

การศึกษาสมอรับแรงดึงด้วยแบบจำลอง

A Physical Modeling Study of

Pullout Capacity of Plate Anchor in Sand



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาสมอรับแรงดึงด้วยแบบจำลอง

A Physical Modeling Study of

Pullout Capacity of Plate Anchor in Sand



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

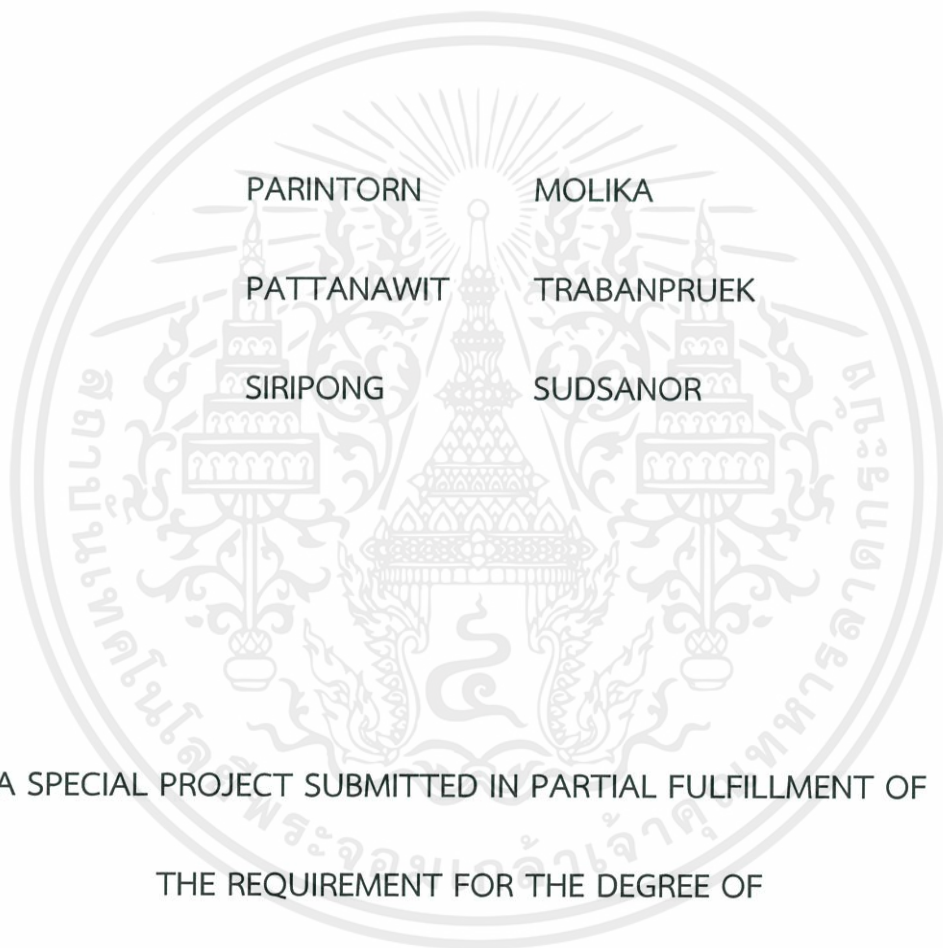
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A PHYSICAL MODELING STUDY OF  
PULLOUT CAPACITY OF PLANTE ANCHOR IN SAND



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การทำนายสภาพภูมิอากาศด้วยแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกบนพื้นที่ภาคกลาง  
ของประเทศไทย

ANN-GCMs Climate Variables Forecast Over Central Thailand

นักศึกษา นายปรินทร์ โมลิกา รหัสประจำตัว 58010748

นายพัฒนวิทย์ ตระบันพฤษ รหัสประจำตัว 58010861

นายสิริพงษ์ สุดเสนาะ รหัสประจำตัว 58011321

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์	
อ.อุษะ ศิริแก้ว	
ดร.ศลิษา ไชยพุทธ	
ดร.ประทีป หล่อประเสริฐ	
ดร.วิรุฬห์ คำชุม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

## การศึกษาสมอรับแรงดึงด้วยแบบจำลอง

นายปรินทร์ โมลิกา รหัสประจำตัว 58010748

นายพัฒนวิทย์ ตระบันพฤกษ์ รหัสประจำตัว 58010861

นายสิริพงษ์ สุดเสนาะ รหัสประจำตัว 58011321

ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์

ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคทางด้านการก่อสร้างเกี่ยวข้องกับดินมากขึ้น ทำให้มีความต้องการที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบป้องกันการพังทลายของดิน ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น วิธีลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินมีหลายวิธี เช่น การเพิ่มระยะฝังของกำแพงกันดิน การใช้สมอยึด การใช้ระบบค้ำยันการจัดเรียงตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดในรูปแบบต่างๆ เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาการป้องกันการพังทลายของโครงสร้างดินด้วยวิธีสมอยึด ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของแผ่นสมอ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 9x10, 9x15 และ 9x20 เซนติเมตร โดยทำการเพิ่มตัวแปรในการทดลองด้วยการฝังในระยะความลึกที่แตกต่างกัน โดยจะทำการฝังสมอในระยะความลึกที่ 5 และ 8 เซนติเมตร เนื่องจากการในการฝังที่ความลึกแตกต่างกันจะส่งผลในการต้านทานการยกตัวของสมอ และเมื่อมีระยะฝังที่ลึกขึ้นก็จะทำให้สามารถมองเห็นแนวการยกตัวและมองเห็นหน้าตัดการพังทลายของหน้าดินได้ง่ายยิ่งขึ้น

## A Physical Modeling Study of Pullout Capacity of Plate Anchor in Sand

PARINTORN MOLIKA                      Student ID.    58010748

PATTANAWIT TRABANPRUEK    Student ID.    58010861

SIRIPONG SUDSANOR                      Student ID.    58011321

Asist.Prof.Dr.Thanadol Kongsomboon

Academic Year 2018

### ABSTRACT

Nowadays, The development of construction techniques associated with more soil. The requirement to improve system performance, prevent soil erosion. more effective How to reduce the movement of There are many ways to structure the soil. The increase of buried underground, the use of anchor, the use of bracing system. Arrangement of the underground type sheet pile in various forms. etc. In this study, it was conducted. To prevent erosion of soil structure by anchor. With a physical model. By changing the size of the cut sheet anchor. The cross-sectional area of 9x10, 9x15 and 9x20 cm. By adding a variable in an experiment with embedding in depth different. It will anchor buried in the depths of 5 and 8 cm. Because embedded in different depth can result in resistance of the lifting anchor. And is buried deeper, it makes visible the vertical lift and a cross section of the erosion of soil more easily.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผศ.ดร.ธนา ดล คงสมบูรณ์ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษากับคณะผู้จัดทำ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงงาน รวมถึงการให้กำลังใจและความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายปรินทร์ โมลิกา  
นายสิริพงษ์ สุดเสนาะ  
นายพัฒนวิทย์ ทรະบันพฤกษ์

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วิธีการหาค่ากำลังรับแรงกดประลัยของฐานราก.....	3
2.2 ทฤษฎีแรงดันดิน.....	9
2.3 หน่วยแรงในมวลดิน.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง.....	27
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล.....	40
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	43
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา.....	43
4.2 ผลการศึกษากำลังแรงถอนสมอในชั้นทรายจากแบบจำลอง.....	47
4.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	74
ภาคผนวก ง.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 Failure mechanism ของ Prandtl มุม $\Psi$ สังเกตว่ามุม มีค่าเท่ากับ $45 + \frac{\phi}{2}$ .....	3
รูปที่ 2.2 Failure Mechanism ของ Terzaghi จะสังเกตเห็นว่ามุม $\Psi$ มีค่าเท่ากับ $\phi$ .....	5
รูปที่ 2.3 Freebody diagram ของฐานรากที่ฝังอยู่ในดิน จากสมดุลของแรงลัพธ์ในแนวตั้งจะได้.....	8
รูปที่ 2.4 แรงดันดินด้านข้างซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน.....	9
รูปที่ 2.5 แรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟ.....	10
รูปที่ 2.6 การวิบัติของดินในสถานะแอกทีฟ.....	10
รูปที่ 2.7 Mohr circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสถานะแอกทีฟ.....	11
รูปที่ 2.8 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟ.....	12
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดแรงดันดินแบบแพชซีฟ.....	12
รูปที่ 2.10 การวิบัติของดินในสถานะแพชซีฟ.....	13
รูปที่ 2.11 Mohr circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสถานะแอกทีฟ.....	13
รูปที่ 2.12 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสถานะแพชซีฟ.....	14
รูปที่ 2.13 รอยแยกเนื่องจากหน่วยแรงตั้งซึ่งเกิดในดินหลังกำแพง.....	15
รูปที่ 2.14 รอยแยกเนื่องจากหน่วยแรงตั้งในดินเหนียว.....	15
รูปที่ 2.15 รูปแบบของสมอด้านแรงตั้ง.....	16
รูปที่ 2.16 Non-interference of zone for anchored wall.....	17
รูปที่ 2.17 สถานะหน่วยแรงในกรณี True triaxial.....	17
รูปที่ 2.18 สถานะหน่วยแรงในกรณีของ triaxial.....	18
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างปัญหาสมมาตรรอบแกนหมุน.....	19
รูปที่ 2.20 การคำนวณหาหน่วยแรงในดินเนื่องจากน้ำหนักกดทับ (Overburden pressure).....	20
รูปที่ 2.21 หลักการหน่วยแรงประสิทธิผล.....	21
รูปที่ 2.22 แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผล.....	22
รูปที่ 2.23 ความคลาดเคลื่อนเมื่อสมมติให้ดินมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงพลาสติก.....	23
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเมื่อทดสอบโดยการดึง.....	24
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของดินและการเลือกใช้ค่าโมดูลัสอีลาสติก.....	25
รูปที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง.....	28

## สารบัญญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน.....	29
รูปที่ 3.3 ตู้บให้การหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน.....	30
รูปที่ 3.4 ชั่งน้ำหนักเพื่อ calibrate pycnometer.....	31
รูปที่ 3.5 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความที่ใช้งาน ถ่วงจำเพาะ.....	31
รูปที่ 3.6 การทดสอบDirect Shearเพื่อหามุมเสียดทานภายใน.....	33
รูปที่ 3.7 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ.....	34
รูปที่ 3.8 ทรายตัวอย่าง และ ทรายสี.....	36
รูปที่ 3.9 ชุดสมอที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
รูปที่ 3.10 ตู้ที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
รูปที่ 3.11 ชุดรอกที่ใช้ในการดึงสมอ.....	37
รูปที่ 3.12 ตู้ที่ทดสอบที่ได้ทำการติดตั้งชุดรอก และ Dial Gauge สำหรับวัดการยกตัว.....	38
รูปที่ 3.13 การโรยทรายสีเพื่อหาลักษณะการยกตัว.....	39
รูปที่ 3.14 ตั้งกล้องเพื่อหาแนววิบัติ.....	39
รูปที่ 3.15 การวางสมอติดกระจกเพื่อหาดูการยกตัว.....	40
รูปที่ 3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำหนักที่ใช้ถ่วง กับระยะเวลาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน.....	41
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการการประมาณหาจุดที่เริ่มเข้าสู่การวิบัติ.....	42
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์แสดงการปรับแก้ค่าน้ำหนักของขวดแก้วกับน้ำ.....	44
รูปที่ 4.2 แสดงการปล่อยทรายอิสระที่ชั้นความสูง.....	45
รูปที่ 4.3 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear.....	45
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดลงบนแผ่นสมอทดสอบ และระยะเวลาการเอนตัว.....	46
รูปที่ 4.5 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร.....	48

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร.....	48
รูปที่ 4.7 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร 8 เซนติเมตร.....	49
รูปที่ 4.8 แสดงการยกตัวเริ่มแรกของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร โดยใช้น้ำหนักเริ่มต้นที่ 700 กรัม.....	49
รูปที่ 4.9 แสดงแผ่นสมอที่ถูกกระทำด้วยแรงถอน และมีการเคลื่อนตัวขึ้นจนมีจันเห็นลักษณะได้ชัดเจน.....	50
รูปที่ 4.10 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 5.....	50
รูปที่ 4.11 รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร.....	51
รูปที่ 4.12 รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอ และระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 5 และ 8 เซนติเมตร.....	51
รูปที่ 4.13 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 81.2 องศา.....	52
รูปที่ 4.14 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 82.7 องศา.....	53
รูปที่ 4.15 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 82.7 องศา.....	53
รูปที่ 4.16 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 80 องศา.....	54
รูปที่ 4.17 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 78.1 องศา.....	55
รูปที่ 4.18 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร.....	55
รูปที่ 4.19 ลักษณะแนววิบัติ.....	56
รูปที่ 4.20 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร.....	56
รูปที่ 4.21 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร.....	57
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ของแรงถอน ที่กระทำต่อสมอกับระยะยกตัวแผ่นสมอ.....	58
รูป ง.1 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 20x9 cm.....	78
รูป ง.2 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 15x9 cm.....	78
รูปที่ ง.3 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 20x9 cm.....	79
รูปที่ ง.4 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 15x9 cm.....	79



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนปลอดภัยต่ำสุดที่แนะนำสำหรับฐานรากตื้น Vesic (1975), คัดลอกจาก (Fang 1990).....	7
ตารางที่ 2.2 ค่า Coefficient of earth pressure at rest.....	9
ตารางที่ 2.3 สรุปสมการที่ใช้คำนวณแรงดันดินด้านข้าง.....	14
ตารางที่ 2.4 การอธิบายปริมาณ scalar, vector และ tensor (Schofield and Wroth) .....	18
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่าง Soil model อย่างง่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	24
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดผลของเม็ดดิน.....	43
ตารางที่ 4.2 ข้อมูล Calibration of Pycnometer.....	43
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย.....	44
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลอง Direct Shear.....	45
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus.....	46
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาระนาบพิบัติของดินบริเวณเหนือ กำแพงกันดินโดยมีทิศทางการทำมุมกับแนว horizontal .....	54
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลผลการศึกษาจุดพิบัติของแผ่นสมอโดยวิธี Graphical Method.....	57
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าระยะยกตัวสูงสุดของแผ่นสมอและค่าแรงถอนสูงสุดของแผ่นสมอ.....	59
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองและค่า Overburden จากทราย.....	60

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากร ส่งผลให้มนุษย์เกิดความต้องการมากยิ่งขึ้น สิ่งปลูกสร้างต่างๆถือเป็นปัจจัยพื้นฐานจึงถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ สำหรับสิ่งปลูกสร้างนั้นการออกแบบฐานรากให้ปลอดภัยถือเป็นหัวใจหลัก ซึ่งความเหมาะสมในการก่อสร้างและความประหยัดก็เป็นปัจจัยสำคัญที่วิศวกรต้องพิจารณาควบคู่กันไปด้วย โดยทั่วไปนั้นการออกแบบฐานรากจะขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดิน ขนาดของน้ำหนักที่ต้องถ่ายลงดิน วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง วิธีการก่อสร้าง และเครื่องจักรเครื่องมือในการทำงานและยังรวมถึงถึงลักษณะความจำกัดของเขตก่อสร้างและพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งฐานรากมักจะถูกออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็ง ดังนั้นในกรณีที่ฐานรากมีการรับแรงยกตัว(Uplift Force)จะเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีฐานรากแผ่นนั้นจะสามารถต้านการยกตัวได้เท่ากับน้ำหนักที่กดข้างบนเท่านั้นซึ่งอาจจะต้องมีการออกแบบสมอยึดกับชั้นดินหรือชั้นหินที่แข็งแรงใต้ฐานรากเพื่อความปลอดภัย แต่เนื่องจากดินนั้นเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมและคุณสมบัติไม่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่มีสูตรสำหรับการออกแบบฐานรากที่รับแรงยกที่ตายตัว ทำให้การคำนวณค่าสำหรับออกแบบสมอยึดนั้นให้ได้ค่าที่แม่นยำถือว่าสามารถทำได้ยาก จึงต้องอาศัยการศึกษาพฤติกรรมของสมอยึดขณะที่มีแรงยกมากกระทำ รวมถึงลักษณะการพิบัติของดินเหนื่อสมอยึดและบริเวณรอบข้าง โดยเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการศึกษาก็เลือกใช้แบบจำลอง เพราะสามารถประยุกต์ใช้ได้ในรูปแบบอื่นๆ อีกทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการพิบัติของสมอยึดฐานรากที่มีแรงยกมากกระทำโดยใช้แบบจำลอง ซึ่งโดยทั่วไปนั้นรูปแบบการพิบัติของสมออาจจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะชั้นดิน , ความลึก , ขนาดสมอ หรือปัจจัยอื่นๆ(Manfred R.Hausmann,1990) ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาการพิบัติของสมอในรูปแบบต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยข้างต้นหรือปัจจัยอื่นๆ สำหรับเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาในการออกแบบหรือเลือกใช้ฐานรากที่เสริมสมอยึดสำหรับรับแรงยก

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของสมอยึดในชั้นทราย ซึ่งถูกกระทำโดยแรงยก
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสมอยึด และการพิบัติของดินบริเวณใกล้ระนาบของสมอ
- 3)
- 4) เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงยกตัวของสมอยึดซึ่งได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากทฤษฎีในรูปแบบต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาด .....
- 2) ศึกษาโดยดินตัวอย่างเป็นทรายแห้งที่ผ่านการอบซึ่งมีขนาดคละอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 10 และเบอร์ 50
  - 2.1) ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) เพื่อหาขนาดคละของทราย
  - 2.2) ใช้วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity of soil) เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของทราย
  - 2.3) ใช้การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) เพื่อหามุมเสียดทานภายใน( $\phi$ ) ของทราย
- 3) ทรายในแบบจำลองเป็นการใช้อุปกรณ์ปล่อยให้ตกอย่างอิสระโดยทรายจะสมำเสมอตลอดหน้าตัด
- 4) สำหรับแบบจำลองสมอ ใช้เป็นแผ่นเหล็กขนาด ..... ที่ ซึ่งบนแบบจำลองขนาด ..... มีรอกสำหรับถ่วงน้ำหนัก
- 5) ใช้ dial gauge ..... เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระยะการเคลื่อนตัวของสมอ
- 6) ไม่พิจารณาผลจากแรงดันน้ำ

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วิธีการหาค่ารับแรงกดประลัยของฐานราก (Ultimate bearing capacity)

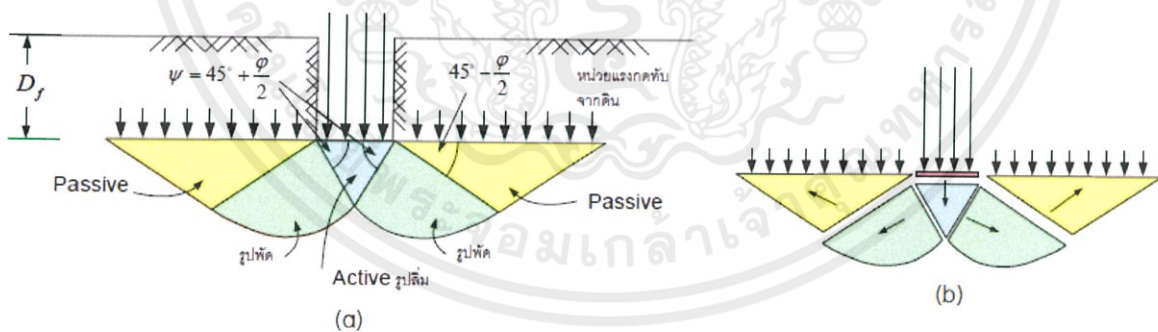
##### 2.1.1 วิธีคำนวณจาก Bearing capacity equation เมื่อแรงกระทำไม่เยื้องศูนย์

Bearing capacity ดินคือความสามารถของดินที่จะรับแรงกระทำจากฐานรากได้โดยดินใต้ฐานรากไม่วิบัติ ซึ่งเปรียบเทียบกับคานที่รับน้ำหนักได้โดยไม่วิบัตินั่นเอง จากการทดสอบกตฐานรากจนวิบัติจากนั้นตรวจสอบแนวการวิบัติพบว่าดินใต้ฐานรากจะถูกเฉือนขาดเป็นรูปโค้ง ซึ่งดินที่ถูกเฉือนขาดนี้จะดันผิวดินด้านข้างฐานรากให้สูงขึ้น และโดยทั่วไปแล้วฐานรากจะวิบัติไปในข้างใดข้างหนึ่งเท่านั้น แรงต้านทานของดินจะได้อาจมาจากการประมาณแนวการวิบัติของดินด้วยสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งในขณะนี้ยังไม่มีสมการคณิตศาสตร์ใดใช้หาแนวการวิบัติได้อย่างแม่นยำ แต่ก็ได้มีการสร้างสมการที่ใช้ประมาณแนวโค้งของการวิบัติซึ่งสามารถใช้ประมาณกำลังแบกทานของดินได้พอเพียง รูปฐานรากที่มักจะนิยมใช้กันได้แก่

1. ฐานรากที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก นิยมใช้รองรับกำแพง
2. ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวเท่ากับความกว้าง
3. ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวด้านไม่เท่ากัน โดยมีความยาวแตกต่างจากความกว้างไม่มาก

##### 2.1.2 สมการ Bearing capacity ของ Prandtl

Prandtl ได้พัฒนาสมการเพื่อคำนวณ Bearing capacity ของวัสดุที่เป็นโลหะโดยมีกลไกการวิบัติแสดงดังรูปที่ 1 และสมการที่ 1 คือสมการที่ใช้คำนวณ bearing capacity



รูปที่ 2.1 Failure mechanism ของ Prandtl มุม  $\Psi$  สังเกตว่ามุม มีค่าเท่ากับ  $45 + \frac{\phi}{2}$

$$(q_u)_{Prandtl} = cN_c + qN_q \quad 2.1$$

โดย

$$N_q = \exp^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$c = Cohesion$

$\varphi = Friction\ angle$

สมการที่ 1 ไม่ได้คิดผลเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุเข้าไปในสมการด้วย ซึ่งในกรณีของวัสดุที่มีกำลังสูงเช่น โลหะจะมีค่าผิดพลาดไม่มากเนื่องจาก  $q_{ult}$  ส่วนใหญ่ได้ มาจากกำลังของโลหะ สำหรับกรณีของวัสดุที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่า โลหะมากเช่นดินได้มีผู้พัฒนาสมการขึ้นมา

### 2.1.3 สมการ Ultimate bearing capacity ของ Terzaghi

ถ้าเป็นวัสดุที่มีกำลังต่ำกว่าโลหะมาก น้ำหนักของดินจะมีผลต่อ Bearing capacity ด้วย ในปี 1943 Terzaghi ได้พัฒนาสมการ bearing capacity โดยใช้ค่าสมการของ Prandtl ในหัวข้อที่แล้วมาพัฒนาต่อ โดย Terzaghi ได้เพิ่มส่วน bearing capacity ที่ได้จากน้ำหนักของดินเข้าไปในสมการที่ 1 และ Terzaghi ได้สมมุติให้มุม  $\Psi = \varphi$  แทนที่  $\Psi = 45 + \varphi/2$  สมการที่ 2 คือสมการ bearing capacity ที่เสนอโดย Terzaghi สำหรับฐานรากตื้นที่มีผิวไม่เรียบ (Rough shallow foundation) โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- เกิดลิ่มรูปสามเหลี่ยมใต้ฐานรากซึ่งก่อให้เกิดสภาวะแอกทีฟที่เพิ่มขึ้นในดินโดยมุม  $\varphi$  เท่ากับ  $\Psi$
- ลิ่มรูปสามเหลี่ยมนี้ดันดินออกทางด้านข้างก่อให้เกิดแรงสภาวะแพสซีฟเพิ่มขึ้นในดินโดยทำมุม  $45^\circ - \varphi/2$
- แนวที่อยู่ระหว่างลิ่มทั้งสองประมาณด้วยสมการชนิด Log-spiral ซึ่งมีสมการคือ

$$r = r_0 \exp(\theta \tan \varphi')$$

- โดยที่  $\theta$  คือค่ามุมมีหน่วยเป็นเรเดียน ,  $\varphi'$  คือ มุมเสียดทานของดินและ

$$r_0 = B / (2 \cos(45 + \varphi/2))$$

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

2.2

เมื่อ

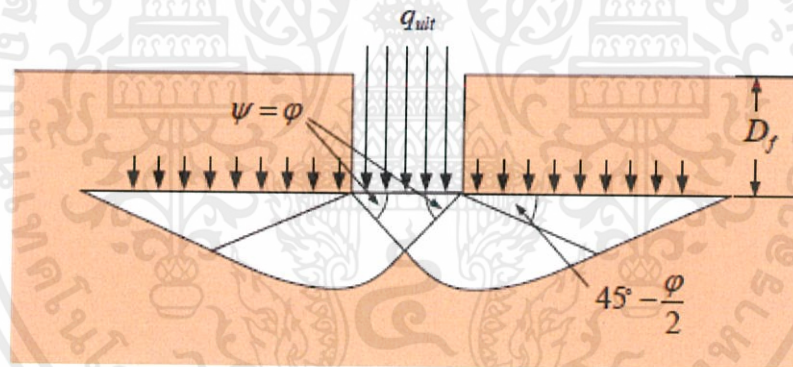
$C$  = ค่าแรงยึดเกาะ (cohesion) ของดิน

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของดิน

$N_c, N_q, N_\gamma$  , = Bearing capacity factor เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและเป็นฟังก์ชันของมุม เท่านั้น

เมื่อเราศึกษาแต่ละพจน์ในสมการที่ 2 จะได้ว่า

- พจน์  $cN_c$  จะเป็นส่วนที่มาจากของแรงยึดเกาะของดิน
- พจน์  $qN_q$  จะเป็นส่วนของหน่วยแรงกดทับเหนือระดับของฐานราก
- พจน์  $\frac{1}{2} \gamma N_\gamma$  จะเป็นส่วนที่มาจากน้ำหนักของส่วนการวิบัติของดินที่เป็นรูปลิ้ม



รูปที่ 2.2 Failure Mechanism ของ Terzaghi จะสังเกตเห็นว่ามุม  $\Psi$  มีค่าเท่ากับ  $\varphi$

สำหรับสมการของ Terzaghi จะใช้ค่ามุม  $\Psi$  เท่ากับ  $\varphi$  แทนที่จะเป็น  $45^\circ + \varphi/2$  ทำให้กำลังรับ

น้ำหนักที่คำนวณโดยสมการของ Terzaghi คลาดเคลื่อนในกรณีที่มีมุม  $\varphi$  ต่ำมากๆ

## 2.1.4 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Allowable capacity)

หน่วยแรงที่คำนวณได้โดยสมการ 2 นั้นเป็นหน่วยแรงที่ฐานรากเกิด ดการวิบัติตั้งนั้นในการใช้งาน จะต้องการ Ultimate bearing capacity ด้วยสัดส่วนปลอดภัย ดังนั้น Allowable capacity คำนวณได้จากสมการ

$$q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \quad 2.3$$

ซึ่ง Vesic (1995) ได้แนะนำสัดส่วนปลอดภัยไว้ในตารางที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้าง ข้อมูลของฐานราก และผลกระทบที่ตามมาถ้าเกิดการวิบัติขึ้นถ้าโครงสร้างนั้นเป็นโครงสร้างชั่วคราวอาจ ใช้สัดส่วนปลอดภัยลดลงได้ถ้าโครงสร้างนั้นเป็นโครงสร้างชั่วคราว ในทางกลับกันถ้าฐานรากนั้นมี แนวโน้มว่าจะต้องรับแรงกระทำ สูงสุดเป็นประจำอาจจะต้องพิจารณาเพิ่มสัดส่วนปลอดภัยให้สูงขึ้น โดยจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- ความไม่แน่นอนของแรงกระทำ –แรงที่กระทำต่อโครงสร้างที่ไม่เป็นโครงสร้างปกติจะไม่ สามารถระบุแรงกระทำที่แน่นอนได้
- โอกาสที่ฐานรากจะรับแรงกระทำสูงสุด – แรงที่กระทำต่อโครงสร้างที่ไม่เป็นโครงสร้างปกติ อาจมีโอกาที่จะมีแรงกระทำสูงสุดมากกว่ากระทำได้
- ผลที่จะตามมาถ้าฐานรากวิบัติ -สำหรับอาคารสาธารณะเราจะไม่ยอมเสี่ยงให้เกิดการวิบัติ ขึ้นเนื่องจากจะมีผลต่อชีวิตและทรัพย์สินมาก แต่ถ้าเป็นโครงสร้างชั่วคราวซึ่งไม่ได้เปิด สำหรับสาธารณะก็อาจใช้ความเสี่ยงที่สูงขึ้นได้ เนื่องจากหากเกิดการวิบัติผลกระทบจะไม่ รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารสาธารณะ
- ความไม่แน่นอนของดิน – เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของดินตามธรรมชาติ ซึ่งจะแตกต่างกันไป จากสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ
- ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน – การเจาะสำรวจดินต้องมีความลึกเพียงพอที่จะระบุชั้นดินได้ และจะต้องมีการทดสอบที่เพียงพอที่จะนำมาใช้ระบุพารามิเตอร์ของดิน ซึ่งถ้ามีการเจาะสำรวจ เพียงพอ จะมี ความมั่นใจในผลการคำนวณ Bearing capacity มากขึ้น

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนปลอดภัยต่ำสุดที่แนะนำสำหรับฐานรากตื้น Vesic (1975), คัดลอกจาก (Fang 1990)

ประเภท	โครงสร้าง	ลักษณะพิเศษของโครงสร้าง	การสำรวจดิน	
			ข้อมูลสมบรูณ์ มากพอ	ข้อมูลจำกัด
A	สะพานรถไฟ, โกดังเก็บ ของ, กำแพงกันดิน, ซิโอส	โครงสร้างอาจต้องรับน้ำหนัก บรรทุกเป็นประจำ การวิบัติ ก่อให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรง มาก	3.0	4.0
B	สะพานรถยนต์, โรงงาน อุตสาหกรรมเบาและ อาคารสาธารณะ	โครงสร้างอาจต้องรับน้ำหนัก บรรทุกสูงสุดเป็นบางครั้ง การ วิบัติก่อให้เกิดผลกระทบค่อนข้าง รุนแรง	2.5	3.5
C	อาคารพักอาศัยและ อาคารสำนักงาน	โครงสร้างอาจไม่ต้องรับน้ำหนัก บรรทุกสูงสุด	2.0	3.0

#### หมายเหตุ

- สำหรับโครงสร้างชั่วคราวสามารถลดค่าในตารางลงได้ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าสัดส่วนปลอดภัยไม่ควรต่ำกว่า 2.0
- สำหรับโครงสร้างสูงมากเช่นปล่องไฟ และหอสูงหรือโครงสร้างที่วิบัติแล้วจะเป็นที่น่ากลัวต่อผู้พบเห็นอาจ เพิ่มค่าในตารางอีก 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์
- ต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดน้ำท่วม และ/หรือ การขุดลอกหรือน้ำกัดเซาะเอาน้ำหนักกดทับ เนื่องจากดินถมฐานรากออกไว้วาย
- แนะนำให้ตรวจสอบเสถียรภาพหลังก่อสร้างเสร็จ (Short-term) และเสถียรภาพในระยะยาว (long-term) ในกรณีที่ไม่สามารถระบุได้ว่ากรณีใดเป็นตัวควบคุม
- ถ้าการออกแบบจะต้องควบคุมปริมาณการทรุดตัวจะต้องใช้สัดส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่านี้

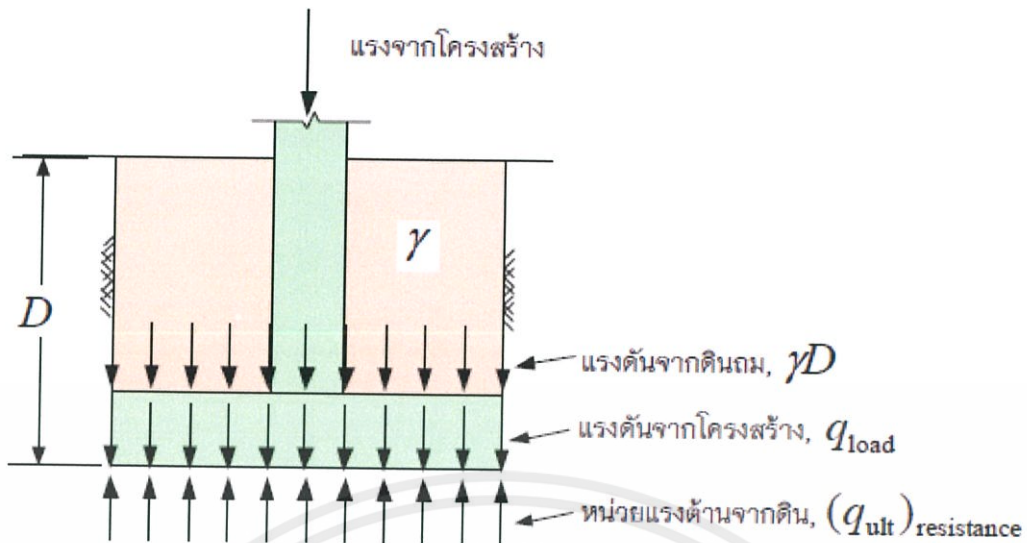
#### 2.1.5 Gross and net ultimate bearing capacity

ในการคำนวณ Bearing capacity นั้นจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น Gross ultimate bearing capacity

$(q_{ult})_{gross}$  ซึ่งถ้าฐานรากนั้นมีดินถมทับฐานรากด้วยจะต้องคำนวณ bearing capacity ที่ดินใต้ฐานราก จะรับได้เพิ่มขึ้นจากฐานรากนั้นคือ Net ultimate bearing capacity  $(q_{ult})_{net}$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$$(q_{ult})_{net} = (q_{ult})_{gross} - \gamma D \quad 2.4$$

ซึ่งสมการที่ 4 สามารถอธิบายจาก free body diagram ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Freebody diagram ของฐานรากที่ฝังอยู่ในดิน

จากสมดุลของแรงลัพธ์ในแนวตั้งจะได้

$$q_{load} + \gamma D < (q_{ult})_{resistance}$$

$$q_{load} < (q_{ult})_{resistance} - \gamma D$$

จากสมการแสดงว่าแรงดันจากภายนอกที่จะกระทำต่อดินใต้ฐานรากได้โดยไม่ก่อให้เกิดการวิบัติจะต้องน้อยกว่าซึ่งเรากำหนดได้จาก ultimate bearing capacity ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

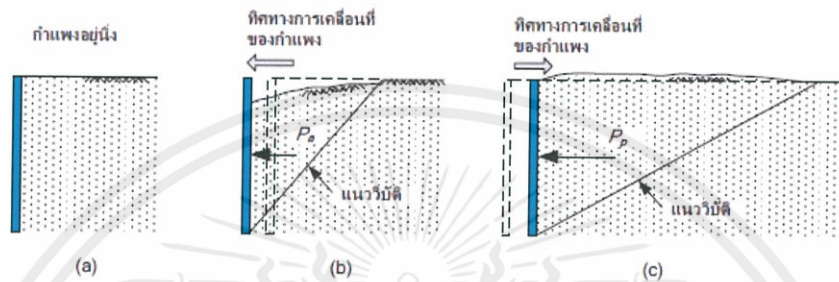
## 2.2 ทฤษฎีแรงดันดิน

### 2.2.1 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างของ Rankine

แรงดันดินด้านข้างของดินขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนตัวของกำแพง แบ่งเป็นสามกรณีได้แก่

- แรงดันดินด้านข้างในสภาพนิ่ง (At rest lateral earth pressure)
- แรงดันดินด้านข้างเมื่อดินเคลื่อนตัวดันกำแพง (Active earth pressure)
- ถ้าแรงดันดินด้านข้างเมื่อดินกำแพงเคลื่อนตัวดันดิน (Passive earth pressure)

ซึ่งจะได้กล่าวถึงการคำนวณแรงดันดินแต่ละชนิดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 แรงดันดินด้านข้างซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน

### 2.2.2 แรงดันดินด้านข้างในสภาพนิ่ง (At rest lateral earth pressure)

ค่า

$\sigma_h =$  คำนวณได้จากสมการ

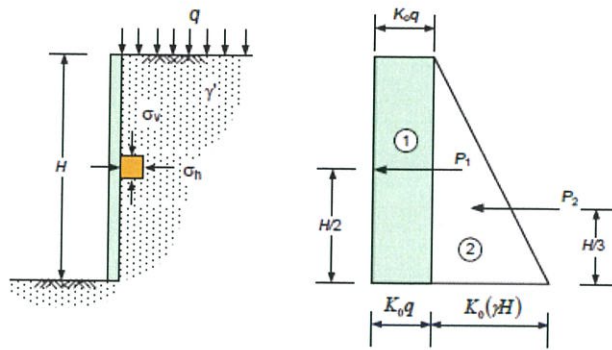
$$\sigma_h = K_0 \sigma'_v + u_3$$

$K_0 =$  Coefficient of at rest earth pressure ค่า สามารถประมาณได้โดยใช้วิธีเชิงประสบการณ์ ดัง

ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า Coefficient of earth pressure at rest

ชนิดของดิน	สมการ
Normally consolidated soil; Jaky (1944)	$K_0 = 1 - \sin \phi$
Normally consolidated clay; Brooker และ Ireland's (1965)	$K_0 = 0.04 + 0.007(PI)$ $PI = 0 - 40\%$ $K_0 = 0.64 + 0.001(PI)$ $PI = 40 - 80\%$
Over consolidated clay; Alpan (1967)	$(K_0)_{oc} = (K_0)_{nc} (OCR)^n$ $PI < 40\%, n = 0.42$ $PI > 40\%, n = 0.32$

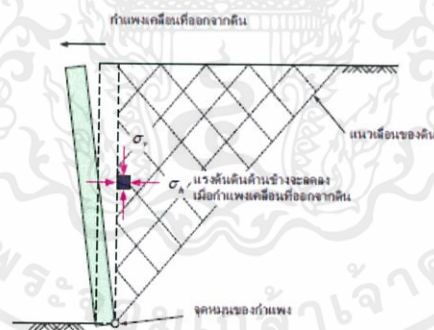


รูปที่ 2.5 แรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟ

### 2.2.3 แรงดันดินด้านข้างเมื่อดินเคลื่อนตัวดันกำแพง (Active earth pressure)

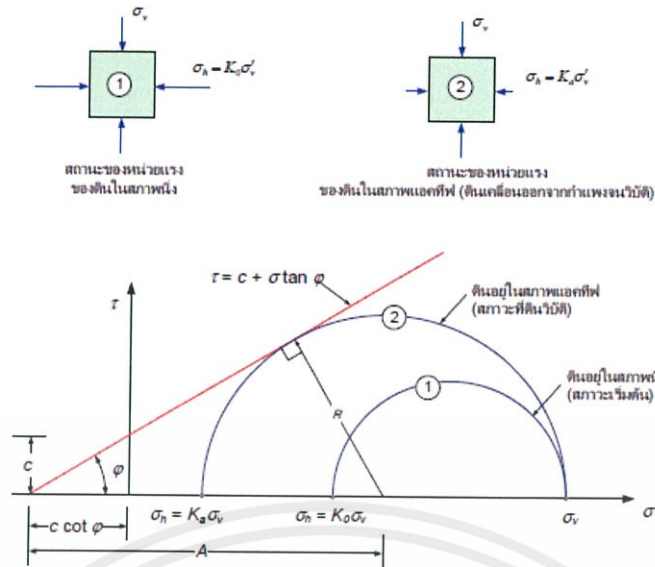
แรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟ และแพชซีฟที่เสนอโดย Rankine (1857)

- กำแพงอยู่ในแนวตั้ง
- ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างดินกับกำแพง
- ดินถมหลังกำแพงอยู่ในแนวราบและไม่มีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นในระนาบราบและระนาบตั้ง
- กำแพงแข็งและยาวไม่สิ้นสุดโดยดินเป็นดินที่มีเนื้อสม่ำเสมอ (homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกๆ แกนที่พิจารณา (isotropic)
- สถานะของดินเริ่มแรกจะต้องอยู่ในสภาพนิ่ง (at-rest state)



รูปที่ 2.6 การวิบัติของดินในสถานะแอกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Mohr circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแอกทีฟ

จากรูปที่ 2.6 เขียนความสัมพันธ์ได้

$$\sin \varphi = \frac{R}{A} = \frac{(\sigma_v - \sigma_h) / 2}{(\sigma_v + \sigma_h + 2c \cot \varphi) / 2}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sigma_h (1 + \sin \varphi) = \sigma_v (1 - \sin \varphi) - 2c \cos \varphi$$

หน่วยแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอกทีฟคำนวณได้จาก

$$\sigma_h = \sigma_v \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right) - 2c \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}$$

ถ้าให้

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

จะได้

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

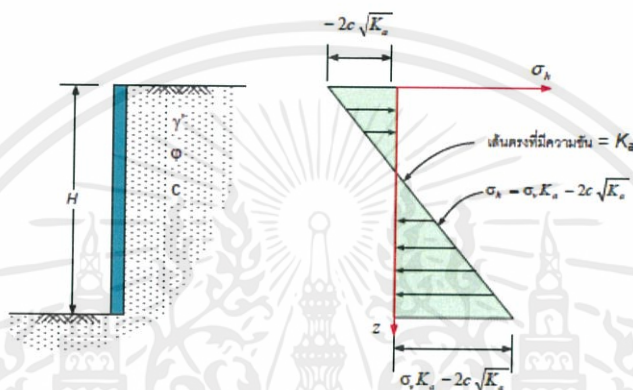
2.5

$K_a$  = Coefficient of active lateral earth pressure

$C$  = cohesion of soil

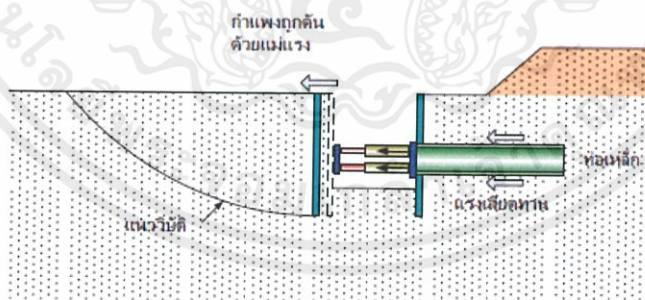
$\varphi$  = friction angle

จากสมการของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอกทีฟสามารถนำไปเขียนเป็น Stress profile ได้ดัง รูป



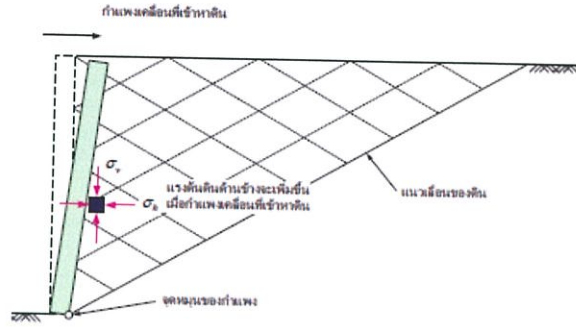
รูปที่ 2.8 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอกทีฟ

2.2.4 แรงดันดินเมื่อดินกำแพงเคลื่อนตัวดันดิน(Passive earth pressure)

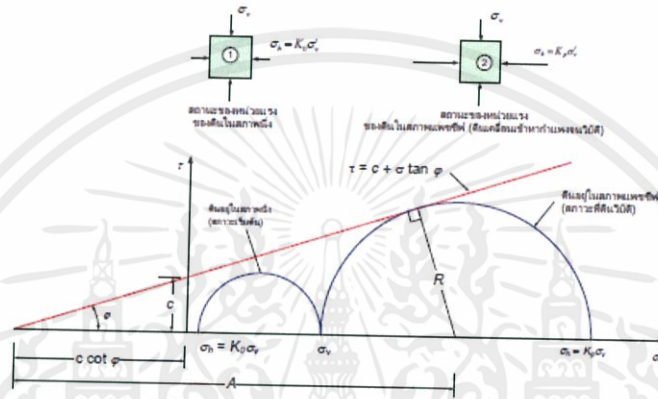


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดแรงดันดินแบบแพสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การวิบัติของดินในสภาวะแพชซีฟ



รูปที่ 2.11 Mohr circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแอคทีฟ

จากรูปที่ 2.10 เขียนความสัมพันธ์ได้

$$\sin \phi = \frac{R}{A} = \frac{(\sigma_v - \sigma_h) / 2}{(\sigma_v + \sigma_h + 2c \cot \phi) / 2}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sigma_v = \sigma_h \left( \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}}$$

ถ้าให้

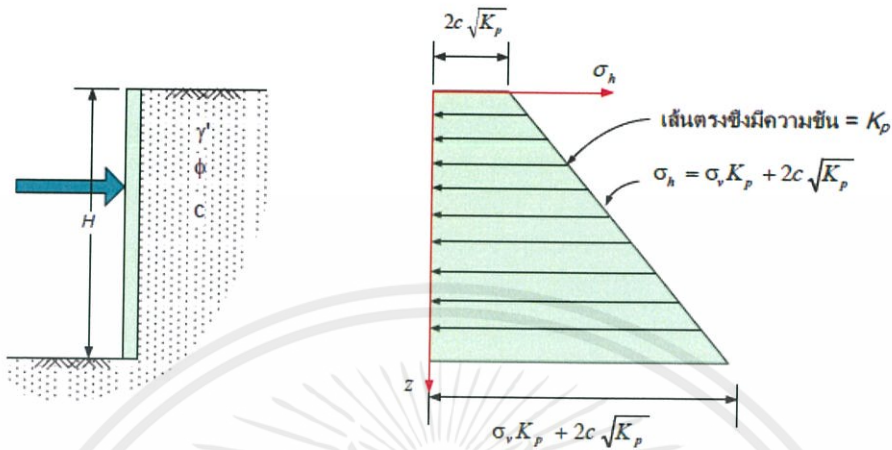
$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

จะได้

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_p + 2c\sqrt{K_p}$$

2.6

$K_p$  = Coefficient of passive lateral earth pressure



รูปที่ 2.12 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแพชซีฟ

ตารางที่ 2.3 สรุปสมการที่ใช้คำนวณแรงดันดินด้านข้าง

สภาวะของดิน	สมการ
สภาวะนิ่ง (At rest)	$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$
สภาวะแอคทีฟ (Active) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$ $K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$
สภาวะแพชซีฟ (Passive) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_p + 2c\sqrt{K_p}$ $K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$

2.2.5 ความลึกของการขุดดินโดยไม่ต้องใช้ค้ำยันด้านข้าง

สำหรับดินเหนียวซึ่งอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained) เราสามารถคำนวณความลึกของการขุดโดยไม่ต้องใช้น้ำยันได้

ในสภาวะ Undrained ของดินเหนียว  $\phi = 0^\circ, c = s_u$  ค่า  $K_a = 1.0$

$$\sigma_a = \gamma z - 2s_u$$

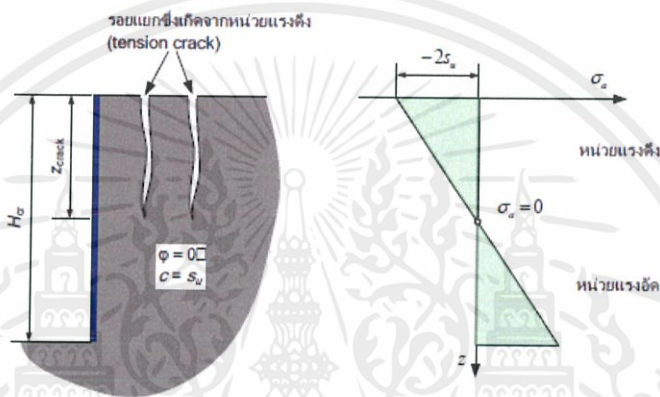
ในกรณีที่  $\sigma_a = 0$

$$Z_{crack} = \frac{2s_u}{\gamma}$$

ความลึก  $Z_{crack}$  คือ ระยะที่เกิดแรงดึงขึ้นในเนื้อดิน แต่ดินรับแรงดึงได้น้อยจึงเกิดรอยแยกชั้นที่ผิวดิน ดังนั้นเมื่อคิดความลึกที่จะทำให้เกิดสถานะสมดุลใน  $H_{cr}$  แนวราบ จะเป็น  $Z_{crack}$  สองเท่าของ

$$H_{cr} = \frac{4s_u}{\gamma} \quad 2.7$$

รูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 แสดงถึงรอยแยกในดินเหนียวซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึง



รูปที่ 2.13 รอยแยกเนื่องจากหน่วยแรงดึงซึ่งเกิดในดินหลังกำแพง



รูปที่ 2.14 รอยแยกเนื่องจากหน่วยแรงดึงในดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

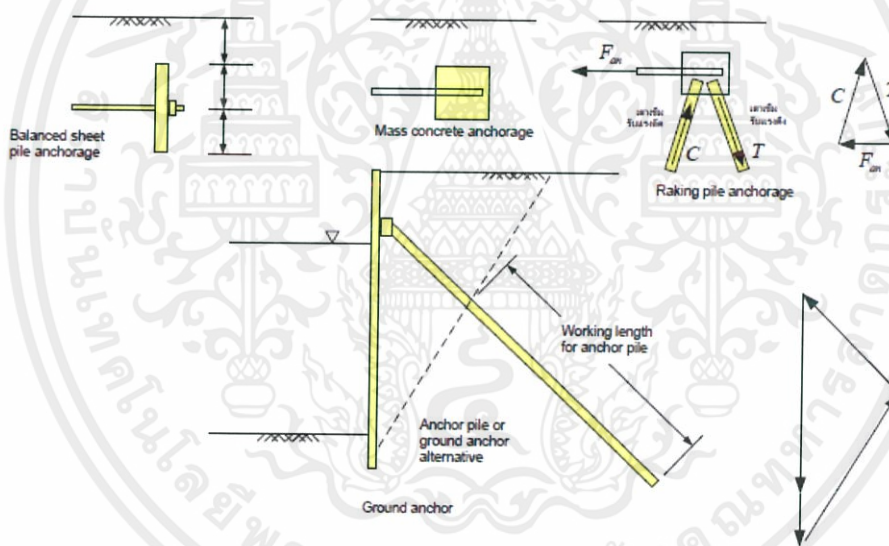
## 2.2.6 สมอต้านแรงดึง

### 2.2.6.1 รูปแบบของสมอต้านแรงดึง

สำหรับกำแพงที่ใช้สมอยึดเป็นแรงต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดจากแรงดันดิน จำเป็นจะต้องมีโครงสร้างที่ก่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาที่เป็นแรงต้านทานโดยอาจจะใช้ในรูปแบบของ

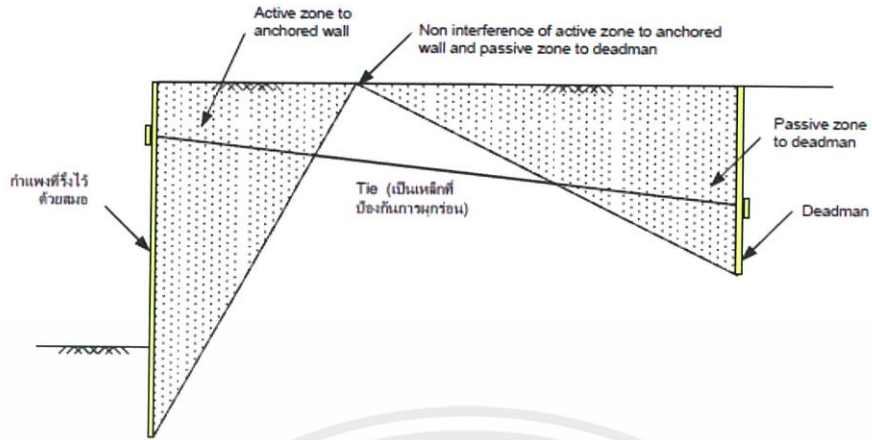
แท่นยึดตรึง (Deadman1) – โครงสร้างชนิดนี้สร้างขึ้นจากแท่งคอนกรีตหรือคานคอนกรีตต่อเนื่อง ที่ทำให้เกิดแรงต้านทานแบบ passive แท่นยึดตรึงนี้เหมาะที่จะใช้ในกรณีที่สามารถขุดเปิดหน้าดินและฝังกลับได้

- เสาค้ำสมอ – แรงปฏิกิริยาที่จะต้านทานต่อแรงดึงเกิดจากแรงต้านทานจากเสาค้ำที่ตอกลงในดิน ใช้ในกรณีที่ชั้นดินแข็งอยู่ในระดับลึก โดยเสาค้ำที่ใช้อาจตอกลงในดินแบบเอียงเพื่อให้มีแรงต้านทานต่อแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้น
- ฐานรากของอาคาร – ในกรณีที่อาคารมีน้ำหนักสูงมาก อาจจะใช้ยึดสายสมอเข้ากับฐานรากของโครงสร้างเพื่อต้านทานต่อแรงกระทำทางด้านข้างได้ แต่ต้องตรวจสอบกำลังต้านทานของโครงสร้างด้วย



รูปที่ 2.15 รูปแบบของสมอต้านแรงดึง

### 2.2.6.2 ตำแหน่งของการติดตั้งสมอต้านแรงดึง



รูปที่ 2.16 Non-interference of zone for anchor wall

### 2.3 หน่วยแรงในมวลดิน

ดินเป็นวัสดุที่แตกต่างจากวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เช่น คอนกรีตหรือเหล็ก เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ อีกทั้งดินประกอบไปด้วยเม็ดดิน ก๊าซ และของเหลวซึ่งมักจะเป็นน้ำ เมื่อมวลดินมีแรงมากกระทำ จะก่อให้เกิดหน่วยแรงขึ้น การคำนวณหน่วยแรงในมวลดินนั้นแตกต่างจากการคำนวณหน่วยแรงในวัสดุที่ทราบพื้นที่หน้าตัดชัดเจน สำหรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินนั้นถ้าเราพิจารณาในระบบ 3 แกนจะได้



รูปที่ 2.17 สภาวะหน่วยแรงในกรณี True triaxial

สำหรับ stress นั้นจัดเป็นปริมาณที่เรียกว่า tensor ซึ่งมาจากภาษากรีกหมายถึงยึดออกซึ่ง แตกต่างจากปริมาณ scalar และ vector สำหรับ Tensor นั้นมี invariants ที่เป็นอิสระต่อกัน (independent) เพียง 3 ค่าเท่านั้นจึงสรุปได้ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.4 การอธิบายปริมาณ scalar, vector และ tensor (Schofield and Wroth)

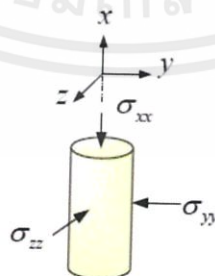
Type	Scalar	Vector	Tensor
Array of	Zero order	First order	Second order
Example	Specific volume	Displacement	Stress
Notation	$v$	$d_i$	$\sigma'_{ij}$
Number of components	1	3	9
Independent data	1	3	9 in general 6 if symmetrical
Independent scalar quantity that can be derived	1	1	3

ปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพีนั้นอาจไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ปัญหาเป็นแบบสามมิติเนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะมีความยาวต่อเนื่อง และมักจะยาวกว่าความกว้าง ตัวอย่างเช่นคันทางถนนที่ยาวมาก หรือ จากรูปที่ 1 จะเห็นว่ามีความเค้นกระทำ ต่ออีลิเมนต์สองชนิดได้แก่ความเค้นตั้งฉาก  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  และ

ความเค้นเฉือน  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  ดังนั้นจึงมีความเค้นที่จำเป็นในการระบุสถานะของหน่วยแรงระบบสามแกนคือ  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  ซึ่งเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

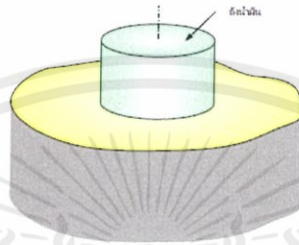
ในปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีส่วนใหญ่และการทดสอบเพื่อหาคคุณสมบัติของดินจะเป็นปัญหามิติสองมิติ (Axisymmetry) ซึ่งมีสถานะของหน่วยแรงดังรูป



รูปที่ 2.18 สถานะหน่วยแรงในกรณีของ triaxial

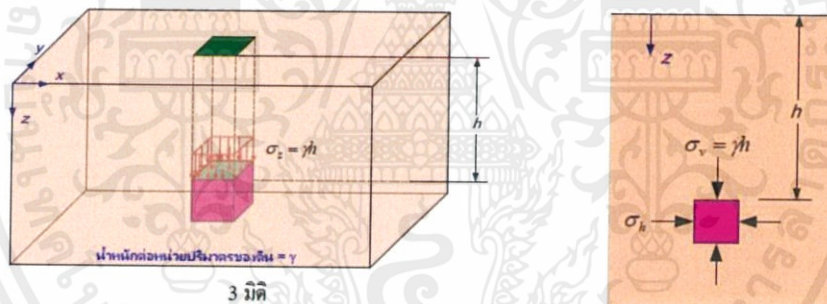
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะมีหน่วยแรงกระทำที่ด้านบนของทรงกระบอกเป็น  $\sigma_{xx}$  และมีหน่วยแรงกระทำด้านข้าง ทรงกระบอกเป็น  $\sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  ซึ่งหน่วยแรงกระทำ ด้านข้างนี้กระทำรอบทรงกระบอกด้วยขนาดที่เท่ากันดังนั้น เรามักจะเรียกหน่วยแรง  $\sigma_{xx}$  ว่าหน่วยแรงในแนวตั้งและ  $\sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  ว่าเป็นหน่วยแรงกระทำ ตามแนวรัศมี ในกรณีของการสมมาตรรอบแกน เช่นกรณีของการทดสอบตัวอย่างดินทรงกระบอกที่ล้อมรอบไว้ด้วยแรงดันน้ำ ในกรณีนี้หน่วยแรงที่เกี่ยวข้องคือ หน่วยแรงกดทดสอบในแนวแกน  $\sigma_a$  และแรงดันของน้ำ ที่กระทำต่อ ตัวอย่างตามแนวรัศมี  $\sigma_r$  ในการทดสอบชนิดนี้จะไม่มีความเครียดกระทำต่อตัวอย่าง



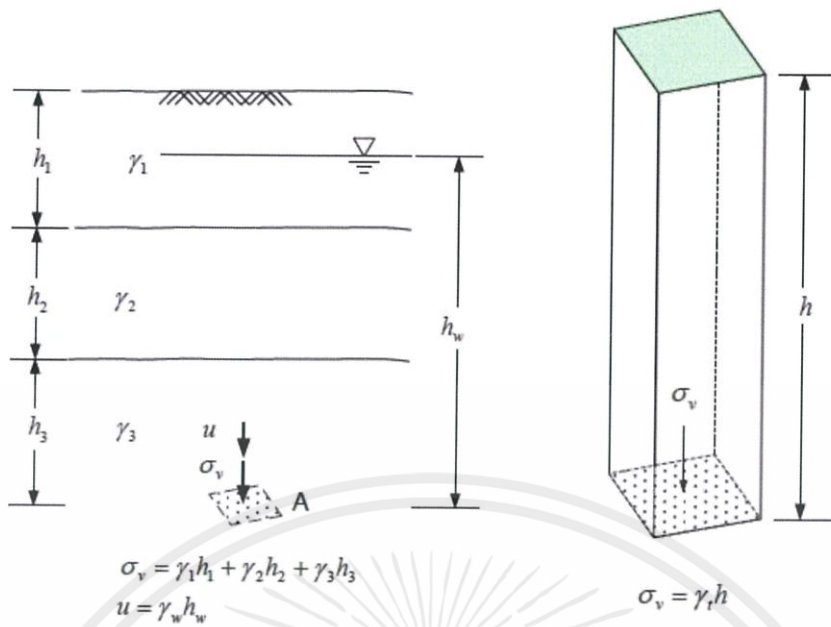
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างปัญหาสมมาตรรอบแกนหมุน

### 2.3.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากร้ำน้ำหนักกดทับของดิน (overburden pressure)



รูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การคำนวณหาหน่วยแรงในดินเนื่องจากน้ำหนักกดทับ (Overburden pressure)

หน่วยแรงตั้งฉากในแนวตั้ง ณ. จุด A คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 \quad 2.8$$

สมการทั่วไปของ Vertical total stress

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad 2.9$$

$\gamma_i$  = หน่วยน้ำหนักของดิน ณ. ชั้นที่

$h_i$  = ความหนาของดิน ณ. ชั้นที่  $i$

$n$  = จำนวนชั้นดินเหนือจุดที่พิจารณา

แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน (Pore water pressure,  $u$ ) จะเท่ากับความดัน Hydrostatic

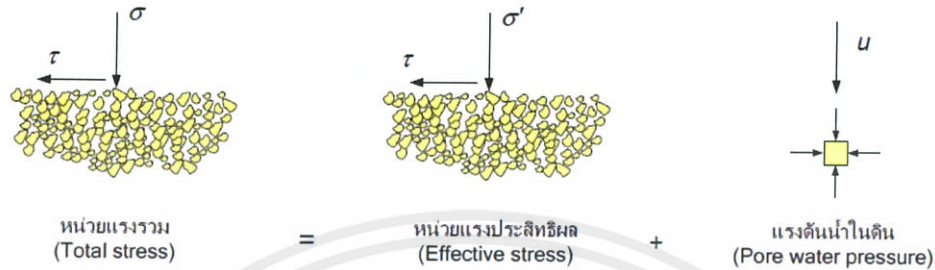
$$u = \gamma_w h_w \quad 2.10$$

$\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$h_w$  = ระยะจากผิวน้ำใต้ดินถึงจุดที่พิจารณา

### 2.3.2 หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress)

หลักการของหน่วยแรงประสิทธิผลมีความสำคัญในวิชาปฐพีกลศาสตร์อย่างมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปของดินจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้น หน่วยแรงประสิทธิผลจะใช้กับหน่วยแรงตั้งฉากเท่านั้นซึ่งจะใช้ไม่ได้กับหน่วยแรงเฉือน



รูปที่ 2.21 หลักการหน่วยแรงประสิทธิผล

หน่วยแรงในแนวดิ่ง (Vertical stress)

$\sigma_v$  หน่วยแรงรวม (Vertical total stress)

$\sigma'_v$  หน่วยแรงประสิทธิผล (Vertical effective stress)

$u$  ความดันน้ำ ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure)

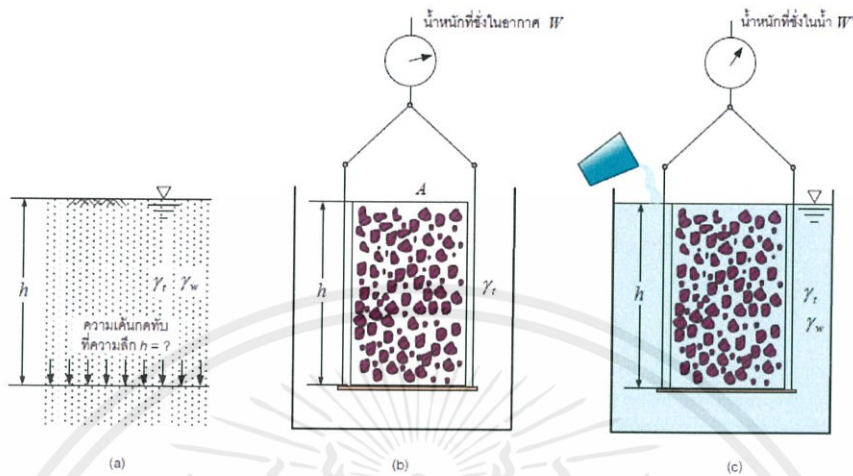
ดังนั้น Effective stress เนื่องจากน้ำหนักกดทับของดินคำนวณได้จาก

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i - \gamma_w h_w$$

2.11

### 2.3.3 แนวคิดของหน่วยแรงประสิทธิผลอย่างง่าย

เนื่องจากการทำความเข้าใจกับหน่วยแรงประสิทธิผลอาจเป็นเรื่องที่ค่อนข้างเป็นนามธรรมเนื่องจากเราไม่สามารถวัดความเค้นที่กระทำต่อดินได้โดยตรง แต่เราอาจพิจารณาในเชิงกายภาพได้เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น โดยใช้แบบจำลองดังรูป



รูปที่ 2.22 แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผล

พิจารณาความเค้นที่กระทำต่อระนาบที่ความลึก  $h$  ในรูป (a) โดยการคิดว่าดินเป็นแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A$  และมีความสูงเท่ากับ  $h$  เมื่อขังดินในอากาศจะมีน้ำหนักเท่ากับ  $W$  ดังนั้นความเค้นกดทับบนระนาบเมื่อดินไม่จมน้ำเท่ากับ

$$\sigma_v = \frac{W}{A} = \gamma_s h \quad 2.12$$

และเมื่อดินจมน้ำ โดยให้ระดับน้ำเสมอกับผิวดินจะมีน้ำหนักน้อยกว่าที่ขังในอากาศเนื่องจากแรงลอยตัว ดังนั้นความเค้นกดทับบนระนาบเมื่อดินจมน้ำ เท่ากับ

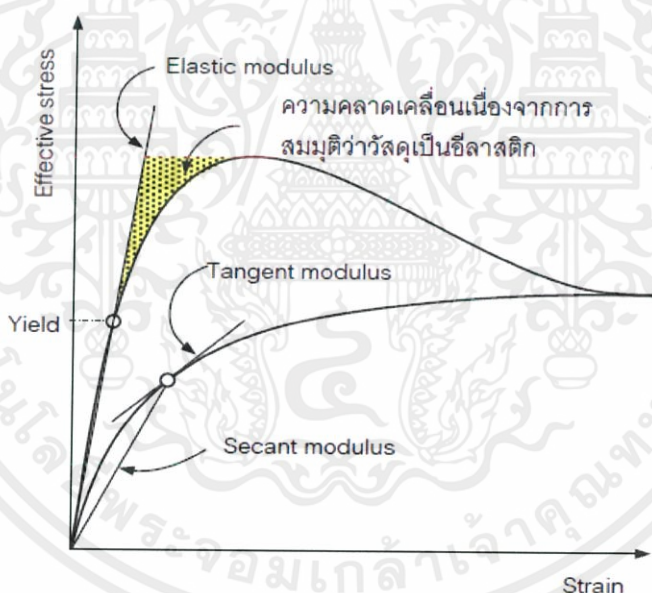
$$\begin{aligned} \sigma'_v &= \frac{W'}{A} \\ &= \frac{\gamma_s h A - \gamma_w h A}{A} \\ &= \gamma_s h - \gamma_w h \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าความเค้นกดทับบนระนาบเมื่อดินอยู่ใต้น้ำจะน้อยกว่าความเค้นกดทับเมื่อดินไม่อยู่ใต้น้ำ โดยความเค้นกดทับจะลดลงเท่ากับ  $h_w \gamma$  ซึ่งเท่ากับแรงดันน้ำที่กระทำต่อระนาบดังนั้นจึงให้  $\sigma'_v$  เป็นความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad 2.13$$

### 2.3.4 ข้อจำกัดของการใช้ทฤษฎีอีลาสติก

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีราคาถูกลงในขณะที่เดียวกันก็มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย วิศวกรจึงมักจะนำวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงในมวลดิน วิธีที่นิยมใช้กันคือ Finite Element และ Finite Difference โดยแต่ละวิธีก็มีคุณสมบัติและข้อจำกัดแตกต่างกันการคำนวณหาหน่วยแรงใต้ฐานรากในปัจจุบัน วิศวกรนิยมใช้ระบบวิธีเชิงตัวเลขกันมากขึ้นในปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากสมการที่ใช้หาหน่วยแรงใต้ฐานรากมีข้อสมมุติฐานหลายประการ ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง ตัวอย่างเช่น สมมุติฐานที่ว่าดินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นโดยไม่มีสภาพพลาสติก ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ตรงกันข้ามกับความเป็นจริงอย่างมากถ้าฐานรากรับแรงจนใกล้จะถึงจุดวิกฤติ



รูปที่ 2.23 ความคลาดเคลื่อนเมื่อสมมุติให้ดินมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงพลาสติก

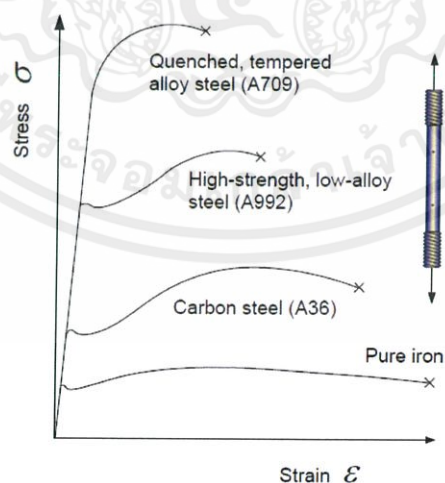
ในการประยุกต์ใช้ปฐพีกลศาสตร์กับการวิเคราะห์หน่วยแรงในมวลดินขั้นสูงนั้นจำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด โดยทั่วไปจะเรียกว่า “Soil model” หรือ “Constitutive model” ตัวอย่าง Soil model ง่ายแสดงดังตารางที่ 2.5

## ตารางที่ 2.5 ตัวอย่าง Soil model อย่างง่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Soil model และสมการที่ใช้	stress-strain relationship	คำอธิบาย
Linear elastic $\sigma = E\varepsilon$		พฤติกรรมของวัสดุเป็นอีลาสติกเชิงเส้น เมื่อเพิ่มหน่วยแรงความเครียดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อลดหน่วยแรงจะไม่มี ความเครียดคงค้าง
Non-linear elastic $\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon \frac{(\sigma_y - \sigma)^2}{\sigma_y^2}$		พฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติกที่ไม่เป็นเส้นตรง เมื่อลดหน่วยแรง จะไม่มี ความเครียดคงค้างเหลืออยู่
Linear elastic – perfectly plastic สมการในช่วงอีลาสติก $\sigma = E\varepsilon$ หน่วยแรงครากที่ $\tau = \sigma \tan\phi + c$		พฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติก เมื่อสภาวะหน่วยแรงเกินกว่าหน่วยแรงคราก หน่วยแรงไม่เพิ่มขึ้นอีก และเมื่อหน่วยแรงลดลง จะมี ความเครียดคงค้าง

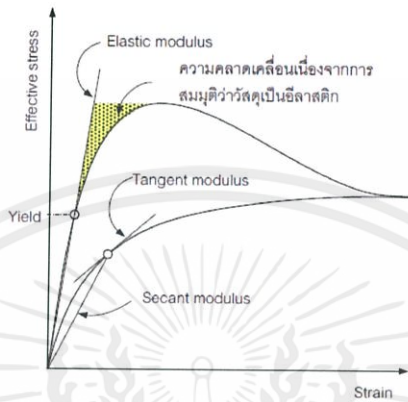
### 2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่สมมาตรรอบแกน

ในหัวข้อคุณสมบัติของวัสดุในวิชา กลศาสตร์วัสดุ หรือวิชากำลังของวัสดุ เราได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงภายในเนื้อวัสดุและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ตัวอย่างเช่นกเหล็ก ในการที่จะทราบความสัมพันธ์นี้เราจะต้องทำการทดสอบให้แรงกระทำ ต่อตัวอย่างและวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำ จากนั้นคำนวณความเค้นจากแรงกระทำ และคำนวณความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวเทียบกับความยาวเริ่มต้น สุดท้ายนำมาเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเมื่อทดสอบโดยการดึง

สำหรับในวิชาปฐพีกลศาสตร์เราก็สนใจในคุณสมบัติทางกลของดินเหมือนกับในกรณีของวัสดุทางวิศวกรรมชนิดอื่น เนื่องจากวิศวกรที่ทำ การออกแบบโดยใช้ดินเป็นฐานรากหรือใช้ดินเป็นวัสดุก่อสร้างนั้น จำเป็นจะต้องทราบพฤติกรรมของมวลดินเมื่อมีแรงกระทำ หรือต้องการทราบว่ามวลดินสามารถรับแรงกระทำ ได้มากเพียงใดดินจึงจะเกิดการวิบัติ



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของดินและการเลือกใช้ค่าโมดูลัสอีลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 บทนำ

มีความเป็นไปได้เล็กน้อยมากสำหรับการจะศึกษาพฤติกรรมต่างๆเกี่ยวกับชั้นดินในหน้างานก่อสร้างจริง เพราะนอกจากจะมีปัจจัยเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูงและ ยังเป็นเรื่องของความปลอดภัยอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้การหาตัวแปรสำหรับการศึกษานั้นค่อนข้างเป็นไปได้ยาก ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับดิน ดังนั้นการศึกษาด้วยแบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก

แบบจำลองเป็นสิ่งที่ได้รับการคิดค้นขึ้นเพื่ออธิบายคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ แบบจำลองจึงไม่ใช่การอธิบายปรากฏการณ์อย่างละเอียดทุกแง่มุม เพราะการกระทำเช่นนั้นจะทำให้แบบจำลองนั้นด้อยลงไป ส่วนการจะบอกว่าแบบจำลอง ควรมีองค์ประกอบอะไรบ้าง ไม่ได้มีการกำหนดตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์แต่ละอย่างและวัตถุประสงค์ของผู้สร้างแบบจำลองนั้นว่าต้องการจะอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ ไปในทิศทางไหน

ในการศึกษาดังต่อไปนี้ เป็นการจำลองแบบจำลองทางกายภาพของแผ่นสมอที่ถูกฝังในชั้นดินและมีแรงกระทำในรูปแบบของแรงถอน ( Pullout Force ) หนึ่งเพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงถอนของแผ่นสมอ และ พฤติกรรมของดินรอบบริเวณแผ่นสมอขณะสมอเกิดการยกตัว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับกรณีระยะฝังและขนาดของสมอที่เปลี่ยนแปลง

### 3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง

ก่อนทำการศึกษาแบบจำลอง ต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ใช้ โดยได้มีการทดสอบ หาขนาดคละของดินตัวอย่าง หนักร้ำน้ำหนักของดินตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 Grain Size Analysis ขนาดคละของดินตัวอย่าง

(มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 422)

มวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความชื้นน้ำ อัตราการทรุดตัว และความสามารถในด้านกำลัง ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลอง

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดินและตามชนิดของดิน ดังนี้

1. วิธีร่อนผ่านตะแกรง สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ ( 0.075 ม.ม.)
2. วิธีตกตะกอนโดยไฮโดรมิเตอร์ สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 ม.ม. ) เช่น ดินเหนียว ดินเหนียวปนตะกอน

ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ทรายเป็นดินตัวอย่าง จึงหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เท่านั้น

#### อุปกรณ์

- 1) ถาดใส่ตัวอย่าง
- 2) ตะแกรงร่อน
- 3) เครื่องเขย่าตะแกรง
- 4) เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- 5) แปรงทำความสะอาดตะแกรง
- 6) ค้อนยาง ช้อนตักดิน

### วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งตะแกรงทุกๆขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควร เกิน 7 ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง
- 2) ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อน ยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก
- 3) นำตัวอย่างดินที่บดขังน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบน และมีถาดรองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเขย่า เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที
- 4) ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F



(รูปที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง)

### วิธีการคำนวณ

- 1) เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง = น้ำหนักดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรง/น้ำหนักดินทั้งหมด  $\times 100\%$
- 2) เปอร์เซ็นต์การค้ำสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า
- 3) เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง =  $100 -$ เปอร์เซ็นต์ค้ำสะสม

### 3.2.2 Specific Gravity of Soil: ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

(มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 854 -00)

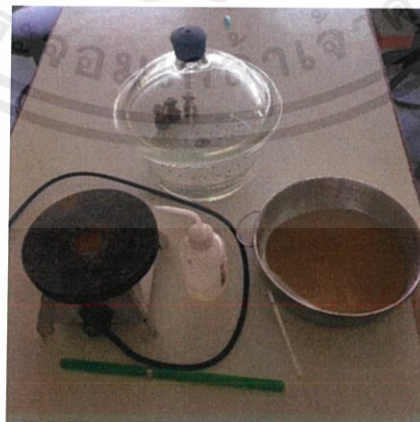
มวลดินจะมีส่วนประกอบของแร่ธาตุสารต่างๆ อาจมีแร่ธาตุชนิดเดียวหรือต่างชนิดกันหลายอย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดิน ก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุสารเหล่านั้น และโดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของ มวลดินจะมีค่าประมาณ 2.60 ถึง 2.80 แล้วแต่แร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบ เช่นดินลูกรัง

บางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจะมีค่า ความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า แต่หากดินมีสารอินทรีย์อยู่มาก จะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำลง

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของมวลดิน สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วน ช่องว่าง ความพรุน ความอิ่มตัว หน่วยน้ำหนัก และค่าอื่นๆ ได้ รวมทั้งใช้คาดคะเนแร่ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบ ของมวลดินนั้น เช่น ดินที่มีไอออนอยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าดินที่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ หรือ ดินเหนียวจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าทราย เนื่องจากดินเหนียวมีส่วนประกอบของแร่ธาตุซึ่งหนักกว่า ซึ่ง เป็นส่วนประกอบหลักของทราย

### อุปกรณ์

- 1) Pycnometer แบบขวดแก้วคอยาวก้นป่อง
- 2) เตابุงเส้น หรือ เตาแผ่นร้อน หรือ หม้อต้มน้ำ
- 3) สามขาและแผ่นตะแกรงแอสเบสโตส ใช้ค้ำเตาบุงเส้น
- 4) ปรอท 0-100°C อ่านละเอียด 0.5-1.0°C
- 5) เครื่องกวนดิน
- 6) แท่งแก้วคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร
- 7) กรวย ขนาดปากประมาณ 10 เซนติเมตร แบบรูกว้าง
- 8) ตู้อบ
- 9) อ่างแก้วดูดความร้อน
- 10) เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.1 g
- 11) ภาชนะ - ชันอลูมิเนียม



(รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(รูปที่ 3.3 ตู้อบให้การหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน)

## วิธีการทดสอบ

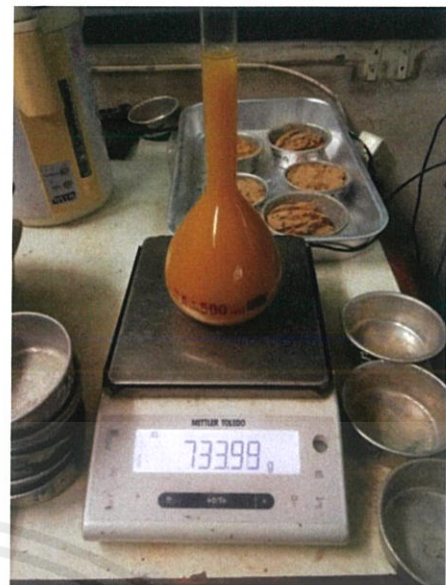
### n) Calibration of Pycnometer

จุดประสงค์เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของขวด Pycnometer ซึ่งมีน้ำเต็มถึงขีดที่กำหนด ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง  $20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $40^{\circ}\text{C}$  เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินต่อไป โดยทำได้ดังนี้

- 1) ล้างขวด ความถ่วงจำเพาะ ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด (อ่านที่ระดับท้องน้ำ)
- 2) ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาทีจนฟองอากาศหมด
- 3) เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 4) วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกัน มาก ให้ตะแคง ขวดแล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- 5) ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน ( $20$  ถึง  $40^{\circ}\text{C}$ ) ประมาณ 4-5 จุด เช่นที่  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  และ  $40^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น
- 6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มและอุณหภูมิ



(รูปที่ 3.4 ชั่งน้ำหนักเพื่อ calibrate pycnometer)



(รูปที่ 3.5 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถี่ใช้งาน ถ่วงจำเพาะ)

#### ข) การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

- 1) นำดินตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม (ถ้าเป็นดินชั้นตื้นต้องเผื่อน้ำหนักความชื้น) ผสมน้ำกลั่นแล้วกวนให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่น โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) เทส่วนผสมดินลงในขวดหา ความถ่วงจำเพาะ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวด ความถ่วงจำเพาะให้หมดระวังอย่าให้ระดับน้ำ เกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด
- 3) ไล่อากาศโดยการต้มหรือดูดด้วยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จน ฟองอากาศหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง
- 4) ถ้าระดับน้ำลดลงอีก ให้เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ว วัดอุณหภูมิของน้ำในขวด
- 5) เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด ความถ่วงจำเพาะ ลงในถาด นำไปบอบให้แห้งเพื่อชั่ง หาน้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

#### วิธีการคำนวณ

จากสมการดังนี้(เมื่อมีปริมาตรเท่ากัน)

$$G = W_s / W_{(4^{\circ}\text{C})}$$

$$G = [(W_s + W_2) - W_1] \cdot 1 / GT$$

$$G = W_s \cdot [(W_s + W_2) - W_1]$$

เมื่อ

$W(4^{\circ}\text{C})$  = น้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$

$W_s$  = น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม

$W_2$  = น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}\text{C}$ ), กรัม

$W_1$  = น้ำหนักขวดที่มีน้ำผสมดินที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}\text{C}$ )

$GT$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}\text{C}$ )

### 3.2.3 Direct Shear Test

(มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 3080)

เนื่องจากดินตัวอย่างเป็นดินทราย จึงได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน อุปกรณ์

- 1) Direct Shear Testing Machine เป็นแบบหมุนทดสอบด้วยมือ หรือแบบอิเล็กทรอนิกส์
- 2) Shear Box พร้อมอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง
- 3) Proving Ring วัดขนาดของแรง
- 4) Dial Gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ อ่านละเอียดได้ถึง 0.0001 นิ้ว (0.0025 มม.)
- 5) Plate Loading (แผ่นน้ำหนัก)
- 6) เครื่องชั่ง และอุปกรณ์หาความชื้น
- 7) เวอร์เนีย

#### วิธีการทดสอบ

##### การเตรียมตัวอย่างดินทราย

- 1) วัดขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cutting Ring พร้อมชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างทรายมาใส่ลงใน Shear Box ใช้ไม้กด ทำการบดอัด จำนวนชั้นในการใส่ตัวอย่างและจำนวนการบดอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต้องการ จากนั้นแต่งตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบ หลังจากนั้นก็ทำความสะอาดขอบแบบ
- 2) จากนั้นนำ Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินทรายมาทำการชั่งน้ำหนัก
- 3) ชั้นสกรูประกอบ Shear Box บนและล่าง วางแผ่นฐานล่าง (Retaining Plate) ลงเข้าไปใน Shear Box โดยให้แนวร่องวางในแนวขวางกับทิศทางของการเฉือนตัวอย่าง
- 4) วาง Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินบนขอบของ Shear Box ใช้ไม้กด (Wooden pusher) ทำการกด นำตัวอย่างดินให้เข้าไปอยู่ใน Shear Box
- 5) วางแผ่นเหล็กด้านบน (Loading Pad) ให้ร่องขวางทิศการเฉือนตัวอย่างดินทราย

## การคำนวณและรายงานผลการทดสอบ

- 1). หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ทดสอบ (3 ค่า)

$$\rho_t = \frac{\text{มวลของตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (ซม}^3\text{)}} \quad , \text{กรัม/ซม}$$

$\rho_t$  = ความหนาแน่นของดินเปียก

- 2) ความเค้นแนวตั้งฉาก (Normal Stress) (3 ค่า)

$$\sigma_n = \frac{\text{น้ำหนักกด (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (ซม}^2\text{)}} \quad , \text{ksc}$$

- 3) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ



(รูปที่ 3.6 การทดสอบ Direct Shear เพื่อหามุมเสียดทานภายใน)

### 3.2.4 การวัดมุมจากการปล่อยทรายให้ตกลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วง

ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน ของดินทรายที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน โดยใช้ทฤษฎี Slope Stability สามารถทำการหามุมเสียดทานภายในได้โดยวิธีกองทรายให้เกิดการไหลลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงได้

#### อุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างดิน
- 2) ไม้วัดมุม

#### วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างดินทรายมาทำการโรยให้เป็นกอง โดยพยายามโรยให้กองทรายสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อสังเกตว่าทรายที่โรยไปเกิดการไหลลงอย่างอิสระแล้ว ให้วัดมุมที่กองทรายทำกับมุมราบ ดังรูป



(รูปที่ 3.7 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ)

จากสมการ Slope stability ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์

$$F.S. = \frac{cL + w \cos \beta \cdot \tan \phi}{w \sin \beta}$$

โดย  $c$  คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

$L$  คือ ความยาวที่เกิดทางเฉือนพัง

$w$  คือ น้ำหนักของมวลที่พังลง

$\beta$  คือ มุมของลาดความชัน

$\phi$  คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

เมื่อพิจารณากรณีของทราย ที่  $c$  เท่ากับ 0 และเป็นการตกอย่างอิสระ ค่า  $F.S.$  จึงเป็น 1

$$1 = \frac{w \cos \beta \cdot \tan \phi \cdot w \sin \beta}{w \sin \beta}$$

$$1 = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

$$\tan \beta = \tan \phi \quad \beta = \phi$$

ดังนั้นมุมของลาดความชันของทรายที่ตกอิสระ จะเท่ากับ มุมเสียดทานภายในของทราย

### 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.3.1 รูปแบบของแบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 แบบจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ทำให้สมอยกตัวและระยะการยกตัว สำหรับเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ

แบบจำลองที่ 2 แบบจำลองที่มีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้มีบริเวณพื้นที่ผิวหน้าตัดเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขนาดของแผ่นสมอให้มีขนาดใหญ่กว่าแบบจำลองที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ทำให้สมอยกตัวและระยะการยกตัว สำหรับเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ

แบบจำลองที่ 3 แบบจำลองสำหรับศึกษาพฤติกรรมของแผ่นสมอขณะยกตัว และดินบริเวณโดยรอบแผ่นสมอ ซึ่งอาจจะมีการใช้ทรายสีโรยเป็นแนวสำหรับสังเกตการยกตัว และแนวการพิบัติของดินในบริเวณนั้นและ ซึ่งแนวการพังที่ได้อาจนำมาอ้างอิงแนวการพังของการทดลองที่ 1 และ การทดลองที่ 2

#### 3.3.2 ขนาดของแบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุ

แบบจำลองจะใช้กล่องโมเดลเหล็กขนาด 53 x 44 x 24 cm

ดินตัวอย่างเป็น ทรายอบแห้ง

ระดับทรายที่ใช้ในแบบจำลอง 5 cm และ 8 cm

แบบจำลองที่ 1 : แผ่นสมอเหล็กความหนา 1 mm. ขนาด 9 x 15 cm<sup>2</sup>  
: แกนสมอมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร  
และมีห่วงคล้องเชื่อมติดกัน

แบบจำลองที่ 2 : แผ่นสมอเหล็กความหนา 1 mm. ขนาด 9 x 20 cm<sup>2</sup>  
: แกนสมอ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร  
และมีห่วงคล้องเชื่อมติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบจำลองที่ 3 : แผ่นสมอเหล็กความหนา 1 mm. ขนาด  $9 \times 15 \text{ cm}^2$   
 : แผ่นสมอเหล็กความหนา 1 mm. ขนาด  $9 \times 20 \text{ cm}^2$

เพื่อให้สามารถควบคุมความแน่นของชั้นทรายตัวอย่างได้อย่างสม่ำเสมอในทุกครั้งของการจำลองทดลอง จึงต้องกำหนดวิธีการเตรียมตัวอย่างชั้นทรายด้วยอุปกรณ์ปล่อยทราย ลักษณะของกล่องจำลองแบบจำลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังนี้

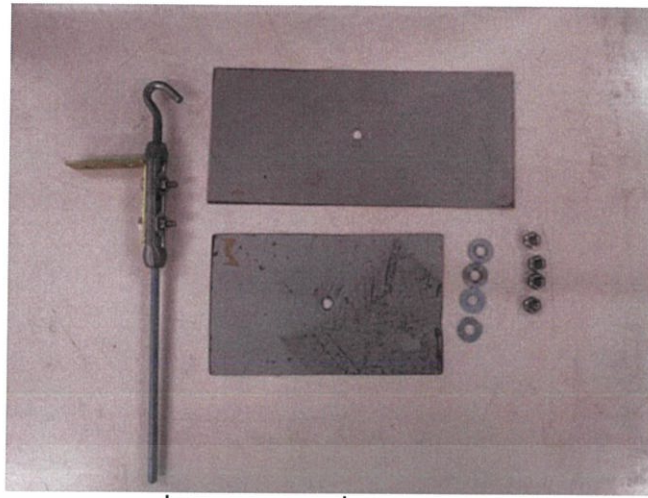
### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

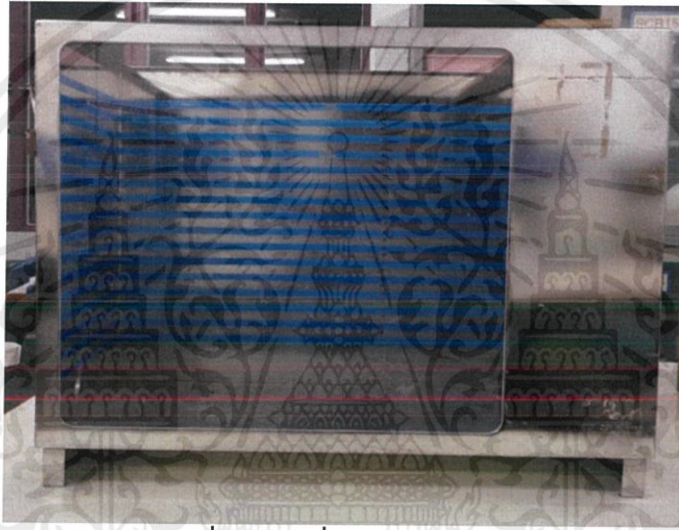
- 1) ทรายแห้งตัวอย่าง
- 2) Anchor plate ขนาด  $9 \times 15 \text{ cm}$  และ ขนาด  $9 \times 20 \text{ cm}$
- 3) กล่องโมเดลเหล็ก ขนาด  $53 \times 44 \times 24 \text{ cm}$  และขนาด  $40 \times 30 \times 10 \text{ cm}$
- 4) รอกและเอ็นสำหรับถ่วงน้ำหนัก
- 5) Sand Dropper
- 5) ผงทรายสีใช้โรยเพื่อสังเกตระนาบการพิบัติ
- 6) ไม้บรรทัด และอุปกรณ์วัดมุม
- 7) คานระบรอก
- 8) แผ่นพลาสติกใส ใช้ติดด้านข้างเพื่อป้องกันดินตัวอย่างรั่ว และลดแรงเสียดทาน
- 9) กล่องแบบจำลอง ขนาด  $24 \times 53 \times 40$  เซนติเมตร



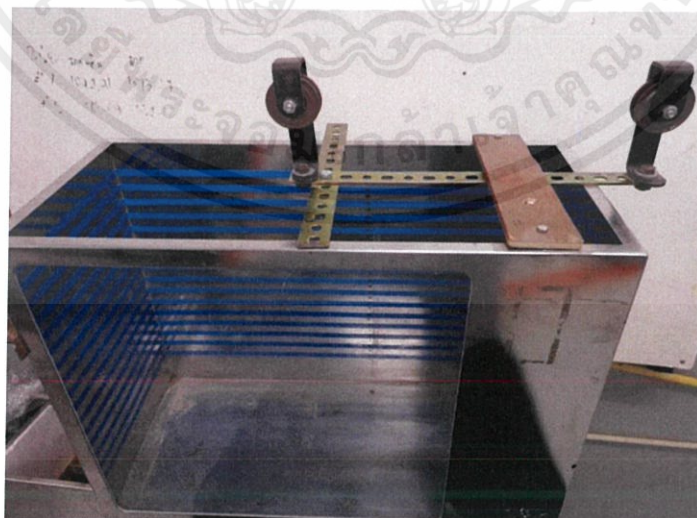
(รูปที่ 3.8 ทรายตัวอย่าง และ ทรายสี)



(รูปที่ 3.9 ชุดสมองที่ใช้ในการทดสอบ)

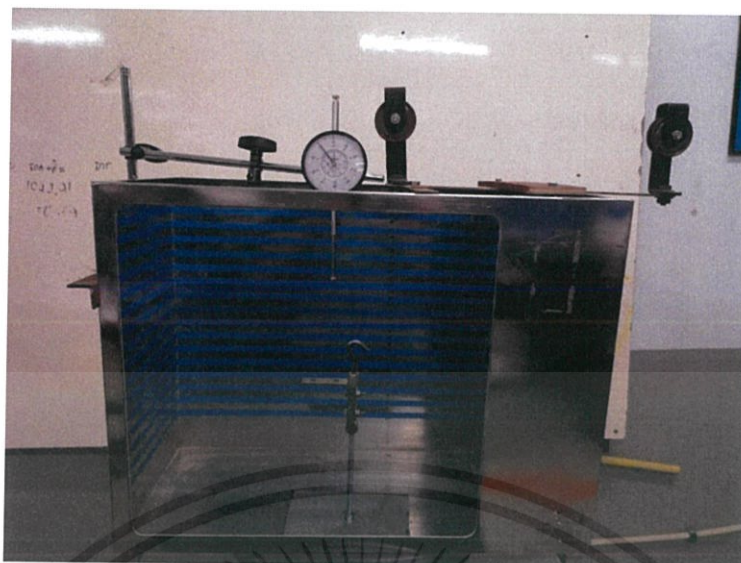


(รูปที่ 3.10 ตู้ที่ใช้ในการทดสอบ)



(รูปที่ 3.11 ชุดรอกที่ใช้ในการดึงสมอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(รูปที่ 3.12 ตู้ที่ทดสอบที่ได้ทำการติดตั้งชุดรอก และ Dial Gauge สำหรับวัดการยกตัว)

### 3.4.2 วิธีเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

- 1) คำนวณค่า parameter ของทราย เช่น มุมเสียดทานภายใน ความกว้างจำเพาะ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินทราย ( $c=0$ )
- 2) เตรียมทรายตัวอย่างโดยการนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น
- 3) นำทรายไปจำแนกขนาดให้อยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 10 ถึงเบอร์ 50
- 4) เตรียมกล่องแบบจำลองเหล็ก พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทราย
- 5) เททรายลงในแบบจำลองให้ได้ระดับเป็นฐานประมาณ 5-10 เซนติเมตร จากนั้นวาง Anchor Plate บนระดับฐาน จากนั้นทำปล่อยทรายด้วยวิธี Sand rain ให้ทรายมีความสม่ำเสมอของหน้าตัดแต่ละชั้น จนถึงระดับที่กำหนด
- 6) ติดตั้งคานพร้อมรอกสำหรับถ่ายแรง และ ติดตั้ง Dial Gauge สำหรับการวัดระยะการยกตัวของแผ่นสมอ
- 10) ติดตั้งกล่องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกับแบบจำลอง เพื่อสังเกตการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน และการยกตัวของแผ่นสมอ

ในส่วนของแบบจำลองที่ 3 จำเป็นต้องมีการทำระดับทรายสีทุกๆ 0.5 เซนติเมตรสำหรับวัดมุมการพิบัติของทรายบริเวณโดยรอบแผ่นสมอ

### 3.4.3 วิธีทดลองของแบบจำลอง

- 1) จำลองแรงยกที่กระทำต่อสมอด้วยการค่อยๆเพิ่มน้ำหนักถ่วงโดยเริ่มต้นที่ 100 กรัมจนกระทั่งสามารถวัดการยกตัวเริ่มต้นได้
- 2) ทำการบันทึกค่าการยกตัวของแผ่นสมอโดยอ่านค่าที่ได้จาก Dial Gauge
- 3) ทำการเพิ่มน้ำหนักขึ้น โดยเพิ่มทีละ 50 กรัม จากนั้นบันทึกผลการทดลอง
- 4) ทำการทดลองเพิ่มน้ำหนักไปและบันทึกค่าการยกตัวไปเรื่อยๆจนกระทั่ง แผ่นสมอไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้
- 5) ศึกษาแนวการพิบัติของทรายจากกล้องที่บันทึกภาพเคลื่อนไหว



(รูปที่ 3.13 การโรยทรายสีเพื่อหาลักษณะการยกตัว)



(รูปที่ 3.14 ตั้งกล้องเพื่อหาแนววิบัติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



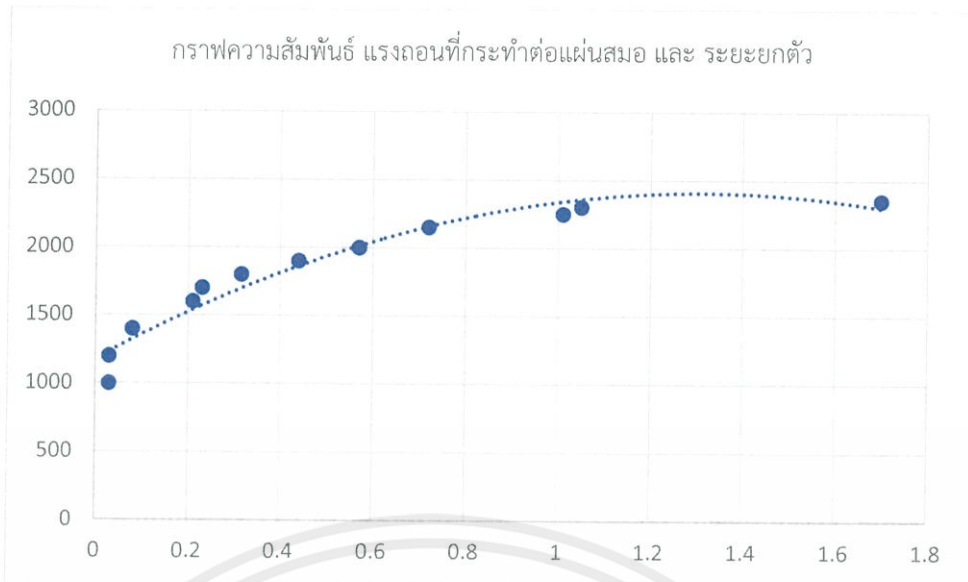
(รูปที่ 3.15 การวางสมอตีดกระจกเพื่อหาตุการยกตัว)

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล

หลังจากทำการเก็บข้อมูลจากแบบจำลอง ผลการทดลองที่ได้คือระยะการเคลื่อนตัวของสมอ และเมื่อมีแรงดึงที่เพิ่มขึ้น และค่ามุมจากระนาบการพิบัติ เพื่อให้เห็นผลต่างระหว่างขนาดของแผ่นสมอ และระยะฝังที่แตกต่างกัน จึงต้องนำข้อมูลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของแผ่นสมอ มีดังนี้

#### 3.5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำหนัที่ใช้ถ่วง กับระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำหนัที่ใช้ถ่วง กับระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน โดยใช้กราฟในการแสดงข้อมูล ตั้งแต่ยังไม่มีการถ่วงน้ำหนัก จนถึงน้ำหนักที่ทำให้โครงสร้างชั้นดินเกิดการพิบัติ แกนนอน(แกนx) แสดงข้อมูลระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน ในหน่วยมิลลิเมตร และแกนตั้ง(แกนy) แสดงมวลน้ำหนัที่ใช้ถ่วงหน่วยกรัม



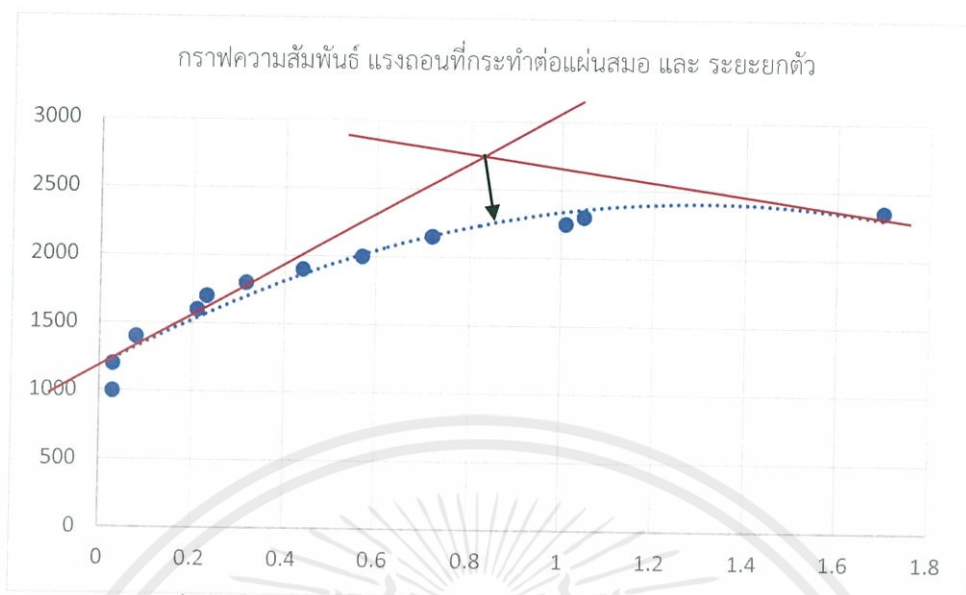
(รูปที่ 3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำหนักรวมที่ใช้ถ่วง กับระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นดิน)

### 3.5.2 วิธีการหาจุดพิบัติของแผ่นสมอรับแรงดึงจากกราฟด้วยวิธี graphical method ของ Arthur Casagrande , 1936

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอน กับระยะการเคลื่อนตัวของแผ่นสมอ จะทำการหาจุดพิบัติของแผ่นสมอโดยใช้หลักการเดียวกันกับการหาจุด preconsolidation pressure บนกราฟ Void ratio และ Effective stress (KPa) ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ มีวิธีดังนี้

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงถอน กับระยะการเคลื่อนตัวของแผ่นสมอ
2. จากนั้นทำการลากเส้นความชันสัมผัสกับกราฟ 2 ช่วง โดยให้ความชันทั้ง 2 ช่วงนี้ตัดกัน
3. ทำการลากเส้นจากจุดตัดความชัน ให้แบ่งครึ่งมุมระหว่างเส้นสัมผัสทั้ง 2 เส้นให้มาชนกับเส้นกราฟ จะได้จุดที่เปลี่ยนความชัน

ซึ่งจุดเปลี่ยนความชันนี้คือจุดพิบัติของแผ่นสมอ ซึ่ง ค่าแกน x คือค่าระยะยกตัวที่จุดพิบัติของสมอ และ ค่าแกน y คือค่าแรงต้านแรงถอนของตัวแผ่นสมอ



(รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการการประมาณหาจุดที่เริ่มเข้าสู่การวิบัติ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

ทรายตัวอย่างที่ใช้สำหรับเป็นชั้นดินในการฝังสมอเพื่อทำการทดสอบในครั้งนี้เป็นทรายเนื้อละเอียดที่นำมาผ่านการอบแห้ง และมีคุณสมบัติดังนี้

##### 4.1.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

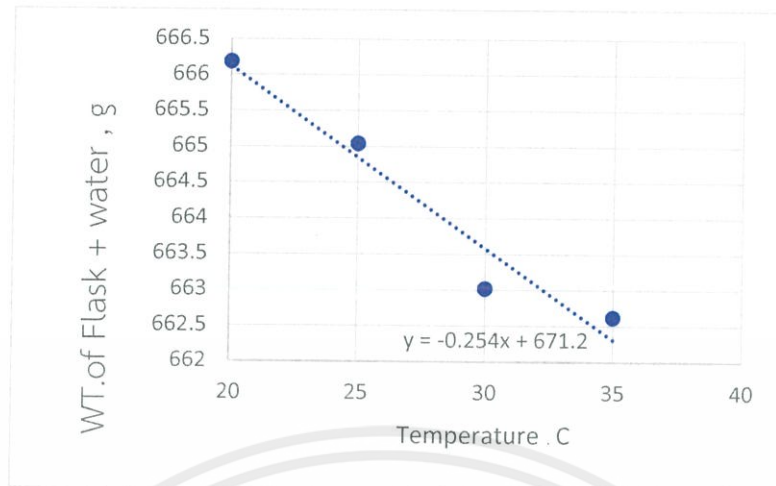
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดคละของเม็ดดิน

ตะแกรง ขนาด เบอร์	ช่องเปิด ของ ตะแกรง มม.	น้ำหนัก ของ ตะแกรง กรัม	น้ำหนัก ของ ตะแกรง +ดิน กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้าง กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้างสะสม กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้างสะสม %	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง %
3/8"	9.51	797.6	797.6	0	0	0	100
4	4.75	775.64	775.64	0	0	0	100
10	2	610.91	700.16	89.25	89.25	16.14304	83.85696
40	0.425	370.7	682.48	311.78	401.03	72.53604	27.46396
50	0.3	561.86	685.29	123.43	524.46	94.86136	5.13864
200	0.075	310.1	338.1	28	552.46	99.92584	0.074158
Pan	0	400.15	400.56	0.41	552.87	100	0

##### 4.1.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูล Calibration of Pycnometer

Calibration of Pycnometer	
Temperature (C°)	FLASK + WATER (g)
35	662.62
30	663.02
25	665.04
20	666.18



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์แสดงการปรับแก้ค่าน้ำหนักของขวดแก้วกับน้ำ

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

Sample NO.	1	1	3
Soil description	sand	sand	sand
Trial NO.	1	2	3
1. Temperature °C	26	26	26
2. Flask + water ,g	666.32	666.32	666.32
3. Flask + water + soil ,g	760.22	760.32	758.81
4. Container NO.	1	2	3
5. Dry soil (A) ,g	149.31	149.33	148.96
6. Saturated Surface Dry soil (B) ,g	150	150	150
7. G.S.	2.6178	2.6266	2.6303
Average G.S.	2.6249		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 ค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle)

จากการทดลองปล่อยทรายให้ตกอิสระที่ความสูงพบว่า ทรายมีมุม  $\phi = 31.9^\circ$

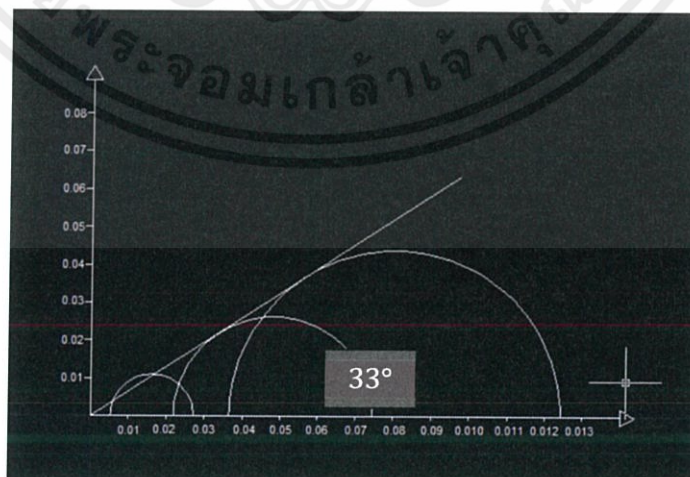


รูปที่ 4.2 แสดงการปล่อยทรายอิสระที่ชั้นความสูง

จากการทดสอบมุมเสียดทานภายในด้วยการทดลอง direct shear ค่ามุมภายใน  $\phi = 33^\circ$

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลอง Direct Shear

TEST NO.	Normal Stress (ksc)	Max. Shearing stress (ksc)
1	0.0162	0.00882
2	0.0483	0.02634
3	0.0804	0.0439

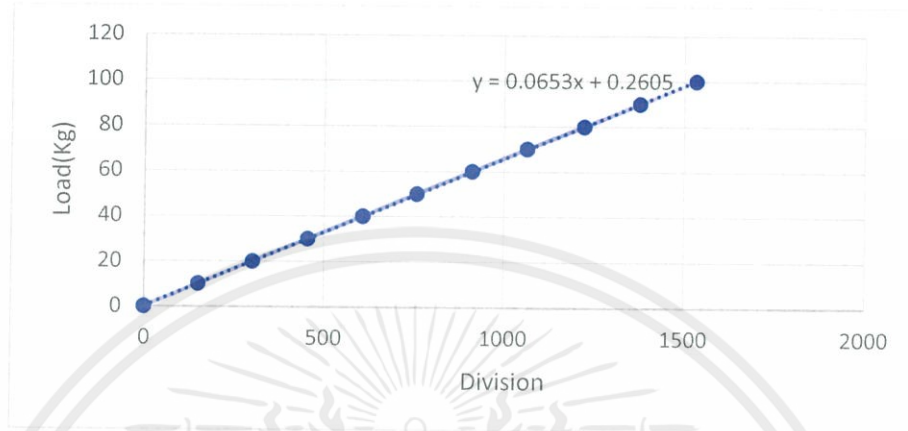


รูปที่ 4.3 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 ค่า Elastic modulus ของแผ่น Plate Anchor

การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของแผ่น Plate ที่นำมาใช้ในการติดตั้งทดสอบ โดยการกดน้ำหนักลงตรงกลางบนแผ่นโลหะที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำสมอรับแรงดึงจำลองโดยบันทึกระยะการโก่งตัวของแผ่นโลหะแผ่นสมอนั้นใช้เป็นแผ่นโลหะขนาด 20x9 cm.



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดลงบนแผ่นสมอทดสอบและระยะการแอ่นตัว

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus

Proving Ring	Dial gauge	$\delta$ (mm)	load(P)	E(kg/m <sup>2</sup> )	E(kg/cm <sup>2</sup> )
1	49	0.49	1.867	8467120181	846712.02
2	54	0.54	2.415	9938271605	993827.16
3	62	0.62	2.924	10480286738	1048028.67
4	69	0.69	3.412	10988727858	1098872.79
5	73	0.73	3.821	11631659056	1163165.91
6	79	0.79	4.516	12703234880	1270323.49
7	84	0.84	5.013	13261904762	1326190.48
8	89	0.89	5.619	14029962547	1402996.25
9	95	0.95	5.945	13906432749	1390643.27
10	101	1.01	6.413	14110011001	1411001.10
11	108	1.08	6.757	13903292181	1390329.22
12	121	1.21	7.332	13465564738	1346556.47
				average	1224053.90

เอกสารนี้เป็นคำนวณหาค่า Elastic modulus โดยใช้สูตร

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า Elastic modulus โดยใช้สูตร  $\delta = \frac{PL^3}{48EI}$

เพื่อหา Elastic modulus จะได้  $E = \frac{PL^3}{48\delta I}$  โดย ค่า  $I$  ได้จากสูตร  $I = \frac{bh^3}{12}$

โดย  $h = 0.001$  เมตร,  $b=0.09$  เมตร,  $L=0.2$  เมตร

$$I = \frac{0.9 \times 0.001^3}{12} = 7.5 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

จากการคำนวณ ได้ค่า Elastic modulus เท่ากับ  $1224073.66 \text{ Kg/cm}^2$

## 4.2 ผลการศึกษากำลังแรงถอนสมอในชั้นทรายจากแบบจำลอง

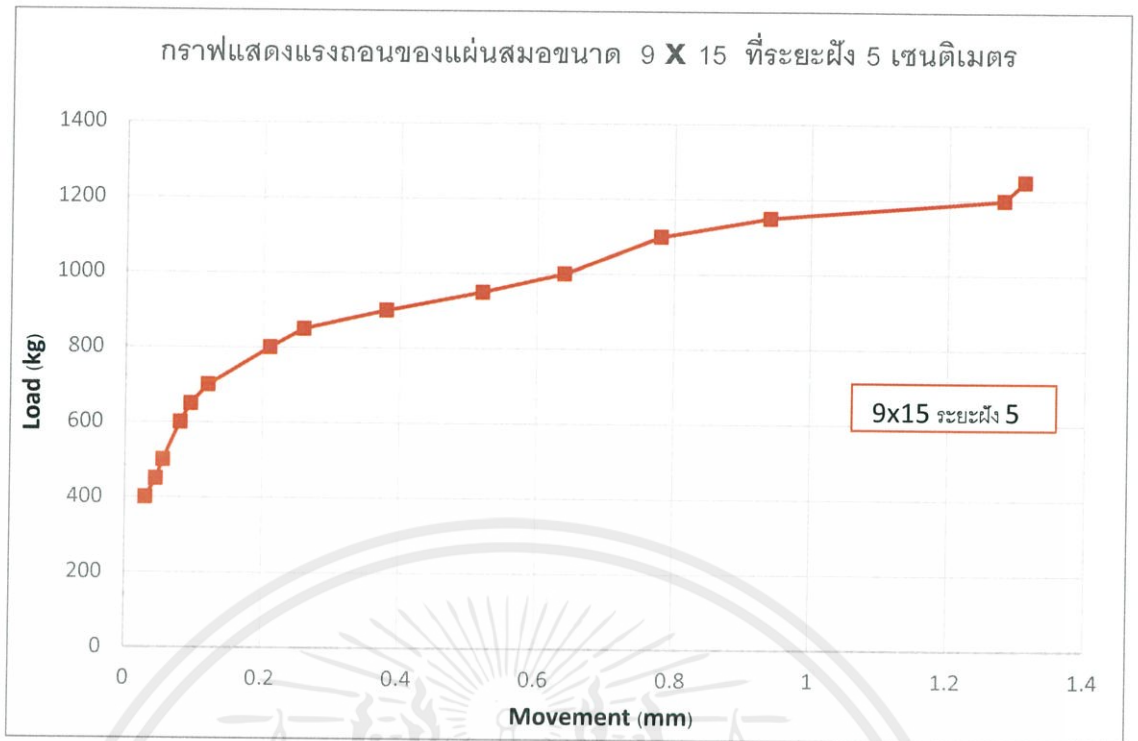
การทดสอบนี้ทำในแบบจำลองขนาด  $53 \times 24 \times 40$  เซนติเมตรด้วยการทดสอบโดยการดึงแผ่นสมอ ที่ถูกฝังในชั้นทรายที่มีขนาดแผ่นสมอแตกต่างกัน และ ระยะลึกของการฝังที่ต่าง ๆ กัน

### 4.2.1 ผลการศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนที่กระทำต่อสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอ

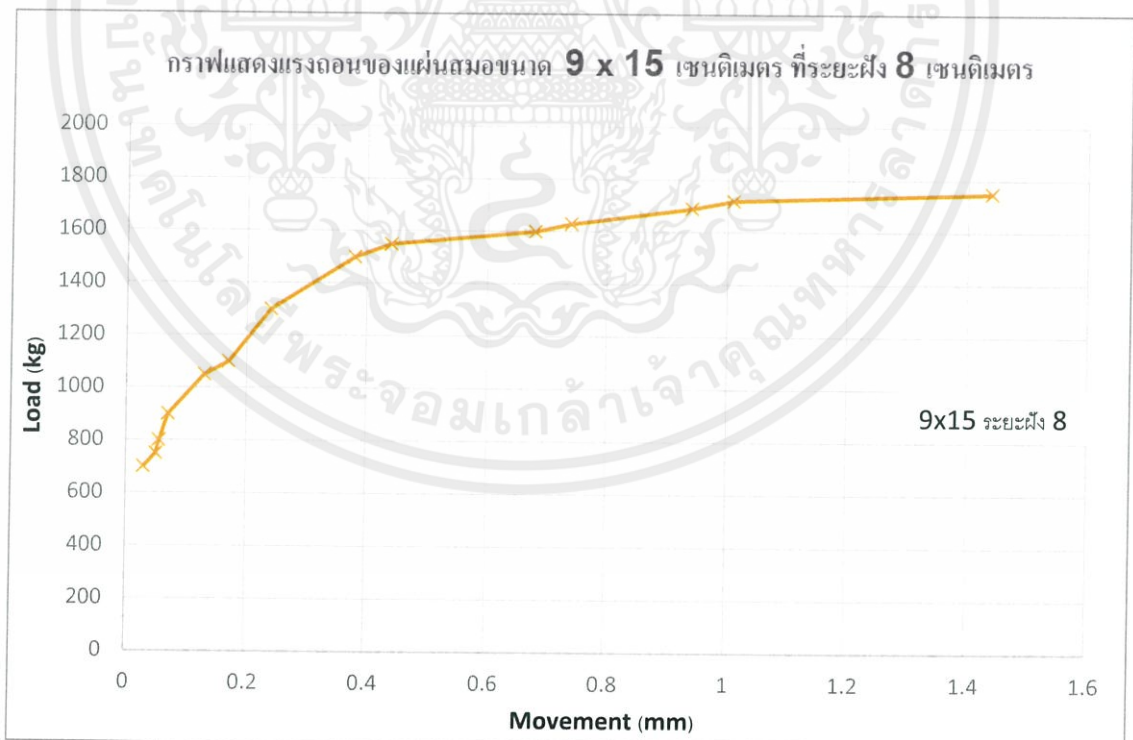
จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแผ่นสมอเมื่อมีการรับแรงถอนโดยกำหนดให้สมอถูกฝังที่ระยะความลึก 5 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร ตามลำดับโดยกำหนดให้ใช้ขนาดของแผ่นสมอ มี 2 ขนาด คือ  $9 \times 15$  เซนติเมตร และ  $9 \times 20$  เซนติเมตร ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.2.1.1 ผลการศึกษาแบบจำลองที่ 1

ในแบบจำลองนี้กำหนดขนาดแผ่นสมอ  $9 \times 15$  เซนติเมตรโดยมีระยะมีระยะฝังที่ 5 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร โดยให้สมอมีการรับแรงถอนไปเรื่อยๆโดยเริ่มจากการใส่ Load ครั้งละ 50 กรัม ไปเรื่อยๆ แล้วทำการบันทึกค่าการยกตัวของแผ่นสมอจากที่อ่านได้ จาก Dial gauge จนกระทั่งแผ่นสมอวิบัติ กราฟที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์แกนนอน คือระยะยกตัวของแผ่นสมอ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และแกนตั้ง คือน้ำหนักที่ใช้ถ่วงโดยจะมีหน่วยเป็น กรัม



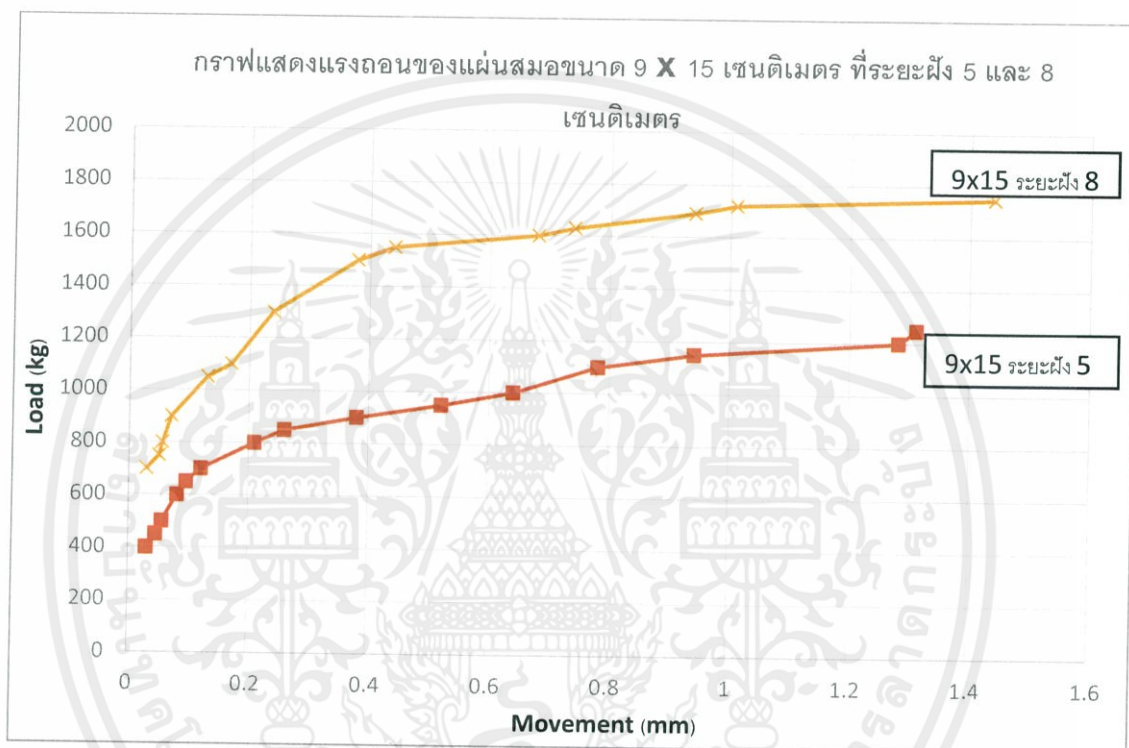
รูปที่ 4.5 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.6 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอกับระยะยกตัวพบว่าเมื่อทำการ Load น้ำหนักเริ่มแรกยังมีแรงกระทำอยู่น้อยๆทำให้ในช่วงแรกนั้นยังไม่มี การเคลื่อนตัวของแผ่นสมอ และเมื่อทำการทดลองไปนั้นพบว่า ต้องมีการ Disturb แผ่นสมอระดับหนึ่งจึงจะให้เกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งพบว่าแผ่นสมอขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะความลึก 5 เซนติเมตรต้องมีการใช้น้ำหนักรบกวน ขนาด 400 กรัมสำหรับระยะยกตัวเริ่มต้น และที่ระยะความลึก 8 เซนติเมตรต้องมีการใช้น้ำหนักรบกวน ขนาด 700 กรัมสำหรับการยกตัวเริ่มต้น แรงถอนสูงสุดที่แผ่นสมอสามารถรับได้ คือ 1250 กรัม และ 1750 กรัม ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตรและ 8 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ ระยะฝัง 5 เซนติเมตร 8 เซนติเมตร



รูปที่ 4.8 แสดงการยกตัวเริ่มแรกของแผ่นสมอที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตรโดยใช้น้ำหนักเริ่มต้นที่ 700 กรัม

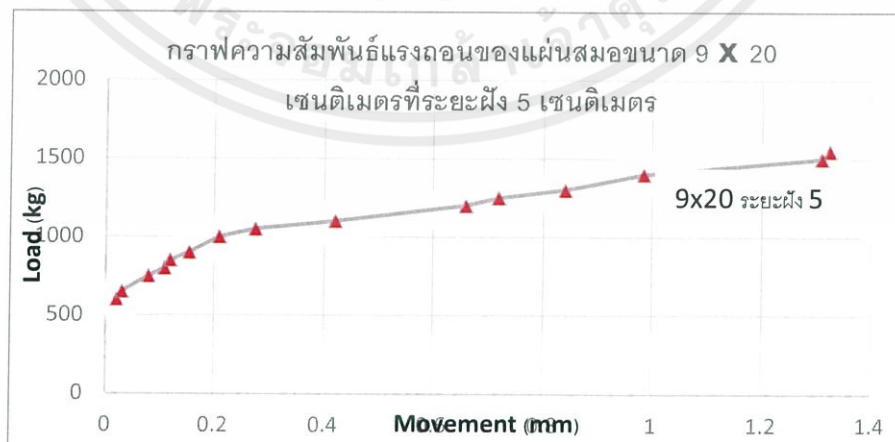


รูปที่ 4.9 แสดงแผ่นสมอที่ถูกกระทำด้วยแรงถอนและมีการเคลื่อนตัวขึ้นจนมีจนเห็นลักษณะได้ชัดเจน

จากการทดลองพบว่าแผ่นสมอมีการเคลื่อนตัวเริ่มแรกเมื่อมีขนาดของแรงเริ่มต้นมากกระทำมากเพียงพอ ซึ่งการเคลื่อนตัวของแผ่นสมอเริ่มแรกจะมีการเคลื่อนที่ในอัตราที่น้อยเมื่อเทียบกับแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอซึ่งในช่วงแรกหลังจากการผ่านช่วงรบกวนด้วยแรงช่วงแรก จะทำให้ทรายนั่นแน่นขึ้นจึงทำให้ความต้านทานต่อแรงถอนของแผ่นสมอมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ในช่วงแรกต้องใช้แรงมากจึงจะทำให้แผ่นสมอเคลื่อนตัว ในช่วงถัดมาอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นสมอจะมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงถอนที่กระทำ ซึ่งเมื่อทำการ Load จนถึงจุดพิบัติของแผ่นสมอจะพบว่าในช่วงปลายอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นสมอต่อแรงจะมากกว่าก่อนที่จะพิบัติ

#### 4.2.1.2 ผลการศึกษาแบบจำลองที่ 2

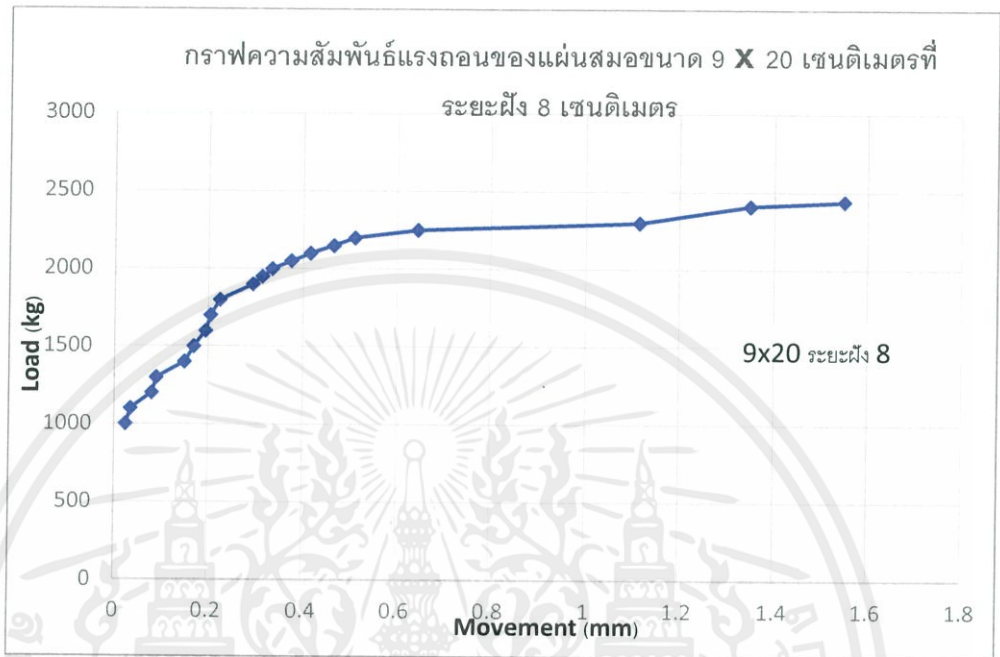
ในแบบจำลองนี้กำหนดขนาดแผ่นสมอ 9 x 20 เซนติเมตรโดยมีระยะฝั่งที่ 5 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร โดยให้สมอมีการรับแรงถอนไปเรื่อยๆโดยเริ่มจากการใส่ Load ครั้งละ 50 กรัม ไปเรื่อยๆ แล้วทำการบันทึกค่าการยกตัวของแผ่นสมอจากที่อ่านได้ จาก Dial gauge จนกระทั่งแผ่นสมอพิบัติ กราฟที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์แกนนอน คือระยะยกตัวของแผ่นสมอ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และแกนตั้ง คือน้ำหนักที่ใช้ถ่วงโดยจะมีหน่วยเป็น กรัม



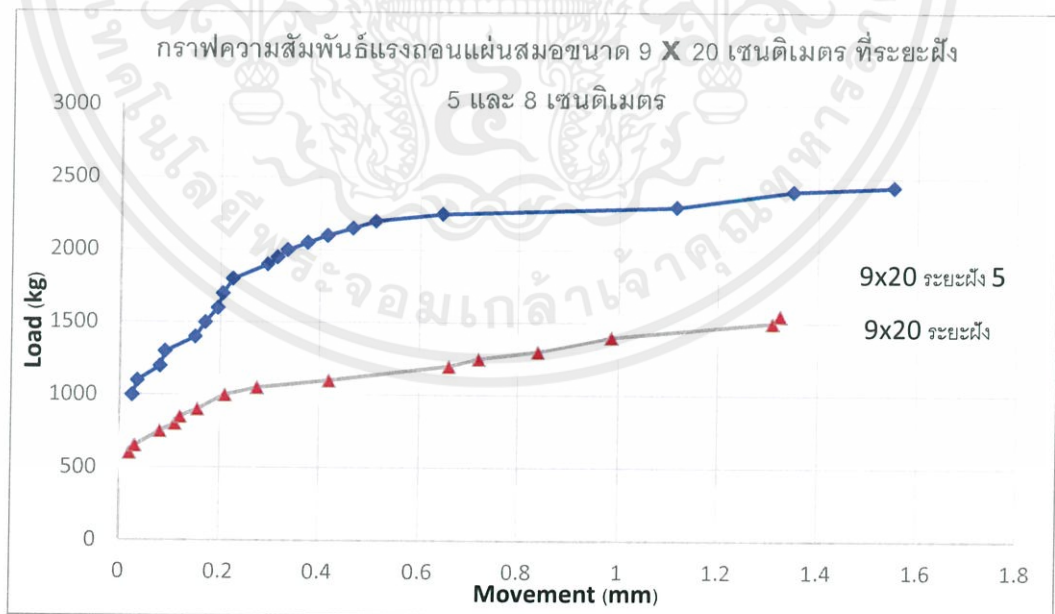
รูปที่ 4.10 รูปขยายแสดงความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝั่ง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาแบบจำลองที่ 2 โดยเป็นการเพิ่มขนาดของแผ่นสมอให้ใหญ่ขึ้นกว่าเดิมโดยการเพิ่มจาก  $9 \times 15$  เซนติเมตร เป็น  $9 \times 20$  เซนติเมตร ซึ่งจากการทดสอบพบว่าแผ่นสมอขนาดใหญ่ขึ้นมีกำลังรับแรงทนได้มากกว่าสมอแผ่นเล็ก และเมื่อขนาดของแผ่นสมอใหญ่ขึ้นพบว่าการใช้น้ำหนักในการทำให้แผ่นสมอเริ่มเคลื่อนตัวมากขึ้นกว่า แผ่นสมอที่มีขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 4.11 รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงทนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝั่ง 8 เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงทนที่กระทำต่อแผ่นสมอและระยะยกตัวของแผ่นสมอที่ระยะฝั่ง 5 และ 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการลองผิดลองถูก พบว่าแบบจำลองที่ใช้ใน 2 มิติคือการกำหนดให้ด้านยาวของแผ่นสมอ ด้านหนึ่งติดกับขอบกระจกสำหรับ การโรยทรายสีเพื่อสังเกตระนาบ จะมีค่าแรงถอนที่น้อยกว่า แบบจำลองที่ถูกออกแบบให้เป็น 3 มิติ คือลักษณะเดียวกันกับในสนาม โดยค่าแรงถอนที่ไม่เสถียรนั้น มาจาก boundary error ซึ่งมาจากแรงเสียดทานระหว่างแผ่นสมอกับแผ่นกระจก ดังนั้นใน แบบจำลองที่ 1 และ แบบจำลองที่ 2 จึงไม่สามารถหามุมพิบัติของดินที่อยู่เหนือแผ่นสมอได้ เพราะ แบบจำลองถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเดียวกับแผ่นสมอที่ถูกฝังในสนามจริง ดังนั้น ในแบบจำลองที่ 3 เป็นแบบจำลองที่ศึกษาลักษณะการพิบัติของดินบริเวณแผ่นสมอ และ ระนาบการพิบัติของดิน

#### 4.2.1.3 ผลการศึกษาแบบจำลองที่ 3

วัตถุประสงค์ของแบบจำลองที่ 3 คือศึกษาการเพิกของดินบริเวณเหนือแผ่นสมอ โดยจะสร้างแบบจำลองเป็น 2 มิติ โดยด้านยาวด้านหนึ่งของแผ่นสมอจะติดกับกระจกและสร้างชั้น ทรายสีสำหรับสังเกตลักษณะการพิบัติของดิน



รูปที่ 4.13 แสดงการจำลองการตั้งของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตรที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร พบว่าระนาบการเพิกของดินมีค่า 81.2 องศา

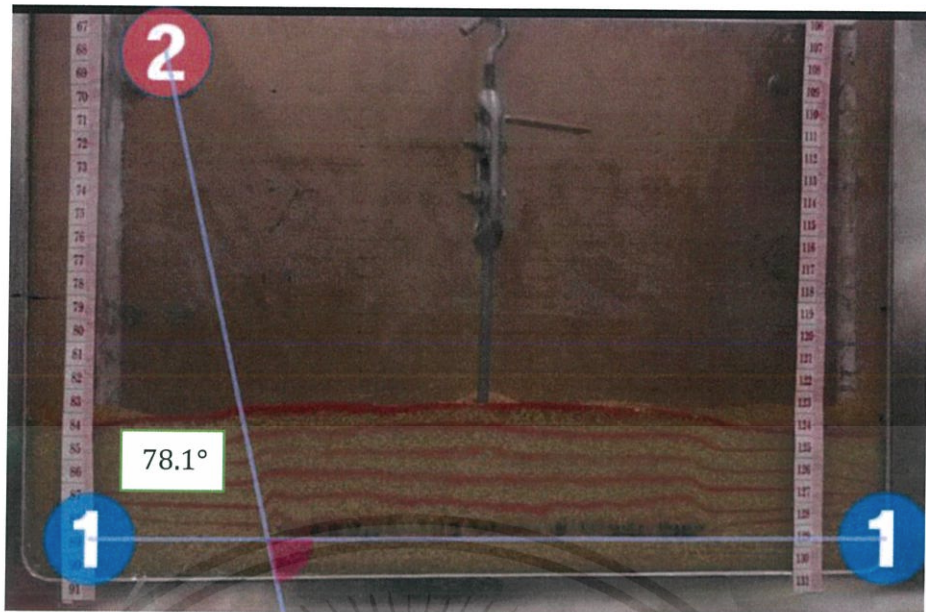


รูปที่ 4.14 แสดงการจำลองการตั้งของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตรที่ระยะฝั่ง 8 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 82.7 องศา



รูปที่ 4.15 แสดงการจำลองการตั้งของแผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตรที่ระยะฝั่ง 8 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 80 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงการจำลองการดึงของแผ่นสมอขนาด 9 x 15 เซนติเมตรที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร พบว่าระนาบการพังของดินมีค่า 78.1 องศา

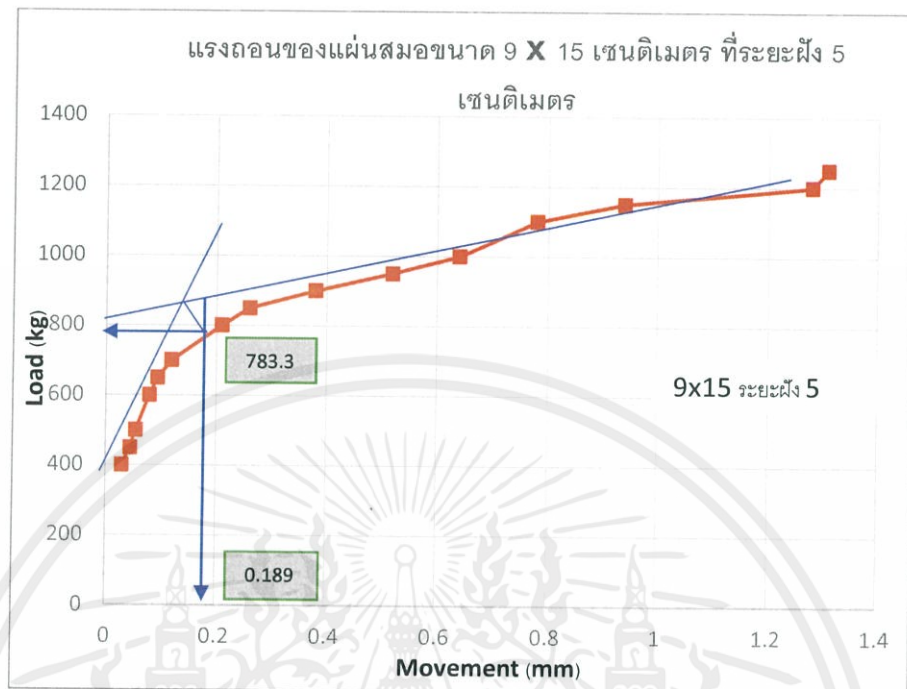
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาระนาบพิบัติของดินบริเวณเหนือกำแพงกันดินโดยมีทิศทางการทำมุมกับแนว horizontal

รูปแบบ	Angle of failure plane
Plate Anchor 7x15 cm : ฝังลึก 5 cm	78.1
Plate Anchor 7x15 cm : ฝังลึก 8 cm	80
Plate Anchor 7x20 cm : ฝังลึก 5 cm	81.2
Plate Anchor 7x20 cm : ฝังลึก 8 cm	82.7

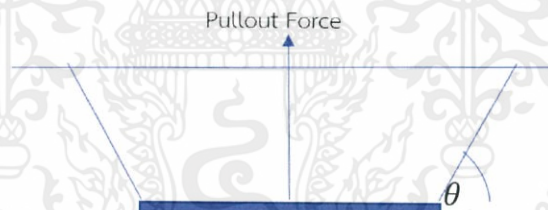
จากผลการศึกษาพบว่า การพิบัติของชั้นดินบริเวณเหนือแผ่นสมอจะมีการพิบัติแบบทำมุมไปทางด้านข้างโดยการสังเกตจากลักษณะของทรายสี ที่มีการปูดขึ้นหลังจากที่มีการถ่วงจากนั้นลากแนวพิบัติของชั้นทรายจากชั้นทรายฐาน ซึ่งพบว่าเมื่อแผ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น ระนาบเฉือนจะมากขึ้นเมื่อเทียบกับแนวราบ หมายถึง ช่วง Influence zone น้อยลง

#### 4.2.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลองการดึง ณ จุดพิบัติ

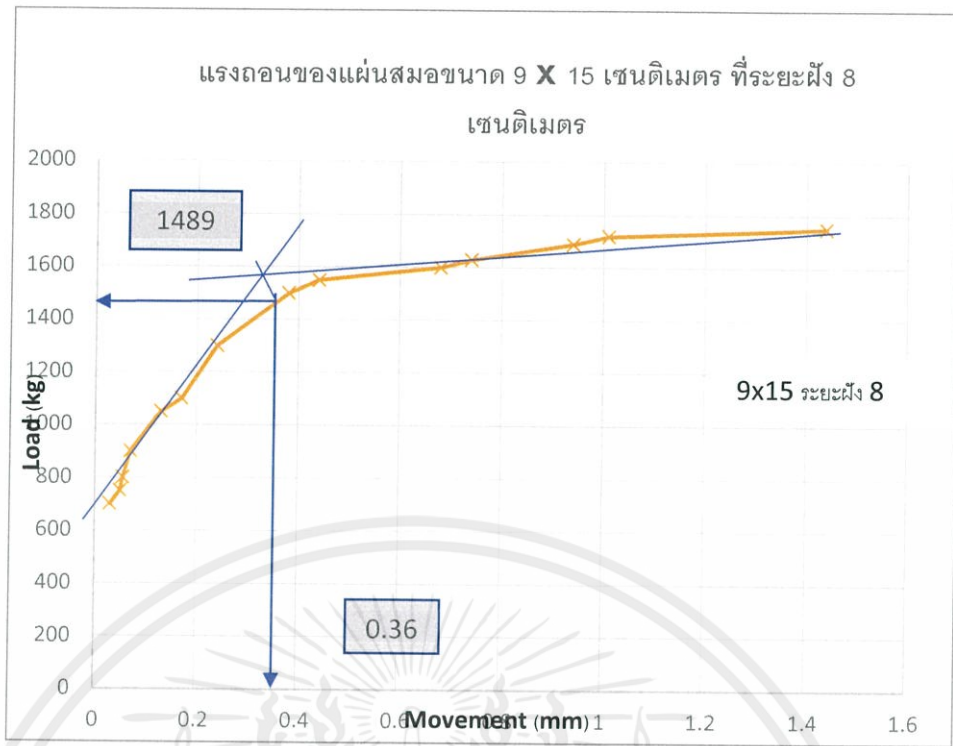
จุดพิบัติของแผ่นสมอการหาจุดพิบัติของแผ่นสมอโดยใช้วิธี Graphical Method



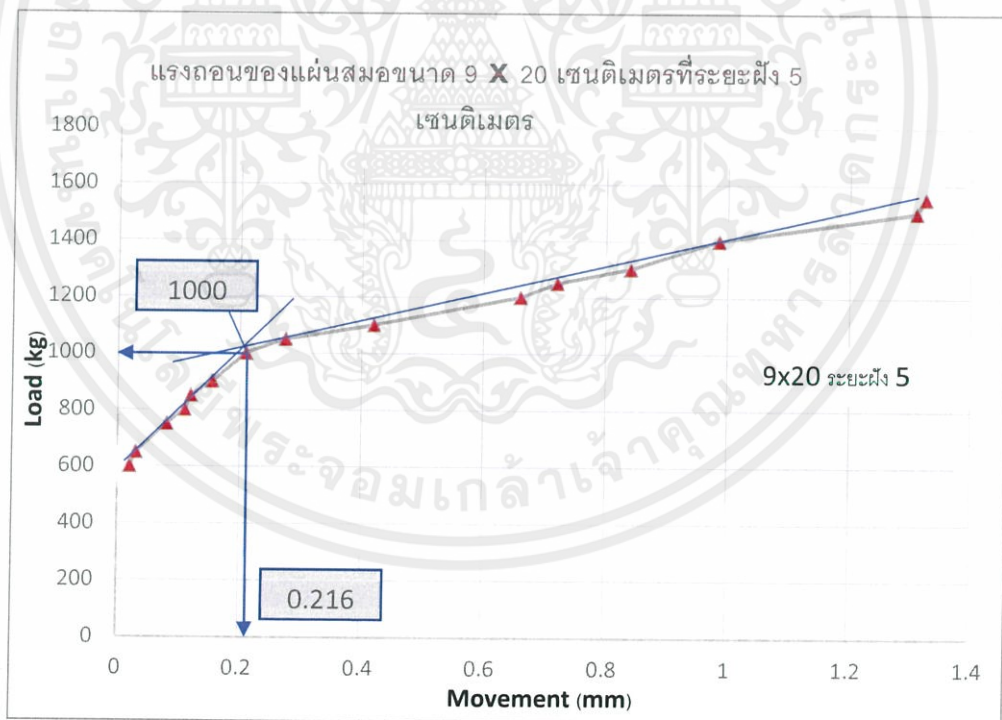
รูปที่ 4.17 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร



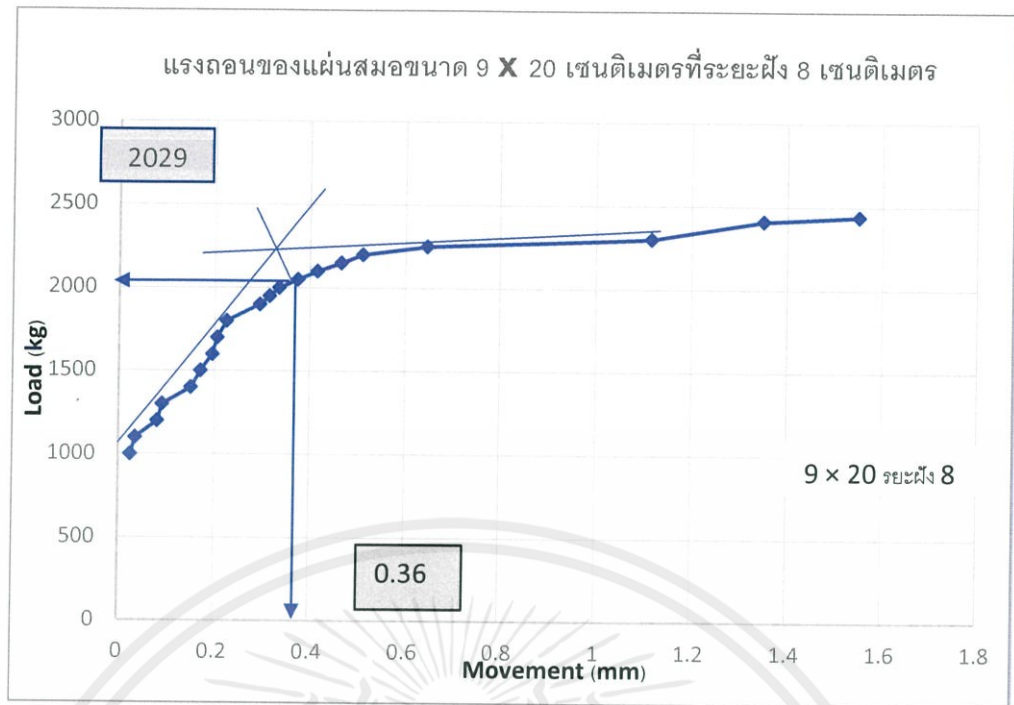
รูปที่ 4.18 ลักษณะแนววิบัติ



รูปที่ 4.19 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 15 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร



รูปที่ 4.20 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.21 แสดงจุดพิบัติของ Plate Anchor ขนาด 9 x 20 เซนติเมตร ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร

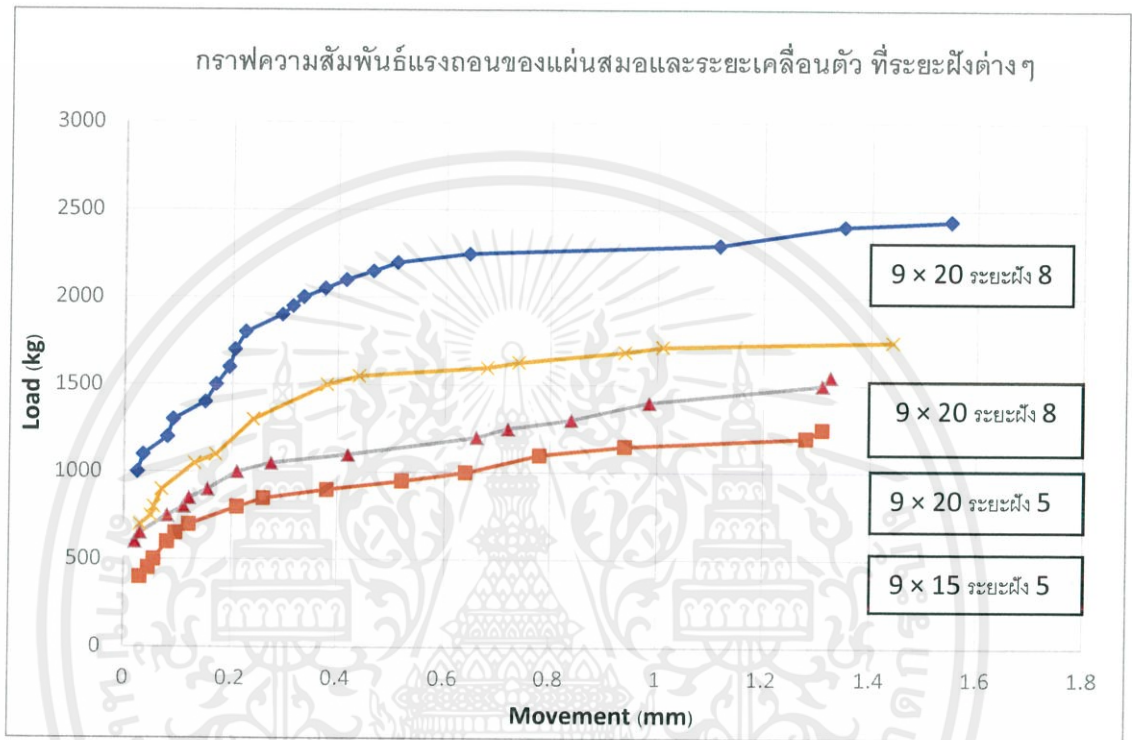
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลผลการศึกษาจุดพิบัติของแผ่นสมอโดยวิธี Graphical Method

รูปแบบ	แรงถอนที่จุดพิบัติ (กรัม)	ระยะยกตัวที่จุดพิบัติ (มิลลิเมตร)
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 5 cm	783.3	0.189
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 8 cm	1489	0.36
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 5 cm	1000	0.216
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 8 cm	2029	0.36

#### 4.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลอง

##### 4.3.1 เปรียบเทียบผลการศึกษาความสัมพันธ์แรงถอนที่กระทำต่อสมอกับระยะยก

จากผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ของแรงถอนและระยะยกตัวของสมอ จากแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 แสดงค่าได้ดังนี้ ทั้ง ในนี้ช่วงแรกไม่มีการรวมน้ำหนักของจากและตะขอเกี่ยวสำหรับวางน้ำหนัก 800 กรัม



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ของแรงถอนที่กระทำต่อสมอกับระยะยกตัวแผ่นสมอ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าระยะยกตัวสูงสุดของแผ่นสมอและค่าแรงถอนสูงสุดของแผ่นสมอ

รูปแบบ	Angle	ระยะการยกตัวสูงสุดของแผ่นสมอ,mm	ค่าแรงถอนสูงสุดของแผ่นสมอ , kg
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 5 cm	78.1	1.55	2050
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 8 cm	80	1.325	2550
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 5 cm	81.2	1.44	2350
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 8 cm	82.7	1.31	3240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองประสิทธิภาพในการต้านทานแรงถอนของแผ่นสมอ

ค่าความต้านทานแรงถอนของแผ่นสมอ เมื่อถูกฝังในชั้นทรายพบว่ามีปัจจัยที่ทำให้แผ่นสมอ มีความต้านทานในการรับแรงถอนประกอบไปด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) , ขนาดของแผ่นสมอ , ความแน่นของชั้นดินที่พิจารณา นอกจากนี้จากข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบุว่า ยังมีตัวแปรไร้มิติ เป็นตัวคูณ Factor ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนระยะฝังต่อความกว้างของแผ่นสมอ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นแบบ Linearly ตามอัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของแผ่นสมอ (Embedment Ratio) ซึ่งชื่อเรียกตัวคูณนี้ถูกเรียกต่าง ๆ กัน

ค่าความต้านทานแรงถอนของแผ่นสมอในช่วงแรงของการ Load พบว่าแผ่นสมอจะไม่เกิดการยกตัวจนกว่าจะมีการ Disturb จากน้ำหนักที่มากพอถึงค่าหนึ่งซึ่งพบว่าน้ำหนักที่ทำให้แผ่นสมอ เริ่มมีการเคลื่อนตัวเริ่มต้นจะอยู่ที่ประมาณ หนึ่งในสามส่วนของค่าน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้แผ่นสมอไม่สามารถรับแรงต่อไปได้

ในช่วงเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะยกตัวของแผ่นสมอนั้น สังเกตได้ว่ามีอัตราของแรงต่อระยะยกตัวที่สูง ซึ่งมาจากความแน่นของทรายในแบบจำลองนั้น ถูกควบคุมความแน่นโดยการปล่อยให้ตกอย่างอิสระที่ความสูง จึงทำให้ทรายวางตัวกันอย่างหลวมๆ เมื่อน้ำหนักกระทำจึงทำให้ทรายแน่นขึ้น จึงเป็นเหตุผลว่าช่วงแรกจึงจะเห็นอัตราแรงถอนต่อระยะยกตัวนี้ค่อนข้างสูงกว่าช่วงอื่น และในช่วงปลายก่อนถึงจุดสูงสุด นั้น อัตราแรงถอนต่อระยะยกตัวค่อยๆ ลดลงจนแทบเป็นเส้นตรงแนวนอนซึ่งหมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของระยะยกตัวเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าแรงถอนที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองและค่า Overburden จากทราย

รูปแบบ	ค่าแรงถอนที่จุดพิบัติ , g	ระยะยกตัวที่จุดพิบัติ, mm	$\gamma_{HA}$ , g
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 5 cm	1583.3	0.189	1378
Plate Anchor 9x15 cm : ฝังลึก 8 cm	2289	0.36	2204.9
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 5 cm	1800	0.216	1837.4
Plate Anchor 9x20 cm : ฝังลึก 8 cm	2829	0.36	2939.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะการพิบัติและแนวการพิบัติของทรายบริเวณเหนือฐานรากของแผ่นสมอรับแรงถอนนั้นพบว่าแนวการพิบัตินั้นมีมุมพิบัติที่มากกว่า 90 องศา กับแนวราบแต่มีลักษณะเบนออกด้านข้างในลักษณะของการเฉือนออกข้าง ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการพิบัติในลักษณะนี้นั้นจะเกิดขึ้นในกรณีของดินที่มีความแน่นสูงเท่านั้น ดังนั้นจากการศึกษาผลการทดลองซึ่งมีพื้นที่ค่อนข้างจำกัดในแบบจำลองซึ่งมีลักษณะการพังออกข้าง อาจมีผลของ boundary effect ซึ่งทำให้การทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี



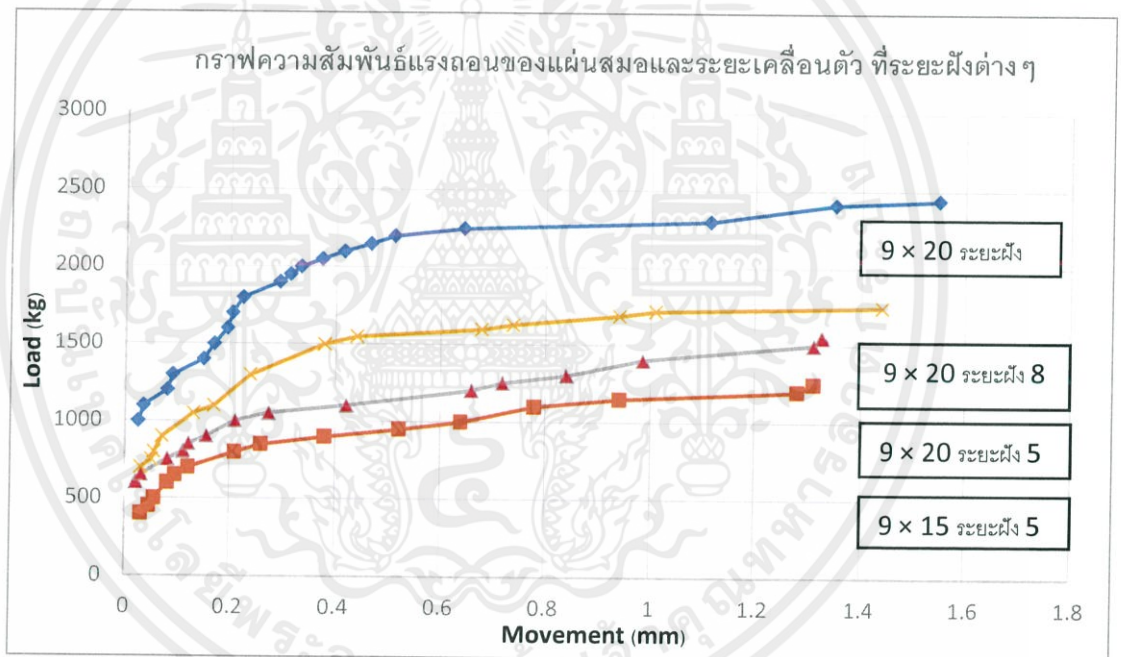
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

- ค่าความต้านทานแรงถอนของแผ่นสมอในช่วงแรงของการ Load พบว่าแผ่นสมอจะไม่เกิดการยกตัวจนกว่าจะมีการ Disturb จากน้ำหนักที่มากพอถึงค่าหนึ่งซึ่งพบว่าน้ำหนักที่ทำให้แผ่นสมอเริ่มมีการเคลื่อนตัวเริ่มต้นจะอยู่ที่ประมาณ หนึ่งในสามส่วนของค่าน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้แผ่นสมอไม่สามารถรับแรงต่อไปได้



ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ safety factor = 3.0

- 2) ในการทดลองนี้ได้มีการเปลี่ยนขนาดของแผ่นสมอและระยะฝังเพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงถอนของแผ่นสมอ ซึ่งจากการทดสอบนั้นพบว่า

พิจารณาเชิงขนาดของแผ่นสมอจะพบว่าที่แผ่นสมอขนาดเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มระยะฝังจาก 5 cm เป็น 8 cm จะทำให้กำลังถอนเพิ่มขึ้นโดย

แผ่นสมอขนาด 9 x 15 เซนติเมตร กำลังถอนเพิ่มขึ้น 24.39 %

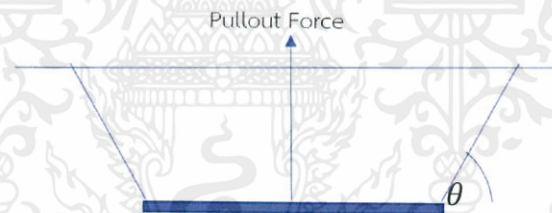
แผ่นสมอขนาด 9 x 20 เซนติเมตร กำลังถอนเพิ่มขึ้น 37.87 %

พิจารณาเชิงระยะฝังพบว่าที่ระยะฝังเดียวกันโดยทำการเปลี่ยนขนาดของแผ่นสมอจาก 9 x 15 เซนติเมตร เป็น 9 x 20 เซนติเมตร จะทำให้กำลังถอนเพิ่มขึ้น

ที่ระยะฝัง 5 เซนติเมตร กำลังถอนเพิ่มขึ้น 27.06 %

ที่ระยะฝัง 8 เซนติเมตร กำลังถอนเพิ่มขึ้น 14.63 %

- 3) จากแบบจำลองพบว่า รูปแบบการพิบัติของแผ่นสมอนั้นพบว่า Plate Anchor จะมีระนาบของพิบัติเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ทิ่มมุมช่วงประมาณ 78-82 องศา



ดังนั้นจึงแนะนำการคำนวณกำลังรับแรงถอนสูงสุดของแผ่นสมอจากน้ำหนักทรายกดทับเหนือแผ่นสมอเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เปลี่ยนสภาพแวดล้อมของแบบจำลองให้เหมือนกับสภาพหน้างานจริง เช่น ชนิดของดิน ตัวอย่าง วัสดุที่ใช้สำหรับการทำ Plate Anchor
- 2) นำผลทางการศึกษาไปวิเคราะห์ ด้วยวิธี Finite Element
- 3) เพิ่มกรณีศึกษาของแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลที่สามารถอธิบายได้เพิ่มขึ้น
- 4) เพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองแบบจำลอง
- 5) เพิ่มกรณีศึกษาสำหรับศึกษาผลของค่าตัวแปรไร้มิติ ( embedment ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จิระยุทธ สืบสุข. (2554). แรงดันดินด้านข้าง. สืบค้นจาก <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [2] บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน. (2557). ก า แวงกันดิน. สืบค้นจาก <http://www.real-parenting.com/Article.aspx?ArticleID=4578>
- [3] สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553, มิถุนายน). Foundation Engineering. สืบค้นจาก <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [4] Research475. (2014). Geosynthetics. Retrieved from <http://commons.wikimedia.Org/wiki/File:Geo2.jpg>
- [5] M.A.Meguid, O.Saada, M.A.Nunes, J.Mattar. (2007). Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. Retrieved from [http://www.researchgate.net/profde/Mohamed\\_Meguid/publication/222025612\\_Physical\\_modeling\\_of\\_tunnels\\_in\\_soft\\_ground\\_A\\_review/links/0c96052588d69020b9000000.pdf](http://www.researchgate.net/profde/Mohamed_Meguid/publication/222025612_Physical_modeling_of_tunnels_in_soft_ground_A_review/links/0c96052588d69020b9000000.pdf)
- [6] Anne Sophie Colas, Denis Gamier, Jean Claude MOREL. (2009). Assessing the two-dimensional behaviour of drystone retaining walls by full-scale experiments and yield design simulation. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00942625/document>
- [7] B.Villemus, J.C.Morel, C.Boutin. (2014). Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation. Retrieved from [https://hal.archives-ouvertes.fr/fde/index/docid/941189/fdename/Experimental\\_assessment\\_of\\_dry\\_stone\\_retaining\\_wall\\_stability\\_on\\_a\\_rigid\\_foundation.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/fde/index/docid/941189/fdename/Experimental_assessment_of_dry_stone_retaining_wall_stability_on_a_rigid_foundation.pdf)
- [8] ผศ.ดร.ชนาดล คงสมบูรณ์, กลุ่มวิจัยด้านแบบจ าลองหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพีแห่งประเทศไทย. (2007). Applications of Geotechnical Centrifuge Technique. Retrieved from <http://www.fiet.kmutt.ac.th/centrifuge/application.html>

## ภาคผนวก ก

## สัญลักษณ์

$B$  = ความกว้างของสมอ

$c$  = *Cohesion*

$D$  = ความลึกของของเสาเข็ม

$E$  = *elastic modulus*

$G_t$  ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}C$ )

$h_i$  = ความหนาของดิน ณ. ชั้นที่  $i$

$h_w$  = ระยะจากผิวน้ำใต้ดินถึงจุดที่พิจารณา

$K_a$  *Coefficient of at rest earth pressure*

$q_a$  = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง

$q_{ult}$  = หน่วยแรงที่เกิดการพิบัติ

$L$  = ความยาวที่เกิดทางเฉือนพัง

$N_c$  = *Bearing capacity factor*

$N_q$  = *Bearing capacity factor*

$N_{\gamma}$  = *Bearing capacity factor*

$S_u$  = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

$u$  = *Pore water pressure*

$W(4^{\circ}C)$  = น้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}C$

$Ws$  = น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม

$W2$  = น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}C$ ), กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W1$  = น้ำหนักขวดที่มีน้ำผสมดินที่อุณหภูมิที่ทดลอง ( $T^{\circ}C$ )

$Z_{crack}$  = ระยะที่เกิดแรงดึงขึ้นในเนื้อดิน

$\beta$  = มุมของลาดความชื้น

$\varepsilon$  = ความคามเคสียด

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนัก

$\gamma_i$  = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน ณ ชั้นที่  $i$

$\gamma_s$  = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน

$\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$\varphi$  = *Friction angle*

$\sigma_a$  = หน่วยแรงในแนวแกน

$\sigma_h$  = หน่วยแรงในดินแนว *horizontal*

$\sigma_n$  = ความเค้นแนวตั้งฉาก

$\sigma_r$  = หน่วยแรงในดินตามรัศมี

$\sigma_v$  = หน่วยแรงในดินแนว *vertical*

$\sigma_{xx}$  = หน่วยแรงกระทำที่ด้านบนของทรงกระบอก

$\sigma_{yy}$  = หน่วยแรงกระทำด้านข้างทรงกระบอก

$\sigma_{zz}$  = หน่วยแรงกระทำด้านข้างทรงกระบอก

$\rho_t$  = ความหนาแน่นของดินเปียก

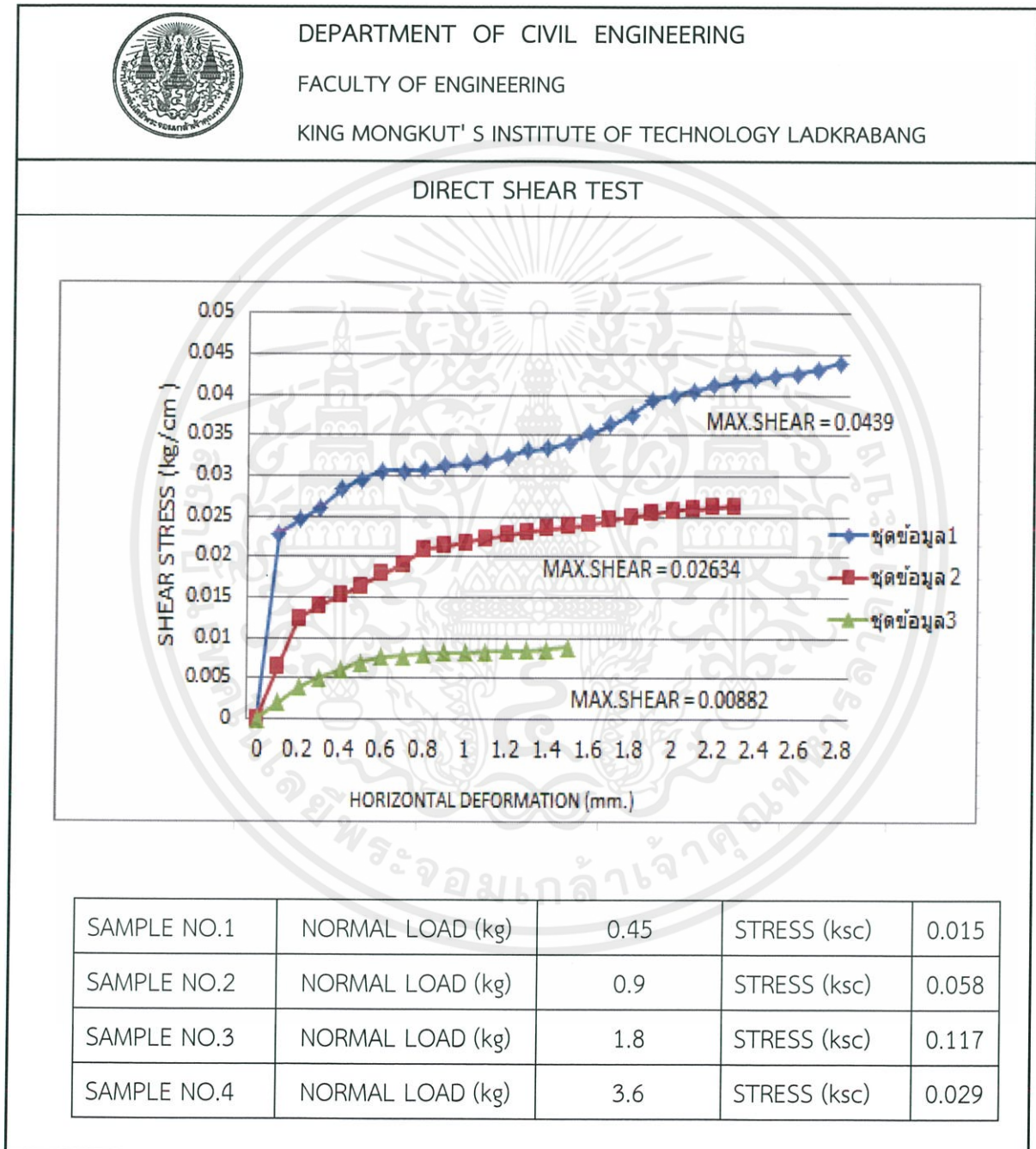
$\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$\phi$  = มุมเสียดทานภายในของดิน

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดสอบคุณสมบัติ

ข.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)ของทรายตัวอย่าง



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

### SPECIFIC GRAVITY TEST

#### PYCHOMETER CALIBRATION

Temperature (Degree C)	FLASK + WATER (g)
35	662.62
30	663.02
25	665.04
20	666.18

WT. of Flask + water , g

Temperature . C

$y = -0.254x + 671.2$

#### SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION

Soil description	sand	sand	sand
Trial NO.	1	2	3
1. Temperature °C	26	26	26
2. Flask + water ,g	666.32	666.32	666.32
3. Flask + water + soil ,g	760.22	760.32	758.81
4. Container NO.	1	2	3
5. Dry soil (A) ,g	149.31	149.33	148.96
6. Saturated Surface Dry soil (B) ,g	150	150	150
7. G.S.	2.6178	2.6266	2.6303
Average G.S.	2.6249		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.3 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size and Soil Classification)



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

#### Sieve Analysis (ASTM C136) for Coarse Grain Soil

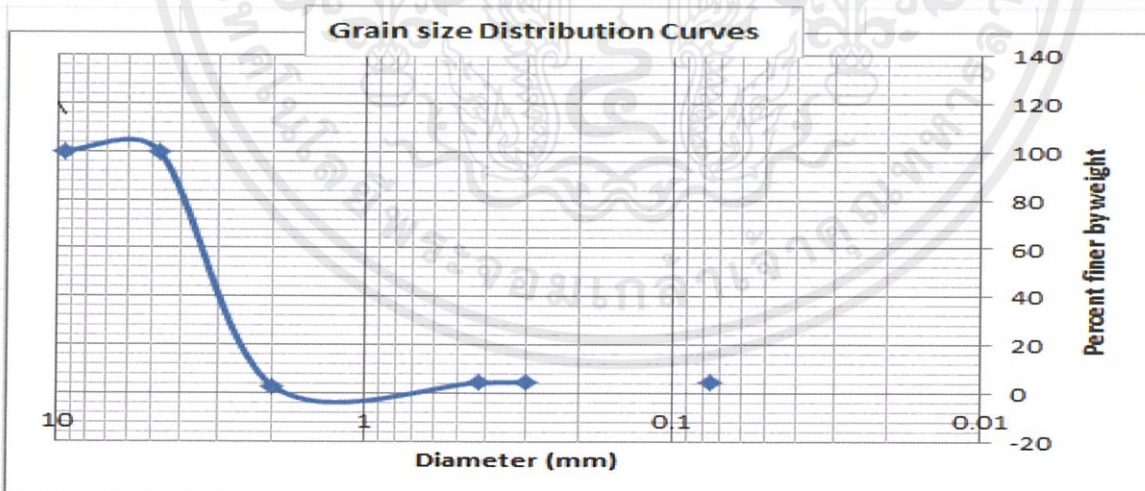
Specific Gravity of Soil ,G.S. 2.6249

Tray NO. 1

Weight of Dry Soil ,g 1000.02

Sieves Standard ASTM E-11

Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/8"	9.50	797.6	797.6	0.00	0.00	0.00	100.00
4	4.75	775.64	775.64	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2.00	610.91	700.16	89.25	89.25	16.14304	83.85696
40	0.43	370.7	682.48	311.78	401.03	72.53604	27.46396
50	0.30	561.86	685.29	123.43	524.46	94.86136	5.138640
200	0.08	310.10	338.10	28.00	552.46	99.92584	0.074158
Pan	0.00	400.2	400.56	0.41	552.90	100.00	0.000000

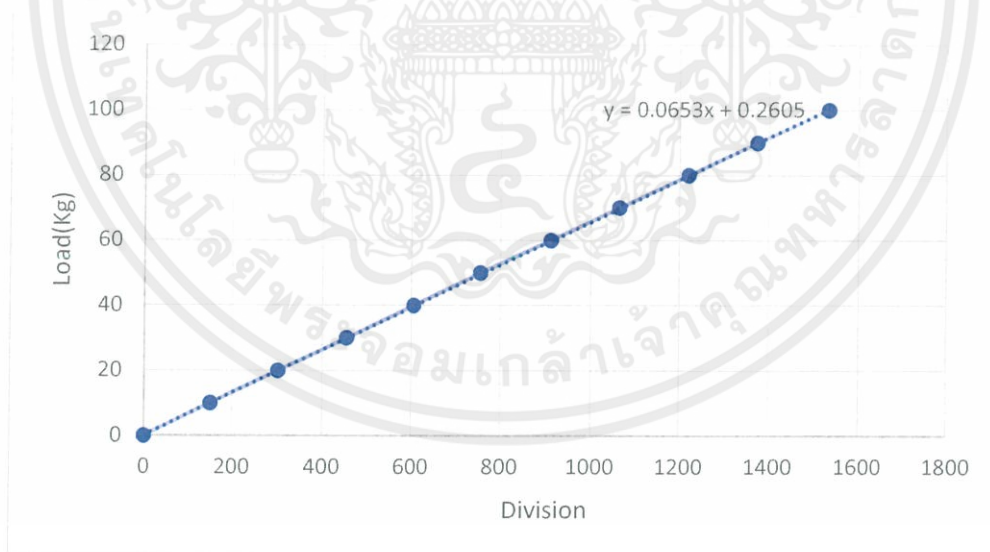


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ข.4 ค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ตาราง ข.1 แสดงค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง

Load	Compression
Kilograms Force	Division
0	0
10	151
20	303
30	455
40	606
50	756
60	912
70	1064
80	1221
90	1375
100	1533



รูป ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของProving Ring  
เพื่อหาสมการเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus

Dial gauge	$\delta$ (mm)	load(P)	E(kg/m <sup>2</sup> )	E(kg/cm <sup>2</sup> )
49	0.49	1.867	8468027211	846802.72
54	0.54	2.415	9939917695	993991.77
62	0.62	2.924	10480645161	1048064.52
69	0.69	3.412	10989694042	1098969.40
73	0.73	3.821	11632572298	1163257.23
79	0.79	4.516	12702109705	1270210.97
84	0.84	5.013	13260582011	1326058.20
89	0.89	5.619	14029712859	1402971.29
95	0.95	5.945	13905263158	1390526.32
101	1.01	6.413	14110451045	1411045.10
108	1.08	6.757	13904115226	1390411.52
121	1.21	7.332	13465748393	1346574.84
			average	1224073.66

คำนวณหาค่า Elastic modulus โดยใช้สูตร  $\delta = \frac{PL^3}{48EI}$

เพื่อหา Elastic modulus จะได้  $E = \frac{PL^3}{48\delta I}$  โดยค่า I ได้จากสูตร  $I = \frac{bh^3}{12}$

โดย h = 0.001 เมตร, b=0.09 เมตร, L=0.2 เมตร

$$I = \frac{(0.09)(0.001)^3}{12} = 7.5 \times 10^{-12} \text{ เมตร}^4$$

จากการคำนวณ ได้ค่า Elastic modulus เท่ากับ  $1224073.66 \text{ Kg/cm}^2$

## ภาคผนวก ค

### ผลการทดลองจากแบบจำลอง

#### ค.1 ข้อมูลผลการทดลองจากแบบจำลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลอง แบบจำลองทั้ง 4 แบบ ได้แก่

- แบบจำลองที่ 1 สมอขนาด  $15 \times 9 \text{ cm}$  ระยะฝั่ง  $5 \text{ cm}$
- แบบจำลองที่ 2 สมอขนาด  $20 \times 9 \text{ cm}$  ระยะฝั่ง  $5 \text{ cm}$
- แบบจำลองที่ 3 สมอขนาด  $15 \times 9 \text{ cm}$  ระยะฝั่ง  $8 \text{ cm}$
- แบบจำลองที่ 4 สมอขนาด  $20 \times 9 \text{ cm}$  ระยะฝั่ง  $8 \text{ cm}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่ 1

เวลา(s)	Load1 (g)	Load2 (g)
60	500	500
120	600	600
180	700	700
240	800	800
300	900	900
360	1000	1000
420	1100	1100
480	1200	1200
540	1300	1250
600	1400	1300
660		1350
720		1400
780		1450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.2 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่ 2

เวลา(s)	Load1(g)	Load2(g)
60	500	500
120	1000	1000
180	1200	1100
240	1400	1200
300	1450	1300
360	1500	1400
420	1530	1500
480	1560	1600
540	1590	1650
600	1620	
660	1650	
720	1700	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.3 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่ 3

เวลา(s)	Load1 (g)	Load2 (g)
60	1000	1000
120	1200	1100
180	1400	1200
240	1600	1300
300	1800	1400
360	2000	1500
420	2200	1600
480	2400	1700
540	2600	1800
600	2800	1900
660		2000
720		2100
780		2200
840		2300
900		2400
960		2500
1020		2600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.4 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่ 4

เวลา(s)	Load1 (g)	Load2 (g)
60	1000	1000
120	1200	1200
180	1400	1400
240	1600	1600
300	1800	1800
360	2000	2000
420	2200	2200
480	2400	2400
540	2600	2600
600	2800	2800
660	3000	3000
720	3200	3200
780	3300	3300
840	3350	3400
900	3400	3450
960	3450	
1020	3500	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## รูปภาพของแบบจำลอง

## ง.1 แบบจำลองดูแนวการพิบัติของดิน

## ง.1.1 แบบจำลองเพื่อสังเกตแนวการพิบัติ



รูป ง.1 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 20x9 cm



รูป ง.2 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 15x9 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 20x9 cm



รูปที่ ง.4 การทดลองหาแนวการพิบัติของ สมอขนาด 15x9 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้