

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง
ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย

The relationship of internal friction angle and coefficient of lateral
stress sand at rest

กุลิสร์ แก้วกัญญาติ

สิริวิชญ์ เหมดี

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2560

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างใน
สภาวะอยู่นิ่งของทราย

The relationship of internal friction angle and coefficient of lateral stress
sand at rest

กุลิสร์ แก้วกัญญาติ

สิริวิชญ์ เพิ่มดี

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2560

The relationship of internal friction angle and coefficient of lateral stress
sand at rest

Mr. Kulit Kaewkunyat

Mr. Sirawit Permdee

This Civil Engineering Project Submitted in Partial Fulfillment of
Requirements For the Degree of Bachelor of Engineering Department of Civil
Engineering, Faculty of Engineering Burapha University, 2017

หัวข้อโครงการ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับสัมประสิทธิ์แรงดันดิน
ด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่งของทราย

โดย นายกุลิสร์ แก้วกัญญาติ

นายสิริวิทย์ เพิ่มดี

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

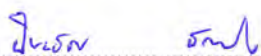
อาจารย์ที่ปรึกษาฯ ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทาง
วิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต



.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

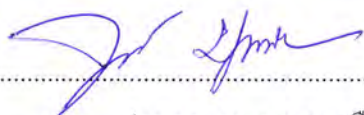
(ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ)

คณะกรรมการสอบโครงการ



.....ประธานกรรมการ

(ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ)



.....กรรมการ

(ดร.นพคุณ บุญกระพือ)



.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์)

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในของทรายกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้นำมาจาก 2 พื้นที่ คือ จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดอ่างทอง จากการทดสอบหาขนาดคละของทรายทั้งแหล่งดังกล่าวมานั้นพบว่าขนาดคละมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นโครงการนี้จึงได้มีการสร้างตัวอย่างทรายที่มีความแตกต่างในเรื่องขนาดคละอย่างชัดเจนจากทรายทั้ง 2 พื้นที่ขึ้นมาอีกพื้นที่ละ 2 ตัวอย่างรวมทั้งหมดเป็น 6 ตัวอย่าง การทดสอบเพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในของทรายทุกตัวอย่าง จะทำโดยใช้การเฉือนตรง (Direct shear tests) ส่วนที่ยากที่สุดของโครงการนี้คือการวัดค่าความเค้นประสิทธิผลด้านข้างของทรายตัวอย่าง ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อวัดค่าดังกล่าวขึ้นมาเป็นพิเศษ จากผลการสอบเทียบพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวัดค่าความเค้นด้านข้างได้อย่างแม่นยำและมีความเป็นเส้นตรงดีมาก จากผลการทดสอบพบว่าค่ามุมเสียดทานภายในของทรายสามารถใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่งได้อย่างแม่นยำ

Abstract

This project aim to studies the correlation between internal friction angles, to represent the physical properties of granular material, with the coefficient of lateral stress at rest. The sand samples were corrected in two areas of Nakhon Ratchasima and Ang Thong provinces. According to the results of grain size distribution curve, the both natural sand sample have a little difference. Therefore, the artificial sand samples were made for another four samples which have the significant different on grain size distribution. In laboratory, the determination of internal friction angles were performed by direct shear tests. The difficult task of this project is how to measure the effective lateral stress that was used to calculate to coefficient of lateral stress at rest. Therefore, a specific tool was designed and manufactured of serve this requirement. A specific tool was evaluated specific calibration process that the result show very impressiveness on the linearity and accuracy. According to the test results, the internal friction is a result of coefficient of lateral stress at rest.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดิน	5
2.2.1 สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Passive (Coefficient of Passive Earth Pressure, K_p)	6
2.2.2 สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Active (Coefficient of Active Earth Pressure, K_a)	6
2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0)	7
2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินในสภาวะอยู่นิ่ง (K_0)	7
2.4 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer)	11
2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)	12
2.6 วงจรวัดสโตนบริดจ์	13
2.6.1 บริดจ์แบบสมดุล (Balance Bridge)	14
2.6.2 บริดจ์แบบไม่สมดุล (Unbalance Bridge)	15
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	18

3.1 บทนำ.....	18
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	19
3.3 วิธีการทดสอบ	19
3.3.1 Sieve Analysis	19
3.2.2 Direct shear Test.....	20
3.2.2 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างโดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ.....	20
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล.....	22
4.1 บทนำ.....	22
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทราย	22
4.3 การทดสอบการ Sieve Analysis	23
4.4 ผลการทดสอบ Sieve Analysis ของทรายธรรมชาติ.....	25
4.5 การสร้างตัวอย่างทราย	26
4.6 การทดสอบการเฉือนตรง Direct shear Test.....	30
4.6.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ Proving ring.....	30
4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบการเฉือนตรง Direct Shear Test.....	31
4.7 ผลการทดสอบการทดสอบการเฉือนตรง Direct shear Test.....	34
4.5 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างที่ออกแบบเป็นพิเศษ.....	38
4.5.1 การประกอบอุปกรณ์.....	38
4.5.2 ขั้นตอนการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแรงดันลม.....	40
4.6 ทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทราย.....	42
4.6.1 สอบเทียบมาตรวัดแบบวงแหวน (Proving ring)	42
4.6.2 การทดสอบวัดแรงดันด้านข้าง.....	43

4.7 ผลการทดสอบการหาค่าแรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ.....	44
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลโครงการ	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนการสร้าง Mix A	26
ตารางที่ 4.2 สัดส่วนการสร้าง Mix B	26
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนการสร้าง Mix D	28
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนการสร้าง Mix E	28
ตารางที่ 4.5 สรุปค่าผลการร่อนผ่านตะแกรง.....	29
ตารางที่ 4.6 ค่า D ₆₀ C _u C _c และ ค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทาน	38
ตารางที่ 4.7 สรุปค่า K _o กับ $\emptyset$	48

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1(ก) แสดงความดันดินที่สภาวะ Passive (ข)แสดงความดันดินที่สภาวะ Active	5
รูปที่ 2.2 แสดงวงกลมมอร์ของความดันดินที่สภาวะ Passive	6
รูปที่ 2.3แสดงวงกลมมอร์ของความดันดินที่สภาวะ Active	7
รูปที่ 2.4 (ก) อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ Ko-Consolidation ด้วยเครื่อง triaxial tests, (ข) แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ Ko-Consolidation ด้วยเครื่อง triaxial tests (D. Y. Baxter).....	8
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Over-consolidation Ratio, OCR) (T. H. Seah และ K. C. Lai, 2003).....	9
รูปที่ 2.6 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ (Vardhanabhuti, 2006)	11
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)	12
รูปที่ 2.8 วงจรบริดจ์	13
รูปที่ 2.9 บริดจ์แบบสมดุล	14
รูปที่ 2.10 บริดจ์แบบไม่สมดุล	15
รูปที่ 2.11 วงจรบริดจ์ใหม่ที่เกิดจากการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	16
รูปที่ 2.12 แสดงการนำค่าEThและRThมาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินิน	16
รูปที่ 2.13 วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge strain gauge circuit)	17
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (Flow Chart)	18
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ Sieve Analysis	19
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบ Direct Shear Test	20

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง	21
รูปที่ 4.1 ล้างทราย	24
รูปที่ 4.2 อบทราย	24
รูปที่ 4.3 ร่อนทรายผ่านตะแกรง.....	24
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเปิดของตะแกรง กับ เปอร์เซ็นต์ Passing	25
รูปที่ 4.5 ขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดนครราชสีมา	26
รูปที่ 4.6 ขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดนครราชสีมา Mix A และ Mix B	27
รูปที่ 4.7 ขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดอ่างทอง	28
รูปที่ 4.8 ขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดอ่างทอง Mix D และ Mix E	29
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่กระทำกับระยะยุบ Proving ring	30
รูปที่ 4.8 ประกอบ Shear Box	31
รูปที่ 4.9 เททราย	32
รูปที่ 4.10 ปาดหน้าทราย	32
รูปที่ 4.11 วางแผ่นเหล็กเตรียมถ่ายโหลด	32
รูปที่ 4.12 ถ่ายโหลด	33
รูปที่ 4.13 เช็ความเรียบร้อย	33
รูปที่ 4.14 ทำการเลื่อนตรง	33
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	34
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	35
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	35
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress กับ Peak Shear stress	36
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	36

รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	37
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress	37
รูปที่ 4.22 ทำความสะอาดท่อ PVC	39
รูปที่ 4.23 เจาะรูเพื่อใส่ท่อแรงดันลม และติดตั้งสเตรนเกจ	39
รูปที่ 4.24 ผังอุปกรณ์ที่ใช้และการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อการสอบเทียบ	40
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมกับค่าแรงดันไฟฟ้า	41
รูปที่ 4.26 ตัดท่อ เพื่อเตรียมทดสอบ	41
รูปที่ 4.27 การสอบเทียบ Proving ring ด้วยสปริงมาตรฐาน	42
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบของ Proving ring กับ น้ำหนัก	43
รูปที่ 4.30 กรอกทรายลงในกระบอกทดสอบ	44
รูปที่ 4.31 ทดสอบวัดแรงดันด้านข้าง	44
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress	45
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress	46
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress	46
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress.....	47
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress	47
รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทาน friction angle (ϕ) กับ ค่า สัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0)	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานจำนวนมาก เช่น รถไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ระบายน้ำที่ใช้ในการระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วม การก่อสร้างกำแพงกันดินแบบชั่วคราวและถาวร และเสาเข็ม ฯลฯ ซึ่งโครงการเหล่านี้ต้องใช้เทคนิคทางวิศวกรรมขั้นสูง มีผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เป็นอย่างมากเมื่อเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างพื้นฐานเหล่านั้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ชั้นดินเป็นทราย โครงสร้างใต้ดินเหล่านี้ลั่นแล้วแต่มีความอ่อนไหวมากและค่าแรงดันด้านข้างของทรายเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างใต้ดินให้มีความปลอดภัยและประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง ซึ่งค่าดังกล่าวจะแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$k_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (1.1)$$

โดยที่

σ'_h คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวนอน (Horizontal Effective Stress)

σ'_v คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)

ซึ่งความท้าทายในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทรายให้ถูกต้องที่สุดคือการหาค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวนอน เนื่องจากค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งนั้นสามารถอ่านได้ง่ายผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่ามาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving ring) หรือ โหลดเซลล์ (Load Cell) ในกรณีที่อ่านด้วยไฟฟ้า

โดยส่วนใหญ่แล้วการหาค่าประสิทธิผลแรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทรายที่ทำในห้องปฏิบัติการนั้นจะต้องจำลองเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นจริงในสนามให้มากที่สุดคือ การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) จะเกิดขึ้นเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น (one-dimensional consolidation) โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนด้วยวิธี k_0 - Consolidated Triaxial Test ซึ่งค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวนอนที่จะนำมาใช้นั้นคือ ค่าแรงดันน้ำด้านข้างที่กระทำกับตัวอย่างทรายในแนวนอน (Cell pressure or Lateral confining pressure) ในขณะที่การอัดตัวคายน้ำนั้นสิ้นสุดลงแล้ว (Primary consolidation)

โดยระหว่างกระบวนการอัดตัวคาน้ำ ผู้ทดสอบจะต้องทำการปรับค่าแรงดันน้ำด้านข้างให้สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันในแนวดิ่งภายใต้เงื่อนไขการทดสอบในหนึ่งมิติคือ

$$\frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_{vol}} = 1 \quad (1.2)$$

โดยที่

$\Delta \varepsilon_v$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่ง (Vertical strain)

$\Delta \varepsilon_{vol}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain)

จากเหตุผลที่กล่าวมา ทำให้การทดสอบนี้ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นการลดความยุ่งยากและเวลาที่จะต้องใช้ในการทดสอบ ดังนั้นการศึกษานี้จึงรวบรวมและพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ๆ ทางด้านเทคนิคและวิศวกรรมเพื่อพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของทราย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความสัมพันธ์แรงดันด้านข้างของทรายในสถานะอยู่นิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest, k_0) ในทรายที่มีแหล่งที่มาและความละเอียดแตกต่างกัน
2. ศึกษาความสัมพันธ์แรงเสียดทานภายในโดยใช้วิธี Direct Shear Test ของทรายที่มีแหล่งที่มาและความละเอียดแตกต่างกัน
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสัมพันธ์แรงดันด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งของทราย (k_0) ของทรายที่มีขนาดละเอียดต่างกันกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) จากการทดสอบ Direct Shear Test

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทรายนํานํามาทดสอบ นํามาจาก จ.นครราชสีมา และ ทรายจาก จ.อ่างทอง โดยแบ่งเป็นตัวอย่างขนาดคณะกรรมการ 2 ตัวอย่าง และขนาดคณะกรรมการสร้างขึ้นมาใหม่ 4 ตัวอย่าง
2. การวัดแรงดันดินด้านข้างจะวัดโดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4
3. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) จะศึกษาโดยใช้วิธีการทดสอบ Direct Shear Test
4. ศึกษาเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทรายที่อยู่ในสภาวะอยู่หนึ่งเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ

ในการออกแบบงานโครงสร้างใต้ดินค่าแรงดันด้านข้างของดินเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างใต้ดินให้มีความปลอดภัย ซึ่งค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่หนึ่งของดิน (K_0) นิยมใช้สมการของ Jaky (1948) ซึ่งให้ค่า $K_0 = 1 - \sin\phi$ ซึ่งเป็นสมการที่อ้างอิงผลการทดลองโดยใช้ทรายในต่างประเทศ ดังนั้น ในโครงการนี้จะเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) ของทรายที่นำมาจากแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ในงานก่อสร้าง การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน ในการศึกษาเลือกที่จะใช้วิธี Direct Shear Tests เนื่องจากมีความสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ หลังจากได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในก็จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่หนึ่งของทรายที่มีแหล่งกำเนิดภายในประเทศอันน่าจะมีลักษณะทางกายภาพเช่น ความกลม หยาบ ความแบนเรียบ หรือ ความยาว ของเม็ดเกรนที่ใกล้เคียงกับแหล่งอื่นๆในประเทศมากกว่าทรายจากต่างประเทศ

1.5 แผนการดำเนินงาน

การทำงานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการค้นคว้าหาข้อมูลจากบทความของวารสารต่างๆในห้องสมุดและจากสื่อสิ่งพิมพ์ออนไลน์ทางอินเทอร์เน็ตเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่สภาวะอยู่หนึ่ง การออกแบบโพลเดอร์และออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำและการประยุกต์ใช้ซึ่งจะนำทฤษฎีและข้อปฏิบัติต่างๆมาเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าวิเคราะห์และออกแบบจากนั้นจึงจะตัดสินใจเลือกชิ้นส่วนวัสดุและโปรแกรมที่ใช้เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลงานการศึกษา

บทที่ 2

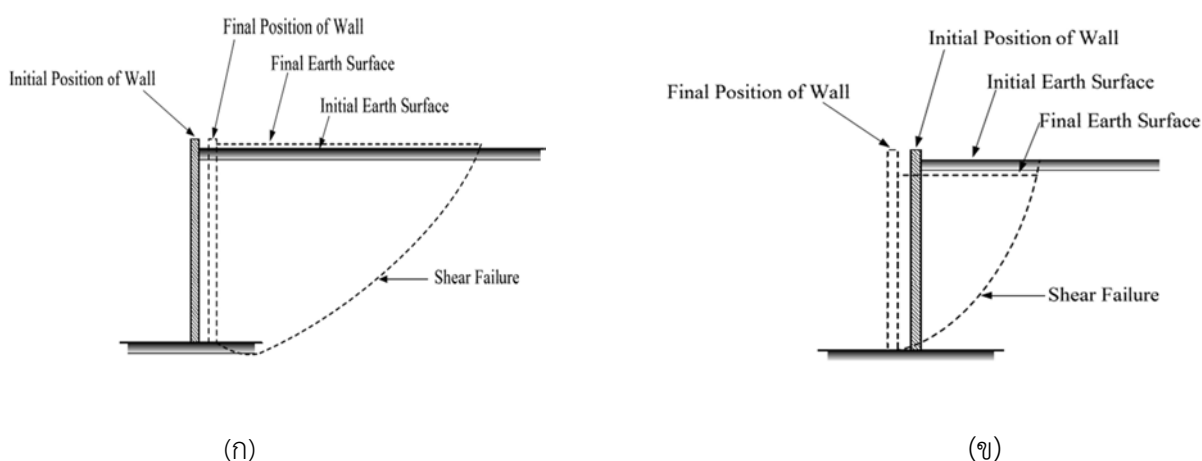
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของทรายเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างใต้ดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกำแพงกันดินและโครงสร้างกันดินต่างๆ รวมถึงเสาเข็มด้วย ขนาดของแรงดันด้านข้างที่ถูกต้องนั้นจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบกำแพงกันดินหรือโครงสร้างกันดินต่างๆ ให้มีความปลอดภัยและประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นโครงการนี้จะเป็นการพัฒนานวัตกรรมในด้านเทคนิคและวิธีการทางวิศวกรรม ในการหาค่าแรงดันด้านข้างของทรายจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทรายก่อนซึ่งสามารถหาได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ

2.2 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดิน

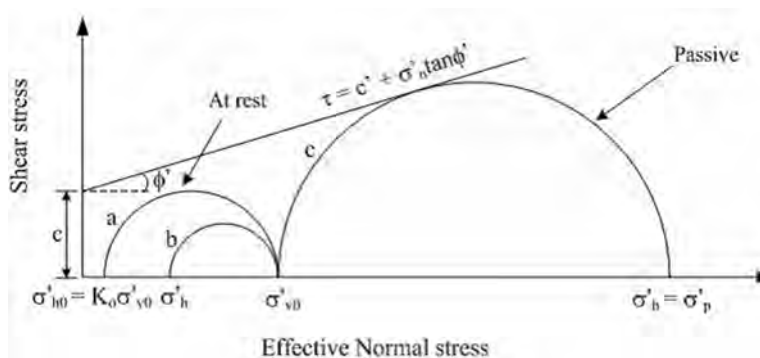
สัมประสิทธิ์ของแรงดันด้านข้างของดินเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการออกแบบกำแพงกันดินและโครงสร้างกันดินต่างๆ ขนาดและทิศทางของแรงดันด้านข้างเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบกำแพงกันดินหรือโครงสร้างกันดินต่างๆ ให้มีอัตราส่วนปลอดภัยมากเพียงพอของสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินมี 3 ประเภทดังนี้



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงความดันดินที่สภาวะ Passive (ข) แสดงความดันดินที่สภาวะ Active

2.2.1 สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Passive (Coefficient of Passive Earth Pressure, K_p)

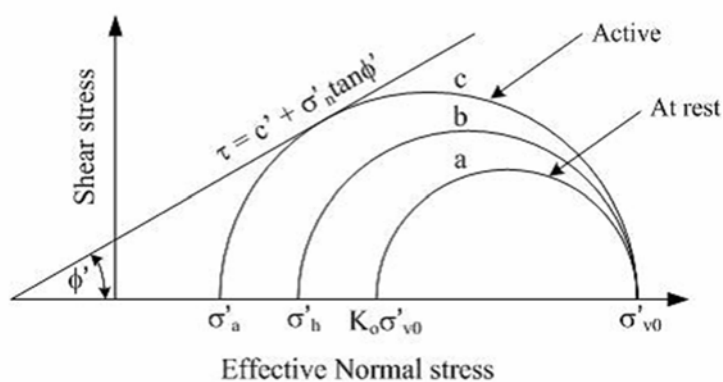
ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Passive (Coefficient of Passive Earth Pressure, K_p) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในสภาวะที่กำแพงกันดินจะเคลื่อนที่เข้าหามวลดินมวลดินจะเกิดการอัดตัว และมีค่าความดันในแนวนอนเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะพลาสติก (Plastic state) ที่สภาวะนี้ ความดันดินด้านข้างประสิทธิผลจะมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ความดันในแนวดิ่งจะมีค่าประมาณคงที่ ทำให้วงกลมมอร์มีขนาดเล็กลงก่อนที่จะขยายเพิ่มขึ้นและเรื่อยๆตามการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและสัมผัสเส้นขอบเขตความแข็งแรง (Failure envelope) โดยค่าความดันนี้ถูกนิยามว่าเป็นความดันประสิทธิผลที่สภาวะ Passive



รูปที่ 2.2 แสดงวงกลมมอร์ของความดันดินที่สภาวะ Passive

2.2.2 สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Active (Coefficient of Active Earth Pressure, K_a)

ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ Active (Coefficient of Active Earth Pressure, K_a) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในสภาวะที่กำแพงกันดินเกิดการเคลื่อนตัวออกจากมวลดินทำให้ความเค้นประสิทธิผลในแนวนอนมีค่าน้อยลงขณะที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งมีค่าประมาณคงที่ทำให้วงกลมมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆตามการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและสัมผัสเส้นขอบเขตความแข็งแรง (Failure envelope) โดยค่าความดันนี้ถูกนิยามว่าเป็นความดันประสิทธิผลที่สภาวะ Active



รูปที่ 2.3 แสดงวงกลมมอร์ของ ความดันดินที่สถานะ Active

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่ง (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0)

ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันทรายที่สถานะอยู่นิ่ง (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0) คือ อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Effective Horizontal Stress) ต่อหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress) ในมวลดินซึ่งอยู่ในสถานะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง โดยระนาบหลักของหน่วยแรง (Principal Planes) อยู่ในระนาบราบและระนาบตั้ง โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่ง จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ ยกเว้นในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งอาจมีค่าสูงถึงประมาณ 3.0 กรณีสำหรับทรายค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 สำหรับทรายแน่น และ 0.5 สำหรับทรายหลวม

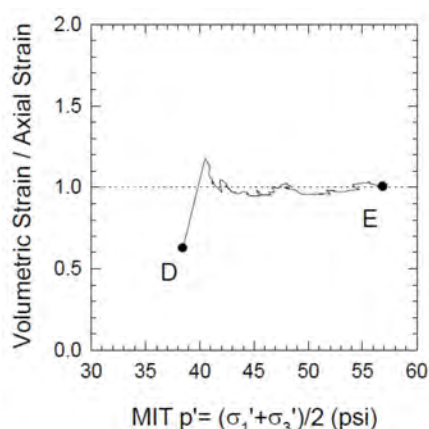
2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินในสถานะอยู่นิ่ง (K_0)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันที่สถานะอยู่นิ่งของดินนั้นสามารถหาค่าได้ทั้งจากการทดสอบในสนาม (In-situ tests) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น โดยทั่วไปจะสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากการทำ K_0 Consolidated Triaxial Test ในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial tests) ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก เพราะจะต้องปรับความดันที่บริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Cell pressure or Confining pressure) เพื่อไม่ให้เกิดความเครียดด้านข้าง (Lateral strain = 0) ในขณะที่เนื้อตัวอย่างด้วยอัตราคงที่แบบระบายน้ำ ดังนั้นความเครียดในแนวตั้ง

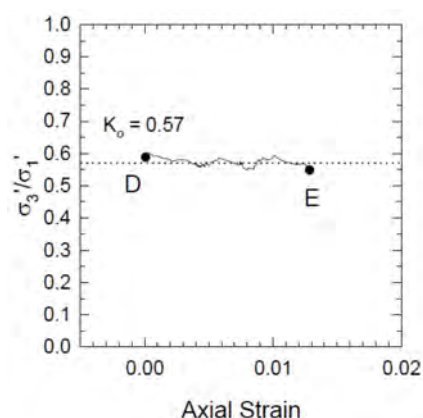
จะมีค่าเท่ากับความเครียดเชิงปริมาตร (Vertical strain = Volume strain) โดยระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (consolidation)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันที่สภาวะอยู่นิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติข้างต้นได้มีผู้ทดสอบโดยอ้างอิงจากหลักการข้างต้นดังนี้

D. Y. Baxter, 2000 ได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial tests) ด้วยวิธี K_0 Consolidated Undrained Triaxial Test โดยในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (K_0 -Consolidation) ระหว่างจุด D ถึงจุด E ในรูปที่ 2.4ก พบว่าการปรับแรงดันด้านข้าง (Cell pressure or Confining pressure) เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain เท่ากับ 1 นั้นเป็นไปได้ยากมากโดยเฉพาะในช่วงต้นๆ ($38 < P' < 41$ psi) และในช่วงที่ $P' > 41$ psi จะพบว่าอัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain นั้นใกล้เคียง 1 ซึ่งทั้งหมดนี้จะส่งผลถึงความแม่นยำในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินดังแสดงในรูปที่ 2.4ข อีกทั้งการทดสอบนี้จะต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากในการทดสอบ



(ก)

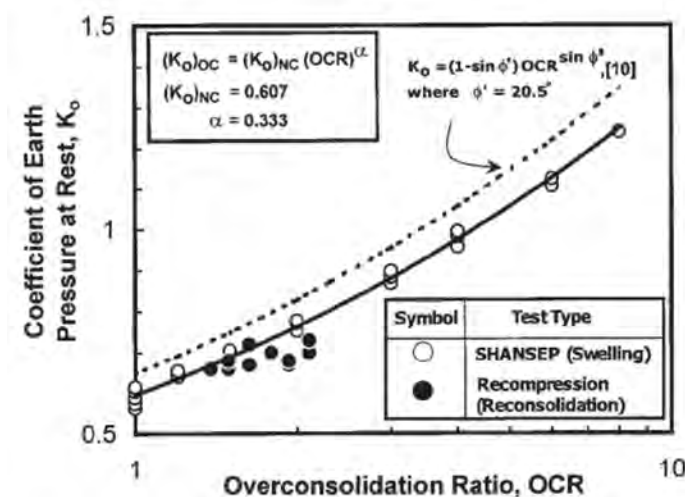


(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ K_0 -Consolidation ด้วยเครื่อง triaxial tests, (ข) แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ K_0 -Consolidation ด้วยเครื่อง triaxial tests (D. Y. Baxter)

T. H. Seah และ K. C. Lai, 2003 ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพแบบคงสภาพ (Undisturbed samples) ที่ความลึกไม่เกิน 8 เมตรในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial tests) ด้วยวิธี K_0 -Consolidated Undrained Triaxial Test และได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Over-

consolidation Ratio, OCR) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินอยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.607 จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งพบว่า



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Over-consolidation Ratio, OCR) (T. H. Seah และ K. C. Lai, 2003)

รูปแบบสมการที่นำเสนอโดย Mayne and Kulhawy, 1982 (สมการที่ 2.8) มีความเหมาะสมในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯทั้งในสภาวะอัดตัวมากกว่าปกติ (Over-consolidated clay) และในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) โดยใช้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') เท่ากับ 20.5°

$$K_o = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (2.1)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) ก็จำเป็นต้องทราบค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') ซึ่งจะต้องใช้ผลการทดสอบจาก Undrained triaxial compression test และต้องใช้ค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Over-consolidation Ratio, OCR) สำหรับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Over-consolidated clay) ซึ่ง

จะต้องใช้ผลการทดสอบ K_o -Consolidation จากเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Test) หรือผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง Oedometer test

จากสมการที่ 2.8 เมื่อดินอยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) ซึ่งจะต้องใช้ค่า $OCR = 1$ และใช้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') เท่ากับ 20.5° ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) ก็จะเป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 0.607 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) นั้นไม่คงที่โดยมีช่วงประมาณ 0.55 ถึง 0.65 (รูปที่ 2.5 จุดที่ค่า $OCR=1$)

ค่าของค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติสามารถประมาณได้โดยใช้สมการต่างๆดังนี้

(1) สมการของ Jaky (1944)

$$K_o = (1 - \sin \phi') \quad (2.2)$$

(2) สมการของ Brooker and Ireland (1965)

$$K_{ONC} = 0.4 + 0.007 (PI) \quad (2.3)$$

โดย PI คือ ดัชนีสภาพพลาสติก

$$K_{ONC} = 0.95 - \sin \phi' \quad (2.4)$$

(3) สมการของ Bolton (1991)

$$K_{ONC} = \frac{1 - \sin(\phi' - 11.5^\circ)}{1 + \sin(\phi' - 11.5^\circ)} \quad (2.5)$$

สำหรับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ

(1) สมการของ Wroth (1965)

$$K_o = OCR K_{ONC} - \frac{\mu}{1 - \mu} (OCR - 1) \quad (2.6)$$

(2) สมการของ Brooker and Ireland (1965)

$$K_{OOC} = K_{ONC}^{\sqrt{OCR}} \quad (2.7)$$

(3)สมการของ Schmidt (1966)

$$K_{ooc} = K_{oNC} \times OCR^\alpha \quad (2.8)$$

โดย $\alpha = \sin(1.2 \times \phi')$

Meyerhof (1976) เสนอให้ใช้ค่า $\alpha = 0.5$

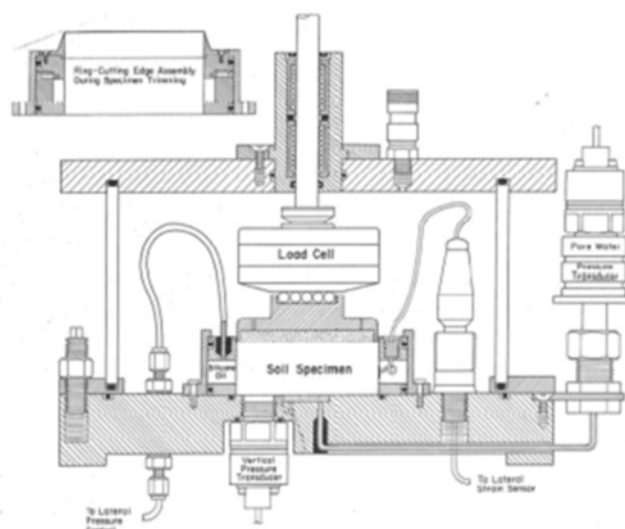
MayneและKulhawy (1982) เสนอให้ใช้ค่า $\alpha = \sin(\phi')$

(4)สมการของ Mayne and Kulhawy (1982)

$$K_o = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (2.1)$$

2.4 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer)

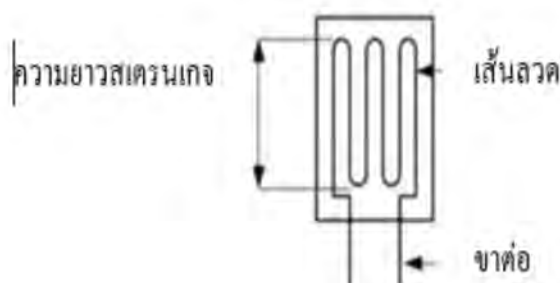
Vardhanabhuti, 2006 ศึกษาและออกแบบเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน (Coefficient of Sand Pressure at Rest, K_o) เครื่องมือ Oedometer พิเศษซึ่งมีวงแหวนภายในทำจาก Highly Polished Stainless Steel และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (Hayat 1992, Mesri and Hayat 1993, Vardhanabhuti 2006) เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและความสูงของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 76.2 mm และ 25.4 mm ตามลำดับ บริเวณกึ่งกลางของวงแหวนเป็น Diaphragm ที่มีความหนา 0.254 mm และติดตั้ง Strain Gages เพื่อตรวจสอบการยืดหดตัว (Lateral Deformation) ของ Diaphragm ซึ่งถูกควบคุมโดยแรงดันจาก Silicone Oil Chamber ที่ประกบติดกับวงแหวนภายในดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ (Vardhanabhuti, 2006)

2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)

อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดเป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์แบบพาสซีฟซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานกลศาสตร์เรียกว่าความเครียดกระทำบนตัวอุปกรณ์ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.7 อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดนับเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในเรื่องของการชั่งน้ำหนักการวัดความดันหรือการวัดความเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆโดยที่อุปกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)

จากรูปตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดประกอบด้วยส่วนของลวดตัวนำซึ่งถูกตัดไปตัดมาวางตัวอยู่บนแผ่นรองรับที่ปลายแต่ละข้างจะมีจุดเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้าโดยทั่วไปจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนส่วนประกอบหรือส่วนของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำ เช่น ตอม่อสะพานหรือส่วนโครงสร้างทางโยธาต่างๆแรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะส่งผลต่ออุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดซึ่งอาจจะดึงให้ตัวนำมีความยาวมากขึ้นในขณะที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำลดลงซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งนี้พิสูจน์ได้โดยสมการ

$$R = \rho L / A \quad (2.9)$$

โดยที่ R เป็นค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม

ρ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดมีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร

L เป็นความยาวของขดลวดตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีหน่วยเป็นตารางเมตร

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของลวดตัวนำเมื่อได้รับแรงกระทำแล้วจะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นสองประการคือความยาวของลวดตัวนำเปลี่ยนไปจากเดิมและความต้านทานของลวดตัวนำก็เปลี่ยนไปจากเดิมเพราะฉะนั้นถ้านำค่าทั้งสองชนิดนี้ไปทำการเทียบสัดส่วนกันก็จะได้ค่าตัวประกอบชนิดหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่าค่าตัวประกอบเกจหรือ Gage factor ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K = (\Delta R / R) / (\Delta L / L) \quad (2.10)$$

โดยที่ K เป็นค่าตัวประกอบเกจ

ΔR เป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

R เป็นค่าความต้านทานของลวดตัวนำเริ่มแรกก่อนถูกแรงกระทำ

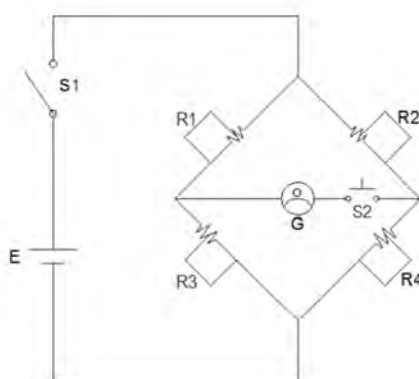
ΔL เป็นค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

L เป็นค่าความยาวของลวดตัวนำก่อนถูกแรงกระทำ

2.6 วงจรวัดสโตนบริดจ์

วงจรวัดสโตนบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ภายในของเครื่องวัดชนิดนี้ประกอบด้วย

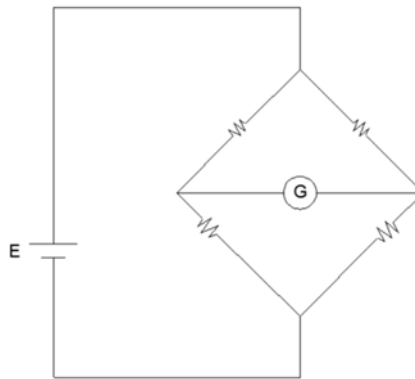
- 1) ตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน 2 สาขาแต่ละสาขาประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน
- 2) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (E) ต่อขนานกับตัวต้านทานของวงจรทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวต้านทานในวงจร
- 3) กัลวานอมิเตอร์ (G) ซึ่งต่อกับขั้วสายที่ขนานกันทำหน้าที่ตรวจจับ (detect) กระแสไฟฟ้าเพื่อบ่งบอกสภาพของวงจรในกรณีที่วงจรบริดจ์สมดุลเข็มจะชี้ที่ศูนย์แต่ถ้าไม่สมดุลเข็มจะเบี่ยงเบน



รูปที่ 2.8 วงจรบริดจ์

2.6.1 บริดจ์แบบสมดุล (Balance Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องวัดชี้ที่เลข 0 ถ้าต้องการทราบค่าความต้านทาน R_4 จะต้องสับสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 แล้วปรับอัตราส่วนของความต้านทาน R_2/R_1 (Ratio adjust) และความต้านทาน R_3 จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรถูกัลวานอมิเตอร์มีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล



รูปที่ 2.9 บริดจ์แบบสมดุล

จากสภาพสมดุลของวงจรบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ทำให้ทราบว่าแรงดันไฟตกคร่อม R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันตามสมการดังนี้

$$I_3 R_3 = I_4 R_4 \quad (2.11)$$

นอกจากนี้แรงดันไฟที่ตกคร่อม R_1 และ R_2 ยังมีค่าเท่ากันด้วย

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2.12)$$

ขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (G) แสดงว่า

$$I_1 = I_3 \text{ และ } I_2 = I_4$$

แทนค่า I_3 ด้วย I_1 และ I_4 ด้วย I_2 ในสมการ 2.11 จะได้

$$I_1 R_3 = I_2 R_4 \quad (2.13)$$

นำสมการ 2.12 ทหารด้วยสมการ 2.13 จะได้

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2.14)$$

2.6.2 บริดจ์แบบไม่สมดุล (Unbalance Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาพไม่สมดุลดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องเบี่ยงเบนได้การเบี่ยงเบนของเข็มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความไวของกัลวานอมิเตอร์กล่าวคือถ้ามีกัลวานอมิเตอร์ 2 เครื่องและแต่ละเครื่องมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากันเข็มของกัลวานอมิเตอร์ที่มีความไวสูงกว่าจะเบี่ยงเบนมากกว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์อีกเครื่องหนึ่งการหาความไวของกัลวานอมิเตอร์ทำได้ 2 แบบคือหาค่าในรูประยะการเบี่ยงเบนของเข็มต่อจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหรือมุมการเบี่ยงเบนของเข็มต่อจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{mm}{\mu A} \text{ หรือ } S = \frac{rad}{\mu A} \text{ หรือ } S = \frac{deg}{\mu A} \quad (2.15)$$

ระยะการเบี่ยงเบนของเข็มหาได้จาก

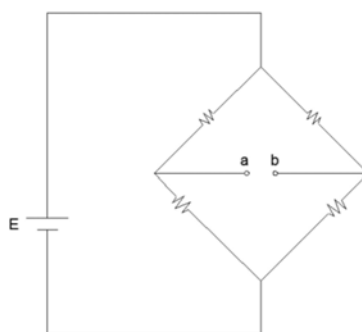
$$D = S \times Ig \quad (2.16)$$

เมื่อ D = ระยะการเบี่ยงเบนของเข็ม (มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

S = ความไวของกัลวานอมิเตอร์ (มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร/ μA)

Ig = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (มีหน่วยเป็น/ μA)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (Ig) ที่แสดงภาพไม่สมดุลของวงจรหาได้โดยการนำทฤษฎีเทวินินมารวมวิเคราะห์ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.10 บริดจ์แบบไม่สมดุล

ปลดกัลวานอมิเตอร์ออกจากวงจรแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงเทวินินคือผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว a และ b ดังนั้นเมื่อนำสมการแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) มาร่วมพิจารณาจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุด a มีค่าเป็นดังนี้

$$Ea = (R_3 R_1 + R_3) \quad (2.17)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่จุด b มีค่าเป็น

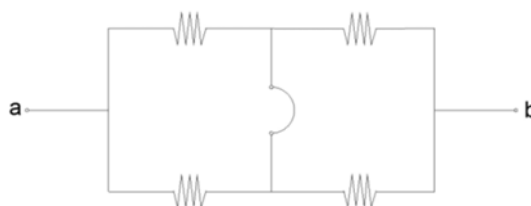
$$Eb = (R_4 R_2 + R_4) \quad (2.18)$$

ผลต่างของแรงดันไฟฟ้า Ea และ Eb คือแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงเทวินิน (E_{Th})

$$E_{Th} = Ea - Eb$$

$$E_{Th} = (R_3 R_1 + R_3) - (R_4 R_2 + R_4) \quad (2.19)$$

$$E_{Th} = (R_3 R_1 + R_3 - R_4 R_2 + R_4) \quad (2.20)$$

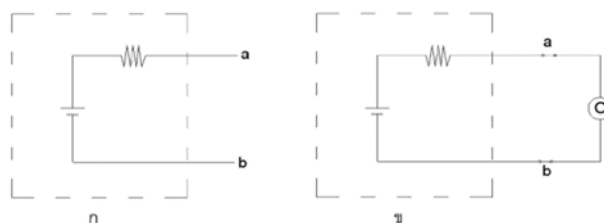


รูปที่ 2.11 วงจรบริดจ์ใหม่ที่เกิดจากการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ความต้านทานเทียบเคียงเทวินิน (R_{Th}) หาได้โดยลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (E) จะได้วงจรบริดจ์ใหม่ดังรูปที่ 2.11 จากรูปที่ 2.11 จะได้สมการความต้านทานเทียบเคียงเทวินินที่เกิดจาก

$$E_{Th} = R_1 R_3 R_1 + R_3 + R_2 R_4 R_2 + R_4 \quad (2.21)$$

นำค่า E_{Th} และ R_{Th} มาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินินได้ดังรูปที่ 2.11

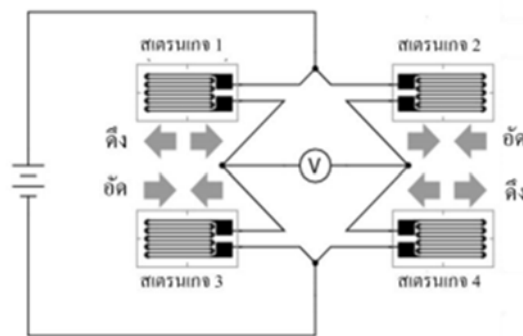


รูปที่ 2.12 แสดงการนำค่า E_{Th} และ R_{Th} มาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินิน

ถ้าต่อกัลวานอมิเตอร์เข้าที่ขั้ว a และ b กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มเบี่ยงเบนมีค่าเป็น

$$IR = EThRTh + RR \quad (2.22)$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของกัลป์วานอมิเตอร์



รูปที่ 2.13 วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge strain gauge circuit)

ในการออกแบบนั้นเราต้องการผลลัพธ์เป็นความต่างศักย์ที่มากที่สุดเราจึงต้องออกแบบให้ วงจรบริดจ์นั้นมีค่าความต่างศักย์ที่ออกมา (V_{out}) มากที่สุดค่า $R(1,2,3,4)$ จะเปลี่ยนแปลงตามการ ยืดหรือหดตัวของ Strain gauge ดังนั้นจึงต้องทราบถึงบริเวณที่ติดตั้ง Strain gauge ว่ามีการเสียรูป ในรูปแบบใดเพื่อที่จะได้ความต่างศักย์ออกมาสูงที่สุดคือ R_2 และ R_3 จะรับแรงอัดหรือแรงดึงแต่ R_1 and R_4 ต้องรับแรงที่ตรงกันข้ามกับ R_2 และ R_3 ตามสมการที่ 2.23

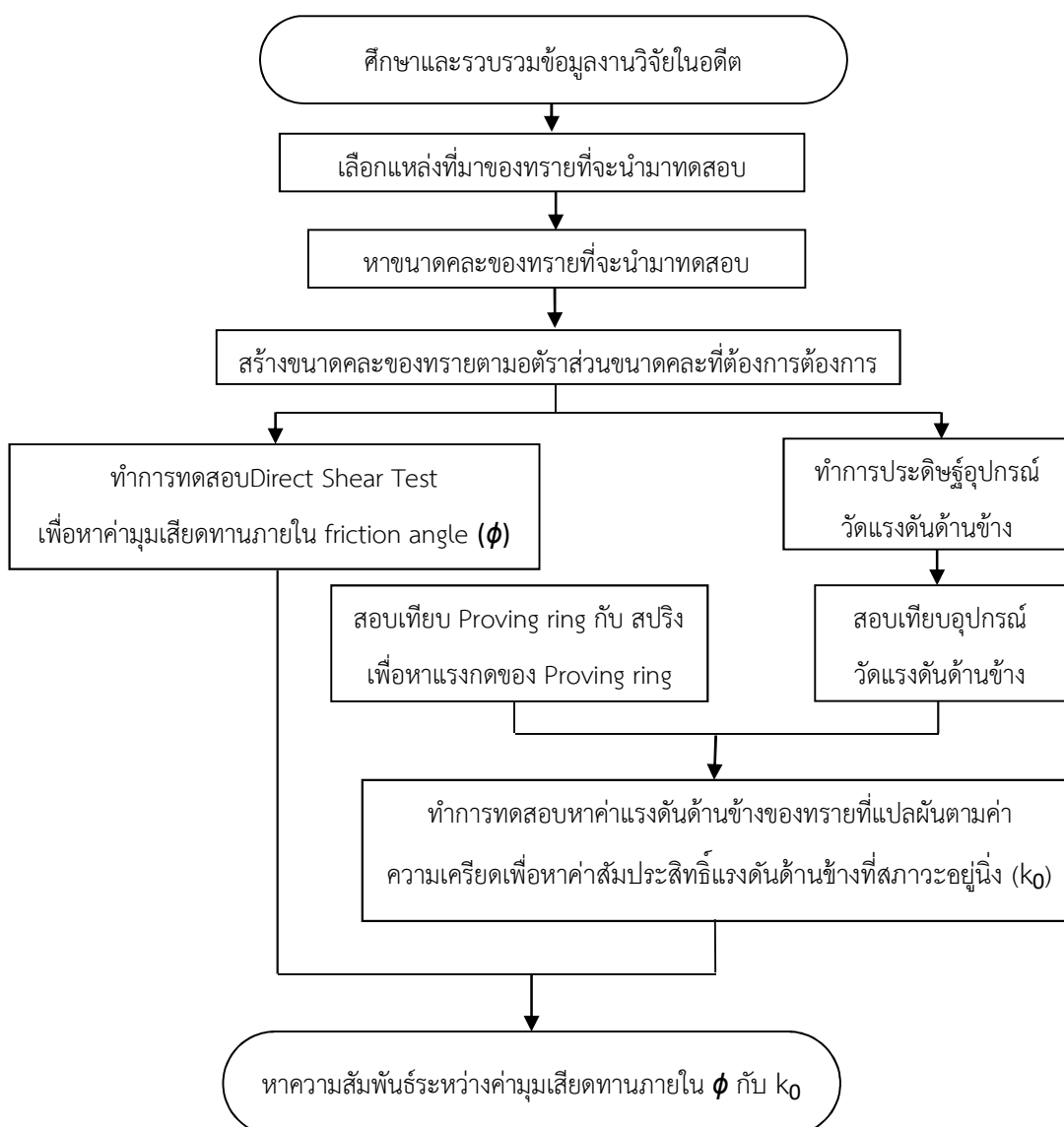
$$V_{out} = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_{in} \quad (2.23)$$

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 บทนำ

ในส่วนของบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาในทุกกระบวนการการทดสอบตัวอย่างเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง ซึ่งมีกระบวนการศึกษาและกระบวนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (Flow Chart)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดิน (Lateral Earth Pressure Transducer) เพื่อนำมาศึกษาและทดสอบมีอุปกรณ์และเครื่องมือดังนี้

- เครื่องทดสอบ Direct Shear Test
- สเตรนเกจ (Strain Gauge)
- เครื่องขยายสัญญาณแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)
- เครื่องแปลงสัญญาณ Multifunction Data Acquisition (DAQ)
- สปริงมาตรฐาน
- ชุดทดสอบแรงกดแบบ Unconfined compression test

3.3 วิธีการทดสอบ

ในโครงการนี้ต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) ของทรายที่มีขนาดผลึกที่ต่างกันกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) จะต้องการอาศัยการทดสอบดังต่อไปนี้

3.3.1 Sieve Analysis

การหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง จะใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด แตกต่างกันไป สำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 โดยเบอร์ตะแกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือเบอร์ 4, 100 และ 200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่ด้านบนและไล่ตามลำดับลงมา ดินหรือหินที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ดินที่ใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรงแต่ก็ไม่แน่นเสมอไปเพราะว่าตะแกรงนั้นไม่สามารถแบ่งแยกความแบนความยาวได้ บางครั้งหินหรือดินเม็ดเล็ก แต่มีความยาวกว่าขนาดของตะแกรงก็สามารถค้างอยู่บนตะแกรงนั้นได้ การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธีแต่ที่นิยมปฏิบัติกันแพร่หลายคือวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ Sieve Analysis

3.2.2 Direct shear Test

การทดสอบ Direct shear Test ได้แสดงในรูปที่ 3.2 อุปกรณ์ Direct Shear จะให้แรงกดในแนวตั้ง (Vertical Stress) ที่ส่วนบนของตัวอย่างดิน จากนั้นให้แรงในแนวนอนกับครึ่งหนึ่งของตัวอย่างเพื่อเนียนตัวอย่างออกจากกันตามแนวระนาบวิบัติในแนวนอน ตัวอย่างดินอาจเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมและมี Porous Plate อยู่ส่วนบนและส่วนล่างเพื่อการระบายน้ำ ระหว่างการเนียนจะวัดแรงในแนวนอนและการเคลื่อนตัวทั้งในดิ่งและในแนวนอนของตัวอย่างดิน การทดสอบจะทำอย่างน้อย 3 ตัวอย่างโดยเนียนที่ vertical stress ต่างๆกันเพื่อหาค่า Strength Parameters (Effective cohesion c และ Effective friction angle (ϕ)) โดยที่ขอบเขตของค่า Vertical Stress ที่ใช้ในการทดสอบมักจะเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในสนาม

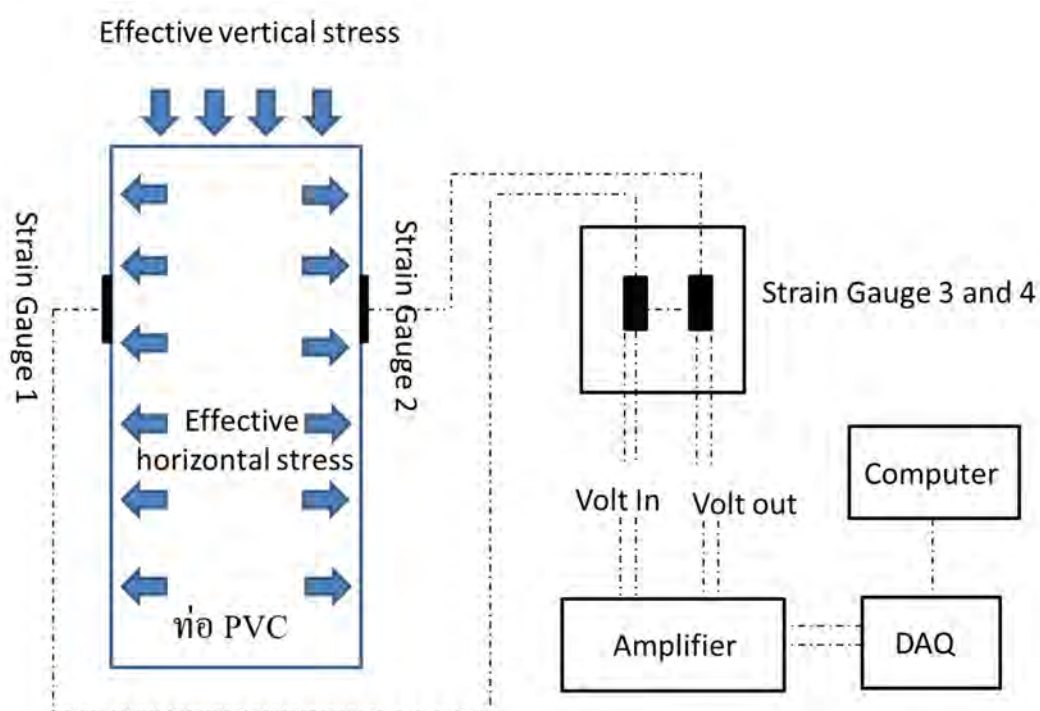


รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบ Direct Shear Test

3.2.2 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างโดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างจะมียอดประกอบสำคัญอยู่ 2 องค์ประกอบหลักคือ ค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) กับค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวราบ (Effective horizontal stress) ซึ่งทั้งสองค่านี้ถ้านำมาเป็นสัดส่วนกันก็จะกลายเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างดังแสดงในสมการที่ 1.1 ในการศึกษานี้การหาค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้งเป็นสิ่งที่ทำได้ง่ายตายโดยการอ่านค่าแรงกดจากมาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving ring) ซึ่งมักจะติดตั้งอยู่ด้านบนของเฟรมทดสอบการหาค่าแรงเนียนนำมาเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง แต่สิ่งที่ท้าทายในโครงการนี้คือการหาค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวราบซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นมาเป็นพิเศษที่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ในที่นี้จะใช้ท่อ PVC ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ที่สามารถรับแรงดันน้ำได้ 0.5 MPa ซึ่งเป็นขนาดท่อที่บางที่สุดในท้องตลาดมาทำเป็นเซลล์ทดสอบ การที่เราจะสามารถวัดแรงดันด้านข้างได้นั้นจะอาศัยหลักการคือ

เมื่อท่อยรับแรงดันในแนวดิ่ง ก็จะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างของท่อ PVC จากนั้นชุดสเตรนเกจที่ติดอยู่ด้านข้างของท่อจะอ่านค่าการขยายตัวโดยแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า (Volt out) ถ้าทำการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านข้างที่ทราบค่ากับแรงดันไฟฟ้า ก็จะสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องแปลงสัญญาณ Multifunction Data Acquisition (DAQ) กลับมาเป็นแรงดันของท่อยที่ขยายออกทางด้านข้างได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความเป็นเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านข้างกับแรงดันไฟฟ้ารวมถึงความไวตัวของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจ นี่จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้โครงการนี้ใช้ความหนาของท่อ PVC บางที่สุดในท้องตลาด การติดตั้งชุดสเตรนเกจจะทำการติดตั้งสเตรนเกจรับแรงดึง (Tensile stress) ในตำแหน่งสเตรนเกจที่ 1 กับ 2 แต่เนื่องจากช่วงเวลาที่ท่อยขยายตัวไม่เกิดความเค้นอัด (Compressive stress) บนตำแหน่งใดๆของท่อ PVC เลย ดังนั้นจึงต้องทำการติดตั้งสเตรนเกจตัวที่ 3 และ 4 บนวัสดุภายนอกที่ไม่มีการยึดหดตัวเพื่อให้สัญญาณที่ได้มีขนาดสูงสุด ซึ่งรูปที่ 3.3 ได้อธิบายหลักการทำงานและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังอธิบายมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนดำเนินการทดลอง แนวคิดของการออกแบบ และการวิเคราะห์ผล โดยหลักการแนวคิดในการออกแบบรูปแบบของอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดิน ซึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปนั้น เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์เพื่อใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ (Strain gauge) และเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดของอุปกรณ์หลังจากได้รับแรงกระทำสูงสุด โดยค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดต้องไม่เกินค่าที่กำหนดของทั้งตัวสเตรนเกจ (Strain gauge) และวัสดุที่นำมาใช้ทำอุปกรณ์

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทราย

ทราย (sand) เป็นหินแข็งที่แตกแยกออกมาจากก้อนหินใหญ่ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เองตามธรรมชาติ ทรายมีขนาดระหว่าง $1/12$ นิ้วถึง $1/400$ นิ้ว ถ้ามีขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทราย จะประกอบด้วยแร่ควอตซ์หรือหินบะซอลต์ ทรายแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ทรายบกและทรายแม่น้ำ

ทรายบกเกิดจากหินทรายที่แตกแยกชำรุดออกมา เป็นเม็ดทรายตามสภาพภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม และจะฝังจมอยู่ในพื้นดินเป็นแห่ง ๆ ทรายชนิดนี้จะมีดิน ซากพืชและซากสัตว์ปะปนอยู่ด้วย ในการใช้งานจึงต้องนำทรายมาล้างแยกดินซากพืชและซากสัตว์ออกให้สะอาด ทรายจากทะเลทรายก็จัดเป็นทรายบกด้วย

ทรายแม่น้ำ ทรายชนิดนี้มีอยู่ทั่วไปในที่ราบลุ่มของแม่น้ำ ทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยกระแสน้ำได้พัดพาทรายจากที่ต่างๆ มาตกตะกอนรวมกันในพื้นที่ที่ราบลุ่มที่เป็นที่รวมของทราย โดยทั่วไปแล้วลักษณะทางกายภาพของทรายจะพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ขนาดของทราย

- 1.1 ทรายหยาบ เป็นทรายที่มีเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยมคม และแข็งแรงดีมาก
- 1.2 ทรายกลาง เป็นทรายที่มีขนาดเล็กกว่าทรายหยาบลงมา
- 1.3 ทรายละเอียด เป็นทรายที่มีขนาดเล็กมาก

2. เนื้อทราย (Texture) ของทรายปกติจะแสดงได้โดยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทรายที่ไม่สามารถผ่านตะแกรงได้ Texture เป็นคุณสมบัติสำคัญของทราย และมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการจับตัวที่แข็งแรง

3. สี (color) สีของทรายหล่อไม่มีความสำคัญยกเว้นจะเป็นตัวชี้บอกรสชาติที่เจือปนอยู่ และประมาณจำนวนได้โดยประมาณ ทรายที่มีสีเหลือง หรือ สีแดง แสดงว่ามีเหล็กผสมอยู่มาก ทรายขาว แสดงว่ามีเหล็กผสมอยู่น้อยมาก

4. ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition) เป็นสิ่งสำคัญใช้พิจารณาว่ามีสารเคมีอะไรเจือปนอยู่บ้างในคอนกรีต โดยวิธีนี้สามารถที่จะหาปริมาณและคุณสมบัติของฟลักซ์ที่จะใช้ได้

5. ส่วนประกอบทางแร่ (Mineralogical composition) ข้อมูลของคุณภาพและปริมาณของแร่ที่ประกอบอยู่ในทราย อาจหาออกมาได้โดยการทดสอบแร่ การศึกษานี้เป็นขั้นแรกของการวิเคราะห์ทางเคมี

6. รูปร่างของเม็ดทราย (shape) เป็นองค์ประกอบสำคัญซึ่งมีผลต่อความพรุนของทราย และการหลอมตัวตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ทรายเหลี่ยมมีการการจับตัวแข็งแรงกว่าทรายมน สำหรับทรายที่ใช้ พลาสติกเป็นตัวประสาน ถ้าพิจารณาถึงในแง่ของการจับตัวกันแล้ว ผิวของทรายจะมีความสำคัญเท่ากับรูปร่างของทรายด้วย ทรายที่มีผิวหยาบจะมีการจับตัวดีกว่าทรายผิวเรียบ ตามความเป็นจริงแล้วทรายมนมีผิวที่หยาบกว่าทรายเหลี่ยมซึ่งได้อธิบายมาแล้ว

4.3 การทดสอบการ Sieve Analysis

ในการทดสอบการ Sieve analysis จะทำเพื่อหาขนาดผลของทรายโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8, เบอร์ 4, เบอร์ 10, เบอร์ 20, เบอร์ 30, เบอร์ 40, เบอร์ 60, เบอร์ 100, เบอร์ 200 เพื่อจะหาขนาดผลธรรมชาติของทรายที่นำมาทดสอบ ในที่นี้จะเลือกใช้วิธีการ Sieve ล้างโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ล้างทราย โดยผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อล้างฝุ่นและดินออกดังแสดงในรูปที่ 4.1
2. นำทรายที่ทำการล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้ว นำมาอบให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2
3. นำทรายที่อบจนแห้งแล้ว นำมาพักให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการร่อนทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8, เบอร์ 4, เบอร์ 10, เบอร์ 20, เบอร์ 30, เบอร์ 40, เบอร์ 60, เบอร์ 100, เบอร์ 200 เพื่อหาขนาดผลธรรมชาติของทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ล้างทราย



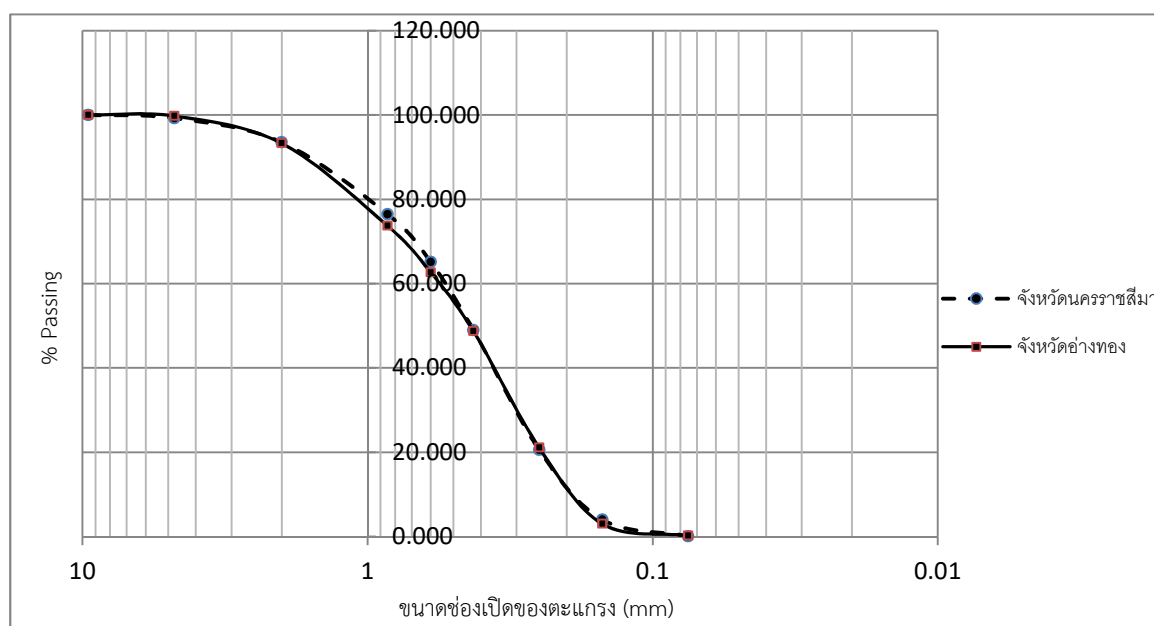
รูปที่ 4.2 อบทราย



รูปที่ 4.3 ร้อนทรายผ่านตะแกรง

4.4 ผลการทดสอบ Sieve Analysis ของทรายธรรมชาติ

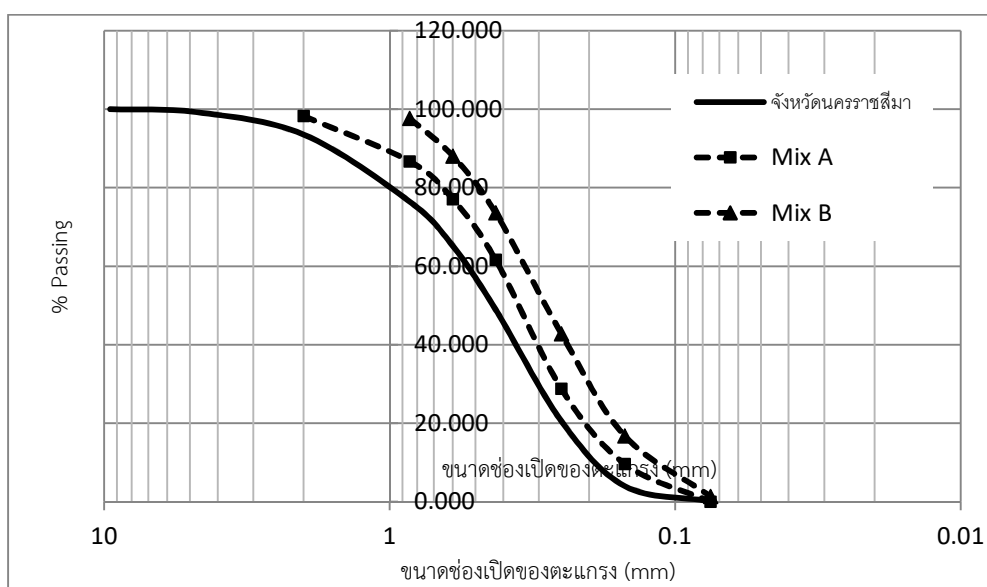
จากการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดคละของทรายโดยการร่อนผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายธรรมชาติจากจังหวัดนครราชสีมาเปรียบเทียบกับจังหวัดอ่าง ได้ผลตามรูปที่ 4.4 จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์พบว่าทรายจังหวัดนครราชสีมาได้ค่า $C_u=2.789, C_c=0.906$ และทรายจังหวัดอ่างทองได้ค่า $C_u=2.876, C_c=0.837$ ดังนั้นทรายของจังหวัดอ่างทองมีความหยาบกว่าทรายจังหวัดนครราชสีมาเล็กน้อยซึ่งสังเกตได้จากกราฟการกระจายตัวของทรายจังหวัดนครราชสีมาอยู่ด้านหน้าทรายของจังหวัดอ่างทองเล็กน้อย ซึ่งดูแล้วไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบหาขนาดคละของทรายด้วยตะแกรงไม่สามารถบอกความกลม ความแบน หรือความคม ของทรายได้ จากการจำแนกชนิดดินโดยอ้างอิงจากระบบ Unified soil classification พบว่าทรายทั้งสองจังหวัดเป็นแบบ SP (Poorly graded sand)



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเปิดของตะแกรง กับ เปอร์เซ็นต์ Passing

4.5 การสร้างตัวอย่างทราย

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าขนาดคละธรรมชาติจากทรายทั้งสองแหล่งแทบไม่มีความแตกต่างกัน อย่างชัดเจน ดังนั้นในโครงการนี้จึงต้องสร้างขนาดคละของทรายตัวอย่างขึ้นมาใหม่ เพื่อที่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายในมีความแตกต่างกัน และนำไปหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทรายได้ต่อไป ในที่นี้สำหรับทรายจากจังหวัดนครราชสีมาจะสร้างขนาดคละขึ้นมาใหม่เป็น Mix A และ Mix B ซึ่งขนาดคละของ Mix A จะมีความหยาบมากกว่าขนาดคละของ Mix B ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถถอดตัวเลขขนาดคละเพื่อความสะดวกในการสร้างขนาดคละใหม่ออกมาได้ตามตารางที่ 4.1 และ 4.2



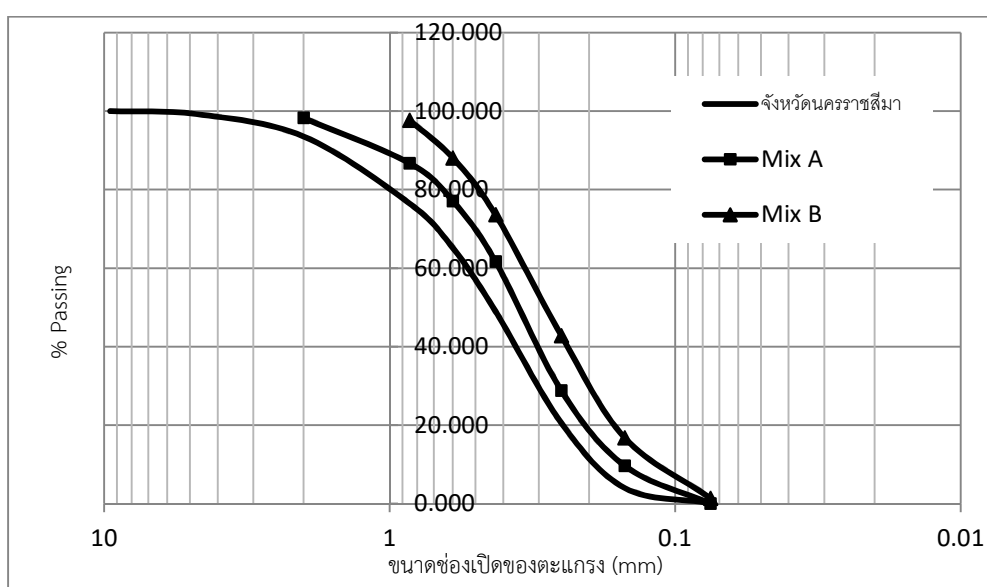
รูปที่ 4.5 ขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนการสร้าง Mix A

ขนาดช่องเปิด(mm)	%passing
2	98.266
0.85	86.705
0.6	77.070
0.425	61.656
0.25	28.766
0.15	9.634
0.075	0.000

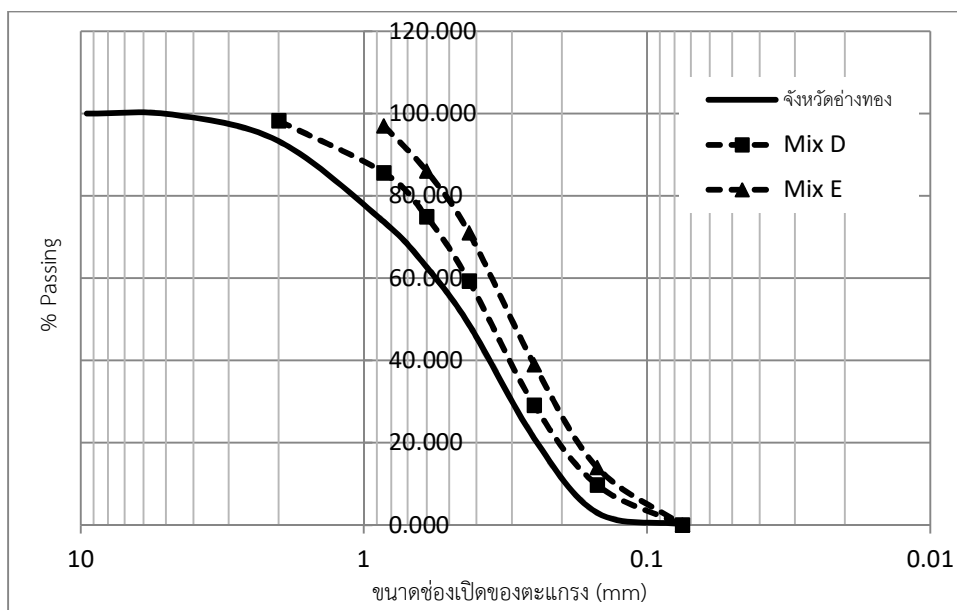
ตารางที่ 4.2 สัดส่วนการสร้าง Mix B

ขนาดช่องเปิด(mm)	%passing
0.85	97.688
0.6	88.053
0.425	73.602
0.25	42.772
0.15	16.760
0.075	1.345



รูปที่ 4.6 ขนาดผลักรรรมชาติของทรายจังหวัดนครราชสีมา Mix A และ Mix B

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าขนาดผลักรรรมชาติจากทรายทั้งสองแหล่งแทบไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นในโครงการนี้จึงต้องสร้างขนาดผลักรรรมชาติของทรายตัวอย่างขึ้นมาใหม่ เพื่อที่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายในมีความแตกต่างกัน และนำไปหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทรายได้ต่อไป ในที่นี้สำหรับทรายจากจังหวัดนครราชสีมาจะสร้างขนาดผลักรรรมชาติขึ้นมาใหม่เป็น Mix D และ Mix E ซึ่งขนาดผลักรรรมชาติของ Mix D จะมีความหยาบมากกว่าขนาดผลักรรรมชาติของ Mix E ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถถอดตัวเลขขนาดผลักรรรมชาติเพื่อความสะดวกในการสร้างขนาดผลักรรรมชาติใหม่ออกมาได้ตามตารางที่ 4.1 และ 4.2



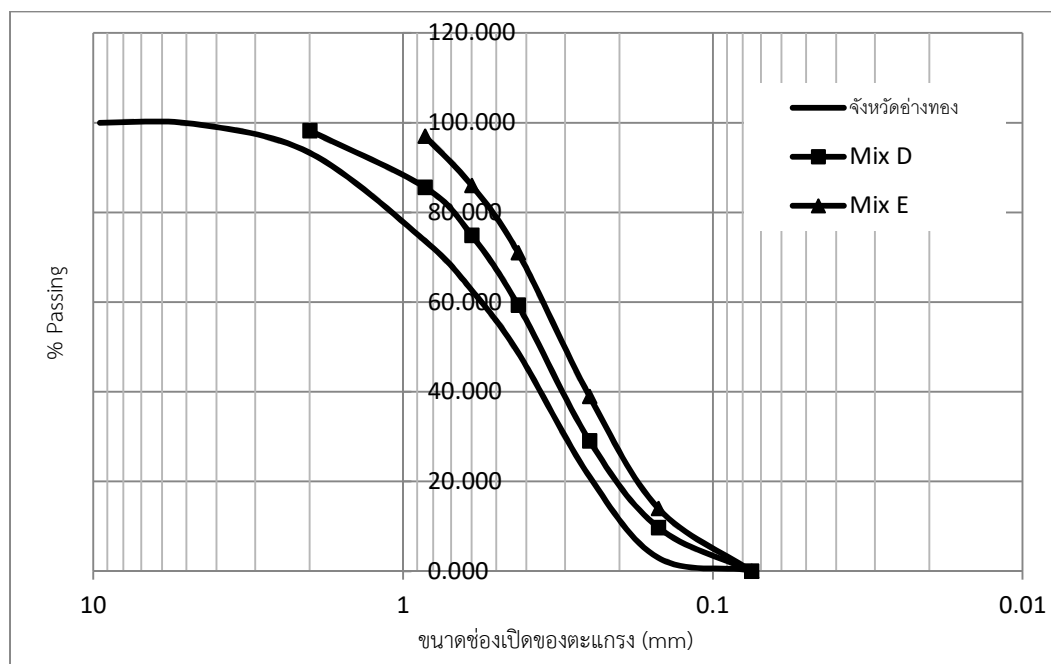
รูปที่ 4.7 ขนาดผลักรรรมชาติของทรายจังหวัดอ่างทอง

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนการสราง Mix D

ขนาดช่องเปิด(mm)	%passing
2	98.247
0.85	85.583
0.6	74.868
0.425	59.282
0.25	29.085
0.15	9.741
0.075	0.000

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนการสราง Mix E

ขนาดช่องเปิด(mm)	%passing
0.85	97.000
0.6	86.000
0.425	71.000
0.25	39.000
0.15	14.000
0.075	0.000



รูปที่ 4.8 ขนาดผลักระรรมชาติของทรายจังหัดอ่างทอง Mix D และ Mix E

หลังจากทราบค่าการกระจายตัวของขนาดผลักระรรมชาติของทรายตัวอย่างแล้ว จากนั้นจะทำการนำทรายตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกเอาทรายที่ค้างในแต่ละตะแกรงมาผสมกันใหม่ตามอัตราส่วนตามตารางที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4 ซึ่งผลจากการตรวจสอบขนาดผลักระรรมชาติของทรายตัวอย่างที่ทำการผสมกันใหม่ตามวิธีที่กล่าวมาแล้วในขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.8 พร้อมทั้งสรุปค่า D10 D30 D60 Cu และ Cc ของทุกขนาดผลักระรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าผลการร่อนผ่านตะแกรง

ตัวอย่าง	D10	D30	D60	Cu	Cc
จังหัดนครราชสีมา	0.196	0.307	0.545	2.789	0.906
mix A	0.157	0.261	0.421	2.677	1.011
mix B	0.121	0.204	0.343	2.797	1.038
จังหัดอ่างทอง	0.194	0.301	0.558	2.876	0.837
mix D	0.152	0.255	0.432	2.842	0.99
mix E	0.13	0.215	0.356	2.738	0.994

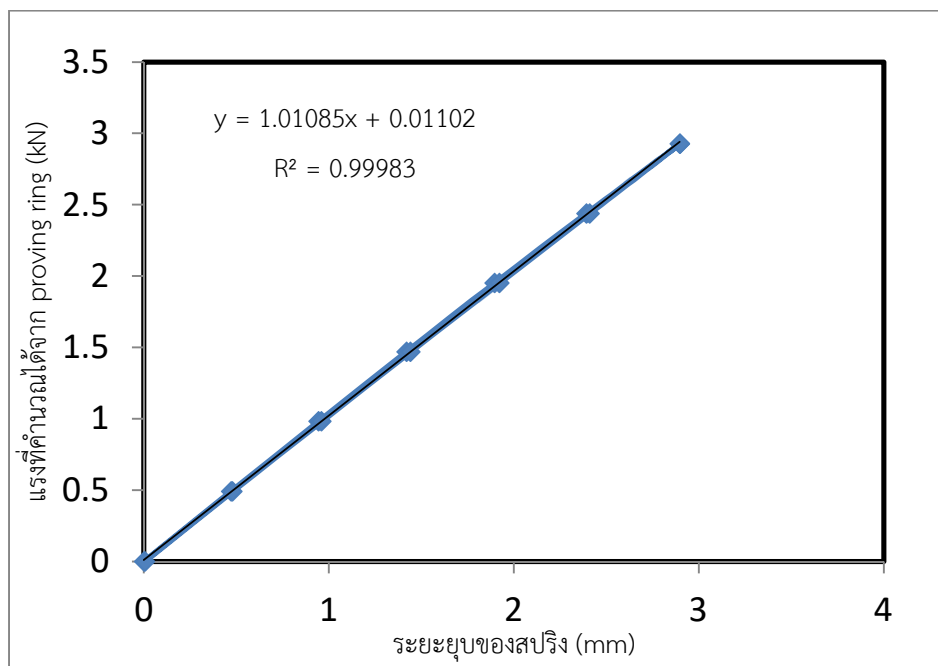
4.6 การทดสอบการเฉือนตรง Direct shear Test

จากการที่ได้ผสมขนาดละเอียดใหม่ของทราย ซึ่งการได้ขนาดละเอียดใหม่มา ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของความหยาบของขนาดละเอียดของทราย ซึ่งมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) โดยจะทำการทดสอบการเฉือนตรงเพื่อหาความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) ของทรายที่มีขนาดละเอียดที่ต่างกัน

4.6.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ Proving ring

1. ติดตั้งอุปกรณ์ Proving ring บนเครื่อง consolidation
2. ให้ไหลโดยใช้น้ำหนักวางบนแกนของเครื่อง consolidation เพื่อกดตัว Proving ring
3. อ่านค่าจาก Dial Gauge ที่หน้าจอ Monitor
4. ทำการลดไหลโดยลดน้ำหนักที่วางบนแกนของเครื่อง consolidation
5. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบ Proving ring ซึ่งในที่นี้จะทำการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกระทำ และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่

4.7 พบว่ามีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า $R^2 = 0.99983$

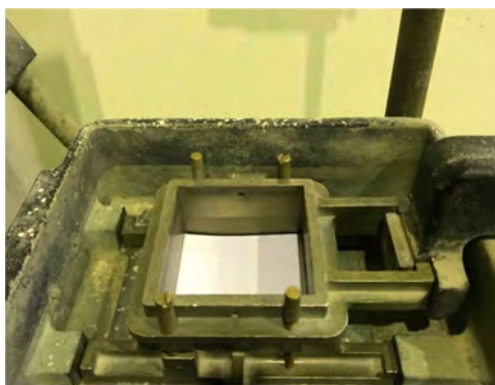


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่กระทำกับระยะยุบ Proving ring

4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบการเฉือนตรง Direct Shear Test

ในที่นี้การทดสอบ Direct Shear Test โดยการใช้ค่า Vertical effective stress ที่กระทำตั้งฉากกับผิวด้านบนกับทรายตัวอย่างคือ 136.20 kPa 190.63 kPa และ 272.20 kPa ตามลำดับสำหรับทรายในทุกตัวอย่าง การทดสอบจะสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. ประกอบ Shear Box ใส่เครื่องทดสอบ
2. จากนั้นทำการเททรายลงใน Shear Box ลงทรายล้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9
3. หลังจากเททรายใส่ Shear Box แล้ว ต้องทำการปาดหน้าทรายที่ล้นเกินมาให้เรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.10
4. จากนั้นวางแผ่นเหล็กและแท่นรับโหลดในแนวตั้งบนหน้าผิวทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.11
5. ทำการถ่ายโหลดในแนวตั้ง โดยใช้ตามค่าความเครียดที่กำหนดแล้วในขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.12
6. หลังจากถ่ายโหลดแล้ว รอจนกว่าการทรุดตัวในแนวตั้งจะสิ้นสุดลงซึ่งอ่านได้จาก Dial Gauge ที่ติดตั้งไว้ด้านบนของตัวอย่าง เช็ความเรียบร้อยของเครื่องทดสอบ ทำการปรับค่า Dial Gauge ทุกตัวให้เท่ากับศูนย์
7. จากนั้นทำการเฉือนตรง โดยใช้อัตราการเฉือนคือที่ 1 มิลลิเมตร ต่อ 1 นาที พร้อมทำการอ่านค่า Dial Gauge ในแนวตั้งและ Dial Gauge ที่ติดตั้งอยู่ภายใน Proving ring



รูปที่ 4.8 ประกอบ Shear Box



รูปที่ 4.9 เททราย



รูปที่ 4.10 ปาดหน้าทราย



รูปที่ 4.11 วางแผ่นเหล็กเตรียมถ่ายโหลด



รูปที่ 4.12 ถ่ายโหลด



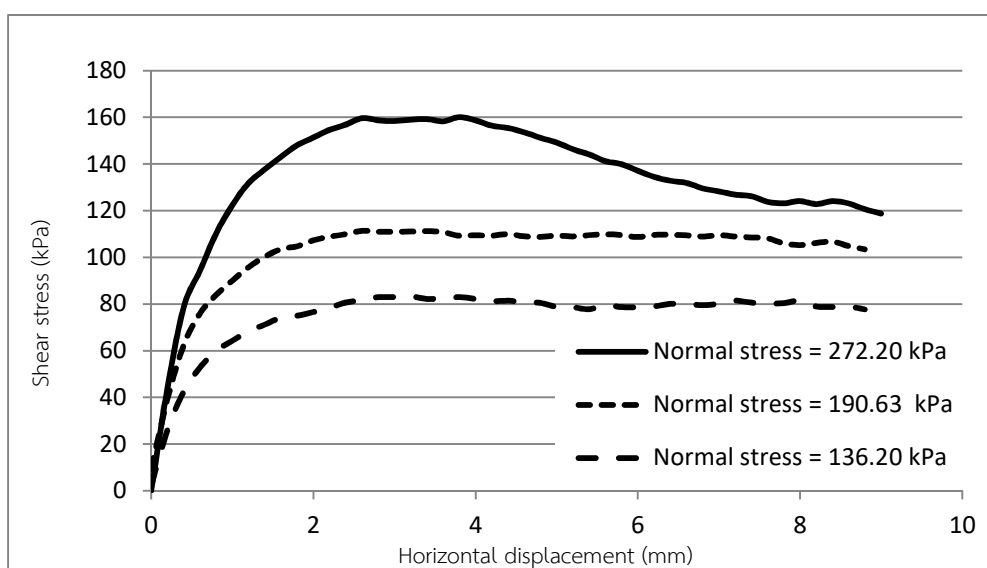
รูปที่ 4.13 เช็คความเรียบร้อย



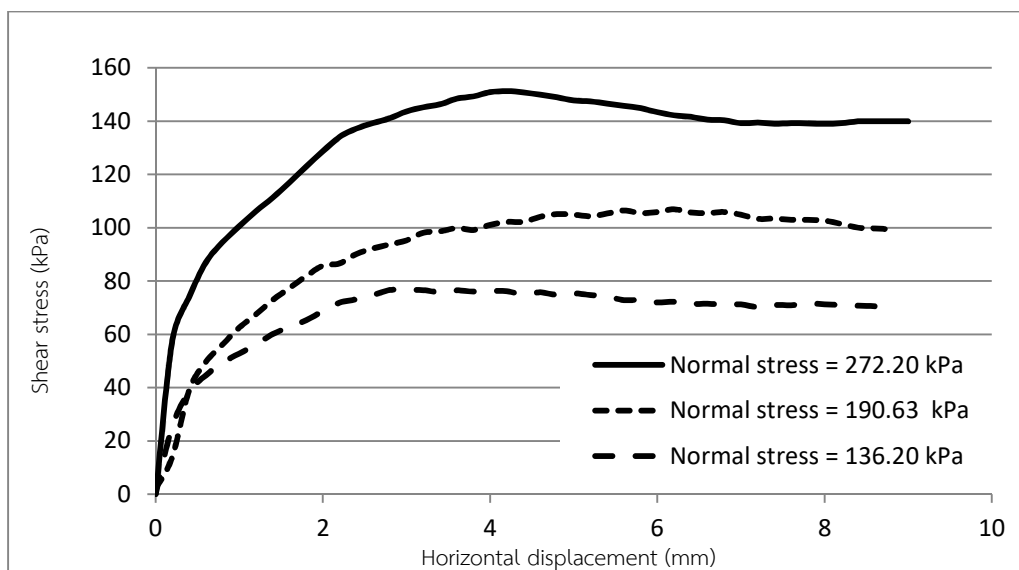
รูปที่ 4.14 ทำการเคียนตรง

4.7 ผลการทดสอบการทดสอบการเฉือนตรง Direct shear Test

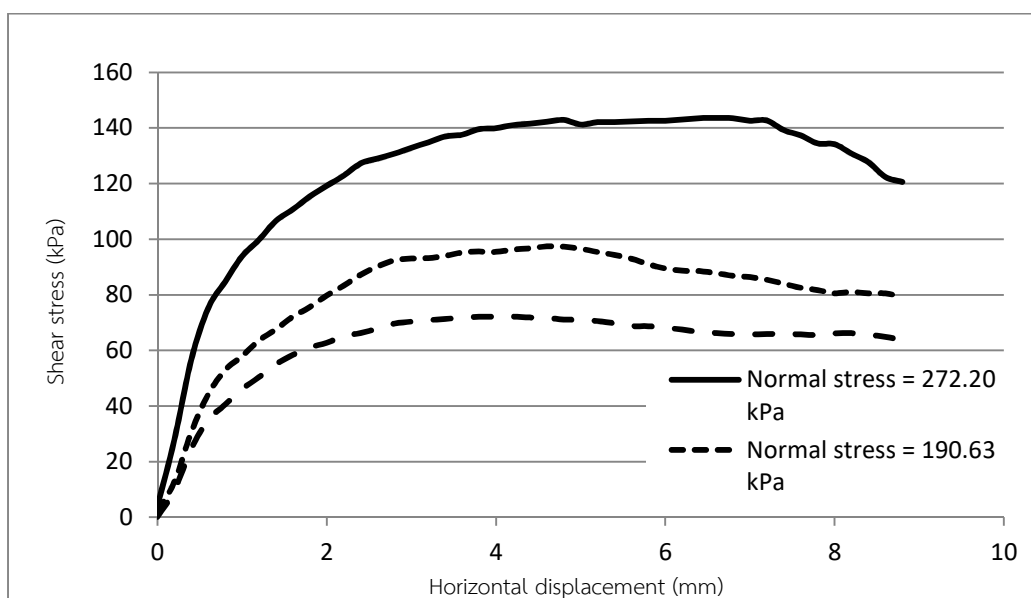
จากการทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงของทรายที่มีขนาดคละแตกต่างกันตามที่กล่าวมาแล้วนั้น รูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement (mm) กับ Shear stress (kPa) ของทรายจังหวัดนครราชสีมา Mix A และ Mix B พบว่าถ้า Normal stress ที่ใส่ลงไปในการทดสอบมีค่ามาก ค่า Shear stress ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งทรายที่มีความหยาบมากกว่าจะสามารถรับค่า Shear stress ได้สูงขึ้นอันส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายในสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.18



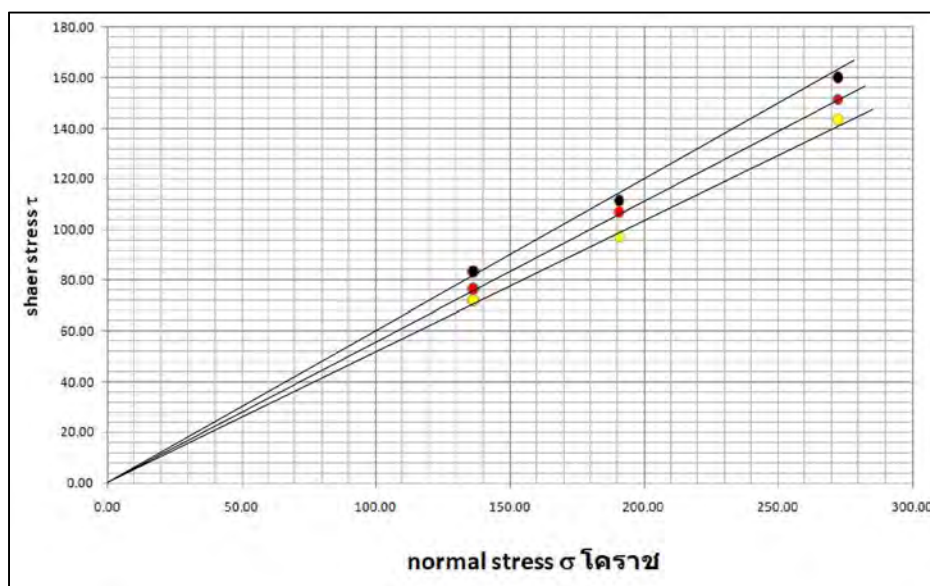
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress ของขนาดคละธรรมชาติของทรายจังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress
ของขนาดคละ Mix A

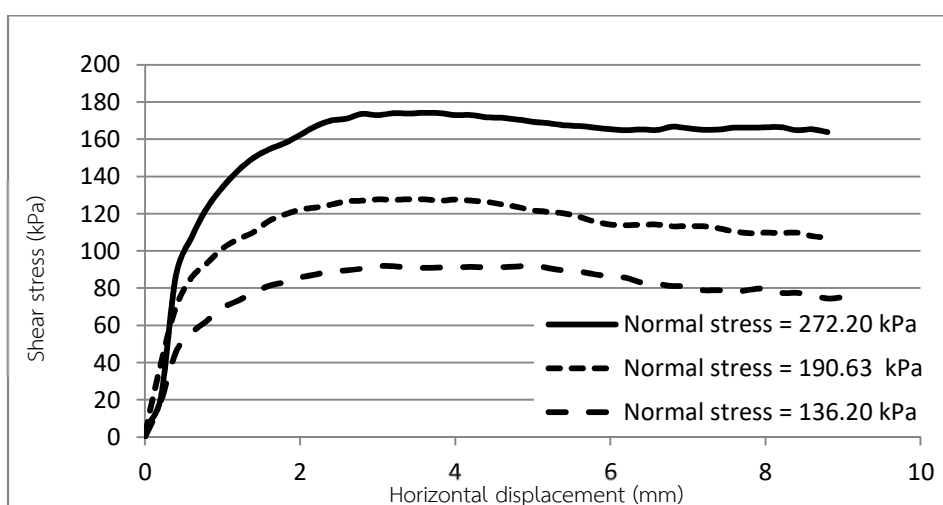


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress
ของขนาดคละ Mix B

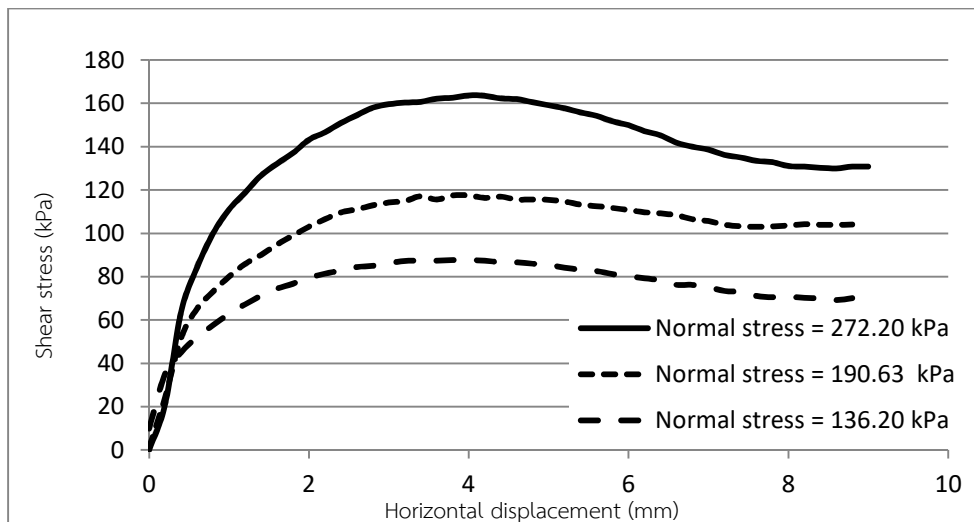


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress กับ Peak Shear stress

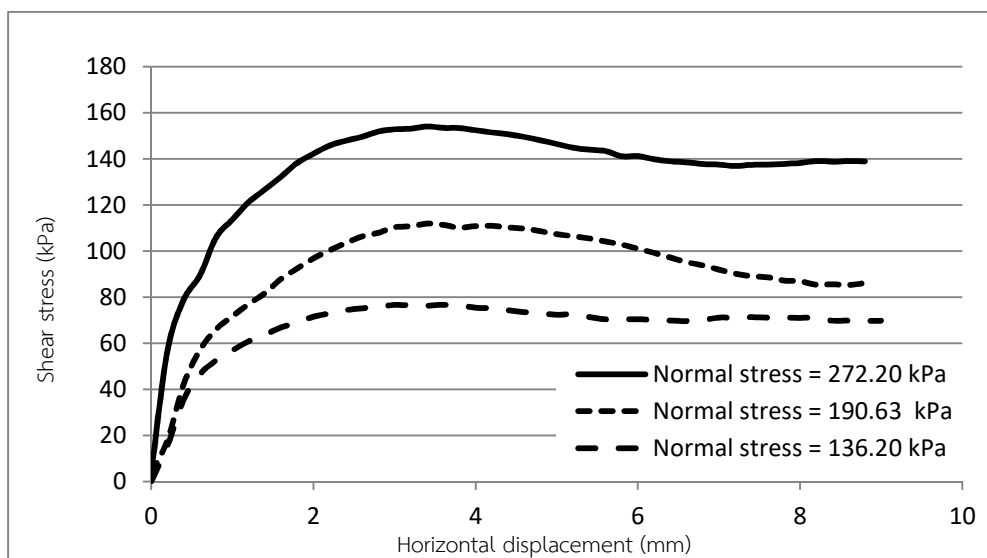
จากการทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงของทรายที่มีขนาดละเอียดต่างกันตามที่กล่าวมาแล้วนั้น รูปที่ 4.19 4.20 และ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement (mm) กับ Shear stress (kPa) ของทรายจังหวัดอ่างทอง Mix D และ Mix E พบว่าถ้า Normal stress ที่ใส่ลงไปใน การทดสอบมีค่ามาก ค่า Shear stress ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งทรายที่มีความหยาบมากกว่าจะสามารถรับค่า Shear stress ได้สูงขึ้นอันส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายในสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress ของขนาดละเอียดธรรมชาติของทรายจังหวัดอ่างทอง



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress
ของขนาดคละ Mix D



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Horizontal displacement กับ Shear stress
ของขนาดคละ Mix E

ตารางที่ 4.6 ค่า D60 Cu Cc และ ค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทาน

จากการทดสอบการเคียนตรง พบว่าความหยาบของทรายมีผลต่อค่า Shear stress ยิ่งทรายมีความหยาบมากค่า Shear stress ก็จะมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ค่ามุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) มีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในตาราง

ขนาดคละ	D60	Cu	Cc	friction angle (ϕ)
				Auto CAD
จังหวัดนครราชสีมา	0.543	2.756	0.887	29°
Mix A	0.423	2.747	1.054	28°
Mix B	0.342	2.85	1.014	26°
จังหวัดอ่างทอง	0.558	2.876	0.837	32°
Mix A	0.432	2.842	0.99	30°
Mix B	0.356	2.738	0.994	29°

4.5 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างที่ออกแบบเป็นพิเศษ

การศึกษานี้การหาค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้งเป็นสิ่งที่ทำได้ง่ายด้ายโดยการอ่านค่าแรงกดจากมาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving ring) ซึ่งมักจะติดตั้งอยู่ด้านบนของเฟรมทดสอบ การหาค่าแรงเคียนนำมาเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง แต่สิ่งที่ท้าทายในโครงการนี้คือการหาค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวราบซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นมาเป็นพิเศษที่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ในที่นี้จะใช้ท่อ PVC ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ที่สามารถรับแรงดันน้ำได้ 0.5 MPa ซึ่งเป็นขนาดท่อที่บางที่สุดในท้องตลาดมาทำเป็นเซลล์ทดสอบ

4.5.1 การประกอบอุปกรณ์

จากหลักการของการวัดแรงดันด้านข้างดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ในขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว มาทากาว ล้างทำความสะอาด ขัดกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.22
2. เจาะรูเพื่อใส่ท่อแรงดันลม และติดชุดสเตรนเกจ (strain gauge) บริเวณด้านข้างของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.23

3. ทำการเชื่อมต่อชุดสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวเข้าด้วยกันตามแบบวงจร full bridge
4. ตรวจสอบสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจว่ามีความเปลี่ยนแปลงไปตามการเสียรูปของท่อ PVC หรือไม่



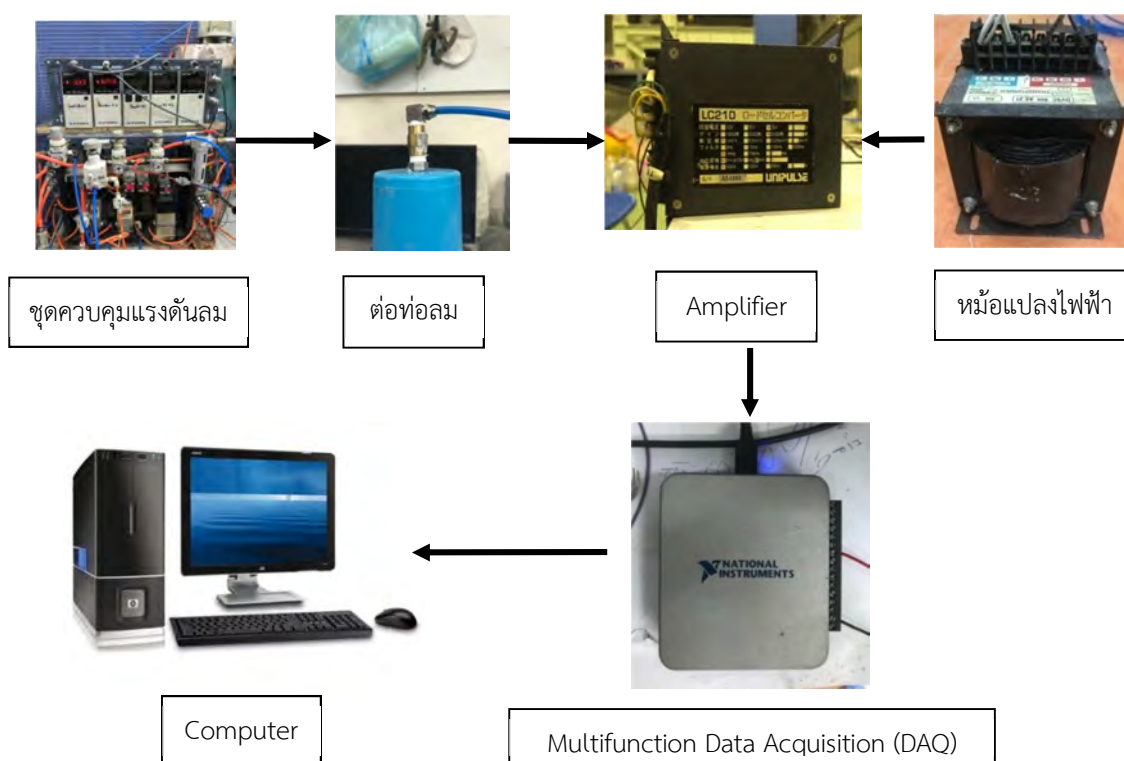
รูปที่ 4.22 ทำความสะอาดท่อ PVC



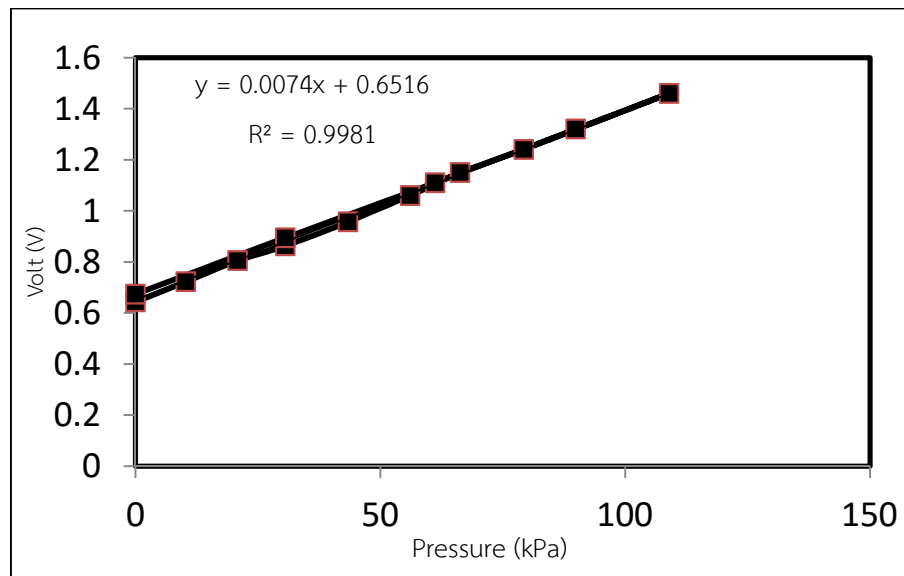
รูปที่ 4.23 เจาะรูเพื่อใส่ท่อแรงดันลม และติดชุดสเตรนเกจ

4.5.2 ขั้นตอนการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแรงดันลม

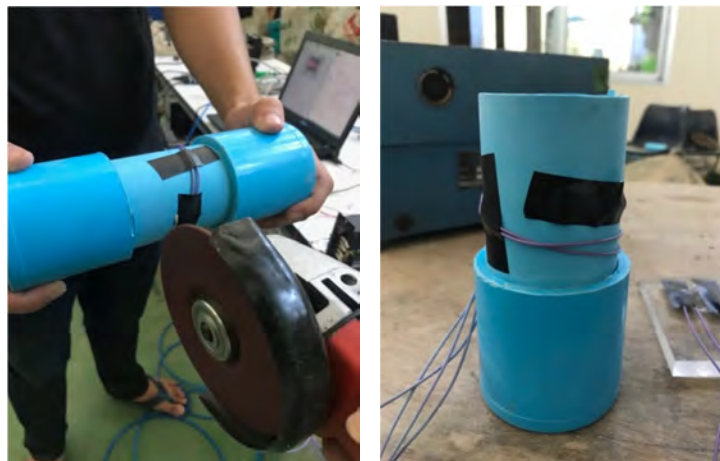
การที่เราจะสามารถวัดแรงดันด้านข้างได้จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านข้างที่ทราบค่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งไว้ด้านข้างของท่อ PVC โดยจะต้องอาศัยอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยเริ่มจากชุดควบคุมแรงดันลมจะจ่ายแรงดันลมที่ทราบค่าเข้าไปที่ท่อ PVC ที่ทำการปิดหัวและท้ายเพื่อกักแรงดัน เมื่อท่อ PVC เกิดการเสียรูปจากแรงดันลมก็จะเกิดการขยายตัวทำให้ชุดสเตรนเกจที่ด้านข้างของท่อ PVC แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจะมีขนาดเล็กจนไม่สามารถวัดค่าได้จึงต้องอาศัยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ามีความชัดเจนจนสามารถวัดค่าจากเครื่องแปลงสัญญาณ Multifunction Data Acquisition (DAQ) ได้ การทดสอบนี้จะทำการเพิ่มขึ้นของแรงดันลมและได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมกับค่าแรงดันไฟฟ้ามีความเป็นเส้นตรงดีมาก และได้ค่า $R^2 = 0.9981$ หลังจากนั้นจะทำการตัดปลายด้านบนของท่อ PVC ที่ปิดตายไว้เพื่อที่จะสามารถบรรจุทรายเข้าไปในท่อ PVC ได้ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 4.26 โดยการตัดนั้นจะต้องระวังไม่ให้ไปกระทบกระเทือนกับชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งเอาไว้



รูปที่ 4.24 ผังอุปกรณ์ที่ใช้และการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อการสอบเทียบ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมกับค่าแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.26 ตัดท่อ เพื่อเตรียมทดสอบ

4.6 ทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของทราย

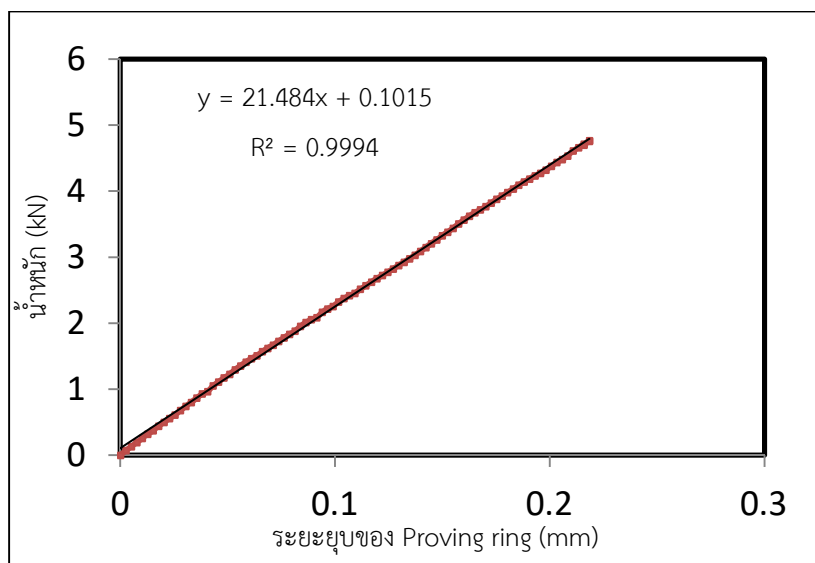
ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างจะมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 องค์ประกอบหลักคือ ค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) กับค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวนอน (Effective horizontal stress) ซึ่งทั้งสองค่านี้ถ้านำมาเป็นสัดส่วนกันก็จะกลายเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างดังแสดงในสมการที่ 1.1 ซึ่งมีขั้นตอนทดสอบดังต่อไปนี้

4.6.1 สอบเทียบมาตรวัดแบบวงแหวน (Proving ring)

จากการทดสอบการวัดแรงดันด้านข้าง วิธีการที่ง่ายที่สุดในตอนนี้คือการหาค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) ซึ่งจะหาได้จากการหาแรงกดของ Proving ring โดยใช้สปริงที่รู้ค่านิจของสปริงมาทำการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ จะใช้เครื่องทดสอบแรงกดแบบ Unconfined compression test ในการสอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.27 เมื่อรู้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดของ Proving ring กับ ระยะยุบของสปริง ซึ่งรู้ค่านิจของสปริงจึงทำการแปลงค่าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำของ Proving ring กับ ระยะยุบตัวของ Proving ring ได้ ซึ่งในที่นี้จะทำการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่ามีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า $R^2 = 0.9994$



รูปที่ 4.27 การสอบเทียบ Proving ring ด้วยสปริงมาตรฐาน



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบของ Proving ring กับ น้ำหนัก

4.6.2 การทดสอบวัดแรงดันด้านข้าง

การที่เราจะสามารถวัดแรงดันด้านข้างได้นั้นจะอาศัยหลักการคือ เมื่อทรายรับแรงดันในแนวตั้ง ก็จะทำให้เกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างของท่อ PVC จากนั้นชุดสเตรนเกจที่ติดอยู่ด้านข้างของท่อจะอ่านค่าการขยายตัวโดยแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า (Volt out) ถ้าทำการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านข้างที่ทราบค่ากับแรงดันไฟฟ้า ก็จะสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องแปลงสัญญาณ Multifunction Data Acquisition (DAQ) กลับมาเป็นแรงดันของทรายที่ขยายออกทางด้านข้างได้อย่างถูกต้อง จากหัวข้อที่ 4.6.1 เมื่อรู้ความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) แล้ว ก็จะหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสถานะอยู่นิ่งของทราย (k_0) ได้โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำท่อ PVC ไปวางที่เครื่องทดสอบแรงกดแบบ Unconfined compression test พร้อมกรอกทรายลงในกระบอกทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.30

2. ทำการกดตัวอย่างจากโดยใช้โหลดในแนวตั้ง พร้อมอ่านค่าแรงดันด้านข้างจาก ชุดสเตรนเกจ โดยอ่านทีละ 0.129228 kN หรืออ่านทุกๆ 2 ซีดของ Dial Gauge ดังแสดงในรูปที่ 4.31



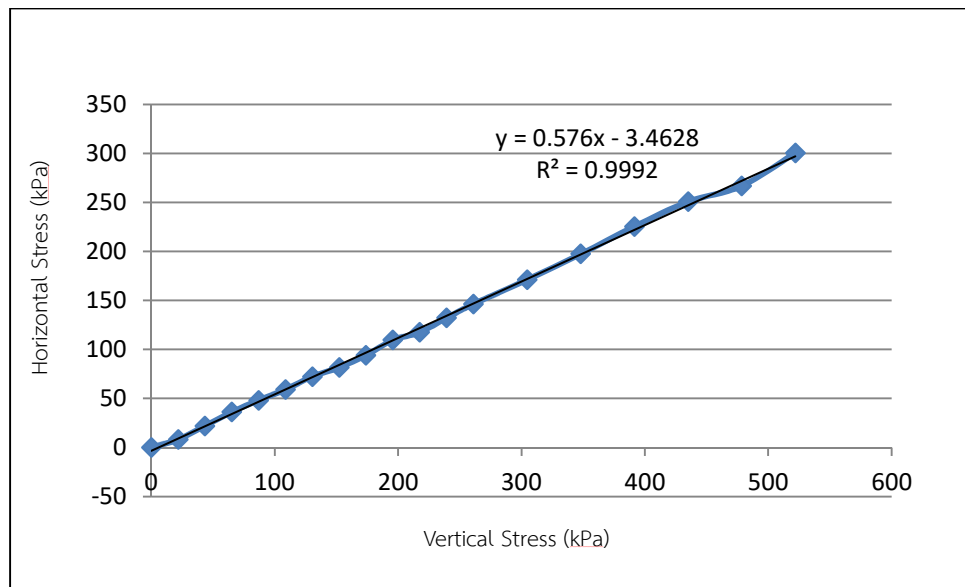
รูปที่ 4.30 กรอกทรายลงในกระบอกทดสอบ



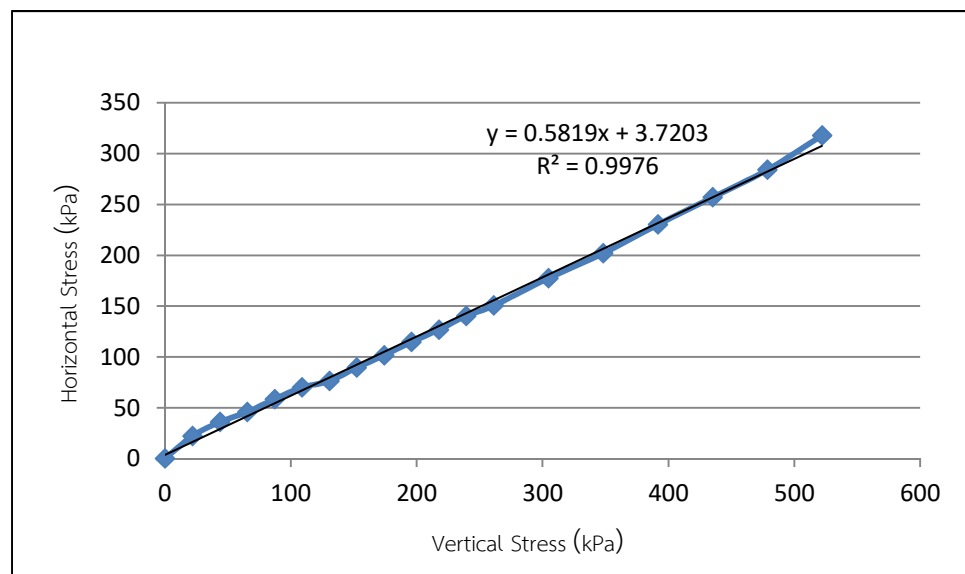
รูปที่ 4.31 ทดสอบวัดแรงดันด้านข้าง

4.7 ผลการทดสอบการหาค่าแรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ

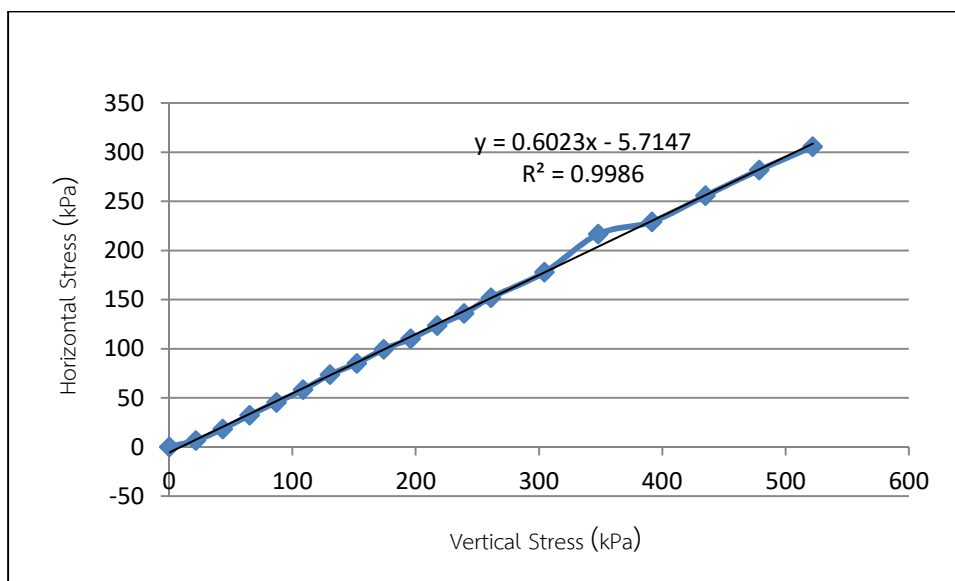
จากการทดสอบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) จากสมการเส้นในกราฟ โดยจะหาทุกขนาดคละของทราย จะเห็นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.32 4.33 4.34 4.35 4.36 และ 4.37 โดยจะสรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) กับค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) ไว้ในตารางที่ 4.7



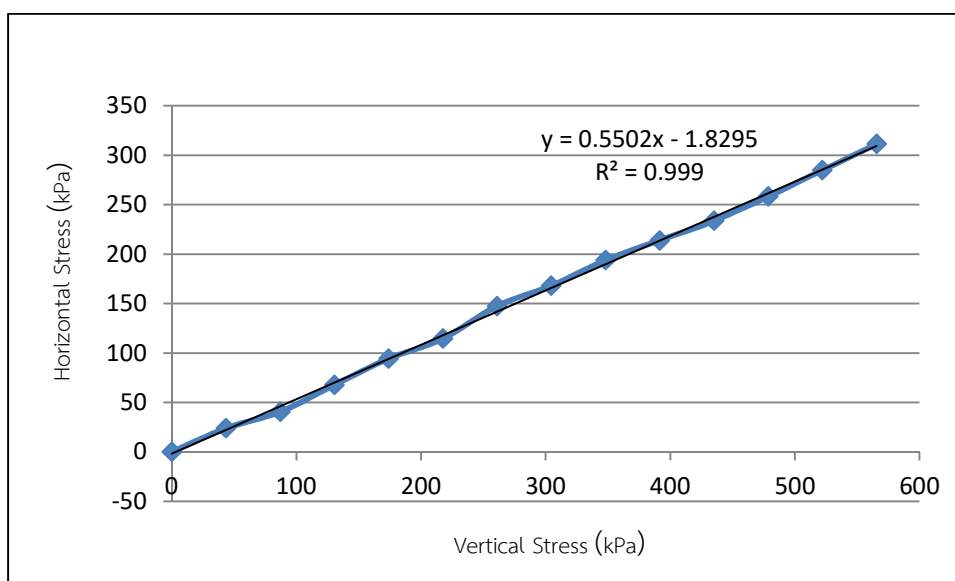
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดผลักรวมชาติจังหวัดนครราชสีมา



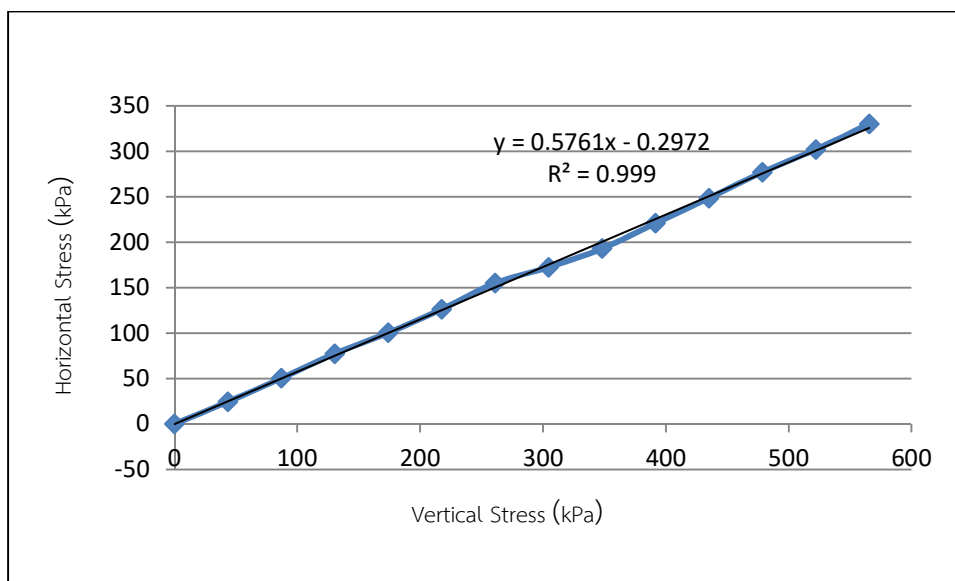
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดผล Mix A



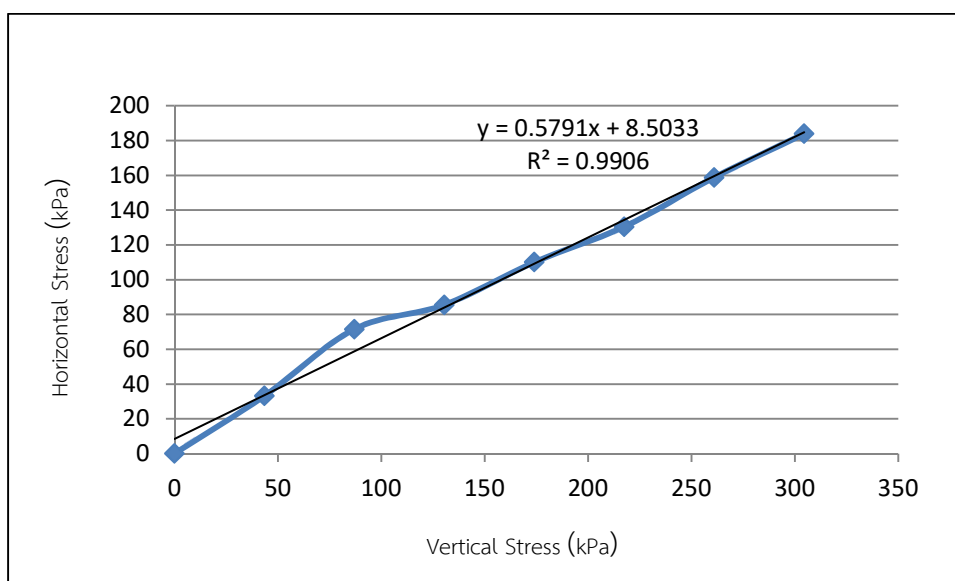
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดคละ Mix B



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดคละธรรมชาติจังหวัดอ่างทอง



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดคละ Mix D



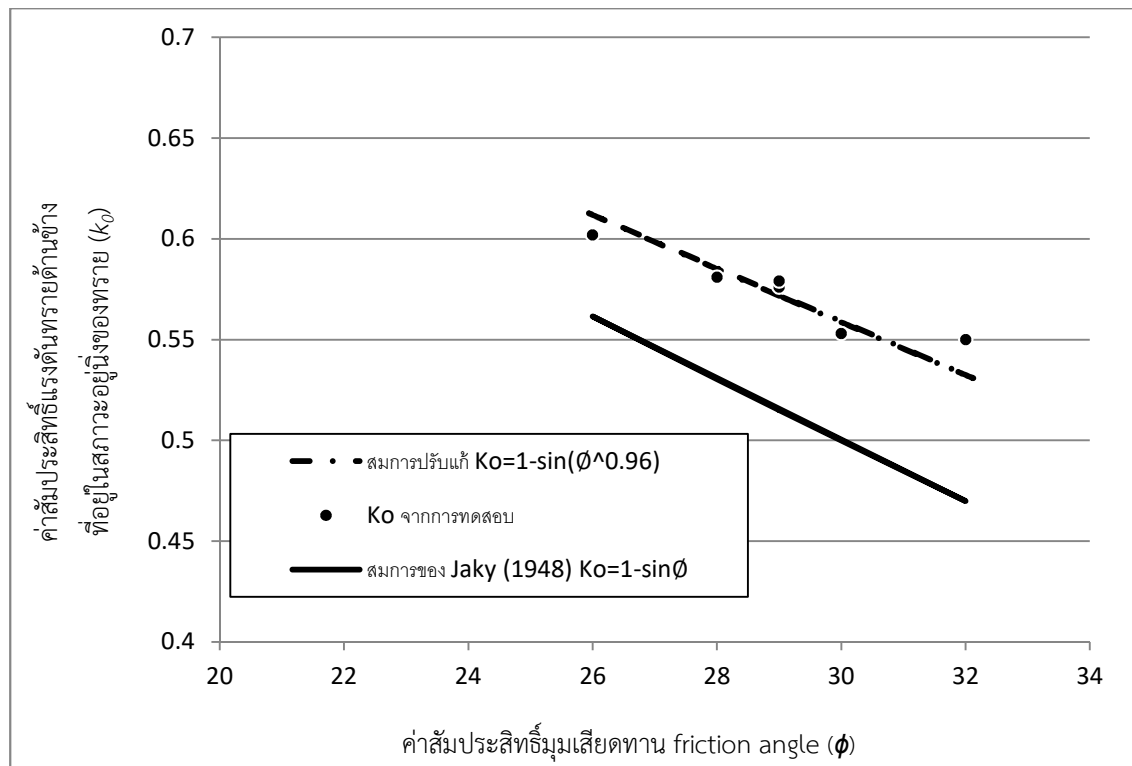
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical Stress กับ Horizontal Stress
ของขนาดคละ Mix E

จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) โดยใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบพิเศษ พบว่าทรายที่มีความหยาบมากและค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) สูง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) น้อย จึงบอกได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) จะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปค่า K_0 กับ ϕ

ขนาดคละ	k_0	ϕ
โคราช	0.576	29
mix A	0.581	28
mix B	0.602	26
อ่างทอง	0.550	32
mix D	0.553	30
mix E	0.579	29

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าสมการที่นำเสนอโดย Jaky (1948) $K_0 = 1 - \sin\phi$ ได้สัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) ค่อนข้างน้อยกว่า การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) โดยการใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะสมการของ Jaky (1948) $K_0 = 1 - \sin\phi$ ไม่ได้ใช้ทรายในประเทศไทยทดสอบ อาจจะใช้ทรายต่างประเทศในการทดสอบเนื่องด้วยทรายในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางกายภาพของทราย เช่น ความยาว ความแบน ความคม ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_0) มีความแตกต่างกัน จึงได้มีการนำเสนอสมการปรับแก้คือ $K_0 = 1 - \sin(\phi^{0.96})$ เมื่อใช้ทรายของประเทศไทยในการทดสอบ



รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทาน friction angle (ϕ) กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันทรายด้านข้างที่อยู่ในสภาวะอยู่นิ่งของทราย (k_o)

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงการ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ทrolleyที่มีความหยาบมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) มาก
2. ทrolleyที่มีค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน friction angle (ϕ) มาก จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทrolley (k_0) น้อย
3. จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทrolley (k_0) โดยใช้สมการของ Jaky (1948) $K_0 = 1 - \sin\phi$ พบว่าจากการทำโครงการค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทrolley (k_0) มีค่าค่อนข้างมากกว่าทฤษฎี จึงมีการเสนอสมการใหม่คือ $K_0 = 1 - \sin(\phi^{0.96})$

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบการวัดแรงดันดินด้านข้างโดยอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษการกดทrolley นั้นเกิดแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างทrolley กับผิวของท่อ PVC ทำให้ทrolley กดท่อ PVC ลงตามไปด้วยขณะการกด จึงมีค่าคลาดเคลื่อนการประมาณ (error) ได้ ซึ่งต้องใช้เวลาในการศึกษาวิจัยการลงแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างทrolley กับผิวของท่อ PVC อีกต่อไป

เอกสารอ้างอิง

D. Y. Baxter. (2006). "Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls" Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

L.P. Chao and K.T. Chen, "Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors", International Journal of Sensors and Actuators, Vol. 63, 1997, pp.105-112.

Jaky (1984) "Coefficient of lateral stress sand at rest"

Vardhanabhuti การทดลองKo-consolidation โดยใช้เครื่องมือ Oedometer