ขั้นตอนที่ 1 : สํารวจคุณสมบัติของดินในบริเวณโครงการ เพื่อประเมินความลึกและความ หนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพซึ่งความลึกและความหนานั้นสามารถพิจารณา ได้จาก

- Atterberg's limit (จุดเปลี่ยนสถานะภาพของมวลดิน)
- Water content (ปริมาณความชื้นในมวลดิน)
- hydraulic conductivity (สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่าน)
- Compressibility (ความสามารถของดินที่ปริมาตรจะลดลงเมื่อถูกอัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิค HVDM (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)

ส่วนการทดสอบในพื้นที่โครงการ เช่น CPT หรือ STP เพื่อตรวจสอบค่าเริ่มต้นก่อนการทำงานในสนาม จากนั้นจะรวบรวมข้อมูลเพื่อออกแบบวิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน ตั้งแต่การกำหนดระยะห่างและความลึกที่เหมาะสมของท่อสุญญากาศ พลังงานของการบดอัดแบบไดนามิก จำนวนและระยะห่างของการทุบรอบเวลาสำหรับการใช้ระบบสุญญากาศกับการบดอัดแบบไดนามิกและอื่นๆ

ขั้นตอนที่ 2 : ติดตั้งท่อสุญญากาศในแนวตั้งและท่อระบายน้ำในแนวราบ ซึ่งท่อสุญญากาศในแนวตั้งจะถูกเจาะรูและท่อรอบโดยผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile fabric) เพื่อการกรองดินที่จะเข้าไปในท่อ ส่วนท่อระบายน้ำในแนวราบจะใช้ท่อพีวีซี(PVCs pipe) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับท่อเหล็กสุญญากาศผ่านข้อต่อดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงแถวของท่อระบายน้ำตามแนวราบที่เชื่อมต่อกับท่อสุญญากาศแนวตั้งในพื้นที่ทำงาน



รูปที่ 2.5 แถวของท่อสุญญากาศและท่อระบายน้ำในแนวราบ (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 : ดำเนินการใช้สุญญากาศเพื่อลดปริมาณน้ำในเขตอิทธิพล สุญญากาศช่วยระบายน้ำ(dewatering)ในดิน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะช่วยเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลของดินได้ถึงประมาณ 50 - 80 กิโลปาสกาล(ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของสุญญากาศ)

ขั้นตอนที่ 4 : ใช้การบดอัดแบบไดนามิกเพื่อให้แรงดันน้ำเป็นเชิงบวก โดยการใช้ตุ้มน้ำหนักกระแทกลงบนผิวดินจนเกิดหลุมทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินและการลดอัตราส่วนช่องว่างภายในมวลดิน (การทำเกิดความแน่นโดยตรง) ตัวแปรควบคุมที่สำคัญของการบดอัดแบบไดนามิกคือน้ำหนัก ขนาด ความสูงที่ยก ระยะห่างที่ตุ้มกระแทก และจำนวนครั้งที่ตุ้มน้ำหนักกระแทกต่อจุด การตัดสินใจเลือกใช้ตัวแปรเหล่านี้จะต้องพิจารณาจากผลการตรวจสอบพื้นที่ทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าดินที่อยู่ข้างล่างของตำแหน่งการปล่อยตุ้มน้ำหนักจะไม่เกิดผลกระทบของความล้มเหลวเนื่องจากแรงเฉือนในดินที่ไม่มีการระบายน้ำ(undrained shear failure) หรือเรียกสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ว่า “rubber soil” โดยปกติตุ้มน้ำหนักที่ใช้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 1.5 เมตรและน้ำหนักอยู่ที่ 20-70 ตัน ความสูงในการยกตุ้มน้ำหนัก 10-20 เมตร

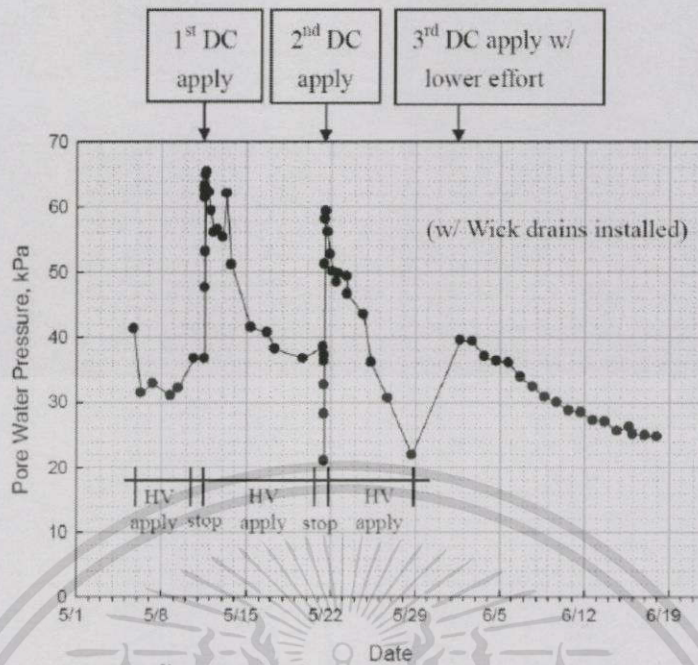
ขั้นตอนที่ 5 : ใช้ระบบสุญญากาศเพื่อช่วยการกระจายความดันอย่างรวดเร็ว ลดปริมาณน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของดินในเขตพื้นที่อิทธิพล ทำให้เกิดแรงดันน้ำเชิงลบ และการบดอัดกระแทกแบบไดนามิกก็จะช่วยให้มีแรงดันน้ำเชิงบวก ทำให้เกิดผลต่างในของแรงดันสูงมาก ซึ่งจะกระจายแรงดันน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำในดินลดลงได้

ขั้นตอนที่ 6 : ตรวจสอบคุณสมบัติของดินหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 5 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

- water content ปริมาณน้ำในดิน
- pore pressures แรงดันน้ำในดิน
- ground water elevation ระดับน้ำใต้ดิน
- ground subsidence ระดับการทรุดตัวของดิน

การตรวจสอบในสนาม เช่น ค่า CPT หรือ ค่า N จาก STP ซึ่งจำเป็นมากที่จะพิจารณาและประเมินผลจากการดำเนินการในรอบแรก (ขั้นตอนที่ 4 และ 5) ของกระบวนการ HVDM การประเมินผลของการปรับปรุงดินในขั้นตอนนี้จะช่วยให้การปรับแก้ค่าตัวแปร ระยะห่างและความลึกของท่อสุญญากาศ พลังงานที่ให้ในการบดอัดแบบไดนามิก และระยะห่างของจุดปล่อยน้ำหนักกระแทก ฯลฯ ในรอบต่อไปของกระบวนการ HVDM

ขั้นตอนที่ 7 : ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 จนกว่าผลที่ออกมามีความพึงพอใจ และผลที่ออกมาควรจะชี้ให้เห็นว่าเมื่อผ่านกระบวนการ HVDM ไปแล้ว 2 รอบ จะต้องเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของคุณสมบัติดินตามที่ได้คาดการณ์ไว้ เช่น ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นจากการวัด CPT หรือ STP และเกิดการทรุดตัวที่เห็นได้



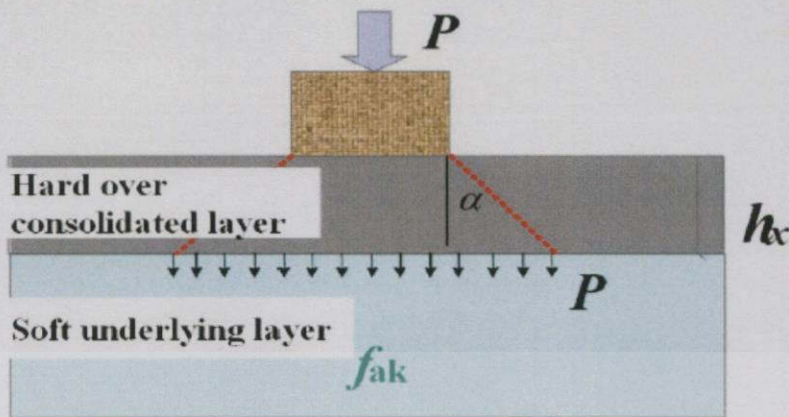
รูปที่ 2.6 แนวโน้มของความดันน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงไป ในการปรับปรุงคุณภาพดินของโครงการก่อสร้างท่าเรือ Ningbo ด้วยเทคนิค HVDM (R. Y. Liang, and S. Xu. ; 2010)

2.3.2 ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

1. การที่กระบวนการ HVDM ได้ใช้การทำซ้ำของการดูดน้ำออกโดยใช้สุญญากาศ และการบดอัดแบบไดนามิก เพื่อให้เกิดแรงดันในโพรงดินที่สูงมากเพื่อเร่งการสลายตัวของแรงดันในโพรงดิน และทำให้เกิดการระบายน้ำโดยใช้ระบบท่อสุญญากาศ กระบวนการ HVDM ได้ขยายการใช้งานของระบบระบายน้ำสุญญากาศให้ดินที่ยากในการซึมผ่าน จากการทำให้เกิดแรงดันในโพรงดินที่สูงและความสามารถในการทำให้ระยะทางระบายน้ำสั้นลง โดยสามารถเข้าไปถึงดินที่มีการซึมผ่านอยู่ที่ระดับ 1×10^{-7} ซม./วินาที

2. การทำให้วิธีหุบบดอัดสามารถใช้งานได้ในดินเหนียวอ่อนที่ชุ่มน้ำได้ สาเหตุหลักที่ทำให้วิธีหุบบดอัดสามารถใช้งานกับดินเหนียวอ่อนที่ชุ่มน้ำได้นั้นเพราะว่า การใช้ร่วมกับการดูดน้ำออกโดยใช้ท่อสุญญากาศ การดูดน้ำออกโดยใช้ท่อสุญญากาศนั้นมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณน้ำในดินเหนียวจนเหลือเปอร์เซ็นต์การอิมตัวอยู่ในระดับประมาณ 75-85% ซึ่งทำให้สามารถใช้วิธีหุบบดอัดโดยไม่เกิดปัญหาปรากฏการณ์ดินคืบตัว (rubber soil)

3. การเกิดความหนาแน่นขึ้นจริงเนื่องจากการทำหุบบดอัด ซึ่งทำให้ดินชั้นบนมีความหนาแน่นมากและลึกลงไป 3-4 เมตร ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 ดินชั้นบนที่หนาแน่นขึ้นสามารถเป็นตัวช่วยในฐานะของตัวลดความเค้นต่อชั้นดิน และกระจายน้ำหนักบนพื้นผิวในมุมที่กว้างขึ้น ซึ่งทำให้ความเค้นที่ถูกส่งไปยังดินชั้นล่างนั้นลดลง ซึ่งจะปลดความต้องการในการปรับปรุงดินของดินชั้นล่างนี้



รูปที่ 2.7 ประสิทธิภาพในการกระจายความเครียดเนื่องจากมีชั้นดินแข็งอยู่ด้านบนชั้นดินเหนียว

4. เราสามารถเก็บท่อสุญญากาศได้ ในระหว่างการปรับปรุงดินหรือหลังจากการปรับปรุงดิน จากการสร้างดินเหนียวที่มีความหนาแน่นสูงมากที่น้ำไม่สามารถผ่านได้นี้ร่วมกับการนำท่อสุญญากาศ ออก (แทนการทิ้งท่อ PVD ไว้) ทำให้การระบายน้ำหลังการปรับปรุงดินนั้นถูกจำกัดเหลือเฉพาะใน แนวอนเท่านั้นดังนั้นแม้ว่าจะมีแรงดันในโพรงดินมากขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง อัตราการ สลายตัวของแรงดันในโพรงดินในสภาพการจำกัดการระบายน้ำนี้จะอยู่ในอัตราที่ช้ามากสามารถลด การแก้ไขในอนาคตและการทรุดตัวไม่เท่ากันได้

2.3.3 ข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิค HVDM

ข้อดี

1. ใช้สุญญากาศเพื่อช่วยระบายน้ำออกจากชั้นดินเหนียวที่บ่มน้ำได้เร็วขึ้น
2. สามารถเปลี่ยนความคิดเดิมที่ว่า การบดอัดแบบไดนามิกไม่สามารถนำไปใช้กับดินเหนียว อิ่มตัวได้
3. ช่วยเพิ่มแรงดันน้ำด้วยการทำให้เกิดผลต่างของแรงดันสูงมาก
4. สร้างชั้นดินเหนียวที่ผ่านการอัดตัวคายน้ำมาแล้วบริเวณชั้นบนของดินได้หนาประมาณ 5-8 เมตร ขึ้นอยู่กับพื้นที่อิทธิพลการให้พลังงานบดอัด
5. ขจัดเส้นทางการระบายน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน เพราะว่าท่อสุญญากาศในแนวตั้ง จะถูกดึงขึ้นมาจากดินเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ และสร้างชั้นดินที่บ่มน้ำบริเวณชั้นผิวดิน ซึ่ง ตรงกันข้ามกับ PVDs ที่โดยปกติแล้วจะถูกฝังทิ้งไว้ในดินเช่นเดิม

ข้อจำกัด

1. เทคนิค HVDM คือการปรับปรุงคุณภาพดินจะถึงความลึกไม่เกิน 10 เมตร เนื่องจาก ข้อจำกัดของเขตอิทธิพลการบดอัดแบบไดนามิกลึก และเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพจากการระบาย น้ำด้วยสุญญากาศเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น

2. ดินเหนียวที่มีความเป็นอินทรีย์สาร(Organic materials) อาจจะไม่เหมาะสำหรับเทคนิค HVDM โดยดินเหนียวที่ใช้สำหรับเทคนิค HVDM ควรเป็นดินที่มีเม็ดขนาดเล็กและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (hydraulic conductivity) ของดินควรไม่น้อยกว่า 5×10^{-7} ซม. / วินาที

2.4 อิทธิพลความลึกและพลังงานเนื่องจากการทุบอัดดิน

การทุบอัดแบบกระแทก (Dynamic compaction) เป็นรูปแบบที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมานานแล้ว การทิ้งน้ำหนักลงบนผิวดินเป็นที่กล่าวถึงและนำทฤษฎีไปใช้งานในยุค 1970 เป็นเทคนิคของ Menard เทคนิคนี้ประกอบไปด้วยการทิ้งตุ้มน้ำหนักลงบนพื้นดินอ่อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีน้ำหนักตั้งแต่ 10 ถึง 150 ตัน ระยะตกกระทบตั้งแต่ 10 ถึง 40 เมตร เพื่อให้มีความอัดแน่นบนบริเวณผิวดินของดิน

ในการพิจารณาอิทธิพลความลึกเนื่องจากการทุบอัด ต้องคำนึงถึงน้ำหนักและความสูงที่ยกตุ้มน้ำหนัก Lukas (1986) ได้ปรับปรุงสมการของ Menard and Broise (1975) ได้ตั้งสมการที่ (2.1)

$$\text{สมการระยะลึกประสิทธิผล} \quad D = n\sqrt{W \times H} \quad (2.1)$$

โดยที่ D = ระยะลึกประสิทธิผล , เมตร

n = ค่าคงที่ 0.3 - 0.5 สำหรับดินเหนียว ,
0.5 - 1.0 สำหรับดินทราย

W = น้ำหนักของตุ้ม , ตัน

H = ความสูงของตุ้มจากพื้นดิน , เมตร

ในการพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการบดอัด เพื่อที่จะนำไปออกแบบตัวแปรเบื้องต้นสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน จะใช้ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$AE = \frac{NWHP}{S^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ AE = พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ , ตัน/ม.

N = จำนวนครั้งที่ปล่อยตุ้มน้ำหนักต่อจุด

W = น้ำหนักของตุ้ม , ตัน

H = ความสูงที่ยกตุ้มน้ำหนัก , ม.

P = Number of Passes = 1

S = ระยะห่างระหว่างท่อระบายน้ำแนวตั้ง , ตร.ม.

2.5 พลังงานจากระบบสุญญากาศ

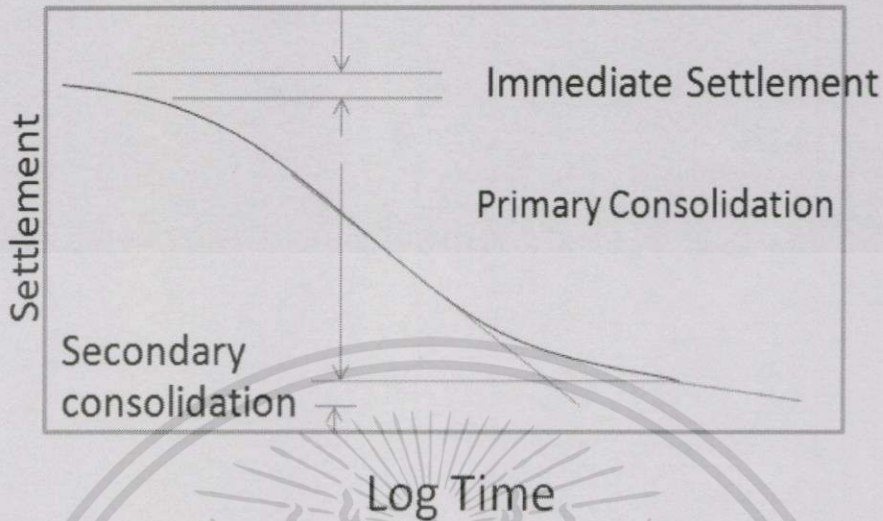
สุญญากาศ (อังกฤษ: vacuum มาจากภาษาละตินแปลว่า ว่างเปล่า) คือปริมาตรของช่องว่างซึ่งไม่มีสสารอยู่ภายใน เหมือนกับความดันแก๊สที่น้อยกว่าความดันบรรยากาศมาก ๆ ในความเป็นจริง เราไม่สามารถทำให้ปริมาตรของช่องว่างว่างเปล่าได้อย่างสมบูรณ์ที่เรียกว่า สุญญากาศสมบูรณ์ (perfect vacuum) ซึ่งมีความดันแก๊สเป็นศูนย์ สุญญากาศสมบูรณ์จึงเป็นแนวความคิดที่ไม่สามารถสังเกตการณ์ได้ในทางปฏิบัติ นักฟิสิกส์มักจะถกเถียงเกี่ยวกับการทดลองในอุดมคติว่าจะเกิดอะไรขึ้นในสุญญากาศสมบูรณ์ โดยใช้คำว่าสุญญากาศแทนสุญญากาศสมบูรณ์ และใช้คำว่า สุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) แทนความหมายของสุญญากาศที่เกิดขึ้นได้จริง

การดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบ โดยปั๊มสุญญากาศเรียกว่า การทำสุญญากาศหรือการทำแวกคัมระบบปั๊มสุญญากาศถูกใช้สำหรับลดแรงดันในระบบและอัดทิ้งสู่อากาศ ภายนอกสายท่อกลางของแมนิโฟลด์เกจจะถูกต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศทางด้านดูดวาล์วทั้งคู่ของ เกจจะอยู่ในตำแหน่งเปิดเต็มที่ เดินปั๊มสุญญากาศให้ความดันลดลงถึง -30 ปอนด์/ตารางนิ้ว และใช้เวลาในการดูดความชื้นอย่างน้อย 20 นาที แต่ถ้าสามารถทำสุญญากาศระบบได้นานกว่านี้ก็จะเป็นการดี การใช้เวลาในการทำสุญญากาศระบบได้นานกว่านี้ยิ่งนานเท่าไร จะยิ่งทำให้การดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบดีขึ้นเท่านั้น

2.5.1 การเลือกใช้พลังงานจากระบบสุญญากาศ

การเลือกใช้พลังงานจากระบบสุญญากาศในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM อาจจะไม่มียุทธการคำนวณในการนำไปใช้ที่ชัดเจน แต่การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกรณีศึกษาในพื้นที่ทดลองจริงที่ผ่านมาพบว่า ความดันสุญญากาศที่ทำให้ความดันน้ำในดินมีค่าเท่ากับหนึ่งความดันบรรยากาศ(100 กิโลปาสคาล) โดยไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์ cavitations ที่มีโอกาสเกิดขึ้น(Liang and Xu, 2012) ทำให้ค่ากำลังแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน(Undrain Shear Strength) ที่มีการยุบอัดคายน้ำปกติ(Normal consolidation) เพิ่มจากประมาณ 50 ไปถึง 80 กิโลปาสคาล และกำลังรับน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้นจากประมาณ 15 ไปถึง 25 กิโลปาสคาล อีกกรณีศึกษาที่เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกความดันของสุญญากาศคือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้แอมบรายน้ำแนวตั้งแบบสังเคราะห์ร่วมกับระบบสุญญากาศและให้น้ำหนักกดทับล่วงหน้า(PVD + Vacuum + Preloading) โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย(AIT) ในพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งได้แนะนำค่าเฉลี่ยความดันสุญญากาศ 50 ถึง 60 กิโลปาสคาล ที่วัดได้ใน PVD และ 70 ถึง 90 กิโลปาสคาลที่ปั๊มสุญญากาศ (Bergado et al, 2006) (เมื่อ PVD เทียบเท่ากับท่อระบายน้ำแนวตั้ง)

2.6 การทรุดตัวของดิน (Settlement)



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงช่วงการทรุดตัวของแต่ละประเภท

การทรุดตัว คือ การยุบตัวลงในแนวดิ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ฐานรากของอาคารเกิดการพังเสียหายขึ้นได้

การทรุดตัวของชั้นดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

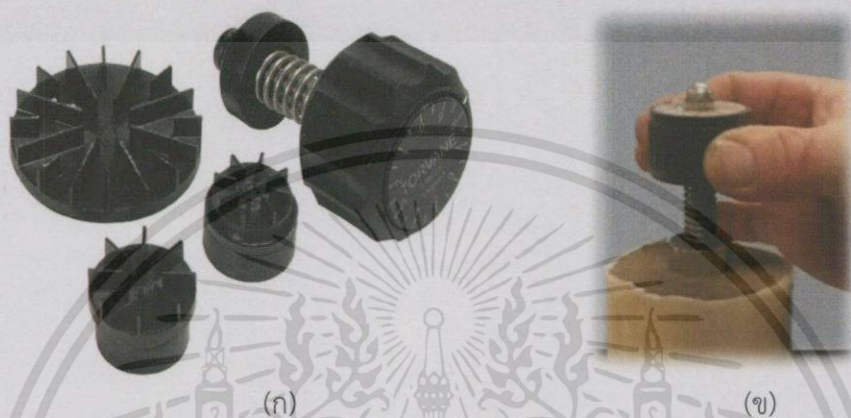
1) การทรุดตัวเนื่องจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน (Immediate Settlement หรือ Elastic Settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน มักจะเกิดขึ้นทันทีที่รับน้ำหนัก หรือมีแรงมากระทำ เรียกว่า การทรุดตัวทันที

2) การทรุดเนื่องจากการยุบอัดตัวของดิน (Consolidation Settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากปริมาณน้ำหรืออากาศถูกบีบออกจากช่องว่างในชั้นดิน จะเกิดขึ้นหลังจากการทรุดตัวทันทีและเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยเฉพาะในชั้นดินเหนียว ซึ่งยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยากและช้า การทรุดตัวแบบนี้อาจจะต้องใช้เวลานานหลายปีในการให้การทรุดตัวสิ้นสุด เมื่อแรงดันน้ำในช่องว่างส่วนที่เกิน (Excess Pore-Water Pressure) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่ผิวดินมีค่าเป็น 0 ดังนั้นความเสียหายของอาคารที่เกิดขึ้นกว่าจะปรากฏให้เห็นก็ภายหลังจากเสร็จสิ้นการก่อสร้างเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้วได้

3) การทรุดตัวเนื่องจาก Creep หรือคุณสมบัติพลาสติกของดิน (Secondary Settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดินและ Plastic Deformation จะเกิดขึ้นหลังจากการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวของดินสิ้นสุด ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก การทรุดตัวแบบนี้มักมีความสัมพันธ์ในดินประเภท Organic และ Highly Organic Clay Soil เท่านั้น คือ จะไม่นำมาคำนึงในการคำนวณค่าการทรุดตัวของดินประเภท Inorganic Clay Soil

2.7 การทดสอบแรงเฉือน ด้วย Pocket Vane Shear (Torvane)

Pocket Vane Shear หรือ Torvane เป็นเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบพกพา สามารถทดสอบแรงเฉือนดินเหนียวในสนามหรือตัวอย่างในห้องปฏิบัติการได้สะดวกและรวดเร็ว โดยจะมีใบพัดทดสอบ 3 ใบพัด ซึ่งสามารถเลือกใช้ตามลักษณะดินที่จะทดสอบ



รูปที่ 2.9 Torvane (ก) , การทดสอบ (ข)

การใช้งานเพื่อทดสอบตัวอย่าง

1. เลือกจุดที่จะทดสอบด้วยความระมัดระวัง เพื่อหลีกเลี่ยงกรวดหรือสิ่งอื่นๆ ที่จะมีอิทธิพลต่อความคาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ หลีกเลี่ยงพื้นที่ที่ถูกรบกวนแล้ว (disturbed areas) สำหรับตัวอย่างดินเหนียวอิมิตัวที่เก็บมาจะต้องทำการทดสอบทันที หรือถ้ามีส่วนใดแห่งก็ให้ตัดส่วนนั้นออกก่อนการทดสอบ
2. เลือกขนาดใบพัดให้เหมาะกับลักษณะดินที่จะทดสอบ พิจารณาจากตารางที่ 1 แล้วประกอบใบพัดที่ส่วนปลายของ Torvane
3. ปรับหน้าปิดส่วนบนของ Torvaneให้อ่านค่าเป็นศูนย์
4. ทำการทดสอบตัวอย่างดิน โดยใช้ส่วนที่เป็นใบพัดกดลงไป在地 ให้ความลึกที่กดเท่ากับ ความสูงของใบพัด จากนั้นทำการบิดที่ตัว Torvane (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) ให้แรงบิดสม่ำเสมอจนตัวอย่างดินวิบัติ และระยะเวลาในการให้แรงบิดควรอยู่ในช่วง 5-10 วินาที
5. อ่านค่าที่เปลี่ยนไปบนหน้าปิดส่วนบนของ Torvane ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่า shear stress ในดิน หน่วย kg/cm^2 (ค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับใบพัดที่เลือกใช้ โดยจะมีค่าคงที่ในแต่ละช่องการอ่านค่า ตามตารางที่ 1 หรือสามารถดูค่าคงที่นี้ได้จะกำกับอยู่บนใบพัด)

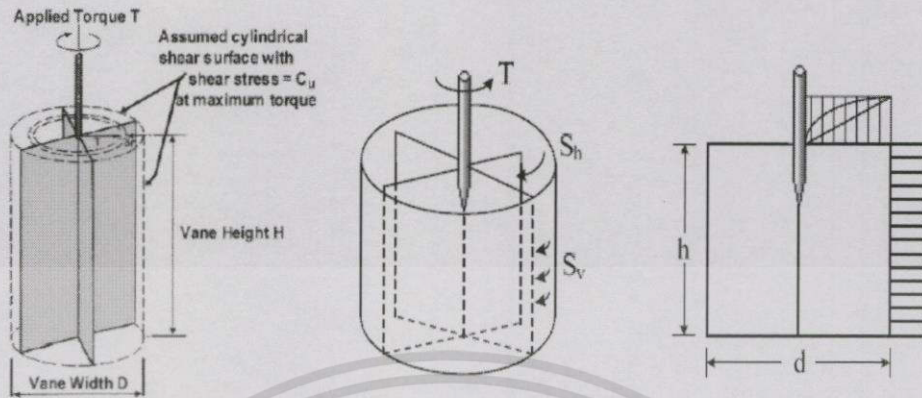
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของใบพัดแต่ละขนาด

	ใบพัดขนาดเล็ก	ใบพัดขนาดมาตรฐาน	ใบพัดขนาดใหญ่
Range	0-2.5 kg/cm ²	0-1.0 kg/cm ²	0-0.2 kg/cm ²
เส้นผ่าศูนย์กลาง	0.7 inch (17.8 mm)	1.0 inch (25.4 mm)	1.8 inch (45.7 mm)
ลักษณะดินที่ใช้ทดสอบ	ใช้กับดินเหนียวแข็ง	ใช้กับดินเหนียวอิมัตว์ปกติ	ใช้กับดินเหนียวอ่อน

การทดสอบ

1. ชุดการทดสอบนี้สามารถทดสอบดินเหนียวอ่อนที่มีความอ่อนมากจนถึงดินเหนียวแบบแข็ง(ประมาณ 0.0-1.0 ksc) การทดสอบทำได้ง่ายและมีราคาการทดสอบถูกมาก การทดสอบที่ต้องการคุณภาพจึงนิยมใช้ทดสอบขณะเจาะสำรวจดินเพื่อเป็นการหาค่าบันทึกก่อนในเบื้องต้น
2. ความน่าเชื่อถือของชุดทดสอบนี้อาจมีไม่มากนัก แต่มักนิยมใช้ทดสอบร่วมกับการทดสอบแบบอื่นๆ เช่น Unconfined Compression Test เพื่อหาความสอดคล้องของการทดสอบ
3. จากการทดสอบหาค่าหน่วยแรงเฉือนแบบต่างๆ เช่น Unconfine Compression Test, Triaxial UU Test มักจะมีปัญหาหนึ่งคือไม่สามารถหาค่าหน่วยแรงเฉือนของดินที่มีลักษณะอ่อนนุ่มมากๆ ได้เนื่องจากข้อจำกัดหลักๆ สองประการคือไม่สามารถ Trimming ดินเหนียวที่อ่อนมากได้ และ/หรือ เครื่องมือวัดแรงกดมีค่าหยาบมากเกินไป ดังนั้นการทดสอบโดยใช้ Hand Vane Shear Test นี้จึงมีลักษณะเด่นที่สุดที่ทำการทดสอบได้ ทั้งนี้ความน่าเชื่อถือของเครื่องมือชุดนี้จะมีมากยิ่งขึ้นถ้ามีการทำการปรับแก้ค่า (Calibration) และถ้าผู้ใช้งานได้ทำการเปรียบเทียบค่าร่วมกับการทดสอบแบบ Unconfine Compression Test หรือ Triaxial Unconfined Unconsolidated Test และนำค่าเปรียบเทียบเขียนเป็นกราฟ จะทำให้การทดสอบมีความเด่นชัดมากยิ่งขึ้น
4. ชุดทดสอบนี้จะให้ขนาดใบพัด 3 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว, 1 นิ้ว และ 1+ 7/8 นิ้ว ถ้าต้องการทดสอบดินที่มีความอ่อนมากให้ใช้ใบพัดขนาดใหญ่ และถ้าดินแข็งแรงมากให้ใช้ใบพัดขนาดเล็ก มีค่า Factor ตัวคูณกับผลที่อ่านได้เป็น 2.5, 1.0 และ 0.2 ตามลำดับ
5. ชุดทดสอบนี้เหมาะเฉพาะสำหรับดินเหนียวที่มีความอิมัตว์ด้วยน้ำสูงและเป็นการทดสอบชนิดไม่ระบายน้ำ (undrained test) ดังนั้นผลการทดสอบดินเหนียวจึงได้หน่วยแรงเฉือนแบบ Undrained Strength
6. เพื่อให้การทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นควรกำหนดให้ Normal Pressure เป็นศูนย์เพื่อให้สอดคล้องกับการ Calibration และจะได้ไม่เป็นการ Disturb ดิน

การคำนวณหาค่าแรงเฉือนของดินโดยใช้ Pocket Vane Shear



รูปที่ 2.10 Pocket Vane Shear

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (kg/cm^2)

$$\text{Shear Strength} = \frac{T}{\pi \left[\frac{d^2 h}{2} + \frac{d^3}{6} \right]} \quad (2.3)$$

เมื่อ T = แรงบิดหรือโมเมนต์ที่เกิดตรงใบพัด (Kg-cm)
 d = ความกว้างของใบพัด (cm)
 h = ความสูงของใบพัด (cm)

2.8 ปริมาณน้ำในดิน (Water Content)

ดินตามธรรมชาตินั้น องค์ประกอบของมวลดิน มี 3 ส่วนใหญ่ๆ ส่วนแรก คือส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือของแข็ง ส่วนที่สอง คือส่วนที่เป็นน้ำหรือของเหลวและส่วนที่สาม คือส่วนที่เป็นอากาศหรือก๊าซ ทั้งนี้ดินไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบครบทั้ง 3 ส่วน อาจจะมีส่วนประกอบเพียง 2 ส่วนก็ได้ ขึ้นอยู่กับสภาพของมวลดินเป็นเกณฑ์

มวลดินประกอบด้วยส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือมวลของแข็ง ซึ่งเป็นอนุภาคของแร่และอินทรีย์สาร โดยอนุภาคมีรูปร่าง 3 มิติ มีผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินภายในช่องว่างจะบรรจุด้วยมวลของน้ำและมวลของอากาศ ซึ่งจะเรียกว่าดินชื้นหรือดินเปียก บางสภาวะช่องว่างระหว่างเม็ดดินอาจมีเฉพาะมวลของน้ำจะเรียกว่าสภาวะอิ่มตัว หรืออาจมีเฉพาะมวลของอากาศจะเรียกว่าอยู่ในสภาพดินแห้ง การหาปริมาณความชื้นในมวลดินคือ การหาอัตราส่วนระหว่างมวลหรือน้ำหนักของน้ำต่อมวลหรือน้ำหนักของเม็ดดินที่มีอยู่ในมวลดิน

การคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน

เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในดิน (Water Content, ω)

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.4)$$

เมื่อ	ω	=	ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
	W_w	=	น้ำหนักของน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม
	W_s	=	น้ำหนักของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

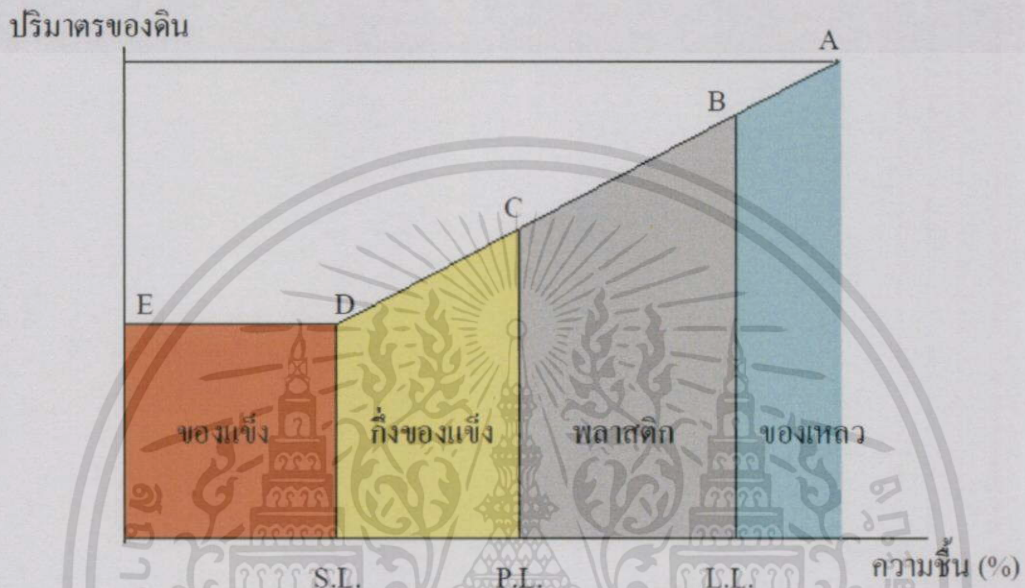
2.9 ขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit)

ดินพวกเม็ดละเอียดโดยเฉพาะดินเหนียว จะมีสมบัติเปลี่ยนไปตามปริมาณที่มีอยู่ใน มวลดิน และปริมาณน้ำในดินนี้จะมีความสำคัญต่อสถานภาพของดิน ซึ่งจะ使得ดินอยู่ในสภาพต่างๆกัน ความชื้นในมวลดินมีอิทธิพลสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน ทั้งในด้านการเปลี่ยน สถานะภาพ (เช่นน้ำมากดินเป็นของเหลว, นำน้อยดินเป็นของแข็ง) และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง วิศวกรรม เช่น ความแข็งแรงของดินฐานรากมีค่าลดลงเมื่อน้ำมาก อิทธิพลเนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงความชื้นดังกล่าวมีผลมากต่อดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดได้แก่ดินที่เรียกว่าดินเหนียว (Cohesive Soil) ทั้งนี้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินหรือความเหนียวดังกล่าวเกิดจากการดึงดูดระหว่าง ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในเม็ดดิน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น สำหรับดินที่มีขนาด เม็ดดินใหญ่ (Coarse Grain Soil) อิทธิพลของการดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้ามีค่าน้อย ความเหนียว จึงไม่มี ดินประเภทนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป ความชื้นในมวล ดิน ณ จุดขณะเปลี่ยนสภาพ เรียกว่าขอบเขตสถานะภาพ เช่น เป็นปริมาณความชื้นที่ดินจะเริ่มไหล เหมือนของเหลว ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของมวลดินนั้นๆ นอกจากนี้จะใช้เป็นตัวบอกสมบัติพื้นฐานแล้ว ยังใช้ในการจัดจำแนกหมวดหมู่ และคาดคะเนสมบัติทางวิศวกรรมของดินอีกด้วย

จุดเปลี่ยนสถานะภาพ หรือ LIMIT ของมวลดิน ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาว สวีเดน ชื่อ A. Atterberg โดยมีอยู่ด้วยกัน 5 LIMIT คือ Cohesion limit, Sticky Limit, Shrinkage Limit, Plastic Limit, และ Liquid Limit แต่ภายหลังนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านปฐพีกลศาสตร์เพียง สาม LIMIT สุดท้ายเท่านั้น ซึ่งในปัจจุบันทางด้านวิศวกรรมโยธาจะใช้กันอยู่ 3 ขีดจำกัด คือ ขีดจำกัดการ ไหลตัว ขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดการหดตัว ซึ่งค่าขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติก จะใช้ พิจารณาในการจำแนกดิน สภาพกำลังของดิน ประมาณการทรุดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำและ ประมาณความหนาแน่นสูงสุดจากการบดอัดดินได้ ส่วนค่าขีดจำกัดการหดตัวจะใช้พิจารณาการ เปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

2.9.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับดินและสถานะของดิน

ถ้าเรานำดินเหนียวมาผสมน้ำจนมีความชื้นสูง ดินจะมีสภาพคล้ายของเหลว เช่น ที่จุด A ในกราฟที่ 2.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของน้ำกับดิน และความชื้นในดินจากจุด A ถ้าเราทำให้ความชื้นค่อย ๆ ลดลงไป ปริมาตรของมวลดินก็จะลดลงเป็นปริมาตรที่คงที่ มวลดินจะเปลี่ยนสถานะภาพไป จากของเหลวเป็นพลาสติก , กึ่งของแข็ง , ของแข็งตามลำดับ



รูปที่ 2.11 สถานภาพของมวลดิน

4.1.1 Liquid Limit (WL หรือ L.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นสารหนืดตัวในสถานะภาพพลาสติกที่จุด B

4.1.2 Plastic Limit (WP หรือ P.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็งที่จุด C

4.1.3 Shrinkage Limit (WSK หรือ S.L.) คือ ความชื้นที่จุด D ซึ่งดินเปลี่ยนจากสภาพที่เป็น กึ่งของแข็งเป็นของแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไป ฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดิน และทำให้เกิดสภาวะไม่อิมตัวเกิดขึ้น จนกระทั่งไม่มีความชื้นเลย ที่จุด E

ค่าความชื้นในสถานะภาพพลาสติกของดิน เราเรียกว่า Plasticity Index (P.I. หรือ I_p) คือ ผลต่างของขีดความเหลว และขีดความเหนียว มักเป็นตัวแสดงถึงความเหนียวของดินและยังแสดงความไวต่อการเปลี่ยนสถานะภาพต่อความชื้นของมวลดินนั้น จึงเป็นค่าที่สำคัญและนำมาใช้มากในการจำแนกมวลดิน

2.9.2 ขีดจำกัดความเหลวของดิน (Liquid Limit)

ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง สถานะสภาพของดินก็จะเปลี่ยนจากของเหลวเป็นพลาสติก สามารถหาค่าได้จากดินที่มีความชื้นแน่น ความชื้นของมวลดินที่เมื่อเตรียมดินลงในถ้วยเคาะ โดยมีรอยบากมาตรฐานแล้วเคาะได้ 25 ครั้ง รอยบากนั้นจะเคลื่อนมาบรรจบกัน ยาวประมาณ 1 เซนติเมตร พอดีซึ่งเท่ากับความชื้น ณ จุดที่กึ่งกลางของดินเท่ากับ 25 กรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบไว้ว่าการเคาะแต่ละครั้งเท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อมวลดินมีค่าประมาณ 1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

การคำนวณหาขีดความเหลวของดิน

$$L.L. = \omega \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (2.5)$$

เมื่อ ω = ปริมาณน้ำในดิน
 N = จำนวนครั้งที่เคาะครั้งเดียว โดย $25 < N < 35$ ต่อการเคาะ 1 ครั้ง

2.9.3 ขีดจำกัดความเหนียวของดิน (Plastic Limit)

ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหนียวหนืดมากขึ้น จะมีปริมาณความชื้นในดิน น้อยกว่าขีดจำกัดเหลวหรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะสภาพของดินก็คือขีดที่ดินเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง หาได้โดยนำดินขึ้นมาคลึงให้ได้เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1/8 นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) และเกิดรอยแตกบริเวณที่ดินถูกคลึง

การคำนวณหาขีดความเหนียวของดิน

1. Liquid Limit (L.L.) อ่านได้จากกราฟที่การเคาะ 25 ครั้ง
2. Plastic Limit (P.L.) ค่า นวนจากค่าเฉลี่ยของความชื้นที่หาได้ 2 ครั้ง
3. Plasticity Index (P.I.) = L.L. - P.L.
4. Flow Index (I_f) คือความชันของเส้นกราฟ (Flow Curve)

$$I_f = \frac{m_1 - m_2}{\log \frac{N_2}{N_1}} \quad (2.6)$$

เมื่อ m_1 = ความชันบน Flow Curve ที่จุด 1 (ค่ามาก)
 N_1 = จำนวนการเคาะที่จุด 1
 m_2 = ความชันบน Flow Curve ที่จุด 2 (ค่าน้อย)

$$N_2 = \text{จำนวนการเคาะที่จุด 2}$$

$$\text{Toughness Index } (I_f) = \frac{\text{Plasticity Index (P.I.)}}{\text{Flow Index } (I_f)} \quad (2.7)$$

$$\text{Liquidity Index } (I_L) = \frac{m_n - P.L.}{P.I.} \quad (2.8)$$

เมื่อ m_n = ความชื้นตามธรรมชาติของดิน (Natural Water Content)

2.9.4 ขีดจำกัดความหดตัวของดิน (Shrinkage Limit)

ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนแปลงสภาพจากวัสดุที่แข็ง หรือปริมาณน้ำที่มากที่สุด ซึ่งแม้ว่าจะมีการสูญเสียน้ำอีกต่อไปก็ไม่ทำให้ดินหดตัวหรือมีปริมาตรลดลงอีก การหาพิสัยหดตัวของดินทำได้โดยการนำเอาดินตัวอย่างที่อยู่ในสภาพพลาสติก มาปั้นเป็นก้อนทรงแบนแล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักของมวลดิน พร้อมทั้งวัดปริมาตรของดินในปรอท แล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อหาน้ำหนักและปริมาตรของดินแห้งนี้

การคำนวณหาขีดจำกัดความหดตัวของดิน

1. คำนวณหาค่าปริมาตรของดินเปียก (Volume of Wet Soil, V_m)

$$V_m = \frac{W_m}{13.53} \quad (2.9)$$

เมื่อ V_m = ปริมาตรของปรอท มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
 W_m = น้ำหนักของปรอทที่ถูกแทนที่ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

2. คำนวณหาค่าปริมาตรของดินแห้ง (Volume of Dry Soil, V_d)

$$V_d = \frac{W_d}{13.53} \quad (2.10)$$

เมื่อ W_d = น้ำหนักของปรอทที่ถูกแทนที่ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

3. คำนวณหาค่า Shrinkage Ratio

$$R = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.11)$$

เมื่อ W_s = น้ำหนักของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
 V_s = ปริมาตรของดินแห้ง มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

4. คำนวณหาค่าระดับการหดตัว (Degree of Shrinkage)

$$D_s(\%) = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (2.12)$$

เมื่อ V_i = ปริมาตรของดินเปียก มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
 V_f = ปริมาตรของดินแห้งหลังอบ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

2.10 เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดพฤติกรรมของดิน

2.10.1 Piezometer

มาตรวัดความดันน้ำใต้ดิน (Piezometer)

มาตรวัดความดันน้ำใต้ดิน คือ เครื่องมือที่ใช้วัดความดันน้ำในดินที่ตำแหน่งที่กำหนด เครื่องมือนี้ ประกอบด้วยหัววัดความดันน้ำ ซึ่งเป็นหินพรุน (Porous Stone) หรือเซรามิก ที่น้ำในดินสามารถซึมเข้าออกได้ ความดันน้ำในหัววัดความดันน้ำจะถูกวัดด้วยอุปกรณ์วัดความดัน ซึ่งมี 3 ประเภท ได้แก่

1. มาตรวัดความดันน้ำใต้ดินชนิดท่อหยิน (Standpipe Piezometer)
2. มาตรวัดความดันน้ำใต้ดินชนิดวัดการสั่นของลวด (Vibrating Wire Piezometer)
3. มาตรวัดความดันน้ำใต้ดินชนิดใช้แรงอัดอากาศ (Pneumatic Piezometer)

การใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความละเอียดที่ต้องการวัด ในกรณีที่ดินเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย เช่น ดินทราย การวัดความดันน้ำอาจตรวจวัดโดยการวัดระดับน้ำในท่อที่ต่อกับหัววัดความดันน้ำชนิดท่อหยิน แต่ในกรณีที่ดินเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก เช่น ดินเหนียว การวัดความดันน้ำจะต้องใช้อุปกรณ์วัดความดันที่มีความไวค่อนข้างสูง เช่น มาตรวัดความดันน้ำใต้ดินชนิดวัดการสั่นของลวด หรือ มาตรวัดความดันน้ำใต้ดินชนิดใช้แรงอัดอากาศ

ความละเอียดของการวัดความดันน้ำในดินจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ ± 1.0 ของค่าความดันที่วัดห้ววัดความดันน้ำต้องสะอาดไม่อุดตัน รอยต่อระหว่างท่อกับห้ววัดความดันน้ำ และระหว่างท่อกับท่อจะต้องไม่มีรอยรั่วซึม

2.10.2 Settlement

การทรุดตัวของดิน (Settlement) คือ การยุบตัวของดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของมวลดิน จากการได้รับน้ำหนักกดทับ ทำให้น้ำเคลื่อนตัวออกจากมวลของมัน ปริมาตรของมวลดินลดลงจึงเกิดเป็นการทรุดตัว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างที่วางตัวอยู่บนมวลดินนี้โดยมีปริมาณน้ำในดินสูง มักจะพบปัญหาการทรุดตัวมากในดินที่มีดินเหนียว เป็นองค์ประกอบหลักและเป็นดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในดินมาก

การวัดการทรุดตัวในแบบจำลองทำโดยการติดสเกลวัดไว้ที่ข้างแบบจำลอง ซึ่งมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

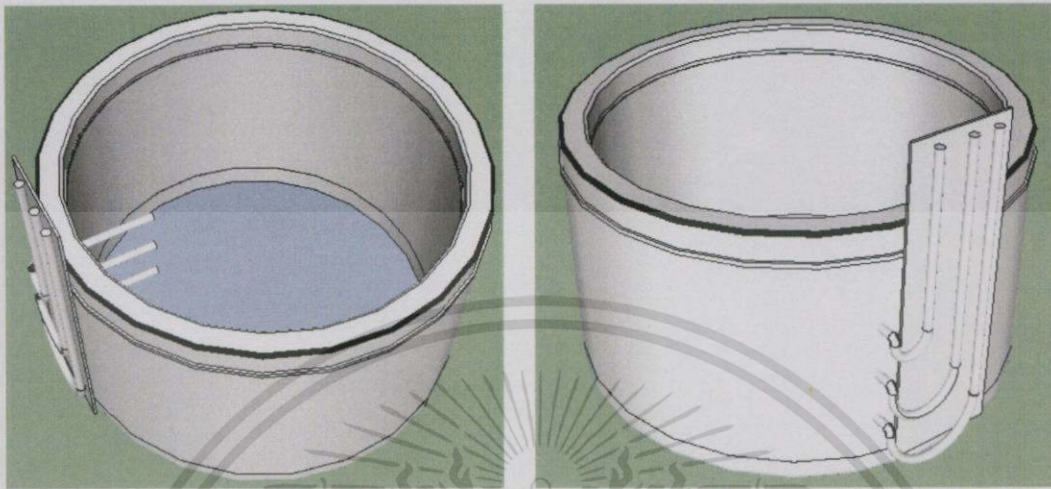


บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน



3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง



รูปที่ 3.1 แบบจำลองขนาดเล็กการทดลอง HVDM

3.2.1 พิจารณาการพลังงานในการบดอัดกระแทก

จากสมการ (2.1) $D = n\sqrt{W \times H}$ จะทำให้เราสามารถทราบถึงอิทธิพลความลึกที่เกิดจากการทุบอัดซึ่งในแปลงทดลองที่ชั้นดินต่างๆ มีปริมาณน้ำในธรรมชาติค่อนข้างสูง ค่าเบื้องต้นที่ใช้คือ

- 1). ต้มน้ำหนัก : ทำมาจากเหล็กน้ำหนัก = 1 กิโลกรัม ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 เมตร
- 2). ความสูงที่ทำการยก = 0.10 เมตร
- 3). ค่าสัมประสิทธิ์ของดิน (ก) ในดินเหนียวจะอยู่ที่ประมาณ 0.3 - 0.5 ให้ใช้ค่า 0.5 แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของดินจะมีการคำนวณย้อนกลับในภายหลังเพื่อเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อน

อิทธิพลความลึกที่เกิดจากการทุบอัด

$$D_{max} = 0.5\sqrt{1 \times 10^{-3} \times 0.10} = 0.005 \text{ เมตร}$$

3.2.2 พิจารณาพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ในการหาพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ สามารถหาได้จากสมการ (2.2)

$$AE = \frac{NWHP}{S^2}$$

1). จำนวนครั้งที่ปล่อยตุ้มน้ำหนักต่อหนึ่งจุด(N)จะดำเนินการทุบอัดต่อจุดในที่นี้จะพิจารณาใช้ 10 ครั้งต่อจุดก่อนจากนั้นเมื่อเสร็จการดำเนินการในรอบแรกแล้วจะนำข้อมูลที่ได้จากในสนามมาพิจารณาเพื่อปรับแก้ค่าในการทุบรอบถัดไป

2). ค่าน้ำหนัก(W) = 1 กิโลกรัม

3). ความสูงที่ยกตุ้มน้ำหนัก = 0.10 เมตร

4). Number of Passes = 1

5). ระยะห่างระหว่างท่อระบายน้ำในแนวตั้ง(S)จะต้องพิจารณาจากตุ้มน้ำหนักเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างการดำเนินการโดยขนาดตุ้มน้ำหนักขนาด 176.7 ตารางเมตร

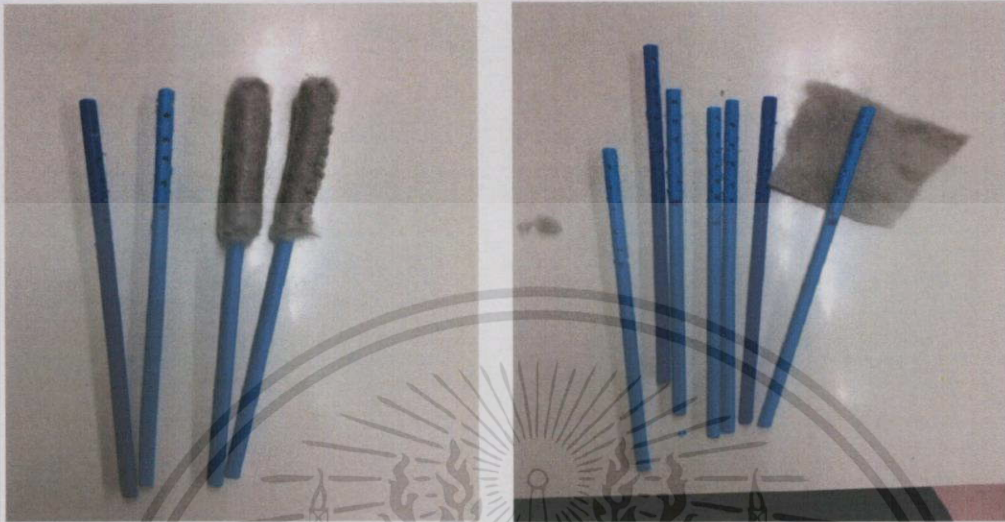
$$AE = \frac{10 \times 1 \times 0.10 \times 1}{\frac{\pi \times 0.225^2}{4}} = 25.15 \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

3.2.3 พิจารณาพลังงานงานของระบบสุญญากาศ

การเลือกใช้พลังงานจากระบบสุญญากาศในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM อาจจะไม่มีการคำนวณในการนำไปใช้ที่ชัดเจนแต่การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกรณีศึกษาในพื้นที่ทดลองจริงที่ผ่านมาพบว่าความดันสุญญากาศ 100 กิโลปาสคาลทำให้ความดันน้ำในดินมีค่าเท่ากับหนึ่งความดันบรรยากาศโดยไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์cavitationsที่มีโอกาสเกิดขึ้นและทำให้ค่ากำลังแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน(Undrain Shear Strength) ที่มีการยุบอัดคายน้ำปกติ (Normal consolidation) เพิ่มจากประมาณ 50 ไปถึง 80 กิโลปาสคาลและกำลังรับน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้นจากประมาณ 15 ไปถึง 25 กิโลปาสคาลอีกกรณีศึกษาที่เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกความดันของสุญญากาศคือการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้แถบระบายน้ำแนวตั้งแบบสังเคราะห์ร่วมกับระบบสุญญากาศและให้น้ำหนักกดทับล่วงหน้า(PVD + Vacuum + Preloading) โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย(AIT) ในพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิซึ่งได้แนะนำค่าเฉลี่ยความดันสุญญากาศ 50 ถึง 60 กิโลปาสคาลที่วัดได้ใน PVD และ 70 ถึง 90 กิโลปาสคาลที่ปัมสุญญากาศ (เมื่อ PVD เทียบเท่ากับท่อระบายน้ำแนวตั้ง)

3.3 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัสดุ - อุปกรณ์

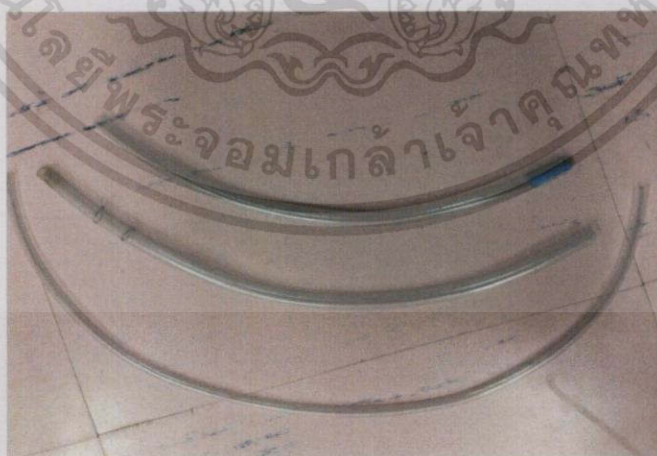
3.3.1 ก้านลูกโป่ง



รูปที่ 3.2 ก้านลูกโป่ง

สำหรับใช้เป็นท่อระบายน้ำในแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.55 เซนติเมตรเจาะรูด้วยสว่านขนาด 3 มิลลิเมตร โดยเว้นระยะห่างจากปลายก้านลูกโป่ง 5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าไประหว่างขั้นตอนดูดด้วยสุญญากาศ

3.3.2 สายยาง

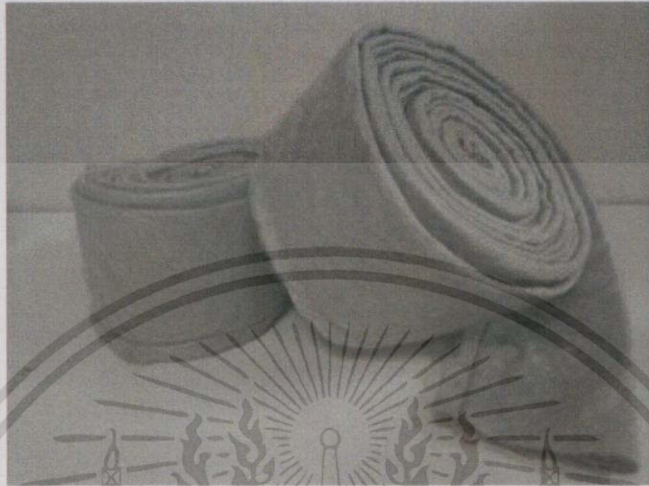


รูปที่ 3.3 สายยาง

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สำหรับเชื่อมต่อระหว่างท่อระบายน้ำในแนวตั้งกับปั๊มสุญญากาศ

3.3.3 แผ่นผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile)

โดยนำมาตัดและเย็บลักษณะคล้ายถุงสำหรับใช้สวมท่อระบายน้ำในแนวตั้งเพื่อป้องกันอนุภาคของเม็ดดินเข้าไปในท่อระหว่างการใส่ระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.4 Geotextile

3.3.4 รายการอุปกรณ์ระบบสุญญากาศ

1. ปั๊มสุญญากาศในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกปั๊มสุญญากาศรุ่น VK-120 Single-Stage Liquid Ring Vacuum Pump มีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง

Model	Capacity (m ³ /h)	Ultimate Pressure (Torr)	Moter Power (kW)	Service Water (L/min.)	Inter Port	Outlet Port	Weight (kg.)
VK-120	120	25	4	18	G1 ½"	G1 ½"	68



รูปที่ 3.5 ปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถังอัดความดัน



รูปที่ 3.6 ถังอัดความดัน

3.3.5 ตุ่มน้ำหนัก



รูปที่ 3.7 ตุ่มน้ำหนัก

ใช้สำหรับทุบตัวอย่างดินโดยใช้ตุ่มน้ำหนักขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้อง 29 อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 แบบจำลองที่ติดตั้งพีโซมิเตอร์



รูปที่ 3.8 แบบจำลองที่ติดตั้งพีโซมิเตอร์(1)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองที่ติดตั้งพีโซมิเตอร์(2)

แบบจำลองในการทดลองนี้เลือกใช้กระดิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.5 เซนติเมตร สูง 29 เซนติเมตรเพื่อให้ตัวอย่างดินในการทดลองอยู่ในระบบปิด เพื่อรักษาอุณหภูมิความชื้นเอาไว้ และทำการติดตั้งพีโซมิเตอร์เข้ากับกระดิกโดยระดับของพีโซมิเตอร์อยู่ที่ 4 เซนติเมตร 9 เซนติเมตร 14 เซนติเมตรจากผิวดินตามลำดับ

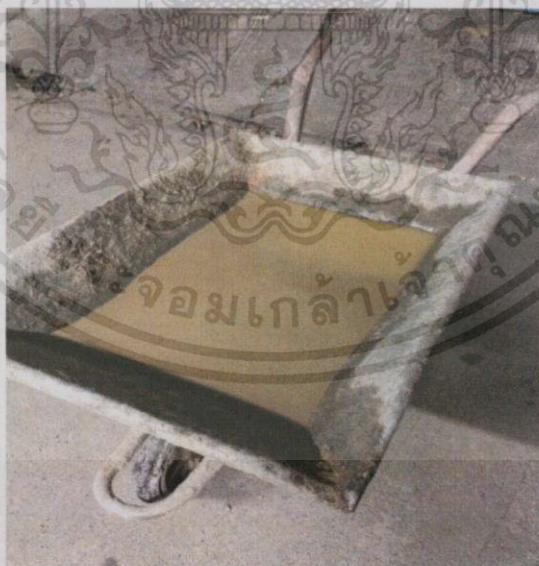
3.3.7 เครื่องปั่นดิน



รูปที่ 3.10 เครื่องปั่นดิน

3.3.8 ทรายอิมตัวด้วยน้ำ

โดยนำทรายเม็ดละเอียดมาแช่น้ำเพื่อให้อิมตัวไปด้วยน้ำ



รูปที่ 3.11 ทรายอิมตัวด้วยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง 31 จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

ขั้นตอนที่ 1 : ทำการเตรียมดินโดยการนำดินที่เตรียมไว้จากระดับความลึก 6 - 10 เมตร มาใส่ในถังที่บรรจุน้ำเพื่อให้ดินเกิดการอ่อนตัวก่อนนำไปปั้นให้ละเอียด

ขั้นตอนที่ 2 : นำดินที่แช่น้ำไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการปั้นให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ระยะเวลาในการปั้น 30 นาทีและเตรียมทรายละเอียดนำมาแช่น้ำเพื่อให้อิ่มตัว

ขั้นตอนที่ 3 : นำทรายอิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เตรียมไว้ใส่แบบจำลองสูง 3 เซนติเมตร และนำดินที่ปั้นเตรียมไว้ใส่ลงในแบบจำลองอีก 15 เซนติเมตร ทำการเสียบท่อในแนวตั้งจำนวน 2 ท่อ ความลึกจากผิวดิน 14 เซนติเมตร และทำแบบเดียวกันทั้ง 3 แบบจำลอง ทิ้งให้ดินเซตตัว 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 4 : นำตัวอย่างดินส่วนหนึ่งมาทำการทดสอบหา

- Atterberg's limit (จุดเปลี่ยนสภาพของมวลดิน)
- Water content (ปริมาณความชื้นในมวลดิน)
- Shear strength (คุณสมบัติรับแรงเฉือนของดิน)

ขั้นตอนที่ 5 : เมื่อปล่อยให้ดินเซตตัวครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการดูดน้ำออกจากมวลดินเป็นเวลา 10 นาที/รอบ ในแบบจำลองที่ 2 กับแบบจำลองที่ 3 และเวลา 30 นาที/รอบ ในแบบจำลองที่ 1 พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดิน เพื่อตรวจสอบปริมาณความชื้นในดิน หลังจากนั้นทิ้งให้ดินเซตตัวอีกครั้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบเช่นเดิม เป็นระยะเวลาประมาณ 13 วัน

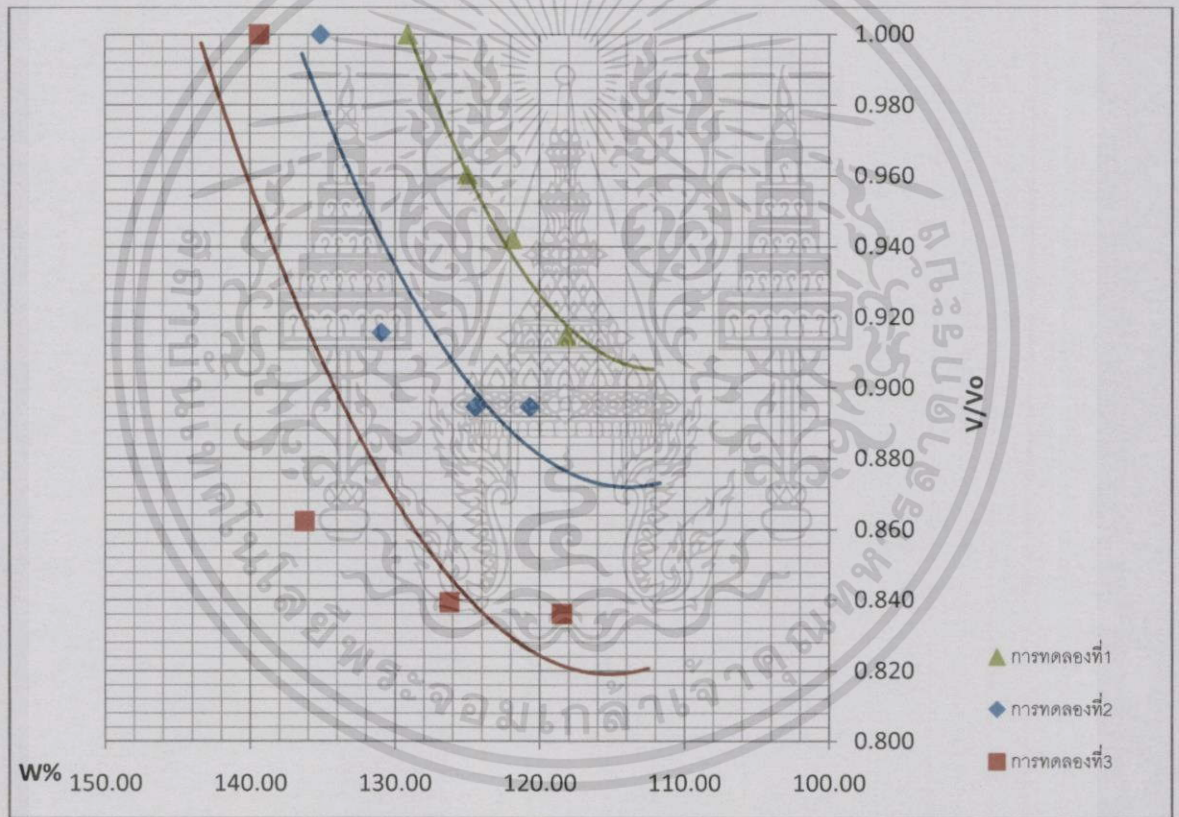
ขั้นตอนที่ 6 : เมื่อดินมี water content เข้าใกล้ Liquid Limit แล้วจะทำการให้พลังงานโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ทำการทุบ 10 ครั้ง ที่ความสูง 0.1 เมตร

บทที่ 4

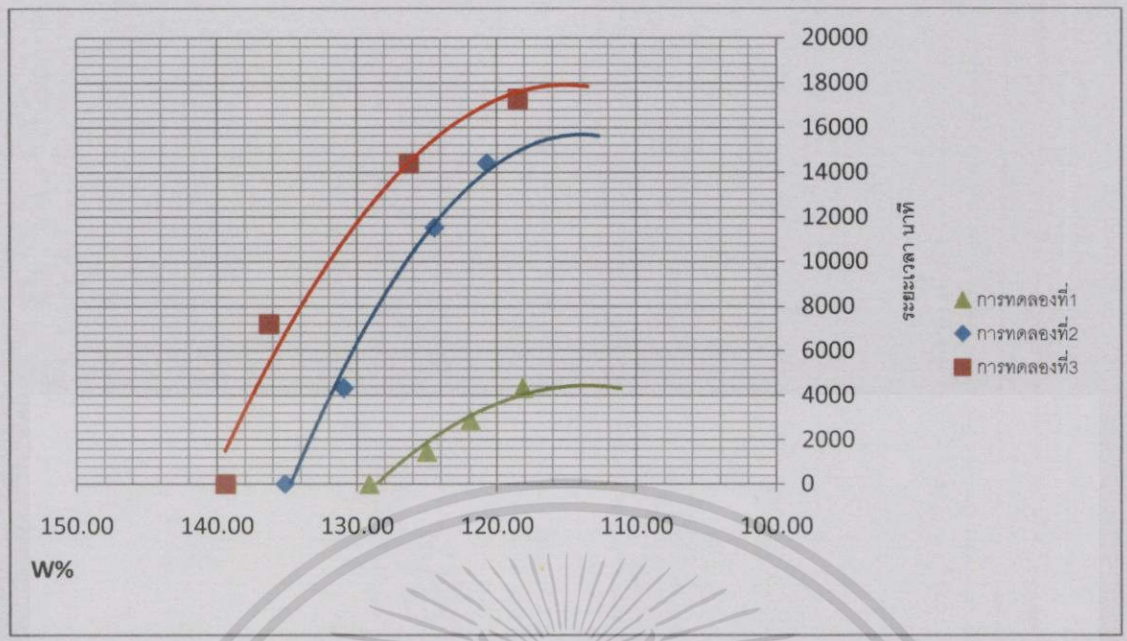
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 ความสัมพันธ์ของการทรุดตัวของดินกับปริมาณความชื้นในดินและเวลา

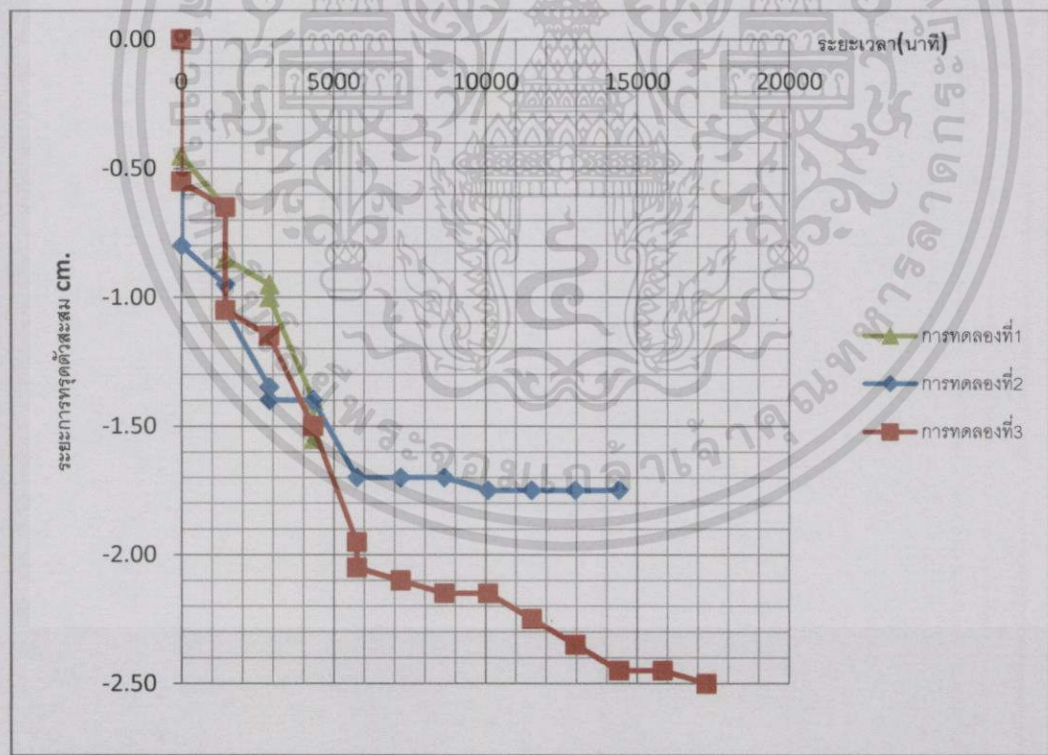
จากการศึกษาการยุบตัวของดิน ดินที่อิ่มตัวเมื่อรับน้ำหนักหรือแรงกดอัด เช่น น้ำหนักที่อยู่เหนือชั้นดินขึ้นไป ปริมาตรของดินจะลดลง แต่เนื่องจากทั้งดินและน้ำที่อยู่ในช่องว่างถือว่าไม่สามารถยุบตัวลงได้ (Incompressible) ดังนั้น ปริมาตรที่เปลี่ยนไปจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินสามารถระบายออกไปได้ ทำให้ช่องว่างเล็กลง เม็ดดินก็จะเคลื่อนตัวเข้าใกล้กัน



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรดินส่วนปริมาตรดินเดิม (V/V₀) กับ ปริมาณความชื้น (W%)



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (W%) กับระยะเวลา



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวสะสมกับระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง 34 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลการทดลอง

การทดลอง	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	ปริมาณความชื้นสุดท้าย		ปริมาตรดิน/ปริมาตรดินเดิม(V/Vo)	ระยะทรุดตัวสะสมสุดท้ายcm.
		W%	เวลา (นาที่)		
1	129	113.000	4426	0.905	-1.55
2	137	114.000	15600	0.872	-1.75
3	144	115.000	17900	0.820	-2.50


การทดลองที่ 1 : เวลาในการดูน้ำ 30 นาที/1ครั้ง แล้วปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 129% ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 4,426 นาที จนดินมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ Liquid Limit 113% มีการทรุดตัวสุดท้าย -1.55 cm.

การทดลองที่ 2 : เวลาในการดูน้ำ 10 นาที/1ครั้ง แล้วปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 137% ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 15,600 นาที จนดินมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ Liquid Limit 114% มีการทรุดตัวสุดท้าย -1.75 cm.

การทดลองที่ 3 : เวลาในการดูน้ำ 10 นาที/1ครั้ง แล้วปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 144% ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 17,900 นาที จนดินมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ Liquid Limit 115% มีการทรุดตัวสุดท้าย -2.50 cm.

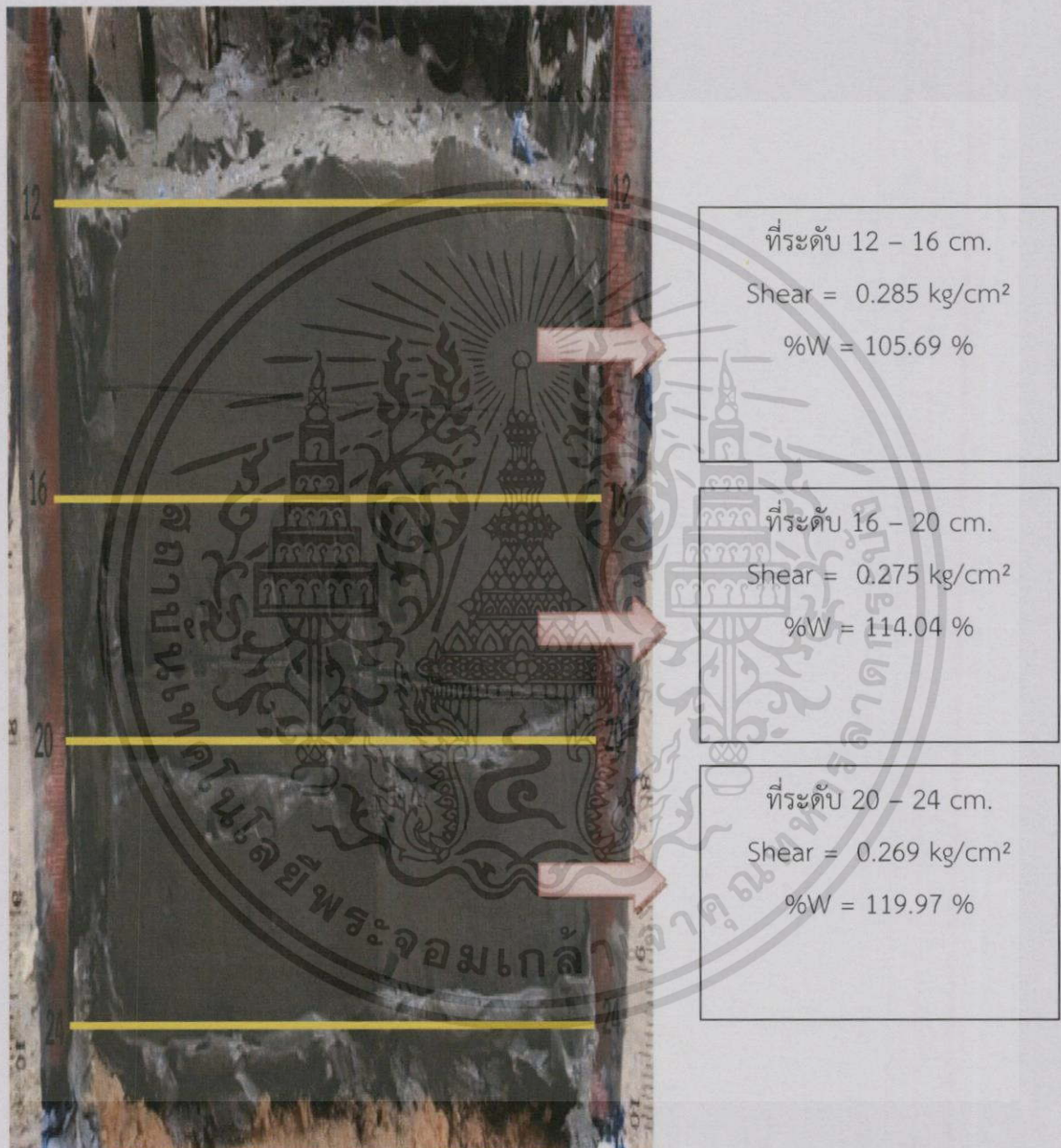
จากการทดลองจะเห็นได้ว่าแม้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นจะต่างกัน 7-8 % แต่ V/Vo เริ่มคงที่เมื่อค่าปริมาณความชื้นเข้าใกล้ค่า Liquid Limit ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถไหลไปด้วยน้ำหนักของดินเองได้ แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการดูน้ำออกจากมวลดินเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นเท่ากับค่า Liquid Limit ในการทดลองที่ 1 นั้นจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 มากเนื่องมาจากมีการเพิ่มนาที่การดูน้ำจาก 10 นาที เป็น 30 นาที ทำให้ปริมาณน้ำที่ออกมามีปริมาณมากกว่า

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและปริมาณความชื้นในดินแต่ละระดับชั้นดินของแบบจำลองที่ 3

รูปที่ 4.4 Model 3	ที่ระดับความลึก จากขอบโมเดล (cm)	Shear Strength (Kg/cm ²)				Water Content (%)			
		1	2	3	Average	1	2	3	Average
	ชั้นบน ที่ระดับ 12 - 16	0.275	0.306	0.275	0.285	105.43	106.01	105.63	105.69
	ชั้นกลาง ที่ระดับ 16 - 20	0.275	0.275	0.275	0.275	115.86	112.49	113.78	114.04
	ชั้นล่าง ที่ระดับ 20 - 24	0.275	0.262	0.269	0.269	119.36	120.45	120.12	119.97

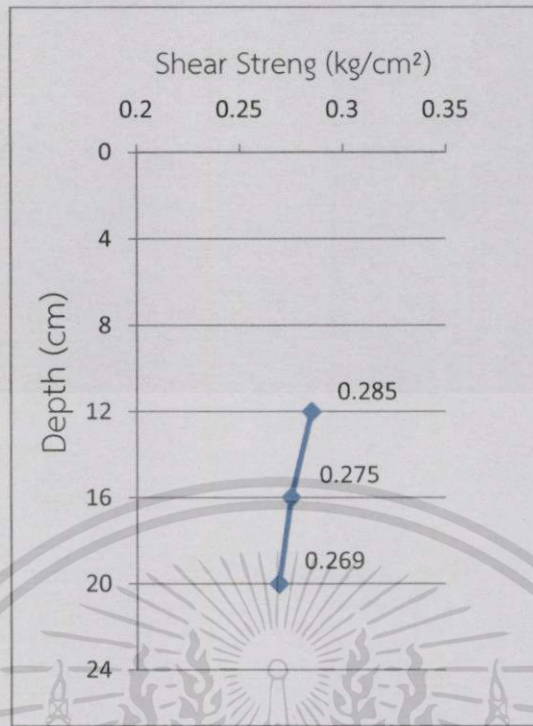
4.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนและปริมาณความชื้นในดินตามแต่ละระดับชั้น (Model 3)

เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเทคนิค HVDM (เฉพาะเค้นน้ำออกจากมวลดิน) จึงทำการตรวจสอบแรงเฉือนและปริมาณน้ำในดินแต่ละระดับชั้น ดังรูปที่ 4.2

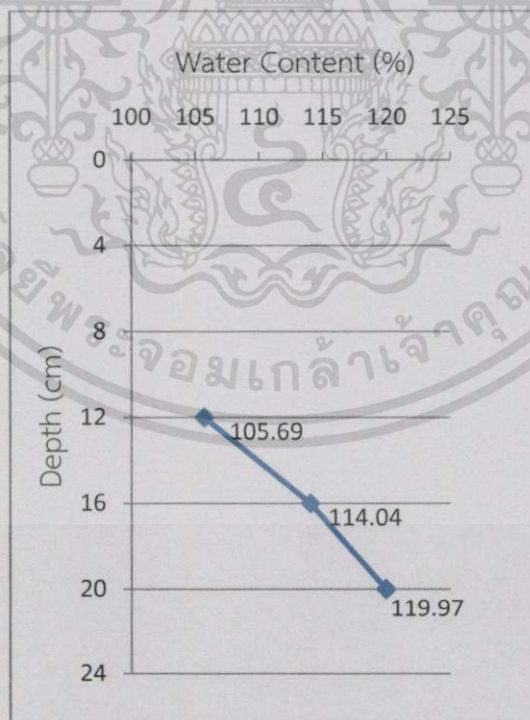


รูปที่ 4.5 แบ่งช่วงระดับชั้นของดิน แบบจำลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 37 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับระดับชั้นความลึกในแบบจำลองที่ 3



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในดินกับระดับชั้นความลึกในแบบจำลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 38 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแรงเฉือนและเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในดินตามแต่ละระดับชั้น

Depth (cm)	Avg. Shear (kg/cm ²)	Avg. Water Content (%)
0	-	-
4	-	-
8	-	-
12	0.285	105.69
16	0.275	114.04
20	0.269	119.97
24	-	-

การทดลองที่ 3 ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ $W\% = 144\%$, Shear Strength = 0.212 ksc. หลังจากได้เริ่มทำการตุดน้ำออกจากมวลดิน 13 รอบ (1 รอบ คือ ตุดน้ำ 10 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง) พบว่าปริมาณความชื้นที่ชั้นล่างนั้นมีค่ามากที่สุดเนื่องมาจากน้ำจากชั้นบนไหลตามช่องว่างลงมาสู่ชั้นล่าง แม้ว่าจะมีการให้พลังงานที่ด้านบนเพื่อให้ช่องว่างบีบตัวให้เล็กลงแล้วก็ตามแต่พลังงานที่ได้ไม่สามารถส่งไปถึงชั้นล่างได้ ดังนั้นชั้นที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าก็จะมี Shear Strength ที่น้อยกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิค High Vacuum Densification Method ในแบบจำลองขนาดเล็กและหาแนวโน้มการทรุดตัวเมื่อค้ำน้ำออกจากมวลดินด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยใช้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีความลึก 6-10 เมตร มาทอนให้เป็นเนื้อเดียวกันและผสมน้ำให้ได้ปริมาณความชื้นประมาณ 140 % จากนั้นนำดินเหนียวที่ถูกรบกวนนี้มาใส่ในแบบจำลองโดยให้ชั้นดินเหนียวมีความหนา 15 เซนติเมตร ปล่ยทิ้งไว้ให้เซตตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงจึงจะเริ่มกระบวนการ High Vacuum Densification Method

ผลที่ได้คือการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ค่าการทรุดตัว (เนื่องมาจากน้ำหนักของตัวดิน) จะเริ่มช้าลงเรื่อยๆ เมื่อค่าปริมาณความชื้นเข้าใกล้ค่า Liquid limit ที่ช่วงระดับดินด้านบนจะมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยน้อยกว่าที่ช่วงระดับดินด้านล่างเนื่องจากการดูดน้ำออกทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินและน้ำที่ตกค้างเหลือจากดินด้านบนไหลลงสู่ช่องว่างดินด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก และค่าปริมาณความชื้นส่งผลให้ Shear Strength ที่ช่วงระดับดินด้านบนมากกว่าช่วงระดับดินด้านล่าง อีกทั้งพลังงานที่ให้ไม่สามารถไปลดช่องว่างที่ช่วงระดับดินด้านล่างได้เพราะอิทธิพลที่ได้น้อยมากและยังเป็นการรบกวนดินอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการทดลองครั้งนี้ดินเหนียวกรุงเทพฯที่นำมาทดลองเป็นดินที่ถูกรบกวนซึ่งค่าการทดลองที่ได้ย่อมมีความแตกต่างจากดินที่ไม่ถูกรบกวน
- การให้พลังงานแก่ดินนั้นอาจไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้เนื่องมาจากตัวอย่างดินเหนียวเกิดการ Punching (แรงต้านทานของดินน้อยมาก)
- ปริมาณน้ำที่ได้แต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของท่อดูดแม้จะมีการออกแบบที่เหมือนกันแต่ในระหว่างการทดลองเมื่อดินเหนียวซึ่งมีขนาดเล็กมากจะมาจับที่ geotextile ทำให้เกิดการขัดขวางเส้นทางของน้ำ
- การตรวจสอบค่าปริมาณความชื้นในระยะทดลองไม่สามารถตรวจสอบในแต่ละระดับชั้นได้ จึงทำให้ได้ค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่านั้น แต่ในระยะแรกและระยะสุดท้ายสามารถหาค่าได้
- จำนวนแบบจำลองในการทำการทดลองมีจำนวนน้อย ทำให้ผลการทดลองที่ได้นั้นอาจจะไม่ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากนักและต้องคำนึงถึงผลกระทบของขนาดแบบจำลองด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Barron, R.A. 1948. Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, Tran. ASCE. Vol.113 : 718-754
- [2] Menard, L. 1975. "Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation." Geotechnique, 25(1), 3-17.
- [3] Hansbo, s. 1979. Consolidation of Clay by Band – Shaped Prefabricated Drains. Ground Eng.5 : 16-25
- [4] Lukas, R.G. 1986. "Dynamic compaction for highway construction." Vol. 1, Design and construction guidelines, Rep. No. FHWA/RD86/133, U.S. Federal Highway Administration, Washington, D. C.
- [5] R. Y. Liang, and S. Xu. 2010. "Innovative Soft Clay Improvements Using Vacuum and Dynamic Compaction," Proc. Indian Geotechnical Conference 2010, GEOtrendz, Vol. III, Invited Papers, IIT Bombay, 133-141.
- [6] R. Y. Liang, and S. Xu. 2012. "High Vacuum Densification Method for Soft Soil Improvement," GeoCongress 2012 © ASCE 2012, 1928-1937.
- [7] นางสาวจิราพร โพธิ์ชัย. 2546. พฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เมื่อปรับปรุงด้วย PVD. มหาคณิศ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ ศรีนิล , รองผู้ช่วยศาสตราจารย์แหลมทอง เหล่าคง-ถาวร และ อาจารย์ชลธิ เร้าบ้านเกาะ. คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์.พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย , 2555
- [9] มณฑิเยร กังคศิเทียม. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 10.นนทบุรี : กรมชลประทาน , 2547
- [10] " ความหมายของดิน. ประเภทของดิน. ดินทางด้านวิศวกรรม. 2556 ."แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%94%E0%B8%B4%E0%B8%99> (1 กันยายน 2556).
- [11] "Atterberg's Limits. Consolidation Test. Permeability Test. Specific Gravity.Hydrometer Analysis. 2552." [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.kkw.rmutr.ac.th> (20 สิงหาคม 2556).

ภาคผนวก ก

แสดงผลการทดสอบ

ตาราง ก-1 แสดงผลการทดลองแบบจำลองที่ 1

ครั้งที่	วัน	ระยะเวลา	ปริมาณน้ำที่ ดูด cm ³	ผลรวมปริมาณ น้ำที่ดูด	ระยะเวลา ทรุดตัว	ds	ปริมาตร ดิน	ปริมาตรดิน/ ปริมาตรดินเดิม	Vout/Vo	W%
1	16/3/2014	0	0	0	6.60	0.00	6520.77	1.000	0.000	129.10
1	16/3/2014	0	185	185	7.05	-0.45	6341.85	0.973	0.028	
2	17/3/2014	1440	0	185	7.25	-0.65	6262.33	0.960	0.028	125.00
2	17/3/2014	1440	80	265	7.45	-0.85	6182.80	0.948	0.041	
3	18/3/2014	2880	0	265	7.55	-0.95	6143.04	0.942	0.041	121.87
3	18/3/2014	2880	100	365	7.60	-1.00	6123.16	0.939	0.056	
4	19/3/2014	4320	0	365	8.00	-1.40	5964.12	0.915	0.056	118.12
4	19/3/2014	4320	20	385	8.15	-1.55	5904.48	0.905	0.059	

ตาราง ก-2 แสดงผลการทดลองแบบจำลองที่ 2

ครั้งที่	วัน	ระยะเวลา	ปริมาตรน้ำที่ดูดได้ cm ³	ผลรวมปริมาณน้ำที่ ดูดได้	ระยะการทรุดตัว (cm.)	dS cm.	ปริมาตรดิน cm ³	ปริมาตรดิน/ ปริมาตรดินเดิม	Vout/Vo	W%
1	20/2/2014	0	0	0.00	6.40	0.00	6600.293	1.000	0.000	135.13
1	20/2/2014	0	50.00	50.00	7.20	-0.80	6282.206	0.952	0.008	
2	21/2/2014	1440	0.00	50.00	7.35	-0.95	6222.565	0.943	0.008	
2	21/2/2014	1440	46.00	96.00	7.45	-1.05	6182.804	0.937	0.015	
3	22/2/2014	2880	0.00	96.00	7.75	-1.35	6063.522	0.919	0.015	
3	22/2/2014	2880	31.00	127.00	7.80	-1.40	6043.642	0.916	0.019	
4	23/2/2014	4320	0.00	127.00	7.80	-1.40	6043.642	0.916	0.019	130.95
4	23/2/2014	4320	37.50	164.50	7.80	-1.40	6043.642	0.916	0.025	
5	24/2/2014	5760	0.00	164.50	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.025	
5	24/2/2014	5760	35.00	199.50	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.030	
6	25/2/2014	7200	0.00	199.50	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.030	
6	25/2/2014	7200	12.50	212.00	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.032	
7	26/2/2014	8640	0.00	212.00	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.032	
7	26/2/2014	8640	6.80	218.80	8.10	-1.70	5924.359	0.898	0.033	
8	27/2/2014	10080	0.00	218.80	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.033	
8	27/2/2014	10080	4.25	223.05	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.034	
9	28/2/2014	11520	0.00	223.05	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.034	124.44
9	28/2/2014	11520	4.00	227.05	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.034	
10	1/3/2014	12960	0.00	227.05	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.034	
10	1/3/2014	12960	4.90	231.95	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.035	
11	2/3/2014	14400	0.00	231.95	8.15	-1.75	5904.479	0.895	0.035	120.68

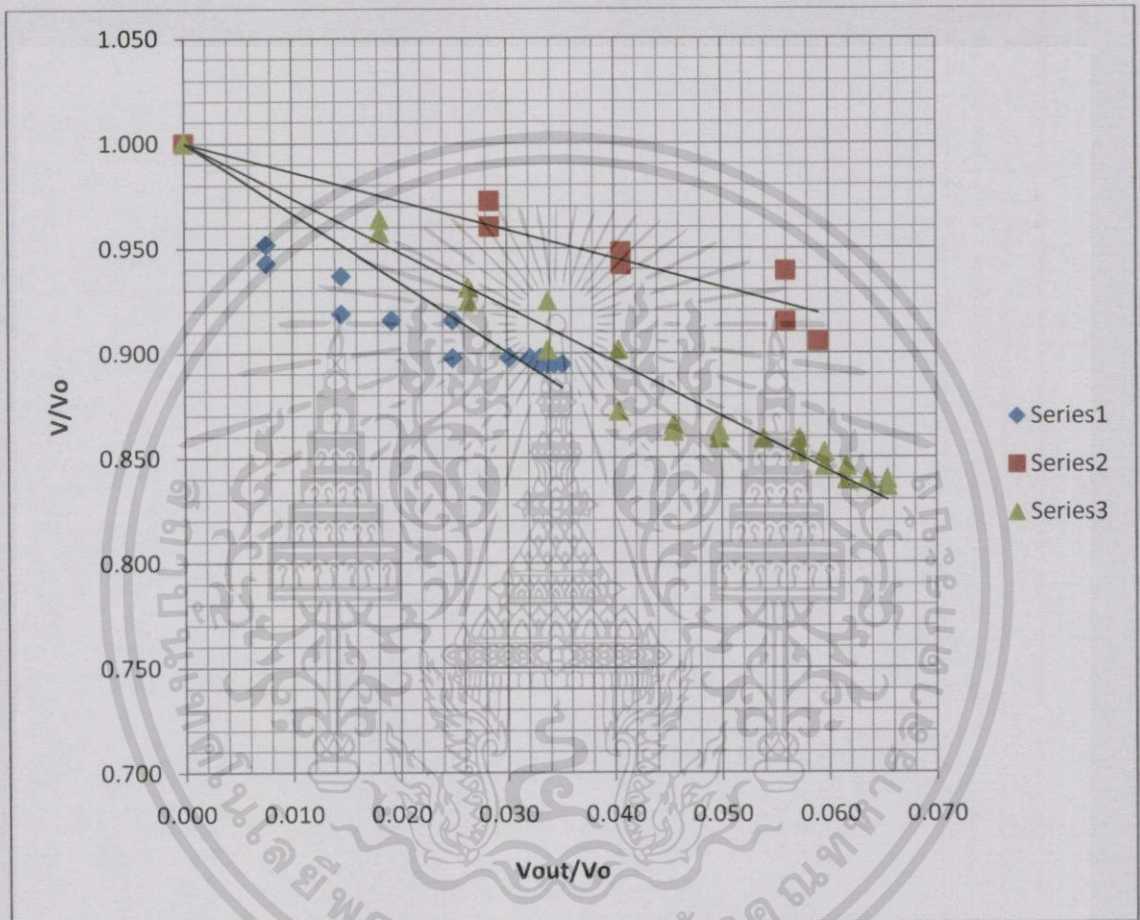
ตาราง ก-3 แสดงผลการทดลองแบบจำลองที่ 3

ครั้งที่	วัน	ระยะเวลา	ปริมาตรน้ำที่ดูดได้ cm ³	ผลรวมปริมาณน้ำที่ดูดได้	ระยะการทรุดตัว (cm.)	dS cm.	ปริมาตรดิน cm ³	ปริมาตรดิน/ปริมาตรดินเดิม	Vout/Vo	W%
1	18/2/2014	0	0	0.00	7.75	0.00	6063.52	1.00	0.000	139.36
1	18/2/2014	0	110.00	110.00	8.30	-0.55	5844.84	0.96	0.018	
2	19/2/2014	1440	0.00	110.00	8.40	-0.65	5805.08	0.96	0.018	
2	19/2/2014	1440	50.00	160.00	8.80	-1.05	5646.03	0.93	0.026	
3	20/2/2014	2880	0.00	160.00	8.90	-1.15	5606.27	0.92	0.026	
3	20/2/2014	2880	45.00	205.00	8.90	-1.15	5606.27	0.92	0.034	
4	21/2/2014	4320	0.00	205.00	9.25	-1.50	5467.11	0.90	0.034	
4	21/2/2014	4320	40.00	245.00	9.25	-1.50	5467.11	0.90	0.040	
5	22/2/2014	5760	0.00	245.00	9.70	-1.95	5288.19	0.87	0.040	
5	22/2/2014	5760	31.00	276.00	9.80	-2.05	5248.43	0.87	0.046	
6	23/2/2014	7200	0.00	276.00	9.85	-2.10	5228.55	0.86	0.046	136.25
6	23/2/2014	7200	26.00	302.00	9.85	-2.10	5228.55	0.86	0.050	
7	24/2/2014	8640	0.00	302.00	9.90	-2.15	5208.66	0.86	0.050	
7	24/2/2014	8640	25.00	327.00	9.90	-2.15	5208.66	0.86	0.054	
8	25/2/2014	10080	0.00	327.00	9.90	-2.15	5208.66	0.86	0.054	
8	25/2/2014	10080	20.00	347.00	9.90	-2.15	5208.66	0.86	0.057	
9	26/2/2014	11520	0.00	347.00	10.00	-2.25	5168.90	0.85	0.057	
9	26/2/2014	11520	14.20	361.20	10.00	-2.25	5168.90	0.85	0.060	
10	27/2/2014	12960	0.00	361.20	10.10	-2.35	5129.14	0.85	0.060	
10	27/2/2014	12960	12.40	373.60	10.10	-2.35	5129.14	0.85	0.062	
11	28/2/2014	14400	0.00	373.60	10.20	-2.45	5089.38	0.84	0.062	126.26
11	28/2/2014	14400	11.50	385.10	10.20	-2.45	5089.38	0.84	0.064	
12	1/3/2014	15840	0	385.10	10.20	-2.45	5089.38	0.84	0.064	
12	1/3/2014	15840	11.50	396.60	10.20	-2.45	5089.38	0.84	0.065	
13	2/3/2014	17280	0.00	396.60	10.25	-2.50	5069.50	0.84	0.065	118.47

ภาคผนวก ข

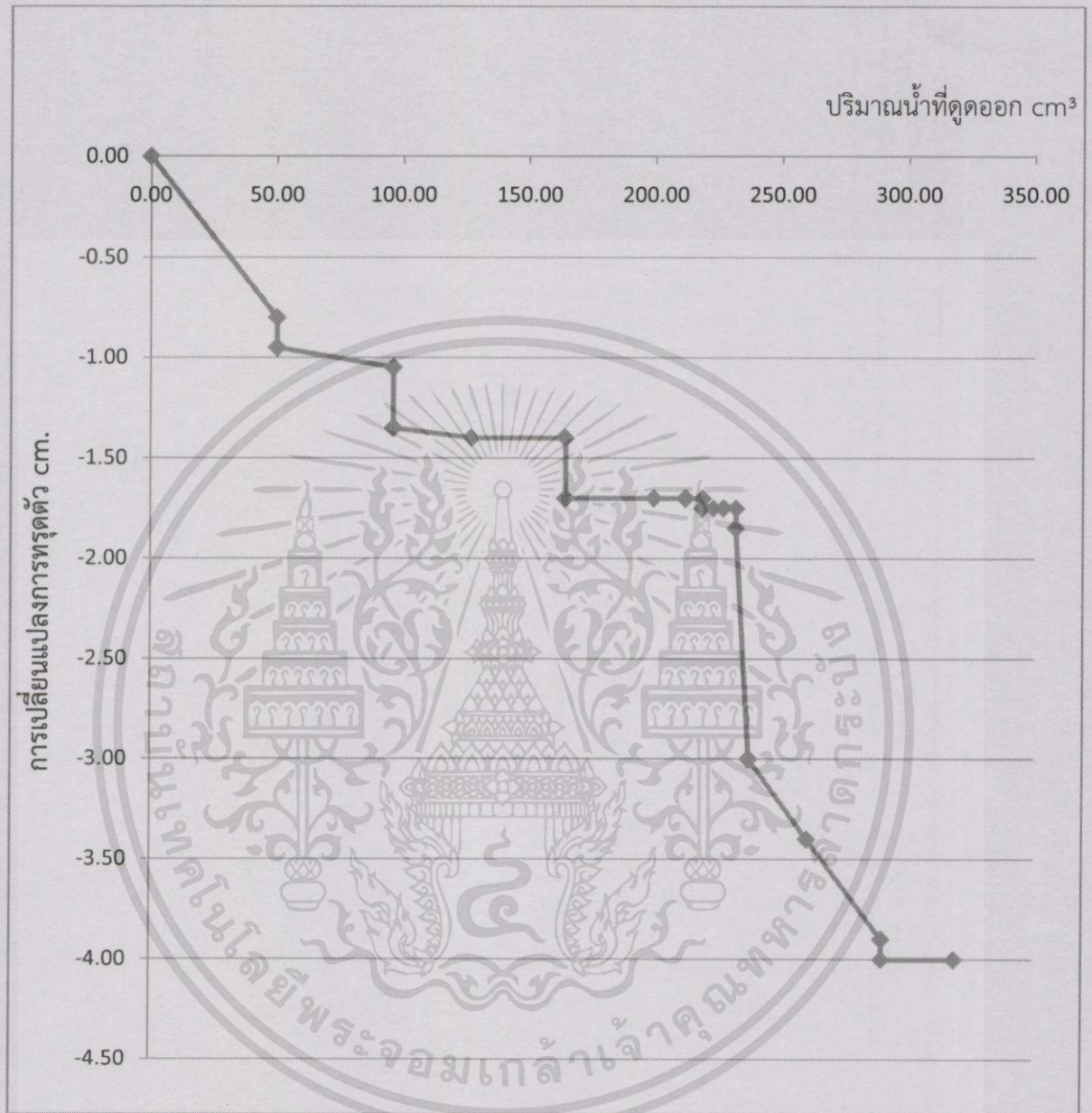
กราฟแสดงผลการทดสอบ

กราฟที่ ข-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out}/V_o กับ V/V_o



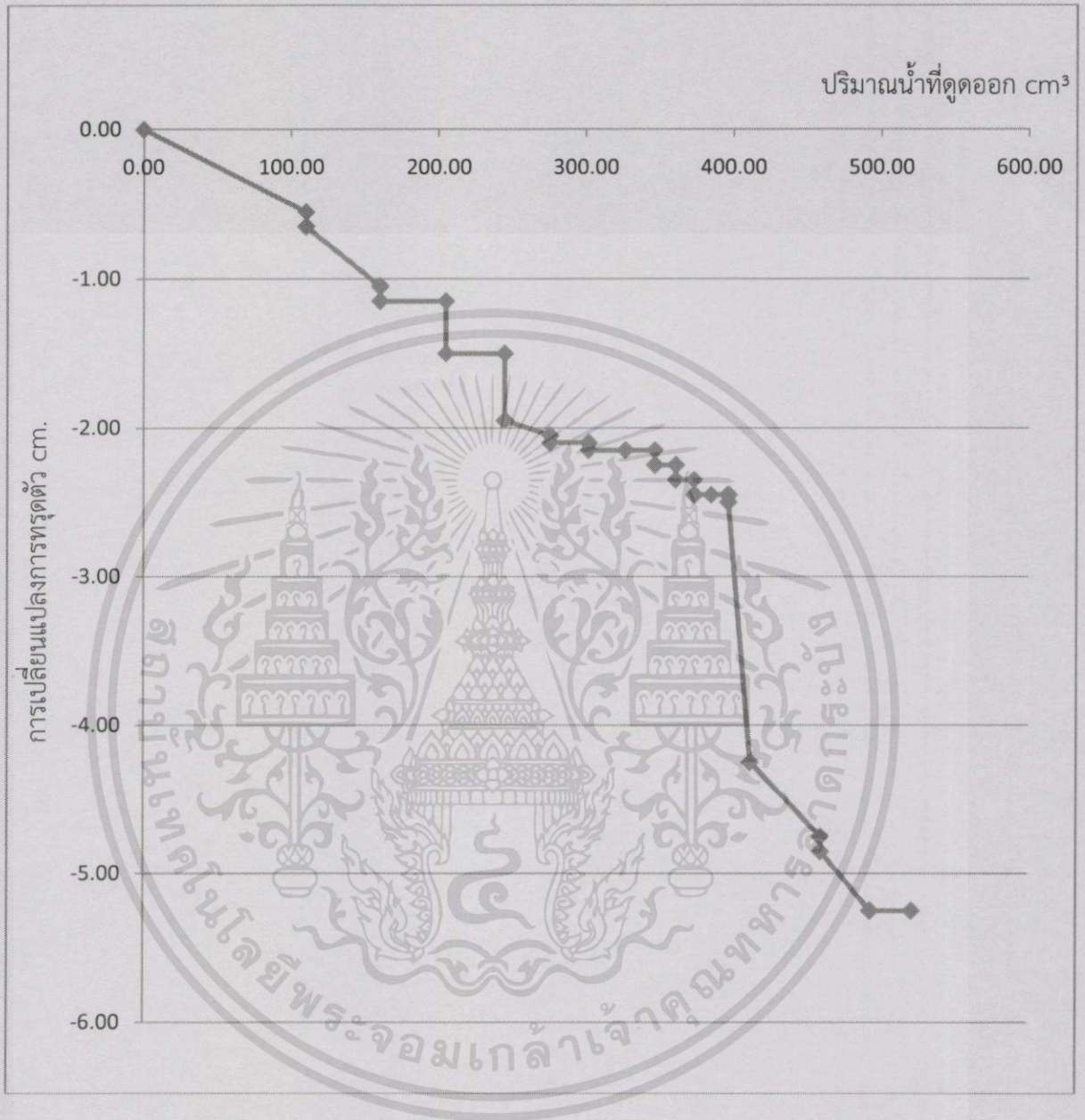
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ ข-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับปริมาณน้ำที่ตุ่ดออก แบบจำลองที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ ข-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับปริมาณน้ำที่ตูดอก แบบจำลองที่ 3



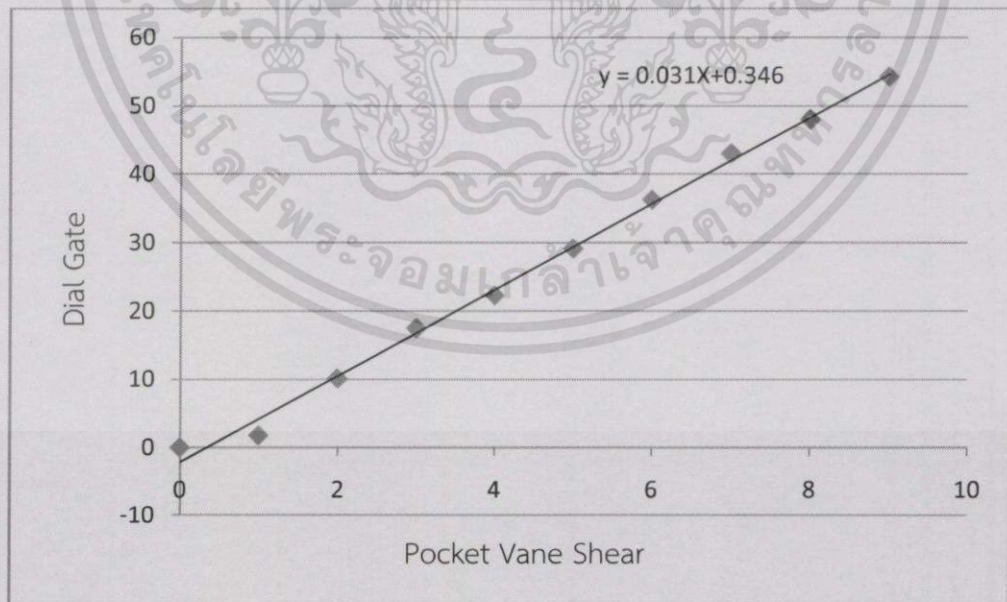
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลสอบเทียบค่า Pocket Vane Shear

ตารางที่ ค-1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Pocket Vane Shear กับ Dial gate

Pocket Vane Shear	Dial Gate				Average
	1	2	3	4	
1	1.8	1.5	1.9	2.0	1.80
2	10.5	8.0	11.0	11.0	10.13
3	14.0	16.0	20.0	20.0	17.50
4	19.0	21.0	24.0	25.0	22.25
5	24.0	27.5	32.0	33.0	29.13
6	32.0	37.0	38.0	38.0	36.25
7	45.0	41.0	42.0	44.0	43.00
8	47.0	45.5	49.5	50.0	48.00
9	52.0	51.0	55.0	59.0	54.25

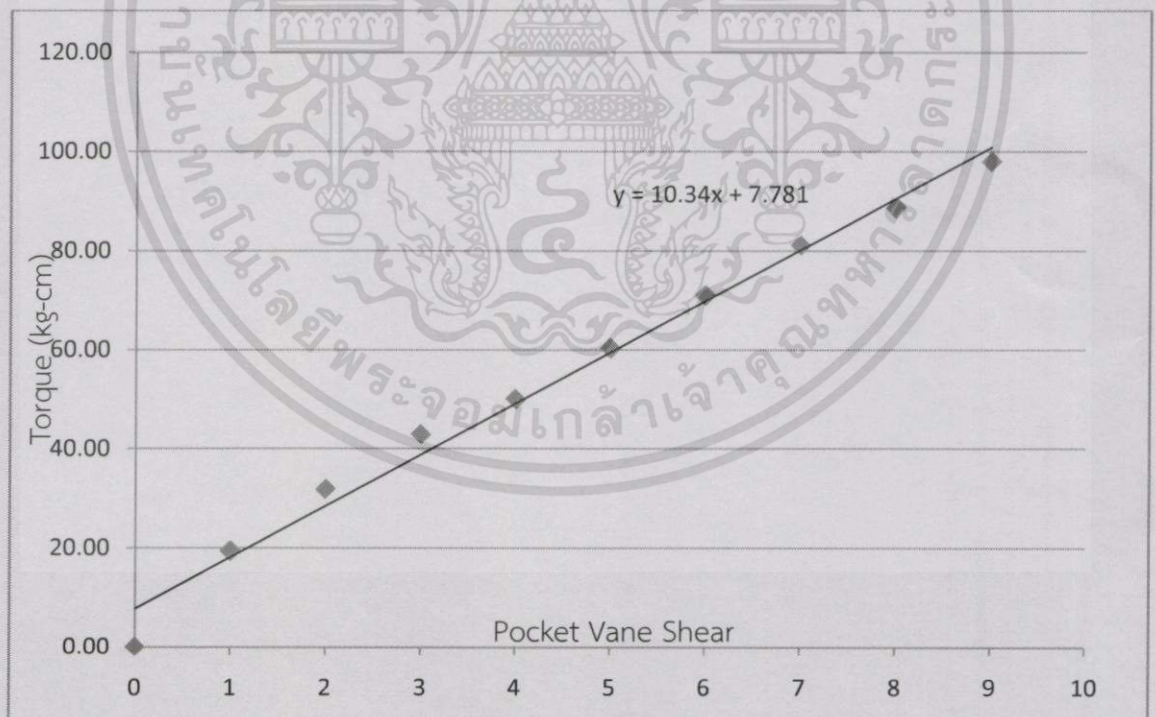


กราฟที่ ง-1 สมการ Dial Gate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Pocket Vane Shear กับ Torque (Moment)

Pocket Vane Shear	Dial Gate (kg) $Y=0.031X+0.346$	Torque (Moment) (kg-cm) $L = 48.30 \text{ cm}$
1	0.40	19.41
2	0.66	31.88
3	0.89	42.91
4	1.04	50.03
5	1.25	60.33
6	1.47	70.99
7	1.68	81.10
8	1.83	88.58
9	2.03	97.94



กราฟที่ ง-2 สมการ Torque (Moment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 การคำนวณหาค่า Shear Strength (Pocket Vane Shear)

สมการ Shear Strength (kg/cm ²)	สมการ Torque (Moment) (kg-cm)	หมายเหตุ
$\frac{T}{\pi \left[\frac{d^2 h}{2} + \frac{d^3}{6} \right]}$	$y = 10.34x + 7.781$	เมื่อ ใช้ใบพัดประเภทดินเหนียว อ่อน Range = 0.2 kg/cm ² d = 4.766 cm h = 0.514 cm

