



รหัสโครงการ 3-1/54

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัด และกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

Three-ring compaction and direct shear testing mold

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2554



ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2553 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ ธรณี ในการประดิษฐ์และทดสอบผล และ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

ตุลาคม 2554

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการแบบใหม่สำหรับหาค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดซึ่งมีชื่อเรียกว่า “แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามแฉก” แบบหล่อทดสอบแบบสามแฉกนี้ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนในแบบหล่อเดียวกัน นอกจากนี้โครงเหล็กทดสอบกำลังเฉือนได้ถูกสร้างขึ้นสำหรับแบบหล่อใหม่นี้ด้วย ข้อได้เปรียบที่สำคัญของแบบหล่อแบบสามแฉกและโครงเหล็กทดสอบที่เหนือกว่าอุปกรณ์มาตรฐาน ASTM แบบดั้งเดิมมีดังนี้ (1) ไม่มีการรบกวนตัวอย่างในขณะที่ถูกย้ายจากแบบหล้อบดอัดไปยังแบบหล้อกำลังเฉือน (2) แนวการกดแรงในแนวตั้งจะคงที่ตลอดเวลาระหว่างการเฉือน (3) เวลาที่ใช้ในการทดสอบต่อตัวอย่างถูกลดลงไปร้อยละ 25 (4) ขนาดเม็ดดินใหญ่ที่สุดที่ทดสอบได้เพิ่มขึ้นจาก 4.25 มม. (ตะแกรงเบอร์ 4) เป็น 9.15 มม. (ตะแกรงเบอร์ 3/8) (5) แรงกดสูงสุดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ตัน เป็น 20 ตัน และ (6) อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความทนทานและกระต๊อค สามารถนำไปทดสอบได้ทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ ชีตความสามารถของแบบหล่อทดสอบแบบสามแฉกและโครงเหล็กทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ถูกประเมินโดยทำการทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนของดินเบนโทไนต์ที่ได้จากบริษัท American Colloid Co. ผลที่ได้จากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และกำลังเฉือน (ความเค้นยึดติด และมุมเสียดทาน) สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ทดสอบได้ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM แบบดั้งเดิม

Abstract

The objective of this research is to design and develop a new laboratory test device for determining the direct shear strength of compacted soil specimens, called hereafter as “three-ring compaction and direct shear testing mold”. The three-ring mold is specifically designed for both compaction testing and direct shear testing. A new direct shear steel frame is also fabricated for this new mold. The key advantages of the three-ring mold and its test frame over the conventional ASTM devices include as follows; (1) the sample disturbance during removing from compaction mold to the shear box is eliminated; (2) the alignment of normal load on the sample is maintained vertical during shearing; (3) the testing time is reduced by 25% for each sample; (4) the maximum particle size that can be tested increased from 4.25 mm (sieve no. 4) to 9.15 mm (sieve no 3/8); (5) the designed safe maximum normal load is enhanced from 0.5 tons to 20 tons; and (6) the device is rugged and portable which can be used both in the field and in the laboratory. The performance of the three-ring mold and its test frame is assessed by performing compaction and direct shear tests on pure commercial grade bentonite of the American Colloid Co. The results in terms of the maximum dry density, optimum water content, and shear strength (cohesion and friction angle) well agree with those obtained from the conventional ASTM test method.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การทดสอบการบดอัด.....	5
2.2 การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง.....	10
บทที่ 3 การออกแบบและประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือน	
แบบสามวงแหวน.....	12
3.1 วัตถุประสงค์.....	12
3.2 รายละเอียดในการออกแบบ.....	12
3.3 ข้อดีของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์ผลงานวิจัย.....	24
4.1 วัตถุประสงค์.....	24
4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	24
4.3 วิธีทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	24
4.3.1 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวน.....	25
4.3.2 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน.....	25
4.4 การคำนวณผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	26
4.5 ผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	27
4.6 การจัดเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังเฉือน.....	31
4.6.1 การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	31
4.6.2 การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน.....	32
4.7 วิธีการทดสอบกำลังเฉือน.....	32
4.7.1 การทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	33
4.7.2 การทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน.....	33
4.8 การคำนวณผลการทดสอบกำลังเฉือน.....	35
4.9 ผลการทดสอบกำลังเฉือน.....	36
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	40
บรรณานุกรม.....	23
ภาคผนวก	
ก คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	ก-1
ข การประชาสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี.....	ข-1
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบระหว่าง Standard Proctor และ Modified Proctor.....	6
2.2	วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test: ASTM D698-00a).....	6
2.3	วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test: ASTM D1557-00).....	7
4.1	การเปรียบเทียบน้ำหนักของเบ้าทดสอบแบบมาตรฐานกับเบ้าทดสอบแบบใหม่ โดยผันแปรปริมาณความชื้น.....	28
4.2	ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์ จากการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวน.....	29
4.3	ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์ จากวิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน.....	30
4.4	ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกล็ดที่อัตราส่วนต่างๆ.....	38
5.1	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบระหว่างสองวิธี.....	41
5.2	เปรียบเทียบคุณลักษณะทางเทคนิคและประสิทธิภาพระหว่างสองวิธี.....	42

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ชุดอุปกรณ์ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	8
2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของ Standard Proctor.....	9
2.3	ตัวอย่างการหดและขยายตัวของดินทราย.....	11
3.1	ภาพเพอร์สเปคทีฟของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	14
3.2	ภาพด้านข้างของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	15
3.3	ภาพด้านบนของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	16
3.4	ภาพด้านหน้าของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	17
3.5	ภาพด้านหลังของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	18
3.6	ภาพแยกแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน19	
3.7	ภาพเพอร์สเปคทีฟของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	21
3.8	ภาพแยกของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	22
3.9	ภาพตัดขวางของแบบหล่อทดสอบที่มีแผ่นดินสำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉากลงบนตัวอย่างที่ต้องการ.....	23
4.1	ภาพแบบหล่อมาตรฐานและแบบหล่อแบบสามวงแหวน.....	26
4.2	ค่าความชื้นที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบหล่อมาตรฐานและแบบหล่อแบบสามวงแหวน	31
4.3	การประกอบแบบหล่อทดสอบ.....	32
4.4	ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ.....	34
4.5	เครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน.....	35
4.6	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและแบบมาตรฐาน.....	37

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
4.7	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างและการเคลื่อนตัวในแนวระนาบของดินเบนโทไนต์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและแบบมาตรฐาน.....	38
4.8	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและแบบมาตรฐาน.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่คล้ายคลึงกับแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนมี 2 ประเภท คือเครื่องบดอัดที่ใช้สำหรับบดอัดดินเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดินในห้องปฏิบัติการที่สามารถหาปริมาณน้ำที่ทำให้ดินบดอัดมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด และเครื่องทดสอบกำลังเฉือนของดิน

ในขบวนการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างดินดังกล่าวด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีข้อด้อยคือ หลังจากทำการบดอัดตัวอย่างดินด้วยเครื่องบดอัดแล้วไม่สามารถนำตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดมาทดสอบกำลังเฉือนได้ในทันที โดยต้องนำตัวอย่างออกมาจากกระบอกที่ใช้บดอัดก่อนจากนั้นจึงนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบกำลังเฉือนที่มีขนาดเล็กกว่ามาก ส่งผลให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน ในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องใช้ตัวอย่างที่ดันออกมาจากแบบหล่อ ทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวน ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการเฉือนอาจจะไม่ใช่ค่าที่แท้จริงที่เกิดจากการบดอัดตัวอย่างดินที่มีความหนาแน่นสูงสุด นอกจากนี้ความเค้นในแนวตั้งจากจะเอียงไปตามทิศทางของแรงเฉือนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งทำให้ตำแหน่งของแรงที่ส่งผ่านไม่คงที่ ส่งผลให้ความเค้นในแนวตั้งจากมีค่าไม่สม่ำเสมอบนผิวสัมผัสของตัวอย่าง แต่ด้วยนวัตกรรมใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ดังกล่าวมาทั้งหมด และยังมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ สามารถทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบสองผิวสัมผัสได้ ซึ่งค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างดินในภาคสนาม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนที่นำเอากการทดสอบตามมาตรฐานของการทดสอบการบดอัดและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินมารวมอยู่ในอุปกรณ์ชุดเดียว และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและประหยัดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้อุปกรณ์ดังกล่าวยังมีความทนทาน ราคาถูก ใช้งานง่าย และให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพและขีดความสามารถของอุปกรณ์ดังกล่าว จึงทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ และค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างดินด้วย เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยอุปกรณ์ดั้งเดิมทั้งสองรูปแบบที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถบดอัดและเฉือนตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว
- 2) ใช้โปรแกรม Solid Work ในการออกแบบรายละเอียดและองค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ในองค์ประกอบต่างๆ
- 3) ทดสอบประสิทธิภาพและขีดความสามารถของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยมีการทดสอบตัวอย่างดินเบนโทไนต์เปรียบเทียบกับแบบหล่อมาตรฐานที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยอุปกรณ์ใหม่
- 4) จัดอบรมแก่บุคคลในองค์กรของรัฐบาลหรือประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและนำเทคโนโลยีนี้เผยแพร่แก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- 5) เขียนคู่มือการใช้อุปกรณ์อย่างละเอียดและเป็นขั้นตอนโดยมีรูปภาพประกอบ
- 6) จดสิทธิบัตรอุปกรณ์ วิธีการใช้ และวิธีการประมวลผล
- 7) เผยแพร่เทคโนโลยีโดยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ประกอบด้วย วิธีการทดสอบการบดอัดดิน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกำลังเฉือนของดินเพื่อหาค่าความหนาแน่นจากการบดอัดและค่ากำลังรับเฉือนของดิน โดยทุกประเด็นได้นำมาศึกษาและค้นคว้าหาข้อสรุปเพื่อให้ทราบว่า การวิจัยที่คล้ายคลึงกันมีประโยชน์อย่างไรต่องานวิจัยที่นำเสนอ โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้ได้นำมาแสดงอย่างละเอียดในรายงานขั้นสุดท้าย ส่วนรายงานของเอกสารอ้างอิงที่สมบูรณ์ได้เขียนในรูปแบบของบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบระบบการทำงานของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

การออกแบบได้ใช้โปรแกรมสร้างแบบทางคอมพิวเตอร์ (CAD – Computer Aided Design) ในการสร้างแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนขึ้นมา ทุกชิ้นส่วนได้มีการคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety) ควบคุมไปด้วย

ข้อกำหนดที่สำคัญ (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ

- สามารถใช้ตัวอย่างดินบดอัดในการทดสอบกำลังเฉือนได้
- สามารถให้แรงเฉือนกับตัวอย่างแบบสองผิวสัมผัสได้
- วัสดุทำจากเหล็กแข็งที่ไม่มีการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดสูง
- ทนทานและมีราคาถูก

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

เมื่อดำเนินการออกแบบแล้วเสร็จจึงนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ ตามข้อกำหนดทั้งหมดในขั้นตอนที่ 2 ที่ห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิศวกรเป็นผู้ดูแลและควบคุมการสร้างอย่างถูกต้อง แม่นยำ และปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์

ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบ โดยมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นและเพื่อสาธิตว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม โดยนำดินเบนโทไนต์มาทดสอบซึ่งมีการผันแปรความชื้นในดินที่ระดับต่างๆ และนำไปบดอัดด้วยชุดทดสอบการบดอัด จากนั้นนำตัวอย่างดินที่อยู่ในชุดบดอัดไปทดสอบหาลังรับแรงเฉือนด้วยชุดทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือ และความแม่นยำของค่าที่วัดได้ ซึ่งในการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินทำให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และความชื้นในดินที่เหมาะสม (Optimum water content) ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงสร้างหรือฐานรากไม่ให้เกิดการทรุดตัว สำหรับการทดสอบค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างดินได้ค่าความเค้นเฉือน (Shear strength) ค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และมุมเสียดทาน (Friction angle)

ขั้นตอนที่ 6 การเขียนคู่มือการใช้งาน

ได้มีการเขียนคู่มือการใช้แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษเพื่อเตรียมพร้อมในการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน
- 2) คู่มือการทดสอบซึ่งพร้อมผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
- 3) ดีพิมพ์ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ
- 4) องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกำลังเฉือนและค่าความหนาแน่นบดอัดสูงสุดของดินที่นำไปสู่การพัฒนาบัณฑิตศึกษาในอนาคต
- 5) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 6) เป็นผลงานวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
- 7) ลิขสิทธิ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลดิน
- 7) กรมทางหลวง

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้สรุปผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์และนวัตกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

การทดสอบการบดอัดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินที่เหมาะสม (Optimum Water Content) ที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วการบดอัดดินเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดิน คือทำให้ดินแน่น (Dense) สูงสุด เพื่อให้เหมาะสมกับงานประเภทต่างๆ ในเชิงวิศวกรรม การทำให้ดินแน่นหรือทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดนอกจากจะใช้พลังงานบดอัด (Compact) แล้วยังต้องคำนึงถึงปริมาณความชื้น (ปริมาณน้ำ) และช่องว่าง (Void) ในดิน เพราะปกติมวลดินประกอบด้วยเม็ดดิน ช่องว่าง และน้ำ โดยทั่วไปการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบการบดอัดของดินในห้องปฏิบัติการมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

- 1) Standard Proctor Test
- 2) Modified Proctor Test

Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ในการทดสอบการบดอัดในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D-698 โดยเฉพาะการทดสอบที่ใช้ในงานก่อสร้าง สนามบิน เขื่อนดิน และพื้นโรงงาน เป็นต้น ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการให้มีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงานที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีการทดสอบการบดอัดดินด้วยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้นเพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูงและรับน้ำหนักได้มาก เรียกว่าวิธีการทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D-1557 โดยรายละเอียดสำหรับดินแต่ละชนิดได้อธิบายไว้ในตารางที่ 2.1 ถึงตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบระหว่าง Standard Proctor และ Modified Proctor (ที่มา: [http:// www.gerd.eng.ku.ac.th](http://www.gerd.eng.ku.ac.th))

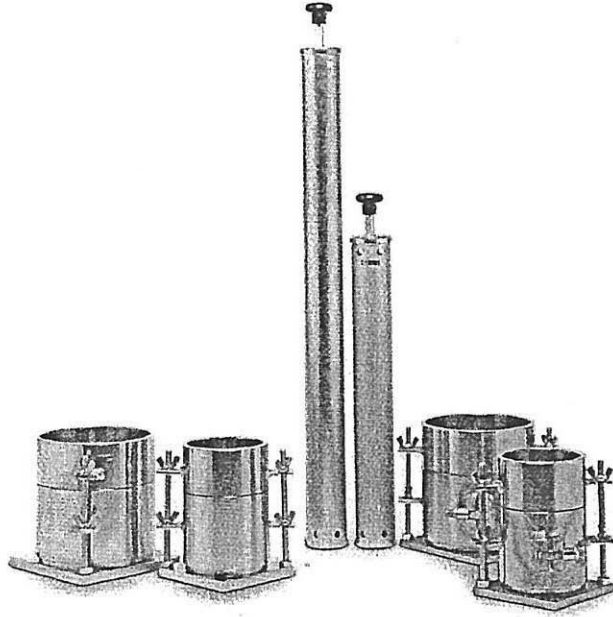
Test	Mold size x Height	Wt. of hammer (lb)	No. of layers	Height of drop (in)	No. of blows per layer	Energy/vol. ft – lb/ft ³
Standard	4"×4.6"	5.5	3	12	25	12,400
Proctor	6"×5"	5.5	3	12	56	12,400
Modified	6"×5"	10	5	18	56	56,000
Proctor	4"×4.6"	10	5	18	25	56,3000

ตารางที่ 2.2 วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test: ASTM D698–00a)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดของโมล	4 นิ้ว (101.6 มม.)	4 นิ้ว (101.6 มม.)	6 นิ้ว (152.4 มม.)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 มม.)	4.584 นิ้ว (116.43 มม.)	4.584 นิ้ว (116.43 มม.)
3. ปริมาตรของโมล	0.033 ลบ. (944 ลบ.ซม.)	0.033 ลบ.(944 ลบ.ซม.)	0.075 ลบ. (2124 ลบ.ซม.)
4. น้ำหนักของค้อน	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)
5. ระยะยก	12.0 ปอนด์ (304.8 มม.)	12.0 ปอนด์ (304.8 มม.)	12.0 ปอนด์ (304.8 มม.)
6. จำนวนชั้น	3	3	3
7. จำนวนครั้งที่ กระทุ้งต่อชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการ บดอัด	12375 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต (600 กน-เมตร/ลบ.ม.)	12375 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต (600 กน-เมตร/ลบ.ม.)	12375 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต (600 กน-เมตร/ลบ.ม.)
9. วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) อาจใช้กับ ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มม.) อาจใช้กับ ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และดินค้ำ ตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19 มม.) อาจใช้กับ ดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และดินค้ำ ตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.3 วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test: ASTM D1557-00)

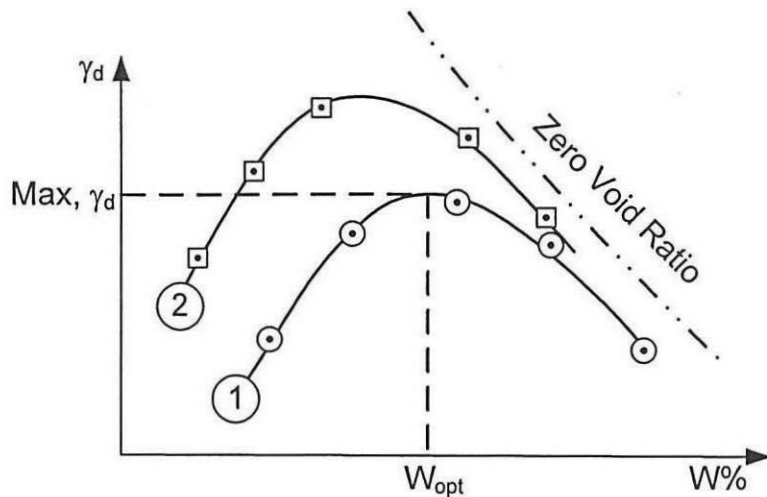
ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดของโมล	4 นิ้ว (101.6 มม)	4 นิ้ว (101.6 มม)	6 นิ้ว (152.4 มม)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 มม)	4.584 นิ้ว (116.43 มม)	4.584 นิ้ว (116.43 มม)
3. ปริมาตรของโมล	0.033 ลบ.ฟุต (944 ลบ. ซม)	0.033 ลบ.ฟุต (944 ลบ. ซม)	0.075 ลบ.ฟุต(2124 ลบ. ซม)
4. น้ำหนักของค้อน	10 ปอนด์ (4.54 กก)	10 ปอนด์ (4.54 กก)	10 ปอนด์ (4.54 กก)
5. ระยะยก	18 นิ้ว (457.2 มม)	18 นิ้ว (457.2 มม)	18 นิ้ว (457.2 มม)
6. จำนวนชั้น	5	5	5
7. จำนวนครั้งที่กระแทกต่อชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการบดอัด	56250 ฟุต-ปอนด์/ลบ ฟุต (2700 กน-เมตร/ลบ.ม)	56250 ฟุต-ปอนด์/ลบ ฟุต (2700 กน-เมตร/ลบ.ม)	56250 ฟุต-ปอนด์/ลบ ฟุต(2700 กน-เมตร/ลบ.ม)
9. วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) อาจใช้ดินที่ต่างตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มม.) อาจใช้ดินที่ต่างตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และดินที่ต่างตะแกรงขนาด 3/8 นิ้วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19 มม.) อาจใช้กับดินที่ต่างตะแกรงขนาด 3/8 นิ้วมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์และดินที่ต่างตะแกรงขนาด 3/4 นิ้วน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน
(ที่มา: <http://www.shambhaviimpex.com/compaction.html>)

Hogentogler (1936) อธิบายว่า ถ้าปริมาณความชื้นน้อย จะทำให้แรงตึงผิวระหว่างอนุภาคดินสูง มีความฝืดหรือแรงเสียดทานมากจึงบดอัดยาก ถ้าเพิ่มความชื้นจะทำให้อนุภาคดินจัดเรียงตัวดีขึ้น การบดอัดง่ายขึ้น ถ้าปริมาณน้ำเกินปริมาณที่เหมาะสมจะเกิดแรงผลักกันระหว่างน้ำกับอนุภาคดิน ทำให้อนุภาคดินไม่สามารถเรียงหรืออัดตัวกันได้ดีเท่าที่ควรและเกิดการบวมตัว (Swell) หากปริมาณน้ำมากเกินไปจนเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินจนทำให้ดินใกล้อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) การบดอัดจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของดินสูงขึ้น ขณะที่ช่องว่างหรือโพรงอากาศระหว่างเม็ดดินลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของดินสูงสุด (Maximum Dry Density) เรียกว่า “Optimum Moisture Content, OMC”

การบดอัดในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในภาคสนาม สามารถทำได้ด้วยการนำดินที่จะใช้ในการบดอัดในภาคสนามมาอบให้แห้งแล้วค่อยๆ เติมน้ำในปริมาณที่พอเหมาะ แล้วเริ่มทำการบดอัดด้วยแบบที่ใช้อัด (Mold) เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ อย่างน้อย 4-6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดในแต่ละครั้งก็จะหาค่าความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินกับความชื้น ซึ่งจะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอดเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” ความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent water content) ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor (2) จาก Proctor (1933)
(ที่มา: <http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)

ถ้าเอาพลังงานในการบดอัดสูงขึ้นไปในดินชนิดเดียวกันมาสร้างเส้นกราฟการบดอัดจะได้เส้นที่ขยับสูงขึ้น สามารถสังเกตลักษณะพิเศษ 2 ประการ คือ ค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า γ_d ของ Standard Proctor และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่จุด γ_d สูงสุด ซึ่งเรียกว่าความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ก็จะลดลงด้วย ขณะที่ γ_d เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดินโดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

การบดอัดแบบพลศาสตร์ (Dynamic Compaction) ได้ใช้วิธีปล่อยน้ำหนักจากค้อนเหล็กให้ตกกระทบดินบนโทโนติในแบบหล่อแบบสามแฉก (Modified Compaction) สามารถคำนวณพลังงานตามมาตรฐาน ASTM D-1557 ได้ดังสมการนี้

$$J \left(\frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{ft}^3} \right) = \frac{W (\text{lb}) \times L (\text{ft}) \times t \times n}{V (\text{ft}^3)} \quad (1)$$

โดยที่ J คือพลังงานบดอัดต่อปริมาตร W คือน้ำหนักค้อน L คือระยะตก t คือจำนวนชั้น n คือจำนวนครั้งที่บดอัด V คือปริมาตรแบบหล่อ

2.2 การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่ไม่สามารถเก็บไว้ให้คงสภาพเดิมได้ (Undisturbed Sample) เช่น ดินตัวอย่างประเภททราย เพราะจะต้องนำตัวอย่างทรายมาเตรียมในกล่องทดสอบ (Shear Box) ให้ได้ความหนาแน่นที่ต้องการ แล้วจึงทำการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง สำหรับตัวอย่างดินเหนียว สามารถทำการทดสอบได้ทั้งตัวอย่างดินคงสภาพและตัวอย่างดินแปรสภาพ การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงในดินเหนียวมีข้อดีคือ สามารถทดสอบหาค่าความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Strength) ได้โดยง่าย ทั้งนี้ อัตราความเร็วในการเฉือน (Shear rate) และระยะเวลาที่ปล่อยให้ตัวอย่างดินทรุดตัว (Consolidate) ก่อนให้แรงเฉือนอาจจะมีผลกระทบต่อผลการทดสอบโดยเฉพาะตัวอย่างดินเหนียว

การทดสอบกำลังเฉือนของดินตามมาตรฐาน ASTM D-3080 มีวัตถุประสงค์เพื่อหา กำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างดิน ซึ่งคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ กำลังหรือความแข็งแรงของมวลดิน (Soil strength) ซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์หรือ ออกแบบฐานราก ผนังกันดิน เขื่อนดิน และสิ่งก่อสร้างเกี่ยวกับดินและหินอีกหลายอย่าง ทางด้าน ปฐพีกลศาสตร์จะถือว่ากำลังของดินคือความสามารถของมวลดินในการรับแรงเฉือน (Shear strength) ซึ่งแตกต่างจากเหล็กหรือคอนกรีตที่พิจารณาจากแรงดึงหรือแรงอัดเป็นสำคัญ

กำลังเฉือนของดินเกิดจาก 2 ส่วนหลักคือ

1) กำลังเสียดทานระหว่างเม็ดดิน (Frictional Strength) และการขัดกันระหว่างเม็ดดิน (Interlocking of Particles) ได้จากสมการ

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (5)$$

2) กำลังเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesive Strength) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินได้จากสมการ

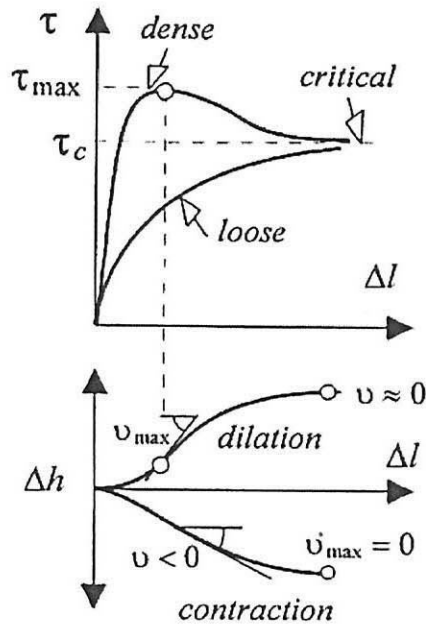
$$\tau = c \quad (6)$$

ทำให้ได้สมการที่สำคัญในเรื่องความแข็งแรงของมวลดินเรียกว่า “Mohr-Coulomb's Equation” ในแต่ละตัวอย่างดินจะมีค่าของ c และ ϕ แตกต่างกันไป ซึ่งแต่ละค่าบ่งบอกถึงความแข็งแรงของมวลดินนั้นๆ เรียกว่า “Strength parameters” ดังสมการ

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (7)$$

- โดยที่ τ = ค่ากำลังต้านแรงเฉือน
 c = ความเค้นยึดติด
 σ = ความเค้นตั้งฉาก
 ϕ = ค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน

เมื่อดินได้รับแรงเฉือนอนุภาคของเม็ดดินจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ให้เหมาะสมเพื่อรับแรงเฉือน ถ้าเม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ เม็ดดินจะเรียงตัวกันให้แน่นขึ้นกล่าวคือ Void ratio ลดลงเมื่อรับแรงเฉือน แต่ถ้าเม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวอย่างแน่น เม็ดดินจะขยายตัวให้หลวมมากขึ้นกล่าวคือ void ratio จะเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.3 แสดงพฤติกรรมของดินเนื้อแน่น (dense) และแบบหลวม (loose) ภายใต้แรงเฉือนซึ่งจะมีการขยายตัวและหดตัวต่างกันออกไป



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการหดและขยายตัวของดินทราย (Contraction and dilation of sands)

(ที่มา: <http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)

บทที่ 3

การออกแบบและประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัด และกำลังเหือนแบบสามวงแหวน

3.1 วัตถุประสงค์

การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหือนแบบสามวงแหวนที่นำเอาการทดสอบมาตรฐานของการทดสอบการบดอัดและการทดสอบกำลังรับแรงเหือนของตัวอย่างดินมารวมกัน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ดังกล่าวในบทที่หนึ่ง เพื่อความสะดวกรวดเร็วและประหยัดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการจัดเตรียมตัวอย่างดิน นอกจากนี้อุปกรณ์ดังกล่าวจะออกแบบให้มีความทนทาน ราคาถูก ใช้งานง่าย และให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

3.2 รายละเอียดในการออกแบบ

แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหือนแบบสามวงแหวนประกอบด้วยชุดการทดสอบ 2 ชุด แบ่งเป็น ชุดบดอัดตัวอย่างดินและชุดให้แรงเหือน โดยชุดบดอัดตัวอย่างดินประกอบด้วยวงแหวน 3 ส่วน ได้แก่ วงแหวนบน วงแหวนกลาง และวงแหวนล่างสำหรับเป็นแบบหล่อทดสอบ โดยมีวงแหวนประกบด้านบนเพื่อให้วงแหวนทั้งสามติดอยู่กับฐานยึดที่ยึดด้วยน็อต เสาค้ำมีคีมหนีบวงแหวนบนและกลาง คีมหนีบวงแหวนกลางและล่าง เพื่อป้องกันไม่ให่วงแหวนทั้งสามขยับเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดิน หลังจากทำการทดสอบการบดอัดสมบูรณ์แล้วจึงนำวงแหวนประกบที่ยึดด้านบน คีมหนีบวงแหวนบนและกลาง คีมหนีบวงแหวนกลางและล่างออก จากนั้นยกทั้งชุดบดอัดใส่เข้าไปในชุดให้แรงเหือนเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเหือนของตัวอย่างดิน โดยชุดให้แรงเหือนมีเสาค้ำยันพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้ง ซึ่งยึดติดอยู่กับคานด้านบนและฐานล่าง ที่ด้านบนของตัวอย่างมีแผ่นดันใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นในแนวตั้งจากไปยังตัวอย่างดิน แม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบยึดกับเสาค้ำยัน ฐานรองด้านหน้า และฐานรองด้านหลังเพื่อให้แรงเหือนกับตัวอย่างดิน โดยวงแหวนบนและวงแหวนล่างมีแผ่นรับแรงเหือนเพื่อป้องกันไม่ให่วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเหือนเมื่อทำการทดสอบ วงแหวนกลางถูกเหือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ที่ด้านหลังของวงแหวนกลางมีคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็ก โดยที่ฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาเหล็กทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลาง เพื่อให่วงแหวนกลางเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงเหือน

รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวน ตามการประดิษฐ์นี้ซึ่งประกอบด้วยชุดการทดสอบ 2 ชุด แบ่งออกเป็น ชุดบดอัดตัวอย่างดินและชุดให้แรงเฉือน

รูปที่ 3.2 ภาพด้านข้างของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวน ซึ่งแนวของแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้งและแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบตั้งฉากกัน โดยมีแผ่นรับแรงเฉือน เพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนบนและวงแหวนล่างขยับตามแรงเฉือนเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

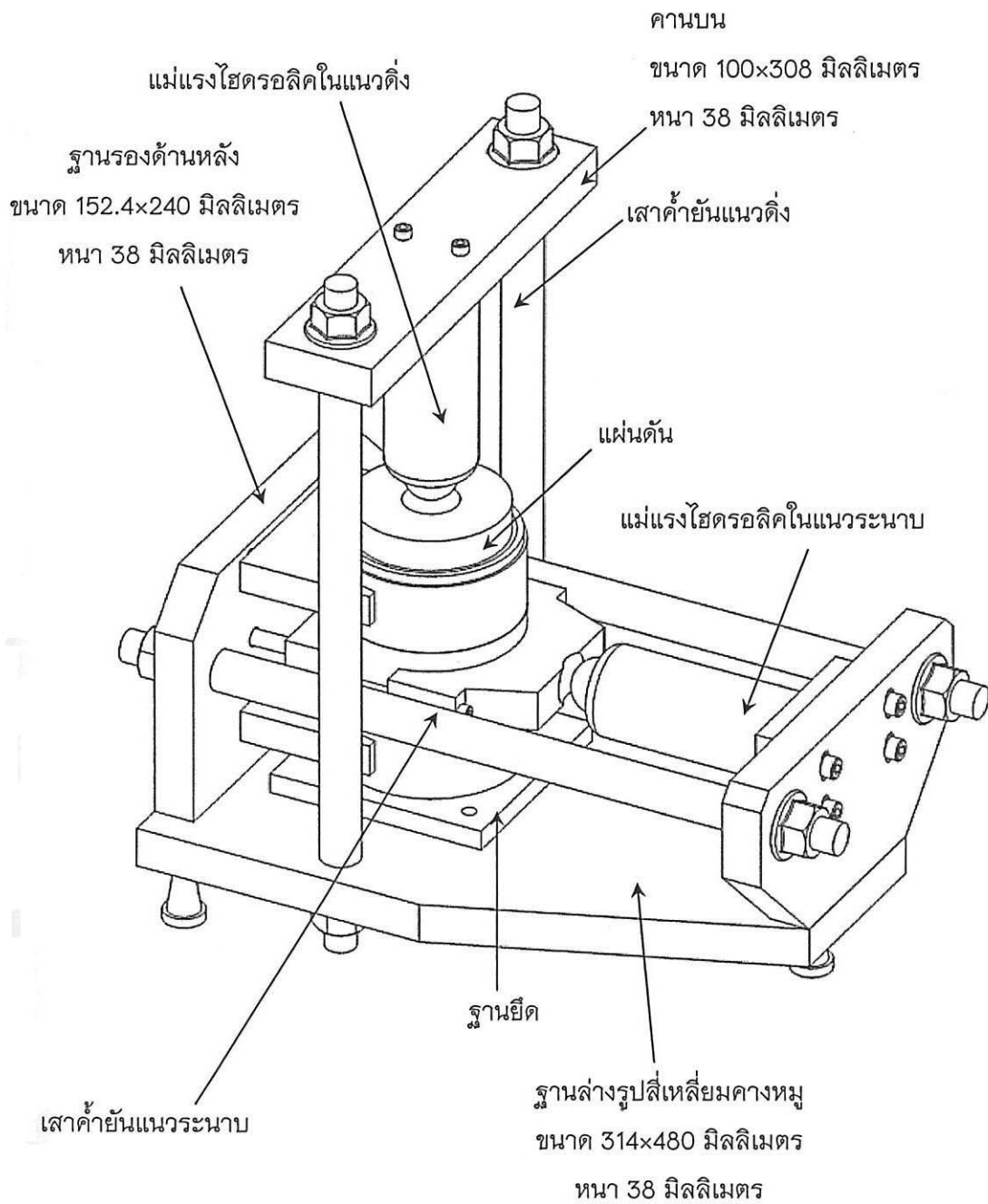
รูปที่ 3.3 ภาพด้านบนของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวน ซึ่งแสดงให้เห็นแนวของคานด้านบนที่อยู่ตรงกลางชุดบดอัดดิน แผ่นรับแรงเฉือนที่ยึดกับวงแหวนบนและคีมหนีบวงแหวนกลางที่มีแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ทำหน้าที่ให้แรงเฉือนกับตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 3.4 ภาพด้านหน้าของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวน ซึ่งแสดงให้เห็นเสาค้ำยันพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้งที่อยู่ติดคานด้านบนและฐานล่าง โดยที่ฐานรองด้านหน้าทำหน้าที่ยึดแม่แรงในแนวระนาบเพื่อให้สามารถส่งแรงเฉือนไปยังตัวอย่างดินได้

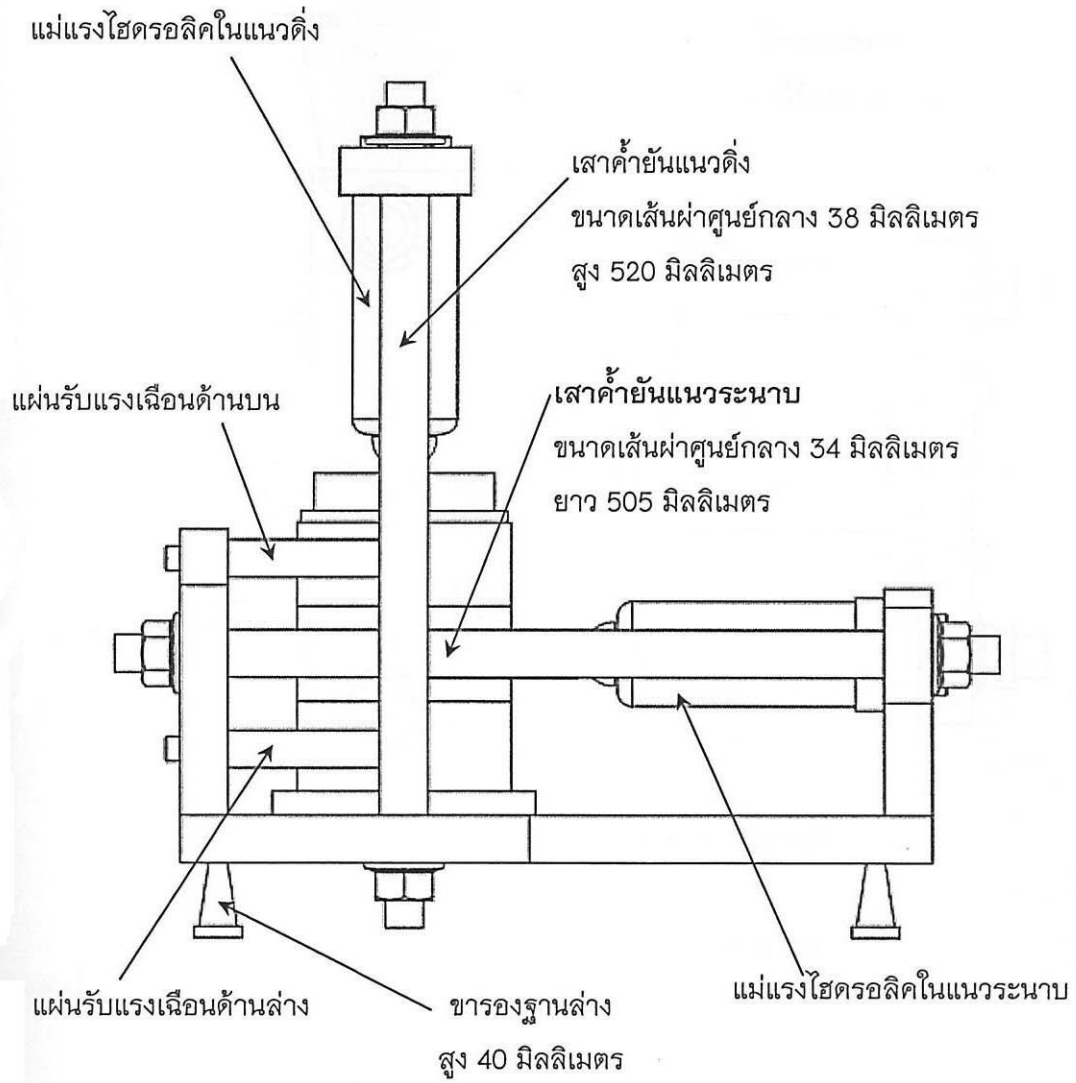
รูปที่ 3.5 ภาพด้านหลังของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวน ซึ่งฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวจำนวน 2 รู เพื่อให้ขาเหล็กที่ติดกับคีมหนีบวงแหวนกลางสามารถสอดเข้าไปได้ และบังคับให้การเคลื่อนตัวของวงแหวนกลางไปตามแนวแรงเฉือน

รูปที่ 3.6 ภาพแยกแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเงื่อนไขแบบสามวงแหวนซึ่งมีคุณลักษณะสำคัญ ได้แก่ วงแหวนบน วงแหวนกลาง และวงแหวนล่างสำหรับเป็นแบบหล่อทดสอบชุดให้แรงเฉือนมีเสาค้ำยันพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้งซึ่งติดกับคานด้านบน และฐานล่าง ที่ด้านบนของตัวอย่างมีแผ่นดันใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นในแนวตั้งฉากไปยังตัวอย่างดิน โดยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบยึดกับเสาค้ำยันกับฐานรองด้านหน้าและยึดกับฐานรองด้านหลังเพื่อให้แรงเฉือนกับตัวอย่างดิน วงแหวนบนและวงแหวนล่างมีแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเฉือนในขณะที่ทำการทดสอบ ที่ด้านหลังของวงแหวนกลางมีคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็ก โดยที่ฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลาง เพื่อป้องกันวงแหวนกลางขยับไปทางซ้ายหรือขวาขณะทำการทดสอบ

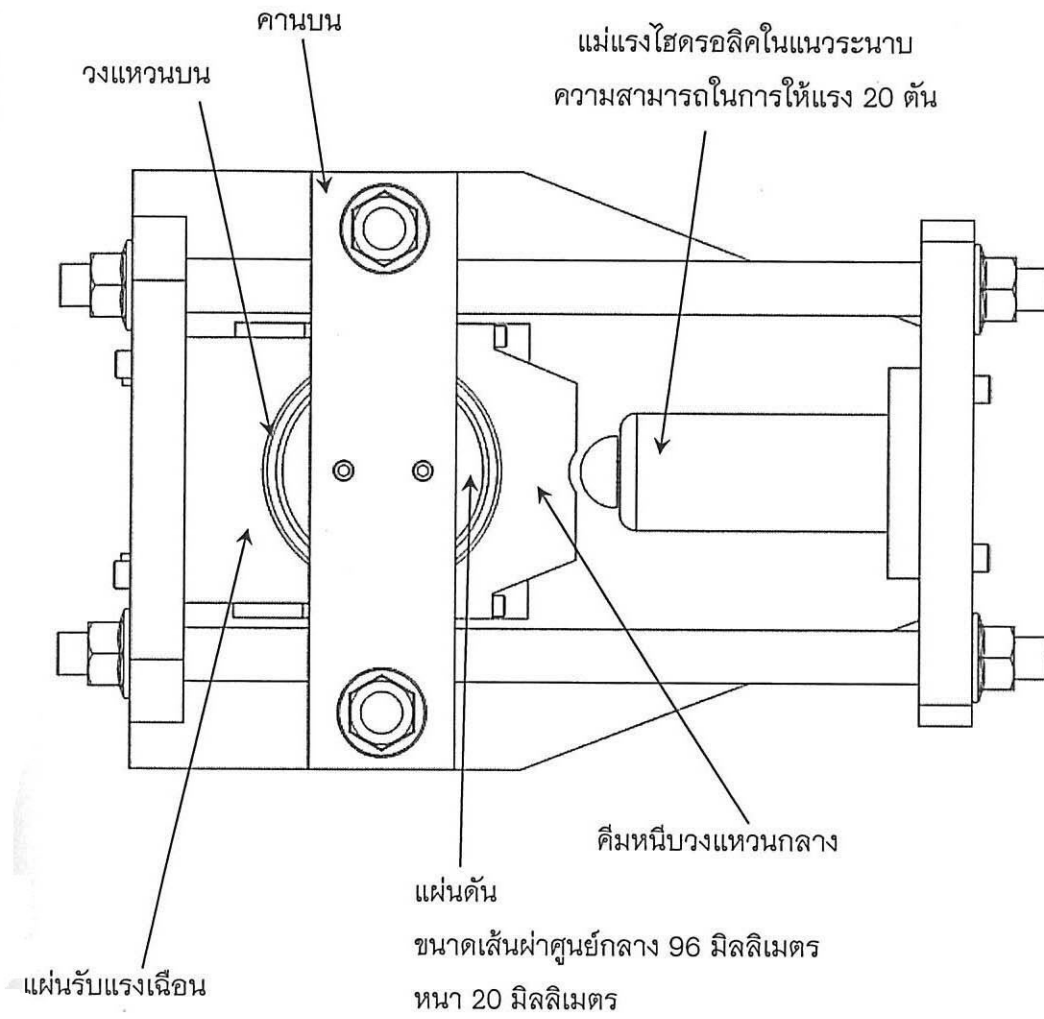




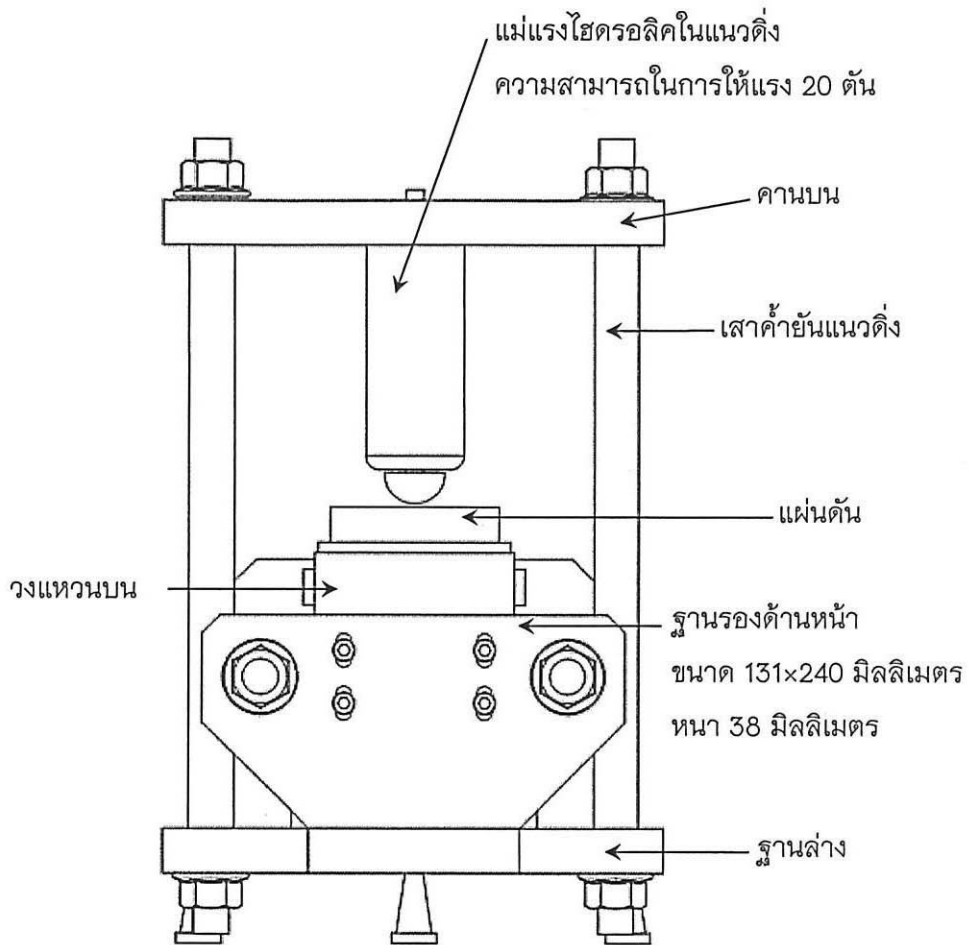
รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเนียนแบบสามวงแหวน



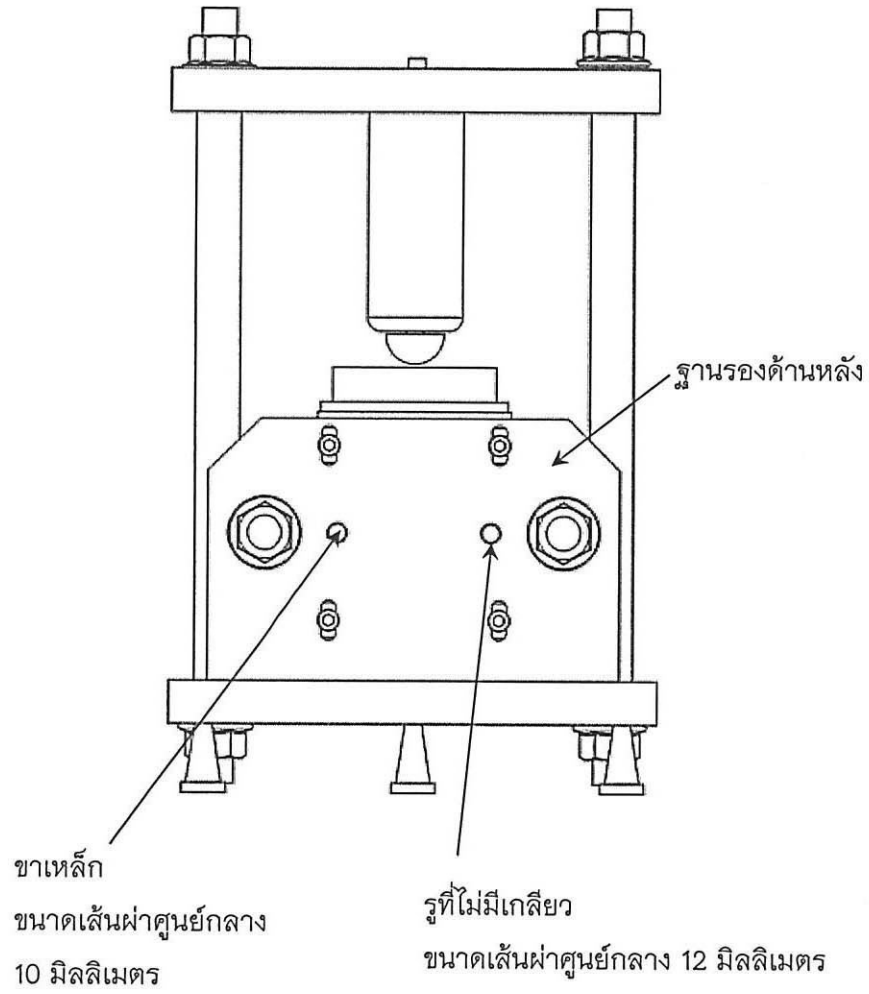
รูปที่ 3.2 ภาพด้านข้างของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหวี่ยงแบบสามวงแหวน



รูปที่ 3.3 ภาพด้านบนของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหวี่ยงแบบสามวงแหวน



รูปที่ 3.4 ภาพด้านหน้าของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน



รูปที่ 3.5 ภาพด้านหลังของแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหนือนแบบสามวงแหวน

รูปที่ 3.7 ภาพเพอร์สเปคทีฟของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน ซึ่งมีคุณลักษณะสำคัญ ได้แก่ วงแหวนบน วงแหวนกลางและวงแหวนล่าง สำหรับเป็นแบบหล่อทดสอบ วงแหวนประกบด้านบนเพื่อให้วงแหวนทั้งสามติดอยู่กับฐานยึดที่ยึดด้วยน็อตและเสาค้ำ ซึ่งมีคีมหนีบวงแหวนบนและกลาง คีมหนีบวงแหวนกลางและล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสามขยับเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดิน โดยวงแหวนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 101.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D1557

รูปที่ 3.8 ภาพแยกของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน ประกอบด้วยวงแหวนบน วงแหวนกลางและวงแหวนล่าง สำหรับเป็นแบบหล่อทดสอบ ที่มีวงแหวนประกบด้านบนเพื่อให้วงแหวนทั้งสามอยู่กับฐานยึดที่ยึดด้วยน็อตและเสาค้ำ โดยมีคีมหนีบวงแหวนบนและกลาง คีมหนีบวงแหวนกลางและล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสามขยับเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดิน โดยวงแหวนประกบจะใช้งานเมื่อทดสอบการบดอัด จากนั้นทำการถอดวงแหวนประกบออกเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนต่อไป

รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของแบบหล่อทดสอบที่มีแผ่นดินสำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉาก ลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งวงแหวนกลางถูกเฉือนด้วยความเค้นเฉือน โดยมีระนาบการเฉือนเกิดขึ้น 2 ระนาบ คือ ระนาบด้านบน (ระนาบ A-B) และระนาบด้านล่าง (ระนาบ C-D)

3.3 ข้อดีของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้

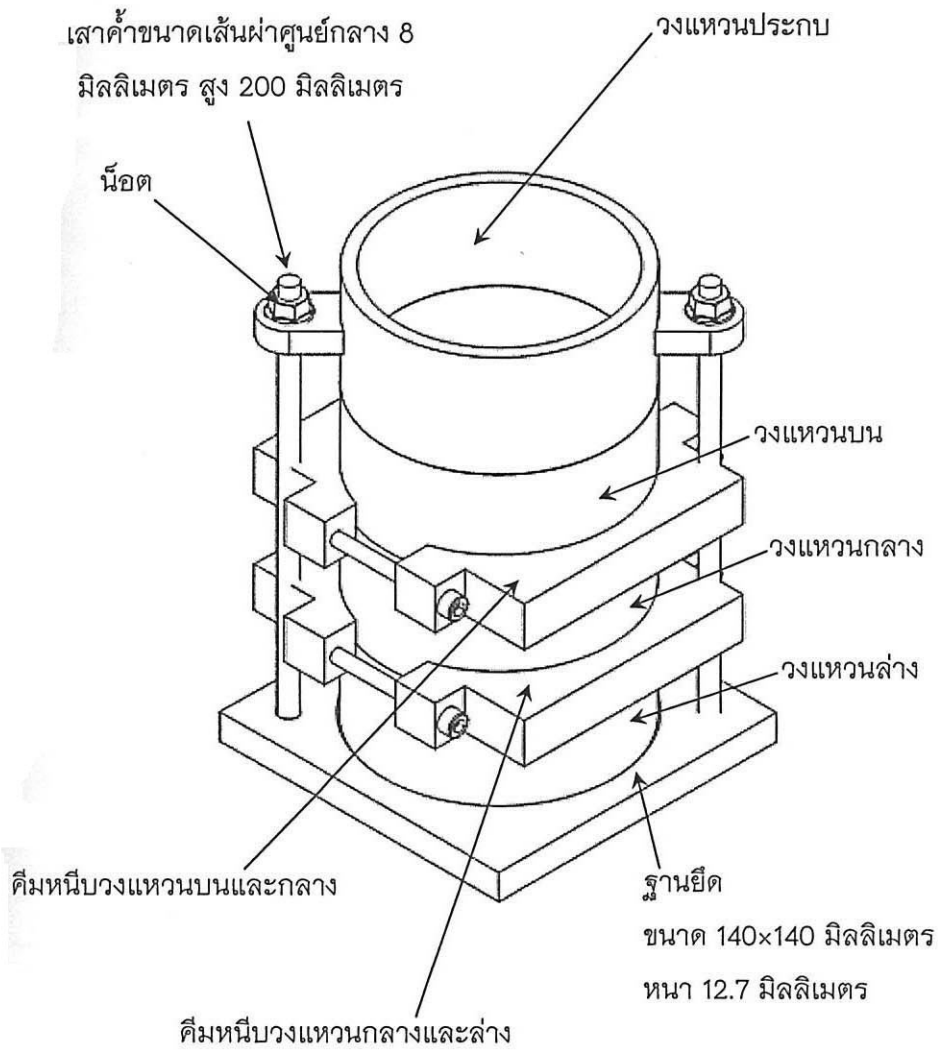
แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนที่ประดิษฐ์นี้สามารถแก้ปัญหาและข้อจำกัดของเครื่องทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนสามารถนำตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนได้ในทันทีโดยไม่ต้องนำตัวอย่างออกมาจากกระบอกที่ใช้บดอัด ส่งผลให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง แม่นยำขึ้น

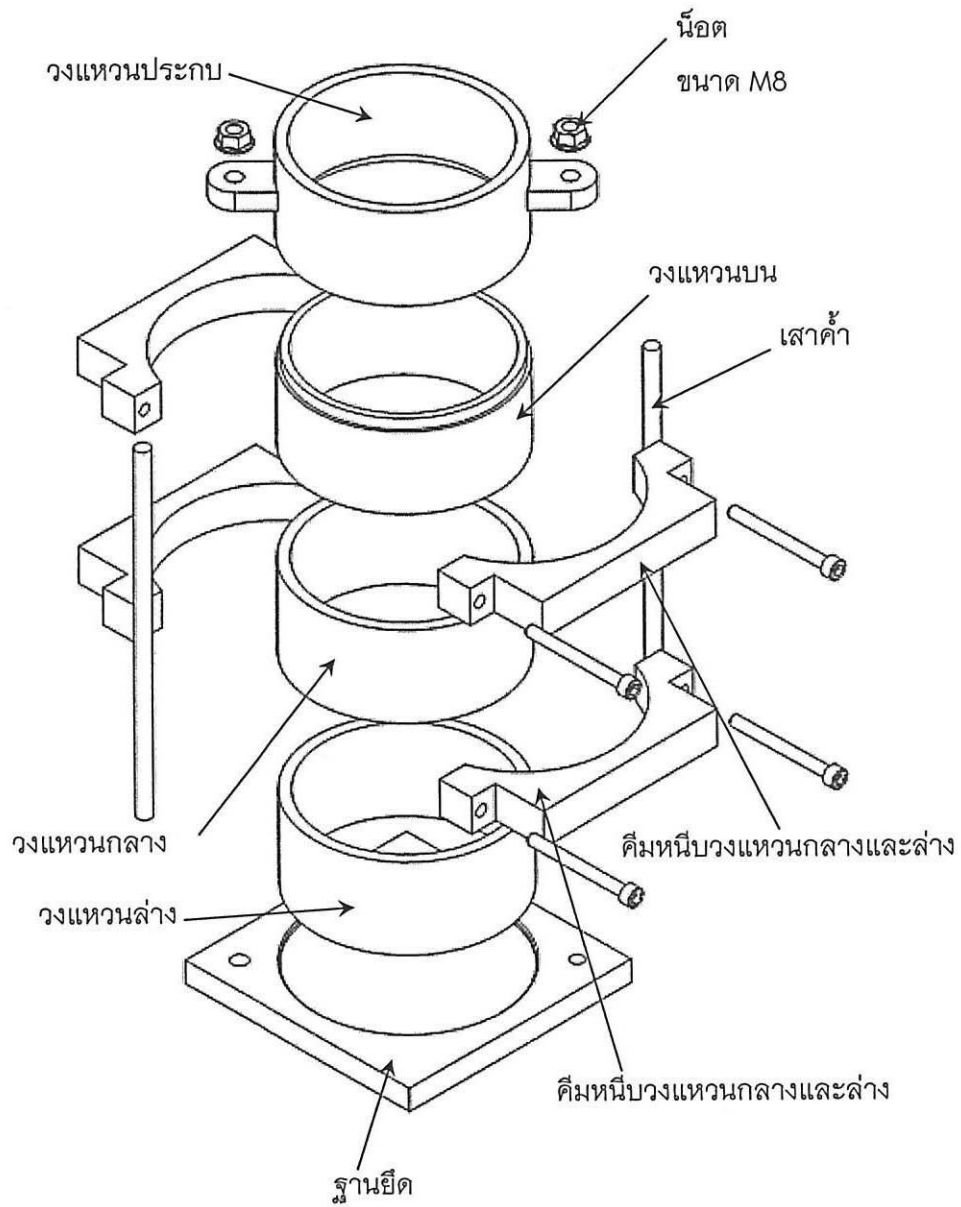
2) ด้วยนวัตกรรมใหม่นี้จึงไม่จำเป็นต้องดันตัวอย่างออกมาจากแบบหล่อที่ซึ่งทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนและส่งผลให้ค่าที่ได้จากการเฉือนไม่ใช่ค่าที่แท้จริงที่เกิดจากการบดอัดตัวอย่างดินที่มีความหนาแน่นสูงสุด

3) นวัตกรรมใหม่นี้สามารถให้ความเค้นในแนวตั้งฉากคงที่บนตัวอย่าง และความเค้นในแนวตั้งฉากมีค่าสม่ำเสมอบนผิวสัมผัสของตัวอย่าง ทำให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำ

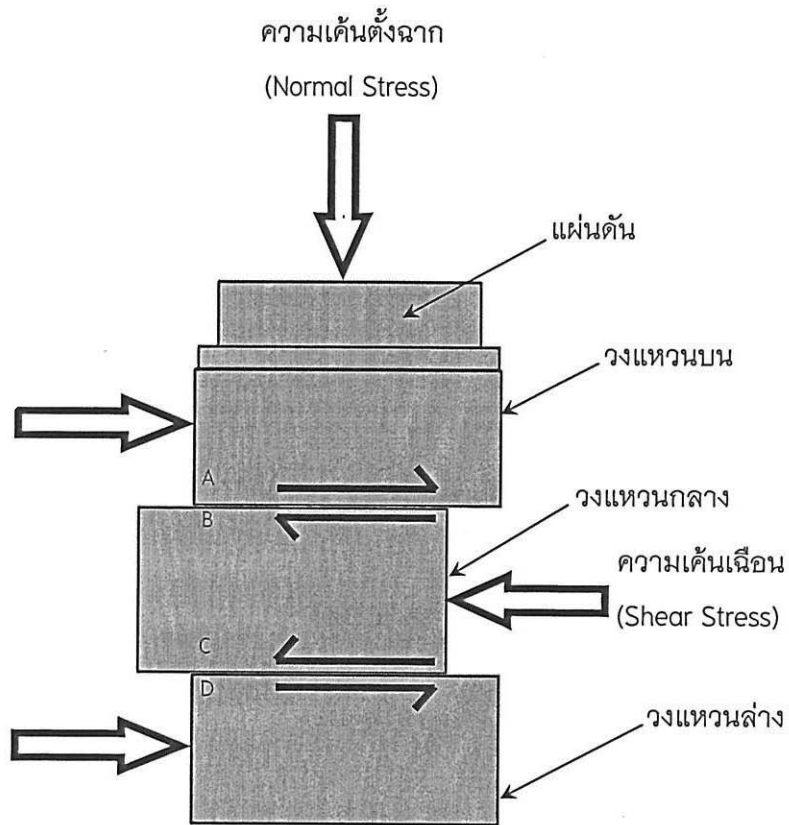
4) เครื่องทดสอบคุณสมบัติการต้านทานแรงเฉือนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันให้แรงเฉือนที่ผิวสัมผัสเพียงด้านเดียวของตัวอย่าง แต่ด้วยนวัตกรรมใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถให้แรงเฉือนกับตัวอย่างแบบสองผิวสัมผัสได้ ซึ่งค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนที่แท้จริงที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 ภาพเพอร์สเปคทีฟของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน



รูปที่ 3.8 ภาพแยกของชุดบดอัดที่อยู่ในแบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของแบบหล่อทดสอบที่มีแผ่นดัดสำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉาก
ลงบนตัวอย่างที่ต้องการ

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ เพื่อทดสอบความสามารถของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับวิธีการทดสอบการบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D1557 (Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort) และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ASTM D8040 (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained) เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์ การทดสอบการบดอัด และการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างดินเบนโทไนต์

4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ที่อัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์กับน้ำบริสุทธิ์มีวิธีการจัดเตรียมตัวอย่างดังนี้

- 1) เตรียมดินเบนโทไนต์น้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม ใส่ลงไปในกระบะแห้งและสะอาด ขนาด 35×40×18 เซนติเมตร ทั้งหมด 14 ตัวอย่าง
- 2) เตรียมน้ำบริสุทธิ์ โดยใช้กระบะบดด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ของน้ำหนักดินเบนโทไนต์
- 3) ทำการผสมน้ำบริสุทธิ์กับดินเบนโทไนต์ที่ได้จัดเตรียมไว้ในแต่ละอัตราส่วนด้วยการตวงน้ำบริสุทธิ์ใส่ในขวดสเปรย์แล้วฉีดพรมเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 4) ทำการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์โดยทันที เพื่อลดผลกระทบของความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป

4.3 วิธีทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์สามารถแบ่งออกเป็นสองชุดการทดสอบคือ การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวน (3-ring mold) และการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน (Standard mold)

4.3.1 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวน

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวนมี 7 ขั้นตอน

ดังนี้

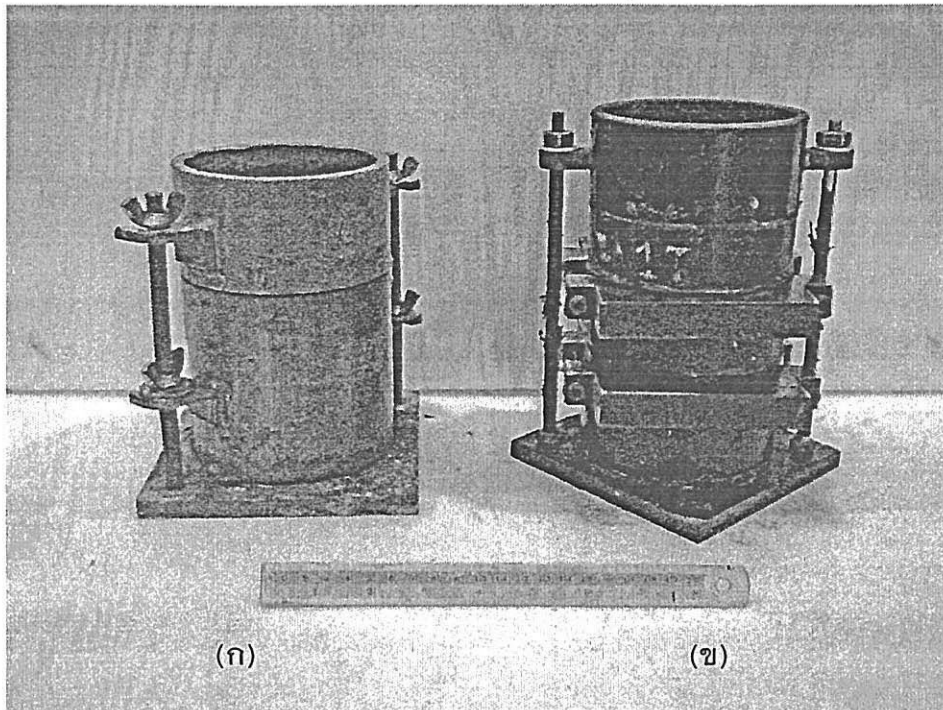
- 1) นำดินเบนโทไนต์ที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างดังกล่าวใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.13 เซนติเมตร สูง 15.19 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1
- 2) ทำการบดอัดตัวอย่างดินเบนโทไนต์ด้วยการปล่อยน้ำหนักจากค้อนเหล็กขนาด 10 ปอนด์ ให้ตกกระทบบนแบบหล่อทดสอบดินเบนโทไนต์ จำนวน 27 ครั้งต่อหนึ่งชั้น โดยคำนวณจากสมการพลังงานบดอัดต่อปริมาตรดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2
- 3) ทำการบดอัดโดยให้น้ำหนักกระจายลงทั่วพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างจำนวน 6 ชั้น
- 4) เมื่อทำการบดอัดจนครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกยึดแบบหล่อทดสอบออกจากนั้นใช้ไม้บรรทัดเหล็กขูดตกแต่งดินให้อยู่ในระดับขอบแบบหล่อทดสอบพอดี
- 5) ปิดทำความสะอาดเศษดินที่ตกค้างอยู่บนแบบหล่อทดสอบออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกค่าไว้
- 6) เก็บตัวอย่างดินเบนโทไนต์ในตำแหน่งบน กลาง และล่างจากแบบหล่อทดสอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและทำการจดบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 7) นำตัวอย่างดินเบนโทไนต์แห้งที่อบไว้มาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความชื้นของตัวอย่างดิน ดังสมการ 4.1

4.3.2 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน (ASTM D1557) มี 7

ขั้นตอน ดังนี้

- 1) นำดินเบนโทไนต์ที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐาน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 11.64 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1
- 2) ทำการบดอัดตัวอย่างดินเบนโทไนต์ด้วยการปล่อยน้ำหนักจากค้อนเหล็กขนาด 10 ปอนด์ ให้ตกกระทบบนแบบหล่อทดสอบดินเบนโทไนต์ จำนวน 25 ครั้งต่อหนึ่งชั้น โดยคำนวณจากสมการพลังงานบดอัดต่อปริมาตร
- 3) ทำการบดอัดโดยให้น้ำหนักกระจายลงทั่วพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างจำนวน 5 ชั้น



รูปที่ 4.1 (ก) คือแบบหล่อมาตรฐานและ (ข) คือแบบหล่อแบบสามวงแหวน

- 4) เมื่อทำการบดอัดจนครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกยึดแบบหล่อทดสอบออก จากนั้นใช้ไม้บรรทัดเหล็กชุดตักแต่งดินให้อยู่ในระดับขอบแบบหล่อทดสอบพอดี
- 5) ปิดทำความสะอาดเศษดินที่ตกค้างอยู่บนแบบหล่อทดสอบออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกค่าไว้
- 6) เก็บตัวอย่างดินเบนโทไนต์ในตำแหน่งบนและล่างจากแบบหล่อทดสอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและทำการจดบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 7) นำตัวอย่างดินเบนโทไนต์แห้งที่อบไว้มาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความชื้นของตัวอย่างดิน ดังสมการ (4.1)

4.4 การคำนวณผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

การคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นของน้ำที่เหมาะสมสามารถทำได้จากการลงจุดค่าปริมาณความชื้นของน้ำแล้วเลือกจุดที่สูงที่สุดของแผนภูมิระหว่างปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินกับค่าความหนาแน่นแห้ง สมการคำนวณหาปริมาณความชื้นของน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$w_c = [(W_1 - W_2) / (W_2 - W_{can})] \times 100 \quad (4.1)$$

โดย w_c = ปริมาณความชื้นตัวอย่างดิน (ร้อยละ)
 W_{can} = น้ำหนักภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักดินเปียก + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
 W_2 = น้ำหนักดินแห้ง + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)

การคำนวณค่าความหนาแน่นเปียกของตัวอย่างดินสามารถหาได้จากสมการ

$$\rho_t = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (4.2)$$

โดย ρ_t = ค่าความหนาแน่นเปียก (กรัม/ซม³)
 W_1 = น้ำหนักแบบ (Mould) (กรัม)
 W_2 = น้ำหนักแบบ + ดินบดอัดในแบบ (กรัม)
 V = ปริมาตรของแบบหล่อดิน (ซม³)

การคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างดินสามารถหาได้จากสมการ

$$\rho_d = \frac{100\rho_t}{100 + w} \quad (4.3)$$

เมื่อ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ซม³)
 ρ_t = ค่าความหนาแน่นเปียก (กรัม/ซม³)
 w = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดิน (ร้อยละ)

4.5 ผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

จากการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ที่ความชื้นต่างๆ ในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวนและแบบหล่อมาตรฐาน โดยมีการเปรียบเทียบน้ำหนักของเบ้าทดสอบแบบมาตรฐานกับเบ้าทดสอบแบบใหม่โดยผันแปรปริมาณความชื้นได้ดังตารางที่ 4.1 และคำนวณคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์จากการทดสอบการบดอัดดินด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวนและการบดอัดดินด้วยแบบหล่อมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.3 โดยนำข้อมูลที่ได้ไปทำการลงจุดระหว่างค่า

ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และปริมาณความชื้น ซึ่งจะทำให้สามารถหาจุดที่แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสมดังรูปที่ 4.2 ได้แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งในฟังก์ชันของความชื้น สำหรับการทดสอบการบดอัดในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวน ซึ่งได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 24.49 โดยน้ำหนักดินตัวอย่าง และความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.43 กรัม/ซม³ สำหรับการทดสอบการบดอัดในแบบหล่อมาตรฐานค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 24.13 โดยน้ำหนักดินตัวอย่าง และความหนาแน่นแห้งมีค่าเท่ากับ 1.41 กรัม/ซม³ จากการทดสอบการบดอัดในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวนเปรียบเทียบกับ การทดสอบการบดอัดในแบบหล่อมาตรฐานได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งของทั้งสองอุปกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักของเบ้าทดสอบแบบมาตรฐานกับเบ้าทดสอบแบบใหม่ โดยผันแปรปริมาณความชื้น

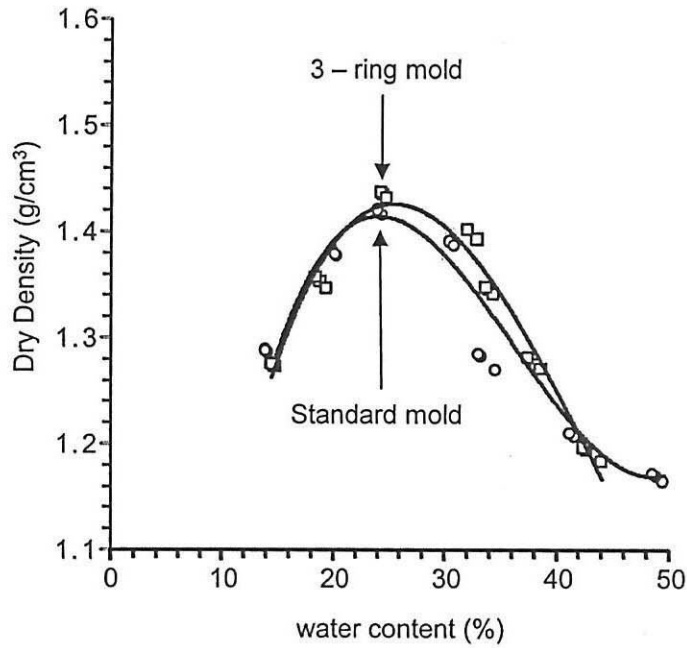
Water content (%)	Standard Mold			Modified Mold		
	Weight of Standard Mold (g)	Weight of Standard Mold + wet soil (g)	Weight of wet soil (g)	Weight of Modified Mold (g)	Weight of Modified Mold + wet soil (g)	Weight of wet soil (g)
0	3,820	5,220	1,400	6,000	7,800	1,800
5	3,820	5,400	1,580	6,000	7,980	2,100
10	3,820	5,500	1,680	6,000	8,200	2,320
15	3,820	5,550	1,730	6,000	8,280	2,320
20	3,820	5,450	1,630	6,000	8,220	2,320
25	3,820	5,450	1,630	6,000	8,170	2,280
30	3,820	5,480	1,660	6,000	8,100	2,200

ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์ จากการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ด้วยแบบหล่อแบบสามวงแหวน

Sample Number	Location with Respect to Mold Length	Wet Density (g/cm ³)	Dry Density (g/cm ³)	Water Content (%)
BN-1	Top	1.4611	1.2727	14.7994
	Middle	1.4611	1.2765	14.4565
	Bottom	1.4611	1.2755	14.5516
BN-2	Top	1.6072	1.3529	18.7925
	Middle	1.6072	1.3467	19.3408
	Bottom	1.6072	1.3574	18.3988
BN-3	Top	1.7858	1.4349	24.4565
	Middle	1.7858	1.4370	24.2667
	Bottom	1.7858	1.4313	24.7649
BN-4	Top	1.8507	1.3936	32.8052
	Middle	1.8507	1.3927	32.8874
	Bottom	1.8507	1.4018	32.0245
BN-5	Top	1.8020	1.3453	33.9440
	Middle	1.8020	1.3414	34.3337
	Bottom	1.8020	1.3479	33.6943
B-6	Top	1.7614	1.2748	38.1757
	Middle	1.7614	1.2709	38.5915
	Bottom	1.7614	1.2812	37.4813
BN-7	Top	1.7046	1.1948	42.6667
	Middle	1.7046	1.1836	44.0177
	Bottom	1.7046	1.1970	42.4113

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์ จากวิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ ด้วยแบบหล่อมาตรฐาน

Sample Number	Location with Respect to Mold Length	Wet Density (g/cm ³)	Dry Density (g/cm ³)	Water Content (%)
BS-1	Top	1.4679	1.2864	14.1049
	Middle	1.4679	1.2884	13.9332
	Bottom	1.4679	1.2880	13.9614
BS-2	Top	1.6566	1.3772	20.2882
	Middle	1.6566	1.3823	19.8422
	Bottom	1.6566	1.3787	20.1586
BS-3	Top	1.7614	1.4204	24.0117
	Middle	1.7614	1.4160	24.4000
	Bottom	1.7614	1.4205	24.0000
BS-4	Top	1.8139	1.3908	30.4192
	Middle	1.8139	1.3907	30.4305
	Bottom	1.7090	1.3869	30.7856
BS-5	Top	1.7090	1.2829	33.2168
	Middle	1.7090	1.2849	33.0124
	Bottom	1.7090	1.2701	34.5578
BS-6	Top	1.7090	1.2073	41.5584
	Middle	1.7090	1.2072	41.5714
	Bottom	1.7090	1.2106	41.1765
BS-7	Top	1.7405	1.1651	49.3894
	Middle	1.7405	1.1697	48.7929
	Bottom	1.7405	1.1717	48.5396



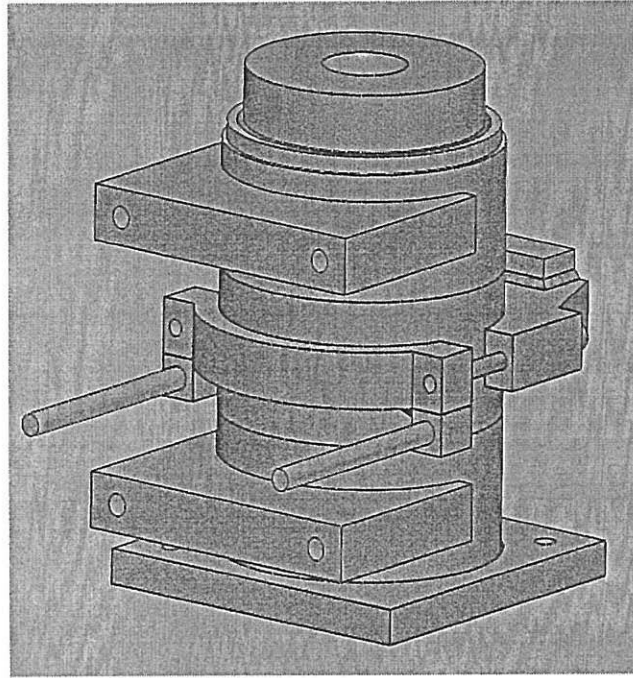
รูปที่ 4.2 ค่าความชื้นที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบหล่อมาตรฐานและแบบหล่อแบบสามวงแหวน

4.6 การจัดเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังเฉือน

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนสามารถแบ่งออกเป็นสองชุดคือการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน

4.6.1 การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

เริ่มจากการนำดินตัวอย่างบดอัดในแบบหล่อแบบสามวงแหวน (3-ring mold) ตามวิธีการบดอัดในหัวข้อที่ 4.3.1 ข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 5 โดยเลือกความชื้นที่เหมาะสม ในที่นี้ใช้ความชื้นร้อยละ 24 โดยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นยกทั้งชุดบดอัดใส่เข้าไปในชุดให้แรงเฉือนเพื่อทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบหล่อทดสอบที่ประกอบเข้ากับคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็ก ฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลาง โดยวงแหวนบนและวงแหวนล่างจะมีแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเฉือนเมื่อทำการทดสอบ

4.6.2 การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน

เริ่มจากการนำดินตัวอย่างบดอัดในแบบหล่อมาตรฐาน (Standard mold) ตามวิธีการบดอัดในหัวข้อที่ 4.3.2 ข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 5 โดยเลือกความชื้นที่เหมาะสม ในที่นี้ใช้ความชื้นเท่ากับ ร้อยละ 24 โดยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นดินตัวอย่างดินออกจากแบบหล่อมาตรฐานตัดแต่งตัวอย่างด้วยแบบแต่งตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 63.5 มิลลิเมตร สูง 31.25 มิลลิเมตร ใช้แบบแต่งตัวอย่างด้านที่มีปลายคมกดตัวอย่างบรรจุเข้าภายในแบบแต่งตัวอย่างให้พื้นขอบแบบแต่งเล็กน้อย ใช้เลื่อยเส้นลวดตัดตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบแต่ง ดันดินตัวอย่างออกจากแบบแต่ง

4.7 วิธีการทดสอบกำลังเฉือน

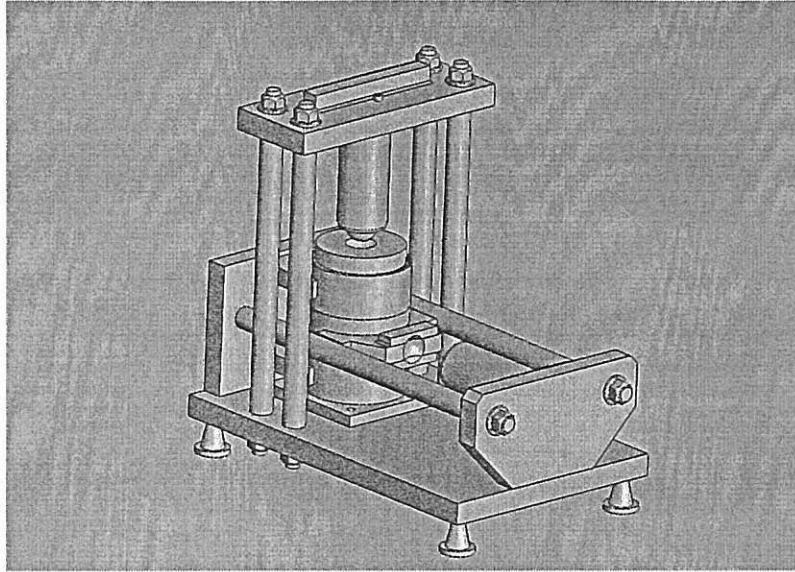
การทดสอบกำลังเฉือนเพื่อหาค่าสูงสุดของดินเบนโทไนต์สามารถแบ่งออกเป็นสองชุดการทดสอบคือ การทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน

4.7.1 การทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

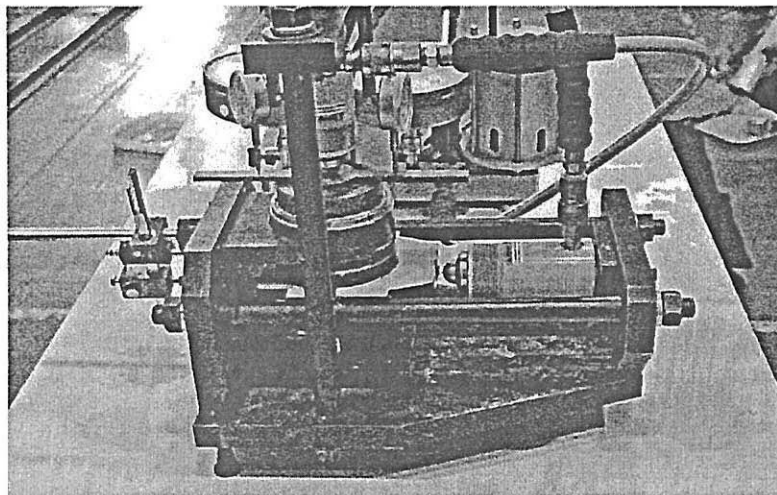
- 1) นำตัวอย่างที่ทำการบดอัดแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3
- 2) ประกอบแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวนเข้ากับอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนดังรูปที่ 4.4
- 3) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้านบนของกระบอกเพื่อวัดระยะการทรุดตัวและแนวระนาบเพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัว
- 4) ให้ความเค้นตั้งฉากด้วยแม่แรงไฮดรอลิกกระทำในแนวตั้งฉากกับตัวอย่าง โดยผันแปรความเค้นตั้งฉากที่ 200, 400, 600, 800 และ 1000 kPa ทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและรักษาความเค้นตั้งฉากให้คงที่
- 5) ให้ความเค้นเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบทุกระยะ 0.5 มิลลิเมตร และจดบันทึกค่าไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) จากสมการ (4.4), (4.6) และ (4.7) จากนั้นทำการให้ความเค้นเฉือนอย่างต่อเนื่องเพื่อหาค่าความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังมีการเคลื่อนตัวของรอยแตก เมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ

4.7.2 การทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน

- 1) ประกอบกล่องตัวอย่างเข้าด้วยกัน ชั้นสกรูยึดกล่องบนและล่างเข้าด้วยกันให้แน่น และชั้นสกรูเร่งให้พอดีตะก่องผิวกล่องล่าง
- 2) วางแผ่นเหล็กเซาะร่องล่างให้แนวเซาะร่องขวางทิศทางเฉือนตัวอย่างวางแผ่นหินพรุนล่าง ตัวอย่างดิน แผ่นหินพรุนบน แผ่นเหล็กเซาะร่องบน แผ่นฝาปิดตัวอย่างลงในกล่องเฉือนตัวอย่าง
- 3) วางกล่องตัวอย่างในเครื่องใส่กล่องตัวอย่างของเครื่องทดสอบกำลังแรงเฉือนแบบมาตรฐานดังรูปที่ 4.5 เลื่อนกล่องตัวอย่างให้แตะแกนเพ็องเกียร์ แขนวนแผ่นน้ำหนักให้ได้ความเค้นแนวตั้งฉากที่ 200, 400, 600, 800 และ 1000 kPa
- 4) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนที่แนวอน การเคลื่อนที่แนวตั้ง และติดตั้งวงแหวนวัด แรงแนวระนาบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยง และ
(ข) อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ



รูปที่ 4.5 เครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน (Electric Direct Shear Testing Machine)

- 5) ให้ความเค้นเฉือนในแนวระนาบ ทำการอ่านวงแหวนวัดแรงและค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบทุกระยะ 0.02 มิลลิเมตร และจดบันทึกค่าไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) จากสมการ (4.5) ถึงสมการ (4.7) จากนั้นทำการให้ความเค้นเฉือนอย่างต่อเนื่องเพื่อหาความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังมีการเคลื่อนตัวของรอยแตก เมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ

4.8 การคำนวณผลการทดสอบกำลังเฉือน

การคำนวณความเค้นเฉือนของการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.4) และ (4.5)

$$\tau = F / 2A \quad (\text{แบบสามวงแหวน}) \quad (4.4)$$

$$\tau = F / A \quad (\text{แบบมาตรฐาน}) \quad (4.5)$$

โดย τ = ค่าความเค้นเฉือน
 F = แรงต้านทานการเฉือน
 A = พื้นที่เฉือนของตัวอย่าง

การลงจุดระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากและค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบน Mohr's Diagram แล้วลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านั้น เส้นตรงนี้เรียกว่า "Mohr – Coulomb Failure Envelope" คือเส้นแทนค่าความแข็งแรงหรือกำลังของดินดังสมการ

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (4.6)$$

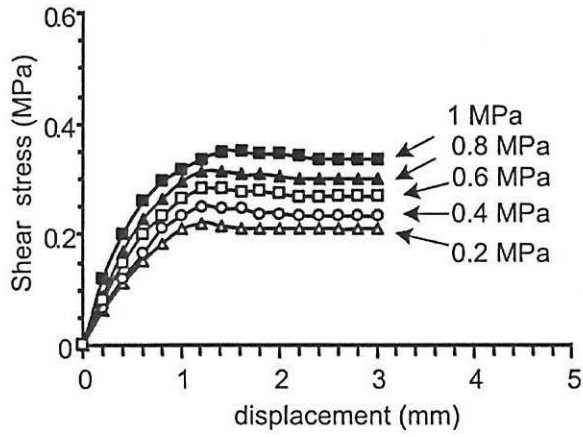
โดย τ = ค่าความเค้นเฉือน
 c = ความเค้นยึดติด
 σ_n = ความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ
 ϕ = มุมเสียดทานภายใน

ค่ามุมเสียดทานภายในหาได้จากสมการ

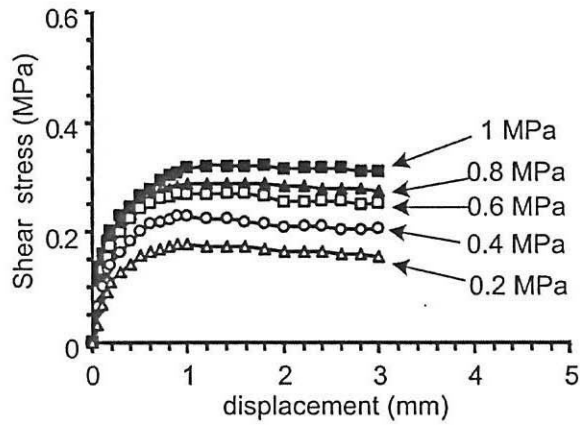
$$\phi = \tan^{-1}(\text{slope}) = \tan^{-1}(\Delta y / \Delta x) \quad (4.7)$$

4.9 ผลการทดสอบกำลังเฉือน

จากการทดสอบกำลังเฉือนของดินเบนโทไนต์ด้วยการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐาน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากดังรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างและการเคลื่อนตัวในแนวระนาบ ดังรูปที่ 4.7 ค่ามุมเสียดทานและค่าความเชื่อมั่นของการทดสอบแบบสามวงแหวนมีค่าเท่ากับ 9 องศา และ 0.189 MPa ค่ามุมเสียดทานและค่าความเชื่อมั่นของการทดสอบแบบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 7 องศา และ 0.197 MPa ดังตารางที่ 4.4 โดยได้คำนวณค่ามุมเสียดทานและค่าความเชื่อมั่นของดินเบนโทไนต์จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากดังรูปที่ 4.8 จากการทดสอบกำลังเฉือนของดินเบนโทไนต์ด้วยการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนเปรียบเทียบการทดสอบกำลังเฉือนแบบมาตรฐานได้ผลการทดสอบที่คล้ายคลึงกัน

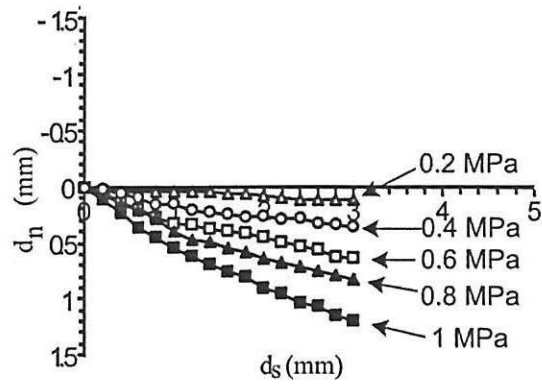


(ก)

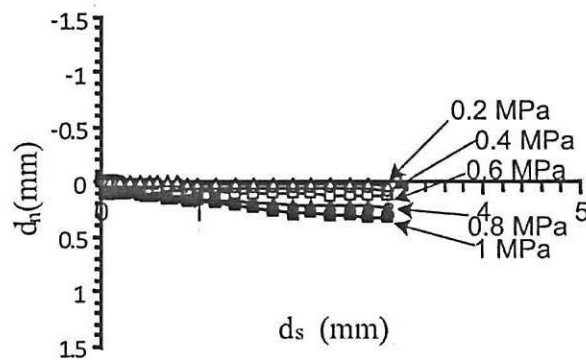


(ข)

รูปที่ 4.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน (ก) และแบบมาตรฐาน (ข)



(ก)

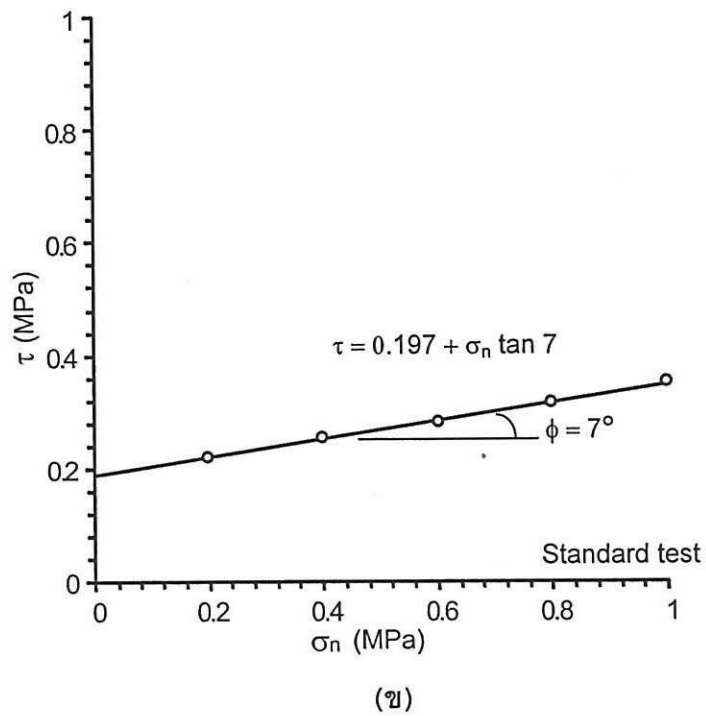
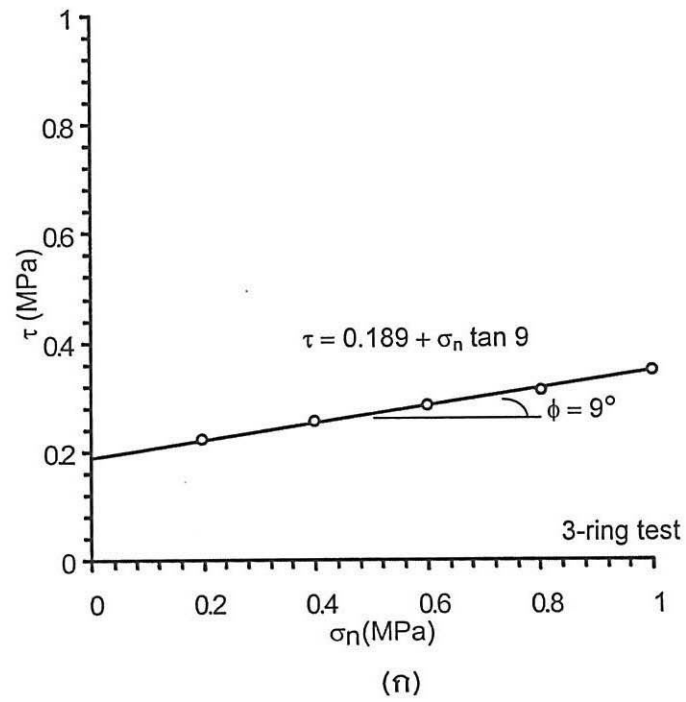


(ข)

รูปที่ 4.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างและการเคลื่อนตัวในแนวระนาบของดินเบนโทไนต์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน (ก) และแบบมาตรฐาน (ข)

ตารางที่ 4.4 ค่าความดันยึดติดและมุมเสียดทานภายในของดินเบนโทไนต์ที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนและแบบมาตรฐาน

Sample	C (MPa)	ϕ (degrees)
3-ring test	0.189	9.0
Standard test	0.197	7.0



รูปที่ 4.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์ ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน (ก) และแบบมาตรฐาน (ข)

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนที่นำเอาการทดสอบตามมาตรฐานของการทดสอบการบดอัดและการทดสอบกำลังแรงเฉือนของตัวอย่างดินมารวมกันในอุปกรณ์ชุดเดียว และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

กิจกรรมที่ได้ดำเนินการประกอบด้วย การออกแบบ ประดิษฐ์ และพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวนโดยตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งความสามารถของอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นถูกพิสูจน์โดยทำการทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนของดินเบนโทไนต์ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์มาตรฐานแบบดั้งเดิมของ ASTM

ผลการทดสอบระบุว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่จุดความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีค่าเท่ากับผลที่ได้จากอุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM ผลการทดสอบกำลังเฉือนที่ได้จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ยังสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ทดสอบได้โดยใช้อุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM

ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบดั้งเดิมสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

- 1) ใช้เวลาในการทดสอบกำลังเฉือนน้อยลงประมาณร้อยละ 25 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1
- 2) ตัวอย่างดินบดอัดที่นำมาทดสอบกำลังเฉือนไม่ถูกรบกวนโดยการตัดหรือตกแต่งลงในเบ้าเฉือน
- 3) ขนาดเม็ดดินใหญ่สุดที่ทดสอบได้ คือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 (9.15 มม.) ในขณะที่เบ้าการทดสอบแบบมาตรฐานสามารถทดสอบตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.25 มม.)
- 4) ความเค้นในแนวตั้งจากไม่เอียงไปตามแนวเฉือนในขณะที่ทดสอบ
- 5) แรงที่ให้ในแนวตั้งจากสูงสุดได้ถึง 20 ตัน ในขณะที่อุปกรณ์ทดสอบแบบมาตรฐานส่วนใหญ่ได้ประมาณ 0.5 ถึง 1 ตัน
- 6) อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีขนาดเล็ก คล่องตัว และทนทาน สามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้ ในขณะที่อุปกรณ์แบบดั้งเดิมถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบระหว่างสองวิธี

ขั้นตอน	การทดสอบ แบบมาตรฐานเดิม	การทดสอบ แบบสามวงแหวน
	(นาที)	(นาที)
1) การจัดเตรียมตัวอย่าง	15	15
2) การบดอัด	15	18
3) การติดตั้งตัวอย่างลงในเบ้าเลื่อน	20	2
4) การทดสอบกำลังเฉือน	30	30
รวมเวลาต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ	1 ชม. 20 นาที	1 ชม. 5 นาที

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะทางเทคนิคและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นกับอุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ถูกพิสูจน์ว่าใช้ได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม และให้ผลการทดสอบสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยอุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการสึกกร่อน ใช้งานง่าย ซึ่งคู่มือการใช้อุปกรณ์ได้นำเสนอโดยละเอียดในภาคผนวก ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ดำเนินการยื่นขอจดสิทธิบัตรของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นภายใต้ชื่อ แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน เลขที่คำขอ 1101000399 เมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2554 และได้ดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีโดยจัดอบรม 1 วัน มีการบรรยายภาคทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในช่วงเช้าและสาธิตการใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการในช่วงบ่ายเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2554

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะทางเทคนิคและประสิทธิภาพระหว่างสองวิธี

รายการ	การทดสอบ แบบมาตรฐานเดิม	การทดสอบ แบบสามวงแหวน
1) เวลาที่ใช้ในการทดสอบต่อ หนึ่งตัวอย่าง	1 ชม. 20 นาที	1 ชม. 5 นาที
2) ขนาดเม็ดดินที่ทดสอบได้	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.25 มม.)	ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 (9.15 มม.)
3) การจัดเตรียมตัวอย่าง สำหรับการเขื่อน	ต้องถอดและตัด ตัวอย่างดินจากเบ้าบดอัดลง ในเบ้าเขื่อน	ไม่มีการถอดและตัดตัวอย่าง ใช้ เบ้าเดียวกันสำหรับบดอัดและ เขื่อน
4) วิธีการบดอัด	อาจถูกรบกวนได้จากการ	ไม่ถูกรบกวน
5) ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบกำลัง เขื่อน	ตัดและปรับแต่งขนาด 5 ชั้น ใช้ตุ้มน้ำหนักบดอัดชั้น ละ 25 ครั้ง	6 ชั้น ใช้ตุ้มน้ำหนักบดอัดชั้นละ 27 ครั้ง
6) สถานที่ทดสอบ	ในห้องปฏิบัติการ	ในห้องปฏิบัติการ และ ภาคสนาม (Portable)
7) ระบายเขื่อน	1 ระบาย	2 ระบาย
8) แนวความเค้นตั้งฉาก	เอียงไปตามการเคลื่อนตัว ของตัวอย่างขณะทดสอบ	คงที่อยู่ในแนวตั้งฉาก ตลอดเวลา
9) แรงที่ให้ในแนวตั้งฉากสูงสุด	0.5 ตัน	20 ตัน
10) ผลการทดสอบการบดอัด และกำลังเขื่อน	เป็นไปตามมาตรฐาน	เหมือนกับมาตรฐาน

บรรณานุกรม

- สถาพร คูวิจิตรจากร. 2545. ทดลองปรุพีภคศาสตร์. กรุงเทพฯ: ไลบราลี่ นาย
- Asadzadeh, M. and Soroush, A. Direct Shear Testing on a Rockfill Material. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34 (2B), pp. 379–396.
- ASTM D1557. “Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft–lb/ft³, 2,700 kN–m/m³)”. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.08, Soil and Rock; Dimension stone; Geosynthetics. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3080–04. “Standard Test Methods for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.08. West Conshohocken, Pennsylvania, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D698–07. “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft–lb/ft³ (600 kN–m/m³))”. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.08. West Conshohocken, Pennsylvania, PA: American Society for Testing and Materials.
- Chen, J., Lin, C. and Lee, w. (2003). Dilative Behavior of Granular Materials. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 13 (4), pp. 301–307.
- Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD) (online). URL: <http://www.gerd.eng.ku.ac.th>.
- Hamidi, A., Alizadeh, M. and Soleimani, S.M. (2009). Effect of Particle Crushing on Shear Strength and Dilation Characteristics of Sand–Gravel Mixtures. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7 (1), pp. 61–71.
- Hassanlourad, M., Selezadeh, H. and Shahnazari, H. (2008). Dilation and Particle Breakage Effects on the Shear Strength of Calcareous Sands Based on Energy Aspects. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 6 (2), pp. 108–119.
- Hogentogler, C. A. (1936), Essentials of soil compaction, *Proceedings of the Highway Research Board National Research Council*, Washington, D.C., pp. 309–316.

- Madhav, M. R. and Arlekar, J. N. (2000). Dilation of granular plies in mitigating liquefaction of sand deposit. 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Auckland, New Zealand, 7 pp.
- Olmez, M. S. (2008). Shear Strength Behavior of Sand–Clay Mixtures. Middle East Technical University.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering News Record 111: 245–248; 286–289; 348–351.
- Standard Compaction Test (online). URL: <http://www.shambhaviimpex.com/compaction.html>

คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบ
การบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

ฉบับที่ 1 วิธีการทดสอบมาตรฐาน

ฉบับที่ 2 วิธีการทดสอบแบบพิเศษ

ฉบับที่ 3 วิธีการทดสอบแบบพิเศษ

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบ
การบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

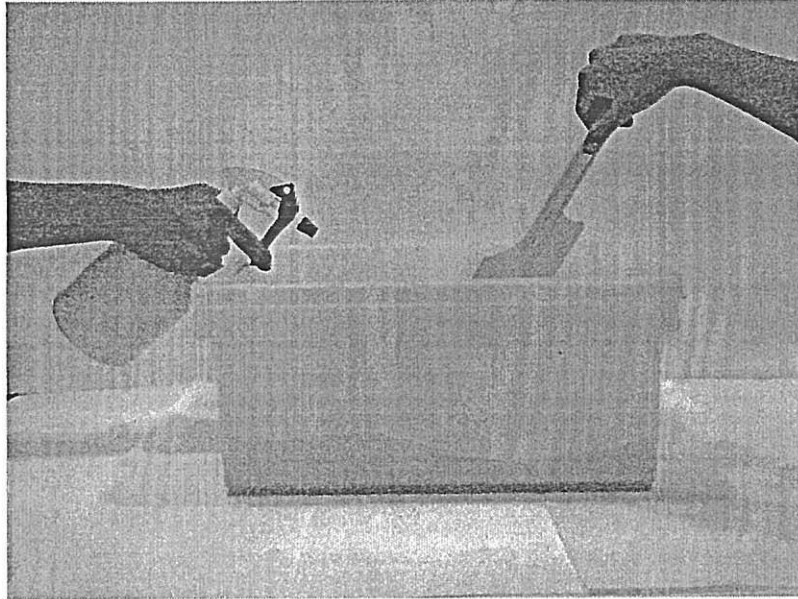
คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบ
การบดอัดและกำลังเนียนแบบสามวงแหวน

ส่วนที่ 1 วิธีการทดสอบการบดอัด

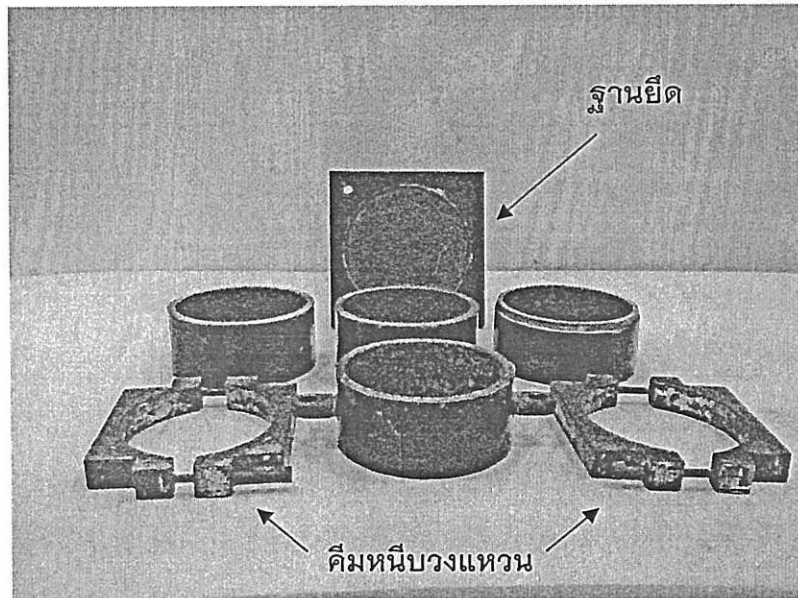
- 1) เตรียมตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 (ขนาด 9.51 มิลลิเมตร) 2.5 กิโลกรัม ใส่ลงในกระบอกแห้งและสะอาด ขนาด 35×40×18 เซนติเมตร
- 2) เตรียมน้ำบริสุทธิ์โดยใช้กระบอกตวงด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักตัวอย่างดิน
- 3) ทำการผสมน้ำบริสุทธิ์กับตัวอย่างทดสอบที่ได้จัดเตรียมไว้ในแต่ละอัตราส่วน ด้วยการตวงน้ำบริสุทธิ์ใส่ในขวดสเปรย์แล้วฉีดพรมเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากัน ดังแสดงในรูปที่ ก-1
- 4) ประกอบแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวน (3-ring mold) ด้วยการประกบวงแหวนบน วงแหวนกลางและวงแหวนล่างลงบนฐานยึดที่ทำการเจาะร่องเพื่อไม่ให้วงแหวนล่างเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ ก-2 และรูปที่ ก-3
- 5) ใช้คีมหนีบวงแหวนระหว่างรอยต่อของวงแหวนล่างกับวงแหวนกลาง และหนีบระหว่างวงแหวนกลางกับวงแหวนบน เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้วงแหวนเคลื่อนที่ออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ ก-4
- 6) ติดตั้งเสายึดระหว่างฐานยึดเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ออกจากกันในขณะที่ทำการทดสอบการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ ก-5
- 7) ประกอบวงแหวนประกบเข้าที่ด้านบนของแบบหล่อทดสอบ แล้วยึดหนีบเข้ากับฐานเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวในขณะบดอัด ดังแสดงในรูปที่ ก-5
- 8) เทตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวนดังแสดงในรูปที่ ก-6
- 9) ทำการบดอัดจำนวน 6 ชั้นๆ ละ 27 ครั้ง ด้วยการปล่อยค้อนเหล็กขนาด 10 ปอนด์ กระจายลงให้ทั่วผิวสัมผัสของตัวอย่างดินในแต่ละชั้น
- 10) ทำการบดอัดจนครบจำนวนครั้ง จากนั้นถอดวงแหวนประกบออกโดยระวังไม่ให้ตัวอย่างดินเคลื่อนหลุด
- 11) ทำการถอดเสาค้ำออกจากฐานยึด
- 12) ใช้แผ่นเหล็กขอบเรียบชุดตักแต่งตัวอย่างดินผิวบนให้อยู่ในระดับเดียวกับขอบบนของวงแหวนบนพอดี
- 13) ปลดคีมหนีบวงแหวนระหว่างรอยต่อของวงแหวนล่างกับวงแหวนกลาง และระหว่างวงแหวนกลางกับวงแหวนบนออกจากแบบหล่อแบบสามวงแหวน

ส่วนที่ 2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

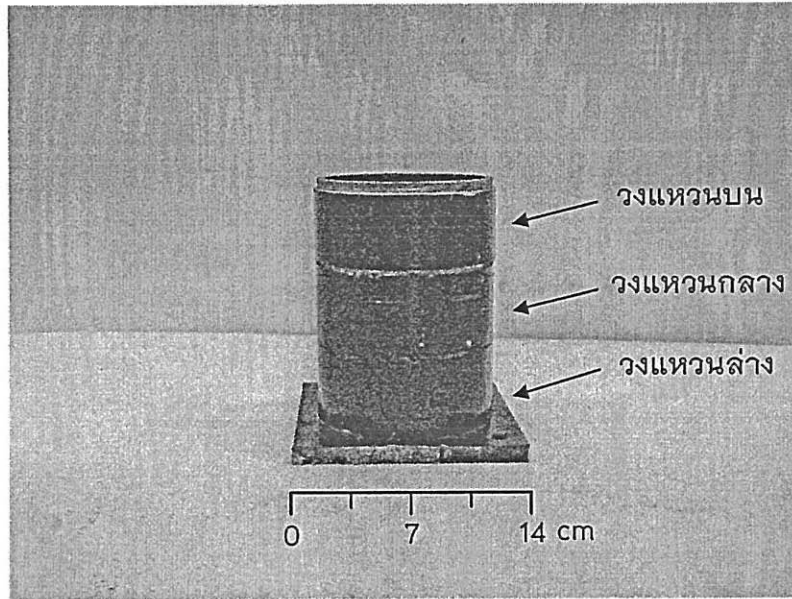
- 1) นำตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามวงวน จากนั้นปิดทับด้านบนแบบหล่อด้วยแผ่นตันเพื่อทำหน้าที่กระจายแรง
- 2) ทำการติดตั้งคีมหนีบวงแหวนกลางเข้ากับแบบหล่อทดสอบแบบสามวงวนดังแสดงในรูปที่ ก-7
- 3) นำแบบหล่อแบบสามวงวนติดตั้งลงในเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงวนดังแสดงในรูปที่ ก-8
- 4) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gage) ในแนวตั้งเข้ากับแผ่นดันด้านบนของกระบอกเพื่อวัดระยะการทรุดตัวและมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบกับขาเหล็ก เพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัวแนวระนาบ ดังแสดงในรูปที่ ก-9
- 5) ให้ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) ด้วยแม่แรงไฮดรอลิกกระทำในแนวตั้งฉากกับแผ่นดันตัวอย่างดิน ทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัว และรักษาความเค้นตั้งฉากให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ ก-10
- 6) ให้แรงเฉือน (Shear Stress) ด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบทุกระยะ 0.5 มิลลิเมตร และจดบันทึกค่า
- 7) ให้แรงเฉือนจนกระทั่งถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle)
- 8) ให้ความเค้นเฉือนอย่างต่อเนื่องเพื่อหาความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังมีการเคลื่อนตัวของรอยแตก เมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ
- 9) ถอดฐานรองด้านหน้าออก จากนั้นนำแบบหล่อทดสอบแบบสามวงวนออกจากเครื่องทดสอบกำลังเฉือน
- 10) ถอดคีมหนีบวงแหวนกลางและถอดแบบหล่อทดสอบออกจากกัน
- 11) เก็บตัวอย่างดินในตำแหน่งบน กลาง และล่างจากแบบหล่อทดสอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและทำการจดบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความชื้น (Water Content)



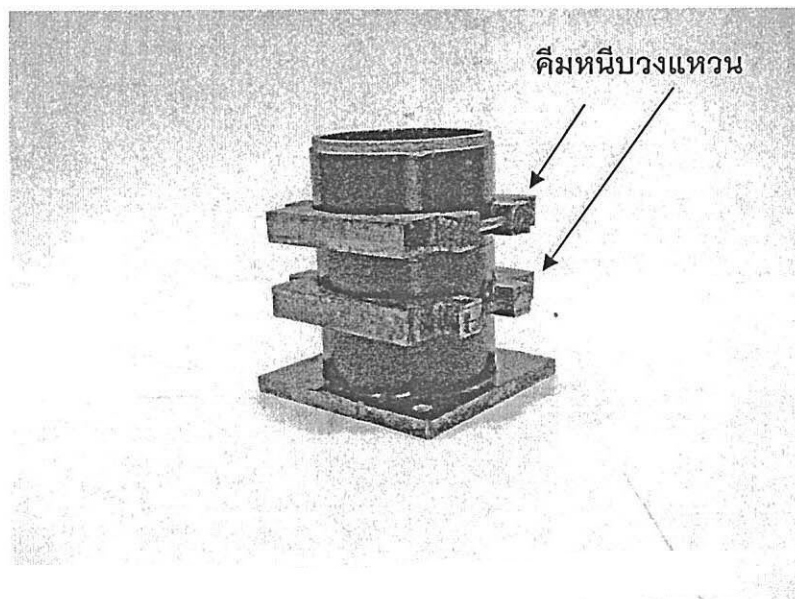
รูปที่ ก-1 การผสมตัวอย่างดินกับน้ำบริสุทธิ์โดยผันแปรอัตราส่วนของน้ำบริสุทธิ์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักตัวอย่างดิน



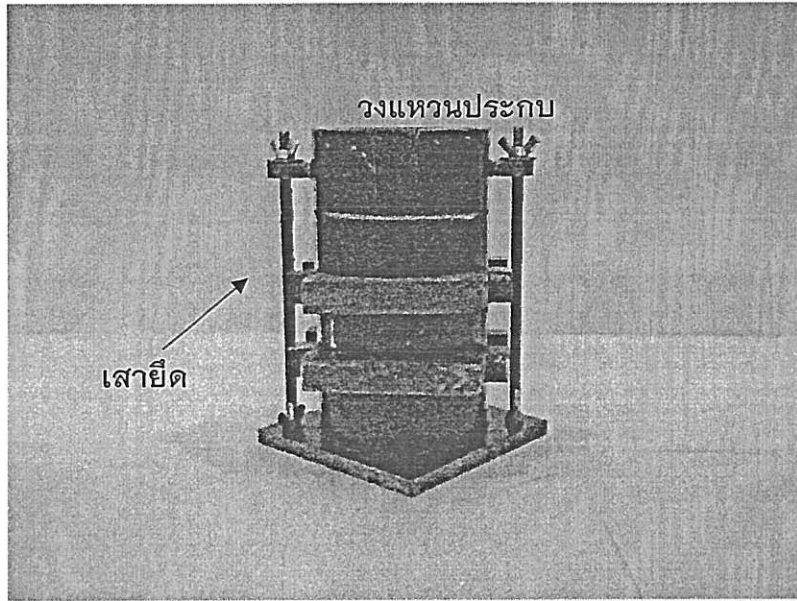
รูปที่ ก-2 องค์ประกอบของแบบหล่อแบบสามแหวน



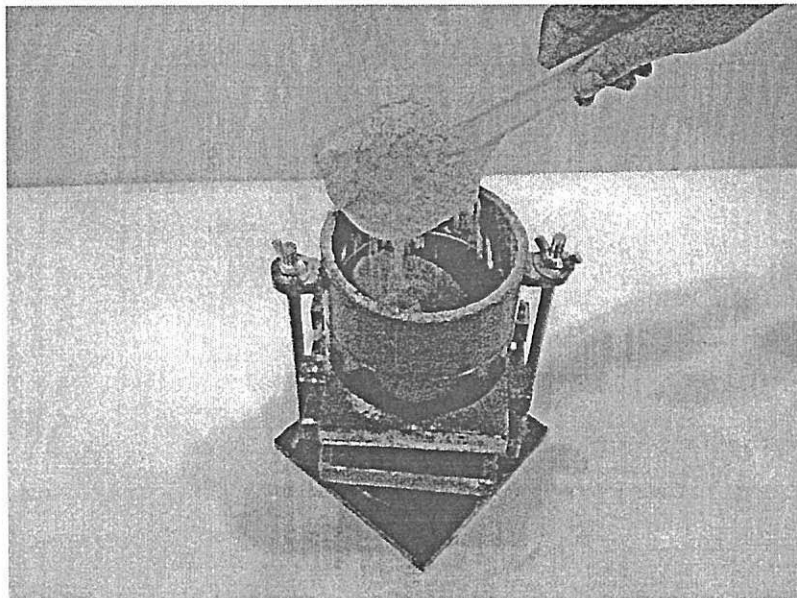
รูปที่ ก-3 แบบหล่อแบบสามวงแหวนที่ถูกประกอบเข้าด้วยกัน



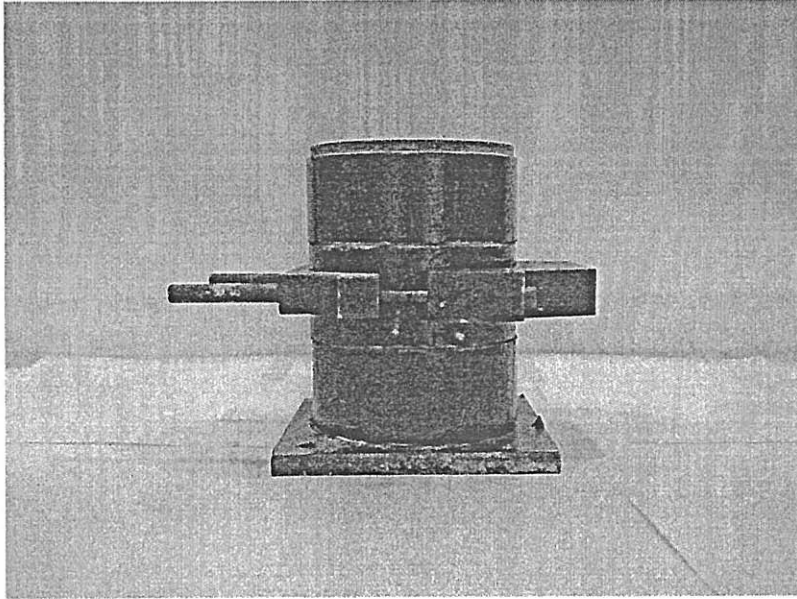
รูปที่ ก-4 การประกอบคีมหนีบระหว่างวงแหวนบน วงแหวนกลาง และวงแหวนล่าง



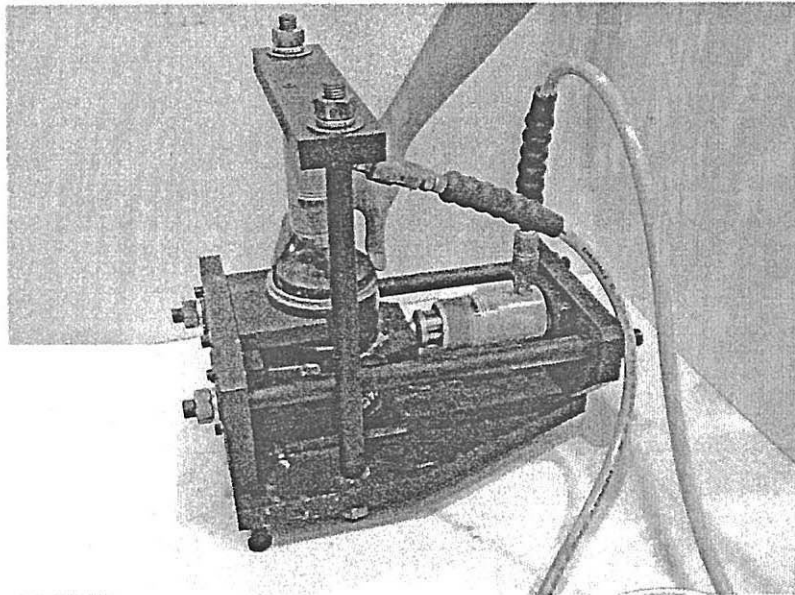
รูปที่ ก-5 การติดตั้งเสายึดและวงแหวนประกบเพื่อยึดแบบหล่อไว้ด้วยกัน



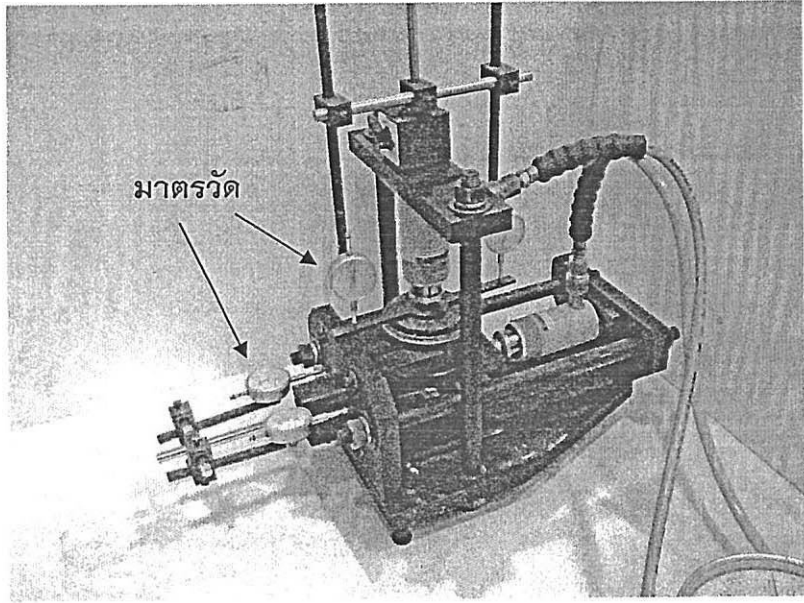
รูปที่ ก-6 การเทตัวอย่างดินลงในแบบหล่อแบบสามวงแหวน



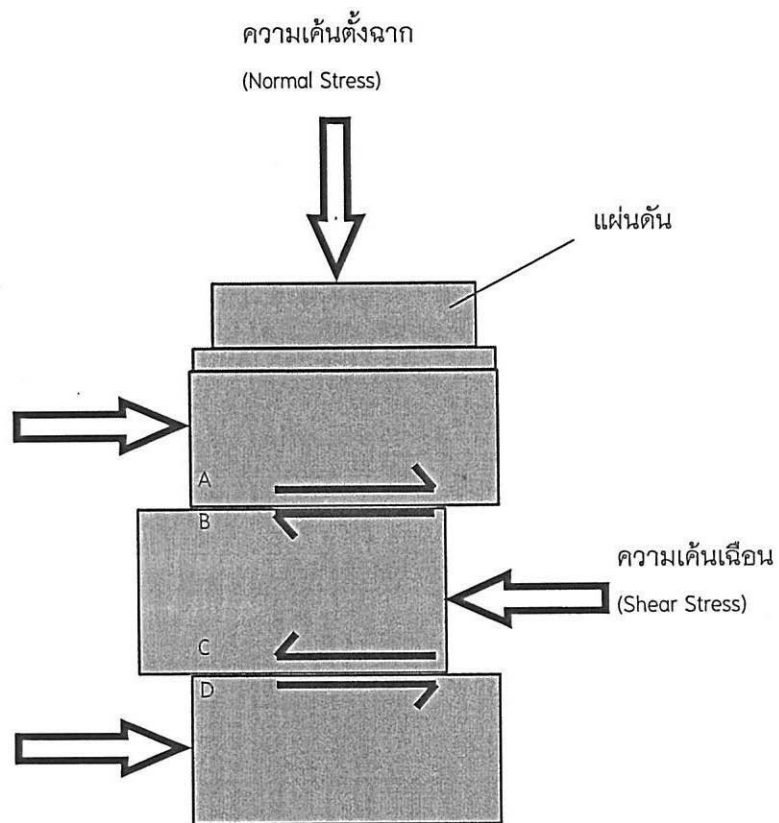
รูปที่ ก-7 การติดตั้งคีมหนีบวงแหวนกลางเข้ากับแบบหล่อทดสอบแบบสามวงแหวน



รูปที่ ก-8 การติดตั้งแบบหล่อแบบสามวงแหวนเข้ากับเครื่องทดสอบกำลัง
เหือนแบบสามวงแหวน



รูปที่ ก-9 การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวระนาบ



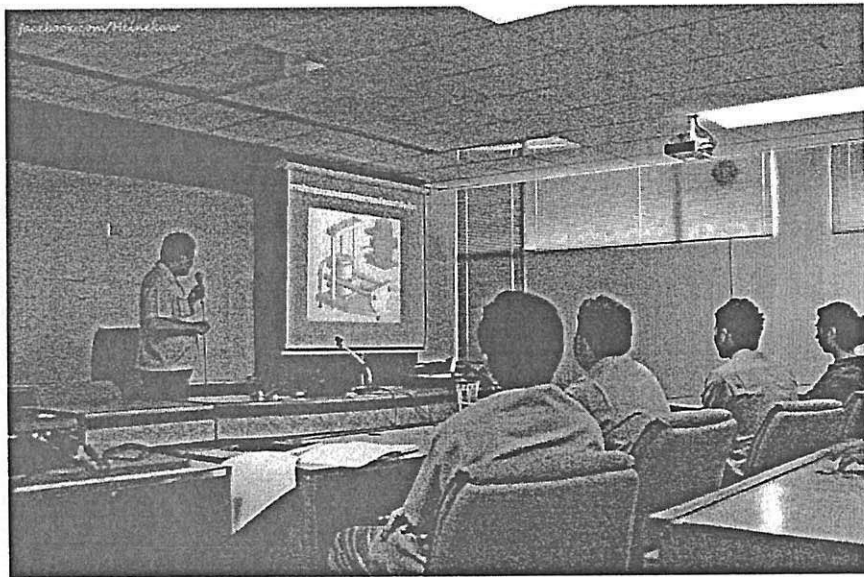
รูปที่ ก-10 ภาพตัดขวางของแบบหล่อทดสอบซึ่งมีแผ่นคั้นที่ใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉาก ลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งวงแหวนกลางจะถูกเฉือนด้วยความเค้นเฉือน โดยมีระนาบการเฉือนเกิดขึ้น 2 ระนาบการเฉือน คือ ระนาบด้านบน (ระนาบ A-B) และระนาบด้านล่าง (ระนาบ C-D)

ภาคผนวก ข

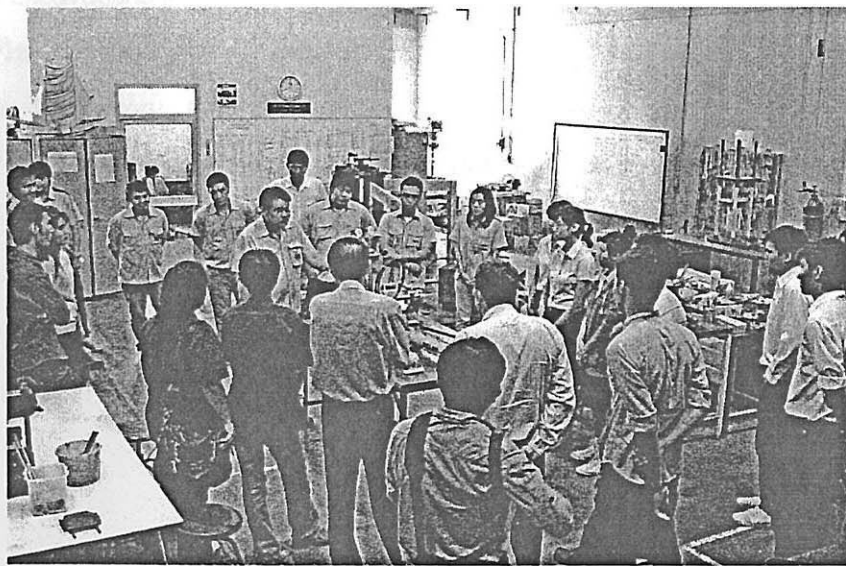
การประชาสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี

การประชุมสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี

หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้จัดให้มีการอบรมและเผยแพร่การประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเหนือนแบบสามวงแหวนซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ เมื่อวันที่ 23 กันยายน 2554 ณ ห้องประชุม 1 อาคารวิชาการ โดยเวลา 09.00-12.15 น. บรรยายสรุปและสาธิตวิธีการใช้แบบหล่อทดสอบฯ โดยมี ดร.ปรัชญา เทพนรงค์ และ รศ.ดร.กิตติเทพ เพ็องขจร เป็นวิทยากร (รูปที่ ข-1) และช่วงเวลา 13.15-16.30 น. ได้มีการสาธิตวิธีการทดสอบการบดอัดและกำลังรับแรงเหนือนแบบสามวงแหวนที่อาคารเครื่องมือ 4 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (รูปที่ ข-2) ซึ่งการอบรมครั้งนี้ได้รับความสนใจจากนักวิชาการทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และสถานศึกษาเป็นอย่างดี



รูปที่ ข-1 การอบรมและเผยแพร่การประดิษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัด
และกำลังเหือนแบบสามวงแหวนที่ห้องประชุม 1 อาคารวิชาการ



รูปที่ ข-2 การสาธิตวิธีการทดสอบการบดอัดและกำลังรับแรงเฉือนแบบสามวงแหวนที่อาคารเครื่องมือ 4

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelp Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือก บทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์