

การพัฒนาเครื่องมือและวิธีการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียดรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้
สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

ชนม์พิสิทธิ์ ยาท่วม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

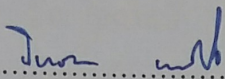
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2561

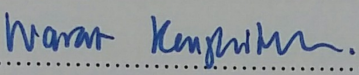
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

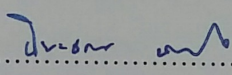
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ชนม์พิสิทธิ์ ยาท่วม ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

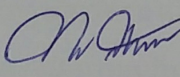
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

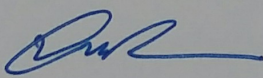

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. ปิยะฉัตร นัตรตันใจ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

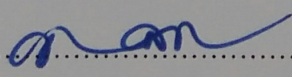

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรัช ก้องกิจกุล)


..... กรรมการ
(ดร. ปิยะฉัตร นัตรตันใจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)


..... กรรมการ
(ดร. ชินวุธ พิพัฒน์ภานุกุล)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 9 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความรู้ และให้คำแนะนำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไข และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ยูนิค เอ็นจิเนียริ่งแอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้รับเหมาในโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมือง (สายสีแดง) ที่อนุเคราะห์ให้เข้าไปเก็บตัวอย่างดินทดสอบในการวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบุญส่ง คุณแม่วรรณทอง ยาท่วม และพี่น้องทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพภกัริ บพภคจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ชนม์พิสิทธิ์ ยาท่วม

57910223: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: อุปกรณ์/ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ/ ความเครียดในระนาบ

ชนม์พิสิทธิ์ ยาทั่วม: การพัฒนาเครื่องมือและวิธีการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (THE NEW APPARATUS AND METHODOLOGY FOR STUDY THE DEFORMATION CHARACTERISTIC OF SOFT BANGKOK CLAY UNDER PLANE STRAIN CONDITION) คณะกรรมการควบคุม
วิทยานิพนธ์: ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ, Ph.D., 124 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีส่วนใหญ่เช่น งานอุโมงค์ งานคันดินยาว งานเขื่อน งานกำแพงกันดิน เป็นต้น จะอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain condition) ซึ่งการทดสอบหาค่าการรับกำลังของดินแบบแรงอัดสามแกน (triaxial test) มีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของการทดสอบที่ไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ในการทดสอบและวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบไม่รบกวนตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงสิ้นสุดขั้นตอนการเจียนดิน เครื่องมือและชุดโปรแกรมควบคุมที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้ทำการออกแบบและประดิษฐ์ขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบให้มากที่สุด ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง คือ นำดินเหลวบรรจุเข้าเครื่องทดสอบที่ได้ติดตั้งวางไว้กับเครื่องทดสอบ โดยเครื่องทดสอบจะมีแผ่นประกบด้านหน้าและด้านหลังเป็นแบบยึดตรึงไว้ และมีด้านซ้ายและด้านขวาสามารถถอดออกได้เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบแก่ตัวอย่าง ในการสร้างโครงสร้างดินใหม่ของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำสูงจะใช้กระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติโดยทำการให้แรงกดในแนวตั้งด้วยกระบอกลมนิวแมติกซึ่งมีการปรับแก้ค่าแรงดันลมอยู่ตลอดเวลาพร้อมกับแรงดันน้ำที่เป็นลบเพื่อเร่งการทรุดตัวในกระบวนการอัดตัวคายน้ำในที่นี้จะใช้แรงดันน้ำที่เป็นลบไม่เกิน 30% ของแรงกดในแนวตั้ง ในกระบวนการนี้ค่าของการเคลื่อนตัวในแนวราบจะมีค่าคงที่ทั้งสี่ด้านและจะถูกวัดค่าของแรงดันดินด้านข้างตลอดการทดสอบด้วยอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างที่ติดตั้งอยู่กับแผ่นประกบด้านหลัง เมื่อสิ้นสุดการสร้างโครงสร้างดินใหม่จะต้องทำการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมของอุปกรณ์ให้เป็นสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบโดยทำการปลดแผ่นประกบด้านข้างออกแล้วทำการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติอีกครั้งโดยให้การยุบตัวในแนวตั้งซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้างขณะหยุดนิ่งได้ จากผลการทดสอบเจียนตัวอย่างที่ถูกเตรียมตัวอย่างขึ้นด้วยความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 50 60 และ 80 kPa ตามลำดับ พบว่าทั้งสามตัวอย่างมีลักษณะการวิบัติที่มีแถบแรงเฉือนเป็นรูปกากบาท เมื่อนำค่า Stress-Strain มาเปรียบเทียบกับในทอมของความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deviator stress กับค่า Vertical strain พบว่าเกิด Hardening Softening or decreasing และเข้าสู่ Residual state ตามลำดับทั้งสามตัวอย่าง และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นบวกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินนั้นต่ำลง

57910223: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: APPARATUS/ SOFT BANGKOK CLAY/ PLANE STRAIN

CHONPISITT YATHUAM: THE NEW APPARATUS AND METHODOLOGY FOR STUDY THE DEFORMATION CHARACTERISTIC OF SOFT BANGKOK CLAY UNDER PLANE STRAIN CONDITION. ADVISORY COMMITTEE: PIYACHAT CHATTONJAI, Ph.D. 124 P. 2018

For many geotechnical engineering problems dealing with very soft clay deposit (e.g., stability of the slope, embankment, etc.), their characteristics are plane strain condition that the conventional triaxial tests are unable to simulate those significant different boundary condition. Therefore, plane strain compression (PSC) tests on very soft clay are necessary. In this research, the new apparatus including high accurate measuring devices and technique to reproduce soft clay specimens without any disturbance before shearing was proposed. All hardware and software of plane strain apparatus proposed in this work was particularly designed and manufactured at the geotechnical laboratories of Burapha University, Chon Buri, Thailand to serve the particular requirement. A prismatic very soft clay specimen can be prepared by consolidating clay slurry injected to a membrane enclosed with two confining plates at front and rear sides, and two auxiliary plates at the left and right sides. Reconstituting is performed by one-dimensional consolidation that the injected high water content of clay slurry was compressed by the top cap using an air cylinder with feedback control system combined with negative pore-water pressure (suction). The suction is about 30% of compression stress. During consolidation process, the strains at the four lateral sides are constrained and a lateral stress is measured in real time at the rear confining plate. After the reconstituting was finished, the boundary condition was changed to plane strain condition by removal of the two auxiliary plates. Then, the 1-D consolidation process was performed in the same plane strain cell which only two opposite sides (the side of auxiliary plates) were controlled by applied vertical deformation via computer controller. After finishing the consolidation process the value of coefficient of lateral soil pressure at rest was firstly determined and then shearing process can be performed consecutively by applying vertical compression under initial vertical stress of 50, 60 and 80 kPa respectively. According to all testing results, the shear bands are the single type, 'X' at the failure state and the stress-strain curves obtained under plane strain condition shows three phases of deviator stress with vertical strain increase: strain hardening, softening or decreasing and residual state. The positive excess pore water pressure increases for lower shear strength specimen.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ฌ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 4 |
| สมมติฐานของการวิจัย..... | 4 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... | 5 |
| ขอบเขตของการวิจัย..... | 5 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| คุณลักษณะทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ..... | 7 |
| หลักการของความเค้นประสิทธิผล..... | 9 |
| การยุบอัดตัว..... | 10 |
| นิยามของดินที่มีการประกอบตัวใหม่และคุณสมบัติของดินเนื้อแท้และดัชนีช่องว่าง..... | 14 |
| การแปลงค่าตัวแปล..... | 17 |
| ความเค้นเฉือน..... | 19 |
| แรงดันดินด้านข้างสภาวะหยุดนิ่ง..... | 38 |
| สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและการตรวจสอบค่าของการอิ่มตัว..... | 43 |
| 3 วิธีการศึกษา..... | 45 |
| การจัดหาตัวอย่างทดสอบ..... | 46 |
| การเตรียมตัวอย่างทดสอบ..... | 47 |
| อุปกรณ์..... | 52 |
| การทดสอบตัวอย่าง..... | 57 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 60 |
| การเตรียมตัวอย่างทดสอบ..... | 60 |
| อุปกรณ์..... | 80 |
| การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์..... | 97 |
| การอัดตัวคายน้..... | 100 |
| การเนียนตัวอย่าง..... | 110 |
| การตรวจสอบระดับความอึ้มตัว..... | 114 |
| 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 118 |
| สรุปผลการวิจัย..... | 118 |
| ข้อเสนอแนะ..... | 119 |
| บรรณานุกรม..... | 120 |
| ประวัติย่อของผู้วิจัย..... | 124 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ | |
| 2-1 ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ..... | 8 |
| 2-2 ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ..... | 8 |
| 2-3 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางของหน่วยแรงที่แตกต่างกัน..... | 20 |
| 2-4 สรุปผลการทดลองของ Alshibli และคณะในปี 2004..... | 33 |
| 4-1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่นำมาทดสอบ..... | 61 |
| 4-2 การเปรียบเทียบระดับความอิ่มตัวของดินในแต่ละชั้นตอน..... | 115 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1-1 ทิศทางของความเค้น..... | 2 |
| 2-1 ทิศทางความเค้นกระทำต่อมวลดิน..... | 10 |
| 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของดินกับเวลา..... | 11 |
| 2-3 แบบจำลองของสปริงที่ใช้อธิบายการยุบตัวของดิน..... | 12 |
| 2-4 แบบจำลองการอัดตัวคายน้ำโดยใช้สปริง..... | 13 |
| 2-5 การใช้ I_v ในการสร้างสมการมาตรฐานจากรูปแบบการอัดตัวของดิน ที่ประกอบตัวใหม่..... | 14 |
| 2-6 การสร้างสมการของ Intrinsic compression line (ICL) จากเส้นโค้งการอัดตัวของดิน ที่ทำการประกอบตัวใหม่..... | 16 |
| 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{v0} และ $\log \sigma'_v$ | 17 |
| 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำและค่า OCR โดยใช้โปรแกรม AGS..... | 18 |
| 2-9 ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง ที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนที่ทดสอบโดย Kim (1991)... | 20 |
| 2-10 ผลการทดสอบ Normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพภายใต้เส้นทาง ของหน่วยแรงแตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน ที่ทดสอบ โดย Gurung (1992)..... | 22 |
| 2-11 ผลการทดสอบ Normalized Stress Paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพภายใต้เส้นทาง ของหน่วยแรงที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน ที่ทดสอบ โดย Anuchit (1998) และ Navanneethan (1999)..... | 22 |
| 2-12 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบแรงดันสูง..... | 23 |
| 2-13 ดินที่บดละเอียดแล้วมาผสมเข้ากับน้ำ..... | 24 |
| 2-14 ให้แรงดันลบกับตัวอย่างดินเพื่อสลایฟองอากาศ..... | 24 |
| 2-15 เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้ไม่เกิน 250 kPa..... | 24 |
| 2-16 เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้สูงสุด 10,000 kPa..... | 25 |
| 2-17 ประกอบโมลเข้ากับอุปกรณ์และให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุงยาง..... | 26 |
| 2-18 ติดตั้งตะแกรงร่อนเข้ากับด้านบนของตัวอย่าง..... | 26 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2-19 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ..... | 27 |
| 2-20 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ..... | 28 |
| 2-21 อัตราส่วนของความเค้นของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ และแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง..... | 28 |
| 2-22 มุมเสียดทานประสิทธิผลของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียด ในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง..... | 29 |
| 2-23 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ โดยใช้เครื่องทดสอบ Biaxial..... | 30 |
| 2-24 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างและการตัดแต่งตัวอย่าง..... | 30 |
| 2-25 ตัวอย่างดินหลังการตัดแต่งมีขนาด 90 x 60 x 30 มม..... | 31 |
| 2-26 ระบบการให้แรงเค้นในแนวดิ่งเพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ภายใต้กระบวนการ อัดตัวคายน้ำ..... | 32 |
| 2-27 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ..... | 33 |
| 2-28 ตารางสรุปผลการทดลองของ Khalid and Ibrahim (2007)..... | 33 |
| 2-29 แถบแรงเฉือนของดินตัวอย่างที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน กับดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ..... | 34 |
| 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ p' ของการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนและ การทดสอบแบบความเครียดในระนาบ..... | 35 |
| 2-31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราทรุดตัวของตัวอย่างของการทดสอบ แบบแรงอัดสามแกนและการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ..... | 35 |
| 2-32 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ..... | 36 |
| 2-33 แถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบ ความเครียดในระนาบ..... | 37 |
| 2-34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดแถบ แรงเฉือนแบบ Single type..... | 37 |
| 2-35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดแถบ แรงเฉือนแบบ 'X' type..... | 38 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

| | |
|--|----|
| 2-36 อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ Ko-Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial tests..... | 40 |
| 2-37 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ Ko-Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial Test..... | 40 |
| 2-38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ..... | 41 |
| 2-39 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ..... | 43 |
| 3-1 กระบวนการทำงานของงานวิจัย..... | 45 |
| 3-2 แนวเส้นทางโครงการระบบรถไฟฟ้าเมืองสายสีแดง..... | 46 |
| 3-3 การก่อสร้างเข็มเจาะในโครงการระบบรถไฟฟ้าเมือง สายสีแดง บริเวณสถานีกลางบางซื่อ..... | 47 |
| 3-4 ดาดินในที่รุ่มเพื่อลดปริมาณความชื้นในดิน..... | 49 |
| 3-5 ทูบดินแห้งเพื่อลดขนาดของเมื่อดินด้วยค้อนยาง..... | 49 |
| 3-6 เครื่องปั้นดินที่ได้ออกแบบขึ้น..... | 50 |
| 3-7 บรรจุดินเข้าสู่กระบอบคินจากเครื่องปั้นดิน..... | 50 |
| 3-8 ดันดินจากกระบอบคินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบ..... | 51 |
| 3-9 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน..... | 51 |
| 3-10 การให้แรงเค้นในกระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน..... | 52 |
| 3-11 รูปด้านหน้าของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง..... | 53 |
| 3-12 รูปตัดของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง..... | 54 |
| 3-13 ภาพตัดด้านหน้าของชิ้นส่วนโพลีเอทิลีนขึ้นต่าง..... | 55 |
| 3-14 ภาพตัดด้านหน้าของชิ้นส่วนโพลีเอทิลีนขึ้นบน..... | 55 |
| 3-15 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบ..... | 57 |
| 3-16 การเปลี่ยนสถานะแวดล้อมจากการเสียรูปในหนึ่งมิติเป็นแบบสถานะความเครียดในระนาบ..... | 58 |
| 3-17 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะให้แก่ตัวอย่าง..... | 58 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

| ภาพที่ | | |
|--------|--|----|
| 3-18 | การควบคุมการทดสอบในขณะที่ทำการเงื่อนไขตัวอย่าง..... | 59 |
| 4-1 | การย่อยดินและปั่นดินให้เข้ากันน้ำ..... | 61 |
| 4-2 | การกรองเศษหินและเปลือกหอยออกจากดินเหนียวเหลว..... | 62 |
| 4-3 | การปาดดินและตากดินในที่ร่มเพื่อลดปริมาณความชื้นในดิน..... | 62 |
| 4-4 | ทุบดินแห้งเพื่อลดขนาดของเม็ดดินด้วยก้อนยางจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40... .. | 63 |
| 4-5 | เทผงดินลงในเครื่องปั่นดิน..... | 63 |
| 4-6 | ผสมน้ำเข้ากับตัวอย่างดิน..... | 64 |
| 4-7 | การแช่ตัวอย่างดินในสภาวะสูญญากาศแล้วทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด..... | 64 |
| 4-8 | รูปใบพัดของเครื่องปั่นดิน..... | 65 |
| 4-9 | รูปใบพัดของเครื่องปั่นดิน..... | 66 |
| 4-10 | ฟองอากาศที่ระเบิดออกมาจากดินเหลว..... | 66 |
| 4-11 | ขนาดและตำแหน่งของจุดแต่ละจุดที่ทำการวาดขึ้น..... | 67 |
| 4-12 | สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง..... | 68 |
| 4-13 | ติดถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง..... | 68 |
| 4-14 | ติดตั้งโอริงเข้ากับแท่นกดด้านล่าง..... | 68 |
| 4-15 | ใช้หัวแรงเจาะถุงยางเพื่อให้เป็นรูยึดสกรู..... | 69 |
| 4-16 | ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านล่าง..... | 69 |
| 4-17 | สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน..... | 70 |
| 4-18 | ติดถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน..... | 70 |
| 4-19 | ติดตั้งโอริงเข้ากับแท่นกดด้านบน..... | 71 |
| 4-20 | ใช้หัวแรงเจาะถุงยางเพื่อให้เป็นรูยึดสกรู..... | 71 |
| 4-21 | ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านบน..... | 72 |
| 4-22 | ติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านเข้ากับอุปกรณ์..... | 73 |
| 4-23 | ดึงถุงยางตามระยะที่ได้กำหนดไว้..... | 73 |
| 4-24 | เซลล์ทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ..... | 74 |
| 4-25 | การใช้น้ำกำจัดฟองอากาศในระบบและเซลล์ทดสอบ..... | 75 |
| 4-26 | ภาพตัดของกระบอกอัดฉีดดินเหลว..... | 76 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4-27 บรรจูดินเข้าสู่กระบอบกดินจากเครื่องปั้นดิน..... | 76 |
| 4-28 ปล่อยน้ำในระบบและดันดินออกจากท่อเพื่อไล่อากาศตกค้าง..... | 77 |
| 4-29 ติดตั้งกระบอบดันดินเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ..... | 77 |
| 4-30 ติดตั้งกระบอบดันดินเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ..... | 78 |
| 4-31 ทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกล็อคความสูงของตัวอย่างไว้..... | 79 |
| 4-32 ดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบจนมีดินและน้ำส่วนเกินออกมา..... | 79 |
| 4-33 ซิลท่อทองแดงเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึม..... | 79 |
| 4-34 ตัวอย่างดินเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในเครื่องทดสอบและพร้อมจะดำเนินการในขั้นตอน ต่อไป..... | 80 |
| 4-35 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ..... | 81 |
| 4-36 เครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ..... | 81 |
| 4-37 คอมพิวเตอร์และชุดควบคุมเครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียด ในระนาบ..... | 82 |
| 4-38 เครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... | 83 |
| 4-39 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นแรก..... | 86 |
| 4-40 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นสองและขั้นตอนทดสอบแรงเฉือน. | 87 |
| 4-41 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นแรก..... | 87 |
| 4-42 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นสองและขั้นตอนทดสอบแรงเฉือน. | 88 |
| 4-43 ขนาดของอุปกรณ์และตำแหน่งในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ..... | 88 |
| 4-44 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง..... | 89 |
| 4-45 ระบบการทำงานของผนังด้านข้าง..... | 89 |
| 4-46 ระบบการทำงานของผนังด้านข้าง..... | 90 |
| 4-47 หลักการทำงานของกรให้แรงดัน P2..... | 90 |
| 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดัน P1 และค่าแรงดันที่วัดได้จาก คอมพิวเตอร์กับเวลา..... | 91 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

| | |
|---|-----|
| 4-49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P1 และ P2 กับระยะของการดึงถุงยาง..... | 91 |
| 4-50 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่า ความเค้นดึงและอัดสูงสุด..... | 92 |
| 4-51 แบบโพลดเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบไว้..... | 93 |
| 4-52 ติดตั้งชุดสเตรนเกจตามตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด..... | 93 |
| 4-53 โพลดเซลล์หลังจากการขึ้นรูปตามที่ได้ออกแบบไว้..... | 94 |
| 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไฟฟ้าและแรง..... | 94 |
| 4-55 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของยี่ของถุงยางกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้น ที่อ่านได้จาก โพลดเซลล์..... | 96 |
| 4-56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับ ชุดสเตรนเกจที่ถูกติดตั้งในแผ่นประกบ B..... | 99 |
| 4-57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นก่อนและหลังปรับแก้ เนื่องจากผลของอุณหภูมิ ของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง..... | 99 |
| 4-58 ตัวอย่างที่ถูกระบายเอาแรงดันน้ำส่วนเกินออกมา..... | 100 |
| 4-59 กระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน..... | 101 |
| 4-60 การให้แรงเค้นในแนวตั้งของกระบวนการสร้าง โครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน..... | 103 |
| 4-61 ความเค้นรวมในแนวตั้ง เนื่องจากกระบอกกลมนิวเมติก รวมถึงแรงดึงถุงยาง ความเค้นรวมในแนวตั้ง เนื่องจากกระบอกกลมนิวเมติก และความเค้นรวม ของแรงดันดินด้านข้างกับเวลาในกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่าง..... | 104 |
| 4-62 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลาด้วยวิธี Log-time..... | 105 |
| 4-63 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลาด้วยวิธี Root-time..... | 105 |
| 4-64 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดของอดีตและปัจจุบันด้วยวิธี Asaoka (1978)..... | 106 |
| 4-65 การทำงานของกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ..... | 108 |
| 4-66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้งกับเวลา..... | 109 |
| 4-67 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้ เครื่องทดสอบแบบ Oedometer และ Plane Strain Cell..... | 109 |
| 4-68 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง..... | 111 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

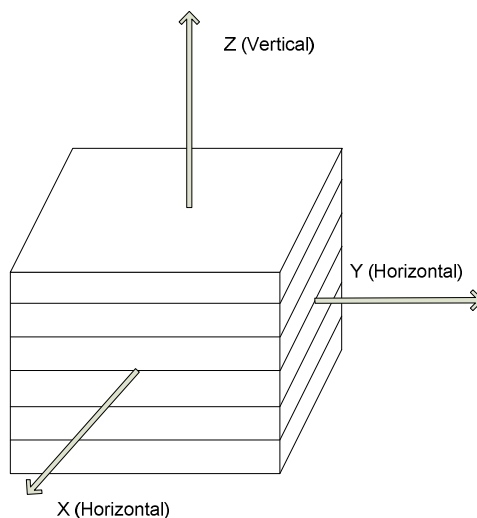
| | |
|--|-----|
| 4-69 ความสัมพันธ์ระหว่าง q กับการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง..... | 112 |
| 4-70 ความสัมพันธ์ระหว่าง q และ p' | 112 |
| 4-71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นอัดประสิทธิผลด้านข้างกับค่าความเครียดอัด ในแนวตั้ง..... | 113 |
| 4-72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลในแนวราบหารด้วยความเค้น ประสิทธิผลในแนวตั้งและความเครียดอัดในแนวตั้ง..... | 113 |
| 4-73 การเคลื่อนตัวของตำแหน่งที่ทำการระบุไว้บนผิวของตุ้งยาง..... | 114 |
| 4-74 ตัวอย่างดินที่มีรอยแยกเนื่องจากฟองอากาศ..... | 115 |
| 4-75 การทรุดตัวเนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะและปริมาณน้ำไหลออกกับเวลา..... | 117 |

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีการทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Axisymmetric triaxial compression test) นั้นได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดินรวมถึงพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) โดยสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ของการทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน นั้นจะกำหนดให้ค่าความเค้น (Stress) ในทิศทาง X และ Y มีขนาดเท่ากัน (ทิศทางของแกน ดังภาพที่ 1-1) จากนั้นก็จะให้ค่าการทรุดตัว (Displacement) ที่ด้านบนของตัวอย่างตามอัตราความเร็วที่กำหนด (Strain rate) ในทิศทาง Z ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดในทิศทาง X และ Y ก็ยังคงมีขนาดเท่ากันตลอดการทดสอบ ซึ่งเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ของการทดสอบดังกล่าวจะเป็นแบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) จากการพิจารณาสภาวะแวดล้อมของการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในงานก่อสร้าง สภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียวนั้นจะใกล้เคียงกับการก่อสร้าง เช่น งานเสาเข็ม งานออกแบบฐานรากแบบกลม งานฐานรากคานที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างไม่มาก ซึ่งเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียวนั้นไม่สามารถครอบคลุมงานก่อสร้างทั้งหมดทางด้านวิศวกรรมปฐพีที่งานก่อสร้างส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain condition)



ภาพที่ 1-1 ทิศทางของความเค้น

โดยงานก่อสร้างที่มีลักษณะเงื่อนไขของสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกับความเครียดใน ระบาย เช่น งานอุโมงค์ งานถนน งานคันดินยาว งานเขื่อน งานฐานรากตื้นที่มีอัตราส่วนความยาว ต่อความกว้างสูงมาก ๆ งานกำแพงกันดิน ดังนั้นจากเหตุผลในเรื่องของเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม ความเค้นกับความเครียดที่ไม่สอดคล้องกับงานก่อสร้างบางประเภท ประกอบกับคุณสมบัติของดิน นั้นจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropic) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาและวิจัย หาคุณสมบัติการรับกำลังของดินในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระบายเพื่อให้ตรงตาม สภาพสภาวะแวดล้อมจริงตามประเภทงานก่อสร้าง ดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นให้มากที่สุด เพื่อให้ เกิดความแม่นยำและความสอดคล้องในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างดินที่ทำการพิจารณา นอกจากข้อจำกัดในเรื่องของสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดที่บางครั้งไม่ตรงกับ สภาพจริงในสนามแล้ว การหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกนยังมีข้อบกพร่องในการ ตรวจสอบแนวแถบการเฉือน (Shear band) ซึ่งการทดสอบในบางครั้งดินวิบัติโดยไม่เกิดแนวแถบ การเฉือนซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริงในสนามเมื่อโครงสร้างดินเกิดการวิบัติโดยเฉพาะใน กรณีของกำแพงกันดิน สอดคล้องกับผลการทดสอบที่ทำโดย Alshibli and Akbas (2007) ได้ทำ การทดสอบดินเหนียวชนิดเดียวกัน พบว่า การทดสอบการรับกำลังของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัด แบบความเครียดในระบาย (Plane strain compression test) จะเห็นแนวแถบการเฉือนได้อย่าง ชัดเจน ส่วนการทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกนที่บางกรณีไม่เกิดแนวแถบการเฉือนหลัง การวิบัติของดินที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในส่วนของการทำนายพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินนั้น ก็เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อให้สามารถทำนายลักษณะและพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินที่จะส่งผลกระทบต่อตรงต่อชิ้นส่วนในโครงสร้างต่าง ๆ เช่น อาคาร ถนน และ อุโมงค์ และในโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ที่วางอยู่บนดิน ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างเป็นอย่างมากในกรณีที่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันในโครงสร้างที่ต่อเนื่องกัน (Differential settlement) ทั้งสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างใต้ดินนั้นมีความซับซ้อนมาก อันเนื่องมาจากปัจจัยในด้านขั้นตอนของงานก่อสร้างและดินยังเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่ยากจะไปกำหนดคุณสมบัติทางกล และที่สำคัญคือ พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของดินนั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยสมการแบบอีลาสติก (Elasticity model) ด้วยปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาในขั้นต้นนั้นทำให้การทำนายพฤติกรรมการเสีรูปร่างของโครงสร้างใต้ดินนั้นเป็นไปได้ยากที่จะให้การวิเคราะห์ด้วยมือหรือการใช้สูตรสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ (ในกรณีที่ไม่ได้สมมติว่าดินนั้นมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก)

ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายพฤติกรรมทรุดตัวของดินนั้นจะประกอบไปด้วยสองด้านหลัก ๆ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) และงานพัฒนาความสามารถในการคำนวณ โดยใช้เทคนิควิธีการทางตัวเลข (Numerical method) เข้ามาช่วยในการประมาณค่าคำตอบของสมการพีชคณิต การทำวิจัยและพัฒนาอย่างหลังนั้นมักจะพบน้อยมากในการทำวิจัยของสาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นสิ่งที่พบได้มากกว่า ซึ่งการที่จะให้ได้ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความถูกต้องสูงสุด ชนิดและความสามารถของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงตามพฤติกรรมของวัสดุนั้นก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญมาก การพัฒนาแบบจำลองนั้นจะต้องเริ่มต้นด้วยการทดสอบวัสดุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณส่วนผสม อุณหภูมิ ความเค้นเริ่มต้น อัตราการเสีรูปร่าง (Strain rate) และเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อค่าการรับกำลังและการเสีรูปร่างของวัสดุนั้น ๆ ที่ทำการพิจารณา แล้วนำเอาผลการทดสอบนั้นมาหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่เราสนใจของวัสดุนั้นตามชนิดของแบบจำลอง จากนั้นก็นำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการแบบจำลองแล้วค่อยนำไปใช้กับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมการเสีรูปร่างของวัสดุต่อไป ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ส่วนแบบจำลองที่นิยมใช้กับดินเหนียว เช่น Cam-Clay Model Modified

และ Cam-Clay Model ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองนั้นสร้างมาจากพื้นฐานของการทดสอบดินแบบการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Triaxial test) ซึ่งอธิบายในตอนต้นแล้วว่าไม่สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานกำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ดังนั้น ผลการศึกษาพฤติกรรมการเสียดรูปของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain compression test) จะสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานที่กล่าวมาข้างต้นได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีแนวคิดจากสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) ยังลดปัญหาความยุ่งยากของตัวสมการ และการนำไปใช้ในระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบดินภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) เช่น โหลดเซลล์ อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง และเฟรมกดตัวอย่าง
2. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่ปราศจากการรบกวน (Fully undisturbed & Remolded bangkok clay sample)
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการรับกำลังและเสียดรูปแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft bangkok clay) ภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain)
4. ศึกษาสัมประสิทธิ์ค่าแรงดันด้านข้างของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพในสภาพอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay)

สมมติฐานของการวิจัย

ในการออกแบบโครงสร้างดินนั้น นอกจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างดินแล้ว ผู้ออกแบบยังต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเสียดรูปและแนวแถบการเฉือนของโครงสร้างนั้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงาน กำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมนิยมและมีการก่อสร้างมากในกรุงเทพมหานคร งานก่อสร้างทั้งสองชนิดนี้มีความอันตรายและมีความเสี่ยงสูงมาก ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สินของประชาชนที่อาศัยอยู่โดยรอบสถานที่

ก่อสร้าง ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการเสียดรูปและการวิบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินนั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยสมการแบบอีลาสติก (Elasticity model) รวมถึงคุณสมบัติของดินนั้นจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropic) ประกอบกับความซับซ้อนในกระบวนการก่อสร้าง การทำนายที่พฤติกรรมการเสียดรูปและแนวแถบการเฉือนนั้น จึงยากจะทำการคำนวณให้ถูกต้องด้วยมือหรือสูตรสำเร็จได้ ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นที่นิยมและเข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหา นี้ จากการวิเคราะห์ลักษณะสถานะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานกำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ซึ่งจะพบว่าสถานะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดเป็นแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะการรับกำลังและการเสียดรูปรวมถึงระนาบการเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft bangkok clay) ภายใต้สถานะแวดล้อมดังกล่าว เพื่อนำผลการศึกษาดังกล่าว ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) และสามารถทำนายพฤติกรรมโครงสร้างดินได้อย่างถูกต้องและแม่นยำต่อไปในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงคุณลักษณะการรับกำลังและเสียดรูปแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) ภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) ซึ่งเป็นสถานะแวดล้อมแบบความเค้นและความเครียดที่พบได้มากในการก่อสร้างงานดินทั่วไป
2. สามารถพัฒนาเครื่องมือทดสอบดินแบบรับกำลังอัดสามแกน (Triaxial test) ให้สามารถทดสอบดินภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain)
3. สามารถนำผลการศึกษาพฤติกรรมการเสียดรูปและแนวแถบการเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) ต่อไปในอนาคต

ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาค้นคว้าลักษณะการรับกำลังและเสียดรูปภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) แบบไม่ระบายน้ำ (Undrain) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบอัดตัวปกติ (Normally soft bangkok clay) โดยเครื่องมือการทดสอบที่ทำการพัฒนาและออกแบบขึ้น โดยแต่ละตัวอย่างจะผ่านกระบวนการประกอบตัวใหม่ในสถานะ K_0 -Consolidation

ที่ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง
(Stress overburden pressure)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันการทดสอบหาคุณสมบัติตัวอย่างดินมีหลายประเภทแต่ที่นิยมหาคุณสมบัติ คือ การทดสอบแบบแรงอัดสามแกนหรือ Triaxial test การทดสอบแบบนี้จะมีแรงสมมาตรในแนวแกน สภาวะแวดล้อมแบบนี้จะเหมาะกับงานประเภทเสาเข็มและฐานรากแบบกลม เป็นต้น เมื่อพูดถึงงานทั่วไปในทางวิศวกรรมปฐพีมักมีงานจำพวก อุโมงค์ ถนน เขื่อน กำแพงกันดินเป็นส่วนใหญ่ งานจำพวกนี้เป็นการเสีรูปในแนวระนาบ คือ ด้านหนึ่งจะถูกตรึงไว้ไม่ให้เกิดการเสีรูป แต่จะเสีรูปได้เพียงสองแกนในแนวระนาบเท่านั้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน เนื่องจากสภาวะแวดล้อมเป็นแบบ Plane strain ดังนั้นจึงมีผู้ทำการวิจัยพฤติกรรม การรับแรงและเสีรูปของดินในสภาวะแวดล้อมแบบ Plane strain ขึ้น

คุณลักษณะทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft bangkok clay)

พื้นที่ของกรุงเทพมหานครนั้นส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบต่ำและเป็นลักษณะชายฝั่งทะเล ชั้นดินจะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ซึ่งเกิดจากการพัดพาของน้ำและการตกตะกอนซึ่งมีคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีดังต่อไปนี้ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ มีค่าปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติประมาณร้อยละ 76-84 ค่าขีดจำกัดของเหลวประมาณร้อยละ 103 ค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นเท่ากับ 2.2 และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 2.68 คุณสมบัติเบื้องต้นอื่น ๆ ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพดังตารางที่ 2-1 และตารางที่ 2-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-1 ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
(Uddin, Balasubramianiam & Bregado, 1997)

| คุณสมบัติของดิน | ค่าของคุณลักษณะ |
|---|-----------------|
| ปริมาณน้ำในมวลดิน W (%) | 76-84 |
| ขีดจำกัดของเหลว LL (%) | 103 |
| ขีดจำกัดพลาสติก PL (%) | 43 |
| ดัชนีพลาสติก PI (%) | 60 |
| ดัชนีของเหลว LI | 0.62 |
| การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain size distribution) | |
| ดินเหนียว (%) | 69 |
| ดินทรายแป้ง (%) | 28 |
| ทราย (%) | 3 |
| หน่วยน้ำหนักรวม γ_t (kN/ m ³) | 14.3 |
| หน่วยน้ำหนักแห้ง γ_d (kN/ m ³) | 7.4 |

ตารางที่ 2-2 ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Uddin et al., 1997)

| คุณสมบัติของดิน | ค่าของคุณลักษณะ |
|--|-----------------|
| ความเป็นกรดต่าง pH (อัตราส่วนดินกับน้ำเท่ากับ 1 : 1) | 6.1 |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, cec) (meq/ น้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) | 28.2 |
| ประจุบวกแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation, ec) | |
| Na ⁺ (meq/ น้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) | 3.62 |
| K ⁺ (meq/ น้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) | 1.99 |
| Ca ⁺ (meq/ น้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) | 6.78 |
| Mg ⁺ (meq/ น้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) | 6.2 |
| ปริมาณสารละลายเกลือ (meq/l) | 8.7 |
| ประจุบวกของน้ำในโพรง | |
| Na ⁺ (meq/l) | 3.22 |

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

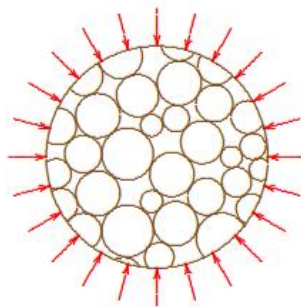
| คุณสมบัติของดิน | ค่าของคุณลักษณะ |
|----------------------------|-----------------|
| K ⁺ (meq/ l) | 0.34 |
| Ca ⁺ (meq/ l) | 6.98 |
| Mg ⁺ (meq/ l) | 10.05 |
| ความต้านทานไฟฟ้า (ohm/ cm) | 2.29 |
| Organic carbon (%) | 2.87 |
| Organic matter (%) | 5.6 |

หลักการของความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

จากการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินต่าง ๆ ค่าความเค้นประสิทธิผล (σ') นั้นได้ถูกอธิบายโดยนิยามของ Terzaghi (1925) และนิยามนี้เป็นจริงเสมอมา โดยความเค้น (σ) ที่มีค่ามากจะต้องถูกพิจารณาความเค้นประสิทธิผลด้วย ความเค้นเปรียบเสมือนแรงกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัสรอบ ๆ ของวัตถุ ดังภาพที่ 2-1 เมื่อเกิดแรงกระทำดังกล่าวแรงนี้จะส่งผ่านไปยังโครงสร้างอื่น ๆ ที่อยู่ในดินซึ่งประกอบไปด้วยเม็ดดินและช่องว่าง ในที่นี้ช่องว่างคือน้ำเมื่อน้ำถูกแรงกระทำก็จะเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ทำให้ส่วนของมวลดินนี้ถูกน้ำและเม็ดดินเป็นตัวรับกำลัง ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าความเค้นประสิทธิผลต้องนำแรงดันน้ำส่วนเกินมาหักลบออกดังสมการ

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-1)$$

สมการนี้ถูกยอมรับและได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงปฏิบัติว่าเป็นจริงเสมอสำหรับดินทุกชนิด ณ ที่ความเค้นต่าง ๆ และเป็นที่ยอมรับได้ว่าความหมายของความเค้นประสิทธิผลนั้นไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตามนิยาม Terzaghi หลาย ๆ งานวิจัยได้นำทฤษฎีดังกล่าวไปปรับปรุงเพื่อที่สามารถใช้ในช่วงความเค้นที่มากขึ้นรวมถึงใช้กับดินที่มีคุณลักษณะตั้งแต่ดินที่มีความอ่อนไปจนถึงแข็งมาก

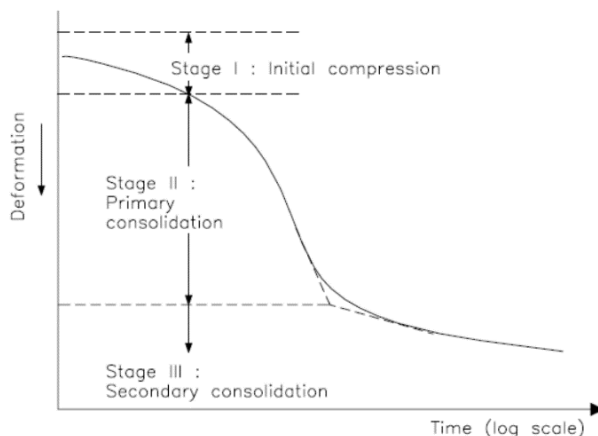


ภาพที่ 2-1 ทิศทางความเค้นกระทำต่อมวลดิน (Terzaghi, 1925)

การยุบอัดตัว (Compressibility)

การทรุดตัว หมายถึง การยุบตัวลงในแนวดิ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) เป็นการทรุดตัวเนื่องจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการรับน้ำหนักหรือมีแรงมากระทำ
2. การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement) ในช่วงการยุบอัดตัวครั้งแรก (Primary consolidation) จะเกิดขึ้นหลังจากการทรุดตัวทันที และจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต้องใช้เวลาที่ยาวนานจนกว่าจะสิ้นสุดการทรุดตัว เกิดจากการลดลงของปริมาตรของดินเมื่อน้ำไหลออกมาจากมวลดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวซึ่งยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยมาก อาจต้องใช้เวลาหลายปี
3. การทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary settlement) จะเป็นการทรุดตัวอันเนื่องจากการคืบ (Creep) หรือคุณสมบัติพลาสติกของดินภายใต้การรับแรง เกิดหลังจากการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวของดินสิ้นสุด



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของดินกับเวลา (Terzaghi, 1925)

สำหรับดินทรายหรือชั้นดินที่น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย อาจจะพิจารณาได้ว่าการทรุดตัวจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้าง สำหรับดินเหนียว น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก การยุบอัดตัวของดินประเภทนี้ จึงเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน

1. การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement)

การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) คือ การที่ดินมีการระบายน้ำออกเมื่อตัวอย่างดินมีหน่วยแรงกระทำซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างดินเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการยุบตัวของดิน (Consolidation settlement) สาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวเพราะเมื่อน้ำที่อยู่ภายในชั้นดินไหลซึมออกมาจะทำให้แรงดันน้ำและปริมาตรของดินลดลงส่งผลให้เกิดการทรุดตัว การทรุดลักษณะนี้จะเกิดหลังจากการทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) และจะเกิดในชั้นดินที่มีน้ำไหลซึมผ่านได้ช้า เช่น ดินเหนียว เป็นต้น

เราใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi ซึ่งสามารถหาได้ทั้งค่าการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวแบบคายน้ำ โดยพิจารณาการไหลของน้ำในทิศทางเดียว (One-Dimensional consolidation) มีสมมติฐานดังนี้

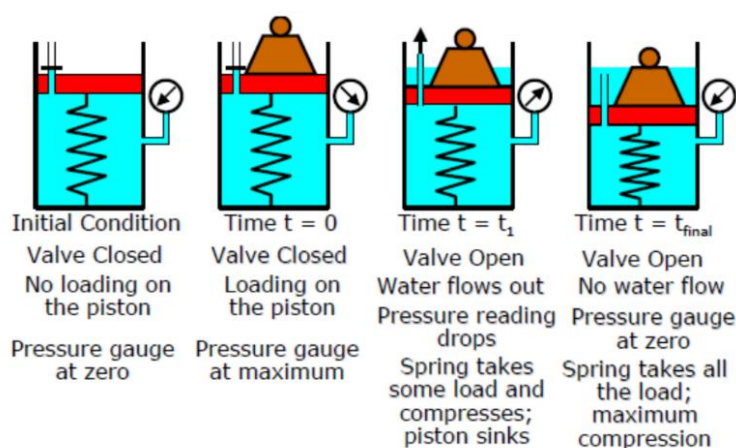
- 1.1 ดินเหนียวทั้งชั้นเป็นดินที่มีเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้น (Homogeneous)
- 1.2 ดินเหนียวอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (100% Saturation)
- 1.3 การไหลเกิดขึ้นในทิศทางเดียวเท่านั้น คือ แนวตั้ง
- 1.4 การไหลแบบ Laminar flow ดังนั้น Darcy's law และ Continuity equation

ของการไหลของน้ำผ่านมวลดินสามารถใช้ได้

$$1.5 \text{ ระหว่างเกิดการทรุดตัวหรืออัดตัวคายน้ำ ค่า } k \text{ และ } m_v = \frac{a_v}{(1+e)} \text{ คงที่}$$

“Low Strain Consolidation”

1.6 การทรุดตัวของมวลดินเกิดจากการไหลออกของน้ำในมวลดินเท่านั้น โดยเนื้อดินหรือเม็ดดินและน้ำจะเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกดอัดได้ (Incompressibility)



ภาพที่ 2-3 แบบจำลองของสปริงที่ใช้อธิบายการยุบตัวของดิน (Terzaghi, 1925)

จากภาพที่ 2-3 สามารถอธิบายการยุบตัวของดิน Terzaghi ได้สรุปไว้ว่า โครงสร้างดินเปรียบได้เสมือนสปริงภายใต้แรงเค้นกระทำ (σ) เมื่อถูกแรงเค้นกระทำกับตัวอย่างดินอิมตัวในชั้นแรก แรงเค้นจะส่งถ่ายไปยังส่วนที่เป็นของเหลวในมวลดิน ในที่นี้คือ น้ำ ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในมวลดินจะค่อย ๆ ถูกระบายออก ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินค่อย ๆ ลดลง แรงเค้นจะถูกถ่ายไปยังเม็ดดิน และเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งแรงดันน้ำส่วนเกินเท่ากับศูนย์ แรงเค้นทั้งหมดจะถูกถ่ายไปยังเม็ดดินทั้งหมด เรียกสถานะนี้ว่า จุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแบบปฐมภูมิ (Primary consolidation stage)

2. การทรุดตัวเนื่องจากการใช้แรงดันลบ (Vacuum Consolidation)

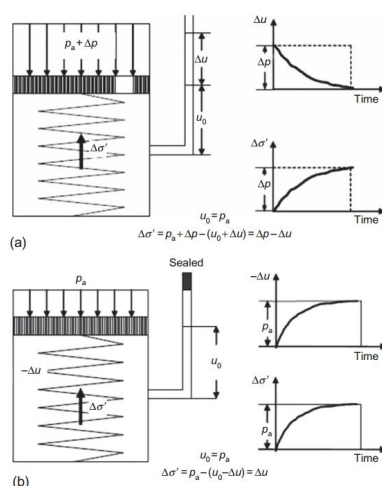
การใช้แรงดันลบ (Vacuum) กระบวนการนี้จะแตกต่างจากการอัดตัวคายน้ำ คือ ไม่ได้ให้แรงที่ผิวของดินเพื่อบีบอัดดินเพื่อให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินออกมา แต่จะใช้แรงดันที่เป็นลบดึงน้ำในดินออกมาแทนและมีการป้องกันไม่ให้แรงดันลบนี้สูญเสียบนทางผิวดินโดยการใช้ผ้าคลุมบริเวณที่ทำการก่อสร้าง และยังคงติดตั้งแผ่นยูรีเทน สำหรับการระบายน้ำในแนวตั้ง (PVDs) ไว้ได้ แผ่นคลุม สำหรับการส่งผ่านแรงดันลบเข้าไปในดินและเป็นทางเดินของน้ำอีกด้วย แผ่นดังกล่าวนี้

จะมีแผ่นตัวกรองหุ้มอีกชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ดินไหลเข้าสู่ระบบ (Kjellman, 1952) แรงดันลบที่ใช้ในระบบดังกล่าวจะใช้แรงดันที่ 90 kPa สำหรับดินเหนียวอ่อนและ 70-80 kPa สำหรับดินทั่วไป หรือใช้เป็นค่าตั้งต้นในการออกแบบ (Chu, Yan, & Indraratna, 2008) การใช้แรงดันลบกับตัวอย่างดินและการใช้โหลดในกระบวนการอัดตัวคาน้ำได้ถูกอธิบายไว้ในรูปแบบของสปริง ดังภาพที่ 2-4 เมื่อต้องการทราบค่าความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-2

$$\sigma' = \eta \times \sigma_a \quad (2-2)$$

ค่าความเค้นประสิทธิผล σ' จะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ σ_a (ประมาณ 100 kPa) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันลบที่ใช้ในการออกแบบ η มีค่าเท่ากับ 0.7-0.8 ของความดันบรรยากาศ (Chu et al., 2008)

ข้อเสียของการทรุดตัวแบบให้โหลด คือ เมื่อให้โหลดหรือทำการก่อสร้างไปแล้ว ระดับของดินถมยังคงเปลี่ยนแปลงไปตลอดรวมถึงยากที่จะกำหนดระดับของดินดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ข้อดีของการใช้แรงดันที่เป็นลบนั้นสามารถหลีกเลี่ยงการให้น้ำหนักแก่ดินหรือถมดินเพื่อให้เกิดการทรุดตัวทำให้การก่อสร้างในส่วนอื่น ๆ ล่าช้าและไม่สะดวก รวมถึงทำการก่อสร้างในขั้นตอนต่อไปได้โดยไม่ต้องรื้อถอนอุปกรณ์ และที่สำคัญไม่ต้องปรับปรุงดินโดยใช้สารเคมีเป็นส่วนผสม ส่งผลให้ไม่เกิดการปนเปื้อนของดินรวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณก่อสร้าง วิธีนี้มักถูกใช้ในดินเหนียวอ่อนที่มีการตกตะกอนหรือประกอบตัวใหม่ ((Bergado, Chai, Miura, & Balasubramaniam, 1998) (Tang & Shang, 2000) (Chu et al., 2008) (Chai, Hong, & Shen, 2008) (Saowapakpiboon, 2010))

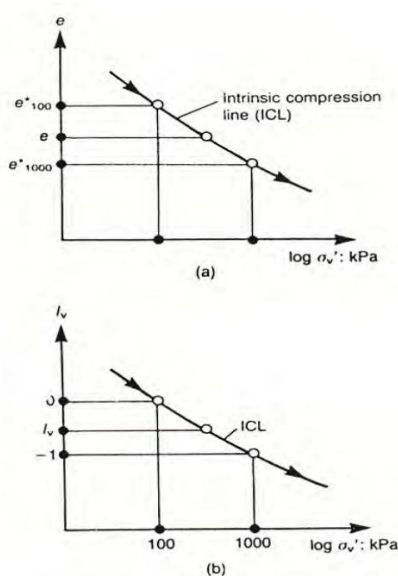


ภาพที่ 2-4 แบบจำลองการอัดตัวคาน้ำโดยใช้สปริง (a) ใช้ระบบให้น้ำหนักกดทับ (b) ใช้ระบบให้แรงดันลบ (Chu & Yan, 2005)

นิยามของดินที่มีการประกอบตัวใหม่ (Reconstituted clay) และคุณสมบัติของดินเนื้อแท้ (Intrinsic properties) และดัชนีช่องว่าง (Void index)

ดินเหนียวอ่อนที่มีการประกอบตัวใหม่ (Reconstituted clay) หมายถึง ดินเหนียวอ่อนที่ถูกผสมด้วยปริมาณน้ำที่มีค่ามากกว่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit) ถึง 1.5 เท่าของขีดจำกัดของเหลว แล้วทำการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ (Burland, 1990) โดยเทอมของ Intrinsic จะถูกใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่ทำการประกอบตัวใหม่ แนวคิดนี้ คือ การใช้คุณสมบัติทางเคมีของน้ำให้เหมือนกับแรงดันน้ำ (Pore water) และคุณสมบัติเนื้อแท้หรือคุณสมบัติที่มีมาแต่เดิม (Inherent properties) ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะทางธรรมชาติของดินนั้น ๆ (Burland, 1990)

เส้นโค้งการอัดตัว (Compression curve) ดังภาพที่ 2-5 ได้นำแสดงรูปแบบการอัดตัวของดินจากหลายสถานที่ โดยแต่ละสถานที่จะทำการประกอบตัวใหม่ (Reconstituted) โดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 1.5 เท่าของขีดจำกัดของเหลว จากภาพที่ 2-5(a) ได้นำแสดงรูปแบบการอัดตัวโดยให้ค่า e^*_{100} และ e^*_{1000} เป็นค่าอัตราส่วนช่องว่าง ที่ความเค้นในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับ 100 kPa. และ 1,000 kPa. ดัชนีการอัดตัวของดินที่ทำการประกอบตัวใหม่ (Intrinsic compression index, C_c^*) หาได้จาก $e^*_{100} - e^*_{1000}$ ซึ่งนิยามโดย Terzaghi โดยให้ e^*_{100} และ C_c^* เป็นค่าคงที่สำหรับการอัดตัวได้ของดินที่ทำการประกอบตัวใหม่



ภาพที่ 2-5 การใช้ I_v ในการสร้างสมการมาตรฐานจากรูปแบบการอัดตัวของดินที่ประกอบตัวใหม่ (Burland, 1990)

จากรูปแบบการอัดตัวในภาพที่ 2-5 อาจจะสามารถสร้างเป็นสมการมาตรฐานโดยกำหนดให้ e^*_{100} และ e^*_{1000} เป็นค่าคงที่จะได้พารามิเตอร์ตัวหนึ่งเรียกว่าค่าดัชนีช่องว่าง (Void index, I_v) มีค่าเท่ากับ

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} \quad (2-3)$$

เส้นโค้งในภาพที่ 2-5(a) อาจเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ภาพที่ 2-5 (b) โดย I_v จะหาได้จากสมการที่ 2-3 เมื่อ $e = e^*_{100}$ ค่า I_v จะเป็น 0 และเมื่อ $e = e^*_{1000}$ ค่า I_v ตัวเลขนี้จะเป็นตัวชี้วัดสถานะและรูปแบบการอัดตัวของดินในขณะนั้น กล่าวคือ เมื่อค่า I_v น้อยกว่า 0 สถานะของดินจะเป็นแบบอัดแน่น (Compact) ในทางกลับกันเมื่อค่า I_v เท่ากับ -1 สถานะของดินจะเป็นแบบหลวม (Loose) สังเกตได้ว่าค่า I_v มีความคล้ายคลึงกับค่า LI จากสมการดังต่อไปนี้

$$LI = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (2-4)$$

โดยค่าดัชนีช่องว่าง I_v เป็นเทอมที่วัดจากคุณสมบัติทางกลศาสตร์หาได้จากการทดลองการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ส่วน LI เป็นคุณสมบัติทางดัชนี (Index) ซึ่งอยู่ในเทอมประสบการณ์ (Empirical)

1. Intrinsic Compression Line

จากภาพที่ 2-6 มีตัวอย่างที่ใช้ในการพิจารณาจากดิน 3 ชนิด ด้วยกัน คือ Argile plastique, London clay และ Magnus clay ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ครอบคลุมช่วงของค่า LL และค่าความเค้นประสิทธิผล เส้นตรงเส้นหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นใหม่เรียกว่า ICL (Intrinsic compression line) ตำแหน่งของ ICL ในภาพที่ 2-6 จะเสนอยู่ในรูปของสมการยกกำลังสามที่มีค่าดังต่อไปนี้

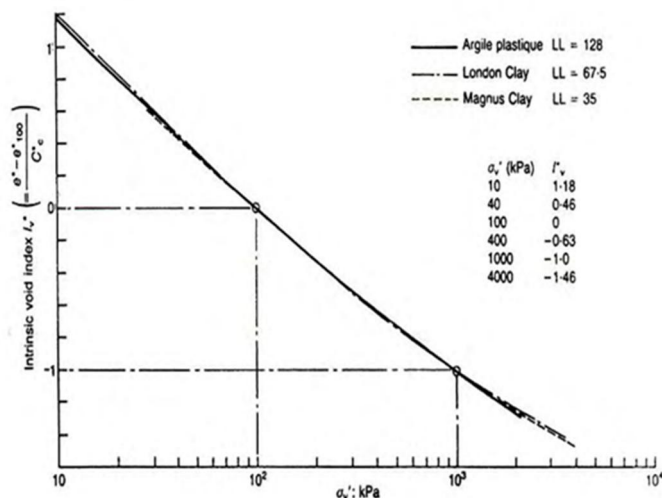
$$L_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (2-5)$$

$$x = \log \sigma'_v$$

เมื่อ σ'_v = ความเค้นประสิทธิผล

ICL อาจวัดได้โดยตรงหรือหาได้จาก e^*_{100} และ C^*_c ซึ่งได้จากการทดลองและถ้าพล็อตค่าระหว่าง e และ $\log \sigma'_v$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$e = I_v C^*_c + e^*_{100} \quad (2-6)$$



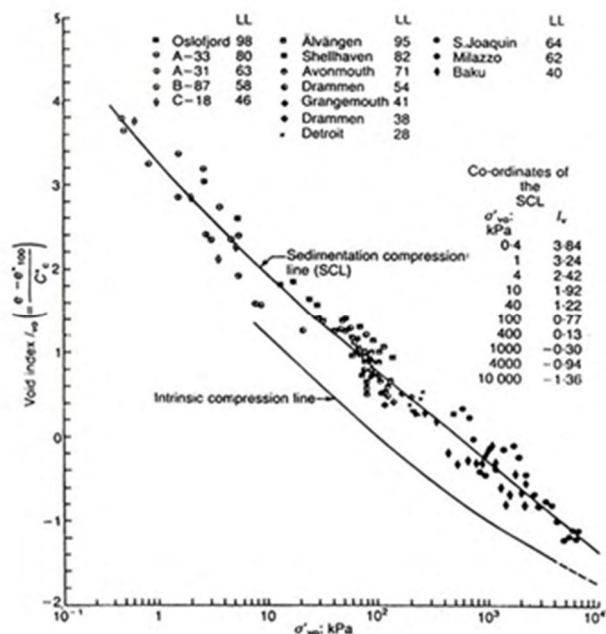
ภาพที่ 2-6 การสร้างสมการของ Intrinsic compression line (ICL) จากเส้นโค้งการอัดตัวของดินที่ทำการประกอบตัวใหม่ (Burland, 1990)

2. การเปรียบเทียบระหว่างการอัดตัวได้ของดินที่ตกตะกอนตามธรรมชาติ (Compressibility of sedimentation) และการอัดตัวได้ของดินที่ทำการประกอบตัวใหม่ (Compressibility of reconstituted)

ค่าพารามิเตอร์ I_v ที่ได้จากภาพที่ 2-7 สามารถใช้เปรียบเทียบการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนธรรมชาติและดินเหนียวอ่อนที่ทำการประกอบตัวใหม่ พิจารณาส่วนที่มีการอัดตัวคายน้ำตามปกติโดยอัตราส่วนช่องว่าง e_0 ซึ่งอยู่ภายใต้ความเค้นประสิทธิผล ค่าดัชนีช่องว่างหาได้โดยสมการที่ 2-7

$$I_{v0} = \frac{e + e_{100}^*}{C_c^*} \quad (2-7)$$

e_{100}^* และ C_c^* หาได้จากการทดลองการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) หรือหาได้จากสมการที่ 2-6 และสมการที่ 2-7 การพิจารณาการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติและดินที่มีการอัดตัวจากการประกอบตัวใหม่ได้ Skempton (1944) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 2-7 เส้นตรงนี้ถูกสร้างจากผลของการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติซึ่งพล็อตจากค่า I_{v0} และ $\log \sigma'_v$ เรียกเส้นตรงเส้นนี้ว่า Sedimentation compression line (SCL)



ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_v และ $\log \sigma'_v$ (Burland, 1990)

จากภาพที่ 2-7 สังเกตได้ว่าในช่วงตั้งแต่ค่า σ'_v เท่ากับ 100-1,000 kPa. เส้นตรงจากการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ (SCL) และเส้นตรงจากการอัดตัวเนื่องจากการประกอบตัวใหม่ (ICL) มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่ขนานกัน ซึ่งค่าความเค้นประสิทธิผลของดินที่มีการตกตะกอนตามธรรมชาติจะมีค่าสูงกว่าความเค้นประสิทธิผลของดินที่มีการประกอบตัวใหม่ประมาณ 5 เท่า ซึ่งเกิดจากความแตกต่างในเรื่อง โครงสร้าง (Fabric) ของเม็ดดินและการยึดเหนี่ยวกัน (Bonding) ระหว่างเม็ดดิน โดยผลกระทบอันเกี่ยวเนื่องมาจากโครงสร้างดิน ได้ถูกทำการศึกษาครั้งแรก โดย Terzaghi (1925) และมีข้อสนับสนุน Skempton (1944) พบว่าหลังจากที่ความดันเพิ่มขึ้นมากกว่า 1,000 kPa. แนวโน้มของ ICL และ SCL จะเข้ามาบรรจบกัน

การแปลงค่าตัวแปล (Normalization)

การแปลงค่าตัวแปลนั้นปกติแล้วมักจะนิยมแปลงค่าในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำคั้งนี้ การทดสอบแรงสามแกนแบบอัด การทดสอบแรงสามแกนแบบขยายตัว การทดสอบในสภาวะความเครียดในระนาบแบบอัด การทดสอบในสภาวะความเครียดในระนาบแบบขยายตัว และการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบตรง จากภาพที่ 2-8 ได้แสดงผลของการแปลง

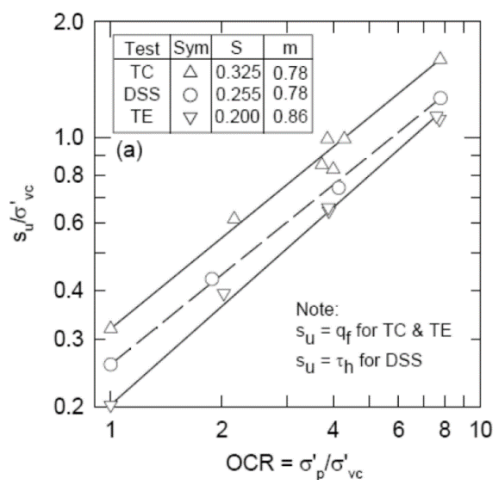
ค่าการทดสอบดังกล่าวด้วยโปรแกรม AGS โดยใช้ดินเหนียว และยังสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของสมการดังนี้

$$s_u / \sigma'_{vc} = S(\text{OCR})^m \quad (2-8)$$

เมื่อ S คือ อัตราส่วนกำลังของดินเหนียวในสถานะอัดตัวปกติ

m คือ สัมประสิทธิ์ค่ายกกำลังของสมการ

การทดสอบทั้งสามแบบจะแตกต่างกันเมื่อทำการทดสอบจากการทดลองในดินธรรมชาติที่ไม่มีความเท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic) ค่าของ K_0 แทบไม่มีความสำคัญและเป็นค่าที่อยู่ในอุดมคติเท่านั้น ในขณะที่ใช้ดินที่มีความเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) แล้วทำการทดลองการขุดอัดตัวในสถานะอัดตัวเกินปกติ นั้นนักวิจัยเชื่อว่าแทบไม่มีความแตกต่างกันในด้านของกำลังแบบไม่ระบายน้ำ สำหรับการขุดอัดตัวในสถานะอัดตัวปกติ เมื่ออยู่บนเส้นจุดครากค่าของ K_0 ในช่วงที่ทำการเงื่อนไขเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ((Belviso, Claustre, & Marty, 2001) (Ladd & Varallyay, 1965))



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำและค่า OCR โดยใช้โปรแกรม AGS (Koutsoftas & Ladd, 1985)

ความเค้นเฉือน (Shear stress)

ความเค้นเฉือน คือ อัตราส่วนของแรงเฉือน (Shear force, F) ต่อพื้นที่ (Area, A) ในแนวขนานกับแรงเฉือนนั้น โดยจะแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ที่มีสภาพใกล้เคียงกับดินตามธรรมชาติมากที่สุด โดยเฉพาะงานเกี่ยวกับเสาเข็ม ฐานรากแบบกลม เป็นต้น เพราะสามารถปรับความดันที่บริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Confining pressure) ให้มีสภาพใกล้เคียงกับดินตามธรรมชาติที่อยู่ลึกกลงไปจากผิวดินและสามารถควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลเข้าออกจากมวลดินได้สะดวก สามารถหาได้ทั้งความเค้นรวม (Total stress) และความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) ของตัวอย่างดิน หลักการของ Triaxial test แตกต่างไปจาก Direct shear test ในการหาค่า Soil strength parameters ดังนี้ คือ 1) Triaxial test จะมีแรงดันตั้งฉากกับผิวของตัวอย่างดินเท่านั้น โดยที่ส่วนมากแรงดันด้านข้างจะคงที่ แล้วเพิ่มแรงดันด้านบนจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ 2) ระบายหรือแนวการวิบัติของตัวอย่างเป็นไปโดยธรรมชาติ ไม่สามารถกำหนดแนวการวิบัติได้ ดังเช่นที่เกิดขึ้นใน Direct shear test และ 3) สามารถควบคุมน้ำทั้งแรงดันและการไหลของตัวอย่างดินทำได้สมบูรณ์ โดยอาศัย Drainage value และ Volume change indicator

การทดสอบนี้สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1.1 CU-TEST หมายถึง การทดสอบที่มีขั้นตอนการยุบอัดตัวของตัวอย่างดิน (Consolidation) ก่อนแล้วจึงเพิ่มน้ำหนักกระทำตามแนวแกน โดยไม่ยอมให้มีการระบายน้ำ (Undrain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

1.2 CD-TEST หมายถึง การทดสอบที่มีขั้นตอนการอัดตัวของตัวอย่างดิน (Consolidation) ก่อนแล้วจึงเพิ่มน้ำหนักกระทำตามแนวแกน โดยยอมให้มีการระบายน้ำ (Drain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

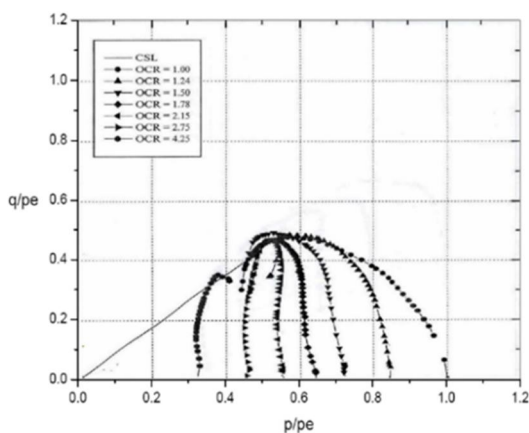
1.3 UU-TEST หมายถึง การทดสอบที่ไม่มีขั้นตอนการอัดตัวของตัวอย่างดิน (Unconsolidation) และ ไม่ยอมให้มีการระบายน้ำ (Undrain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี การทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Axisymmetric triaxial compression test) นั้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดิน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) รวมไปถึงการหา

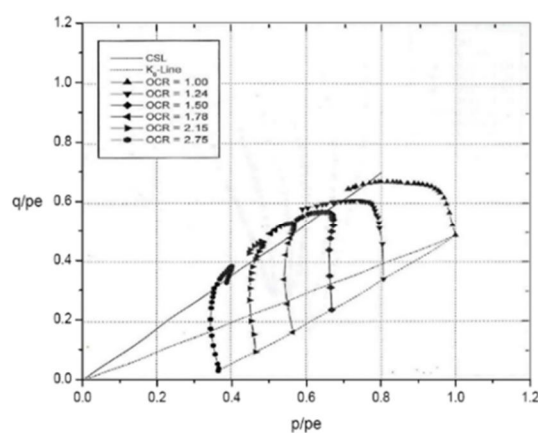
พารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ของการทดสอบค่าการรับกำลังดิน ในแบบสามแกนนั้นจะเป็นแบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) ในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อหาเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2-3 และผลการทดสอบ ดังภาพที่ 2-9

ตารางที่ 2-3 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน

| Author | Test description | | | | |
|--------------------|------------------|-----------------|---------|---------|---------------------------|
| | OCR | p_{max} (kPa) | q/p_c | p/p_c | Direction |
| Anuchit (1998) | 2.75 | 184 | 0.00 | 0.36 | 0° - 180° |
| Navaneethan (1999) | 2.75 | 184 | 0.00 | 0.36 | 180° - 360° |
| Khan (1999) | 2.00 | 140 | 0.11 | 0.50 | 0° - 360° |
| Lena (2000) | 1.60 | 150 | -0.33 | 0.63 | 0° - 360° |
| Amorndech (2001) | 10.00 | 250 | 0.00 | 0.10 | 0° - 360° |

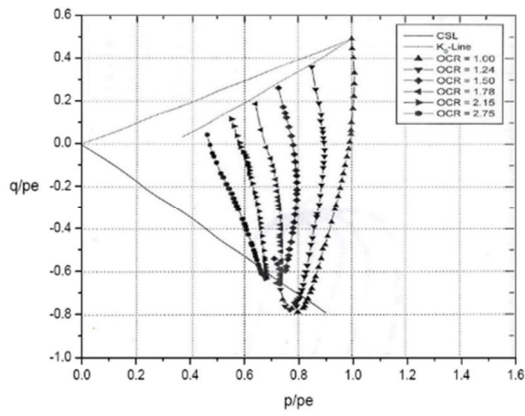


(a)

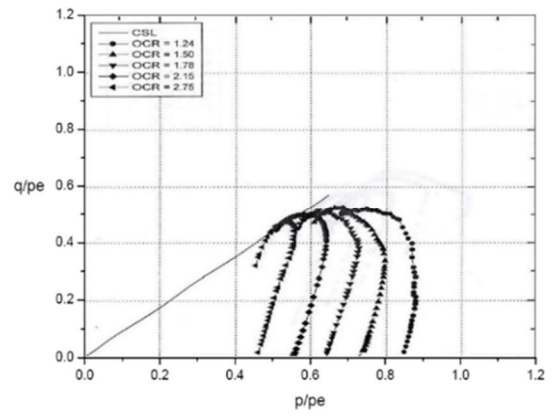


(b)

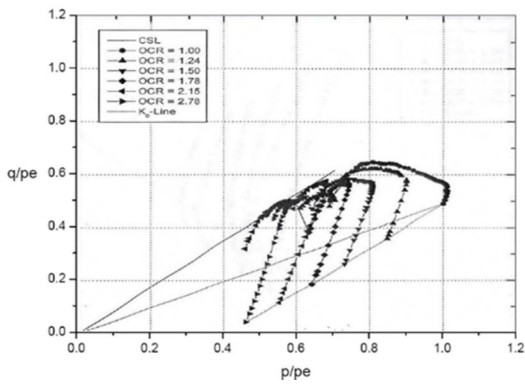
ภาพที่ 2-9 ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial - compression test) ที่ทดสอบโดย Kim (1991): (a) CIU Tests, (b) CKoUC Tests, (c) CKoUE Tests, (d) CID Tests, (e) CKoDC Tests, (f) CKoDE Tests



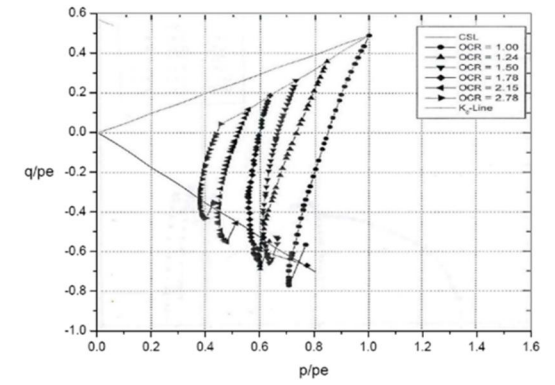
(c)



(d)

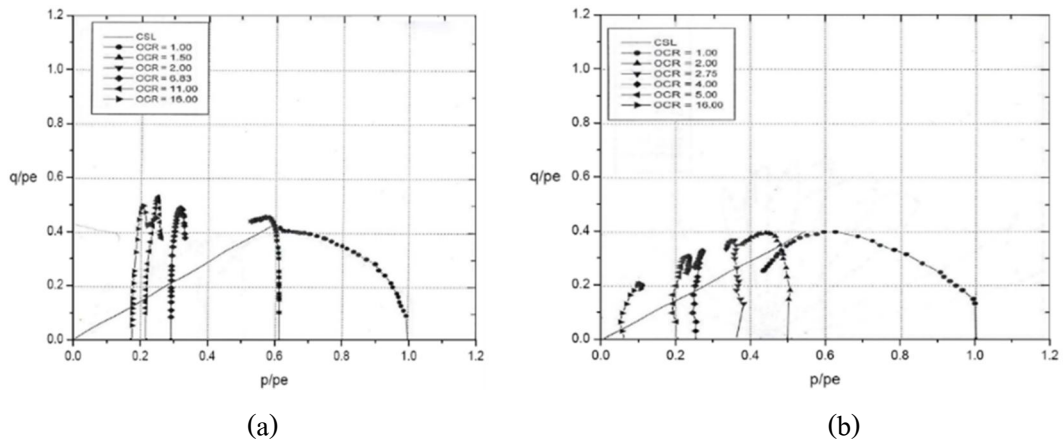


(e)

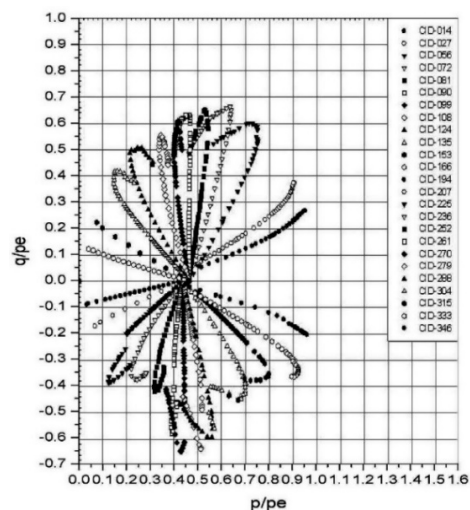


(f)

ภาพที่ 2-9 (ต่อ)



ภาพที่ 2-10 ผลการทดสอบ Normalized Stress Paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) ที่ทดสอบ โดย Gurung (1992): (a) CIP Tests, (b) CIU Tests



ภาพที่ 2-11 ผลการทดสอบ Normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) โดย CIDC Tests นั้นทดสอบโดย Anuchit (1998) และ CIDE Tests ทดสอบโดย Navanneethan (1999)

Casey (2014) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยเครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนแรงดันสูง (High pressure triaxial) (ภาพที่ 2-12) ดินที่ทดสอบจะถูกทำลายโครงสร้างก่อนประกอบตัวใหม่ (Resedimentation) ในขั้นตอนนี้ตัวอย่างดินจะถูกตากในที่ร้อนเพื่อลดความชื้นของดินแล้วนำมาบดหลังจากนั้นจึงนำดินมาผสมน้ำอีกครั้ง (ภาพที่ 2-13) แล้วให้แรงดันที่เป็นลบแก่ตัวอย่างดินนี้เพื่อไล่ฟองอากาศ (ภาพที่ 2-14) เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนดังกล่าวจึงนำเอาตัวอย่างดินนี้ไปผ่านการอัดตัวคายน้ำโดยจะใช้ค่าความเค้นในแนวตั้งเริ่มต้นที่ 30 kPa ระบบการให้แรงเค้นจะแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ที่แรงเค้นไม่เกิน 250 kPa ได้แสดงในภาพที่ 2-15 และแรงเค้นที่มากกว่า 250-10,000 kPa โดยอุปกรณ์ชิ้นนี้ถูกเรียกว่า “Pneumatic Actuator” ได้แสดงในภาพที่ 2-16 และทำการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธี “ K_0 -Consolidation” สำหรับตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) จะใช้แบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.5 มม. มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) ประมาณ 3 เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง ดินตัวอย่างจะถูกนำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรงและขนาดตามต้องการและนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยดินตัวอย่างที่จะถูกนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained triaxial test)



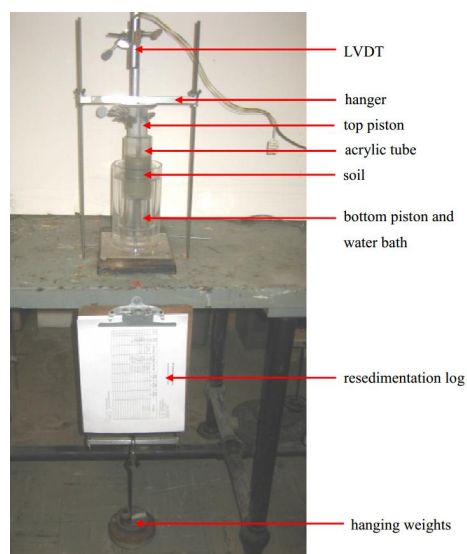
ภาพที่ 2-12 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบแรงดันสูง (Casey, 2014)



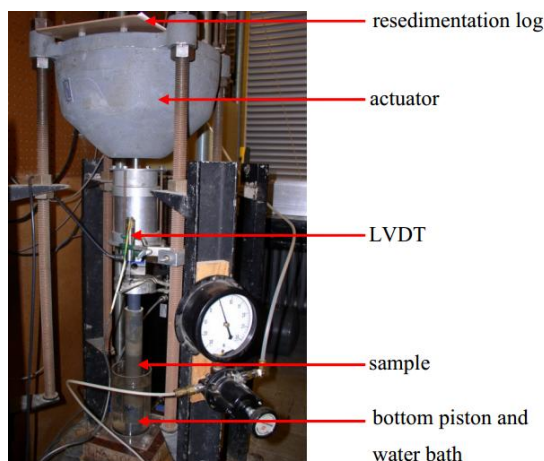
ภาพที่ 2-13 ดินที่บดละเอียดแล้วมาผสมเข้ากับน้ำ (Casey, 2014)



ภาพที่ 2-14 ให้แรงดันลบกับตัวอย่างดินเพื่อสลายฟองอากาศ (Casey, 2014)



ภาพที่ 2-15 เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้ไม่เกิน 250 kPa (Casey, 2014)



ภาพที่ 2-16 เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้สูงสุด 10,000 kPa

(Casey, 2014)

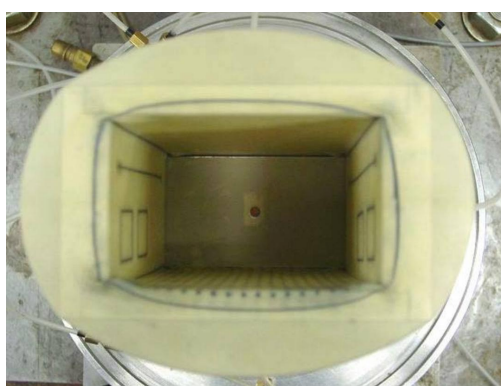
2. การทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain test)

ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี การทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Axisymmetric triaxial compression test) นั้นได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดิน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) รวมไปถึงการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยสถานะแวดล้อม (Boundary condition) ของการทดสอบค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกนนั้นจะเป็นแบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) ซึ่งไม่สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดโดยเฉพาะในงาน คั้นดิน งานกำแพง คั้นดิน และงานอุโมงค์ โดยสถานะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดของงานดังกล่าวเป็นแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) จึงได้มีการพัฒนาการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) เพื่อให้สถานะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดสอดคล้องกับงานก่อสร้างจริงมากที่สุด การทดสอบในปัจจุบันมักมีอยู่สองกลุ่มใหญ่ ๆ ที่ทำการทดสอบการรับกำลังแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบมีดังนี้

2.1 การทดสอบแบบความเครียดในระนาบของดินทราย (Plan strain test in sand)

ในอดีต Kongkitkul (2004) ได้ทดสอบดินทรายโตโยอุระ โดยใช้ขนาดตัวอย่างที่มีขนาดกว้าง 62 มม. ยาว 96 มม. และสูง 120 มม. ตัวอย่างนี้ใช้อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นที่ 0.665 และใช้ถุงยางที่มีขนาดความหนา 0.3 มม. เพื่อเป็นวัสดุแยกระหว่างตัวอย่างดินกับอุปกรณ์การทดสอบ และใช้ซิลิโคนกรีตระหว่างผิวถุงยางกับตัวอย่างลดแรงเสียดทาน แล้วจึงนำโมลเข้ามาประกอบกับชุดเครื่องมือแล้วให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุงยางที่ 20 kPa เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ใน

รูปทรงสี่เหลี่ยมตามแบบของโมล ดังภาพที่ 2-17 จากนั้นทำการ โปรมตัวอย่างลงในโมลโดยผ่านชุด ตะแกรงร่อน ดังภาพที่ 2-18 แล้วจึงทำการถอดโมลออก ทำการติดตั้งผนังด้านข้างเพื่อสร้างสภาวะ ความเครียดในระนาบอุปกรณ์วัดคุมต่าง ๆ ให้กับชุดทดสอบก่อนทำการเนียนตัวอย่าง (ภาพที่ 2-19) ในการทดสอบนี้จะใช้แรงดันลบเริ่มต้นที่ 30 kPa ในส่วนการหาความเครียดของตัวอย่างจะใช้วิธี ถ่ายภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล ใช้แรงกดในแนวตั้งเริ่มต้นเท่ากับ 50 kN และใช้ชุดเกียร์ขับเคลื่อน โดยที่ชุดเกียร์นี้ถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ (Tatsuoka, Santucci de Magistris) และใช้อัตรา การเคลื่อนที่เท่ากับร้อยละ 0.04 ต่อนาที



ภาพที่ 2-17 ประกอบโมลเข้ากับอุปกรณ์และให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุงยาง (Kongkitkul, 2004)

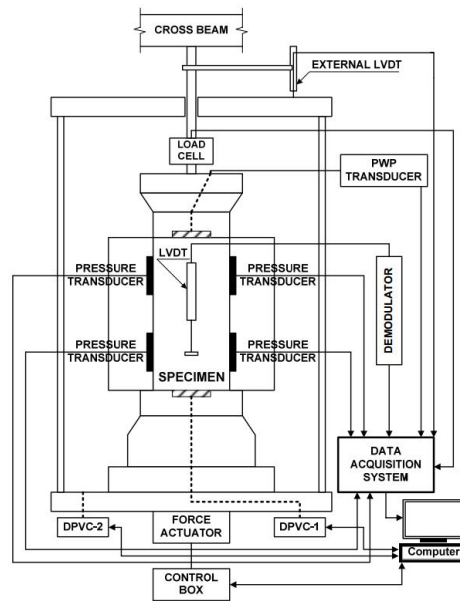


ภาพที่ 2-18 ติดตั้งตะแกรงร่อนเข้ากับด้านบนของตัวอย่าง (Kongkitkul, 2004)

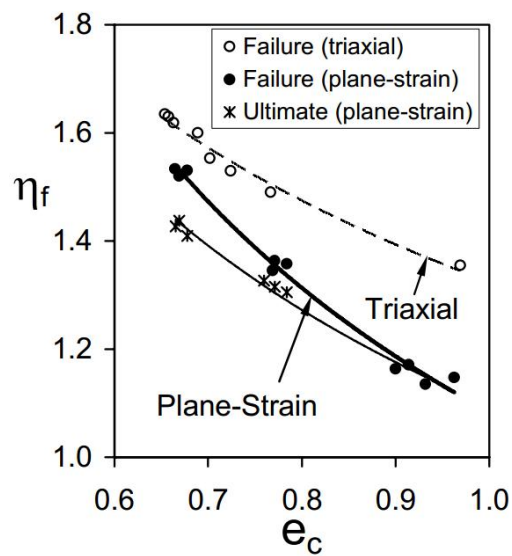


ภาพที่ 2-19 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Kongkitkul, 2004)

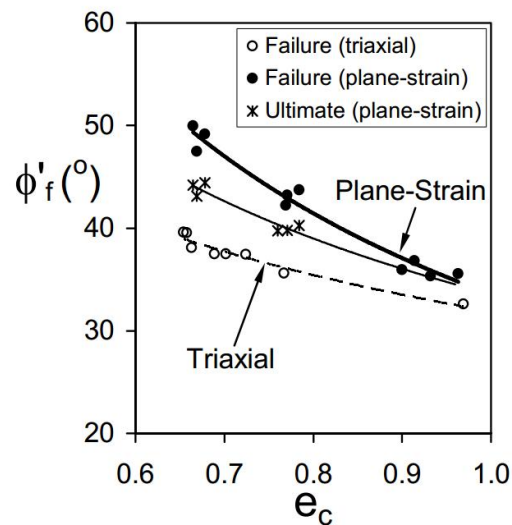
Wanatowski and Chu (2007) ได้ทำการทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะ
 แวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) โดยใช้ทราย Changi ที่มีขนาดของตัวอย่างกว้าง
 60 มม. ยาว 60 มม. และสูง 120 มม. ใช้การอัดตัวคายน้ำแบบ K_0 -Consolidation ในขั้นตอน
 การทดสอบจะทำการวัดค่าแรงดันด้านข้างของตัวอย่างดิน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันเข้า
 กับตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2-20 แล้วใช้แผ่นประกบแนบเข้ากับตัวอย่างเพื่อสร้างสภาวะแวดล้อม
 แบบความเครียดในระนาบขึ้น ในลักษณะการติดอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินแบบนี้มีข้อเสีย
 คือ จะเกิดผลการทบเนื่องจากรอยต่อของอุปกรณ์วัดแรงดันกับแผ่นประกบด้านข้างขึ้นอย่าง
 หลีกเลี่ยงไม่ได้ หลังจากประกอบแผ่นด้านข้างเสร็จสิ้นจึงทำการเขี่ยตัวอย่างในสภาวะแวดล้อม
 แบบความเครียดในระนาบแบบระบายน้ำ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของความเค้นที่
 การทดสอบแบบความเครียดในระนาบมีค่าที่น้อยกว่าการทดสอบแบบรอบแกนสมมาตรอยู่
 เล็กน้อยแต่จะมีค่าตรงกันข้ามในเทอมของค่ามุมเสียดทาน ดังภาพที่ 2-21 และภาพที่ 2-22
 ตามลำดับ



ภาพที่ 2-20 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Wanatowski & Chu, 2007)

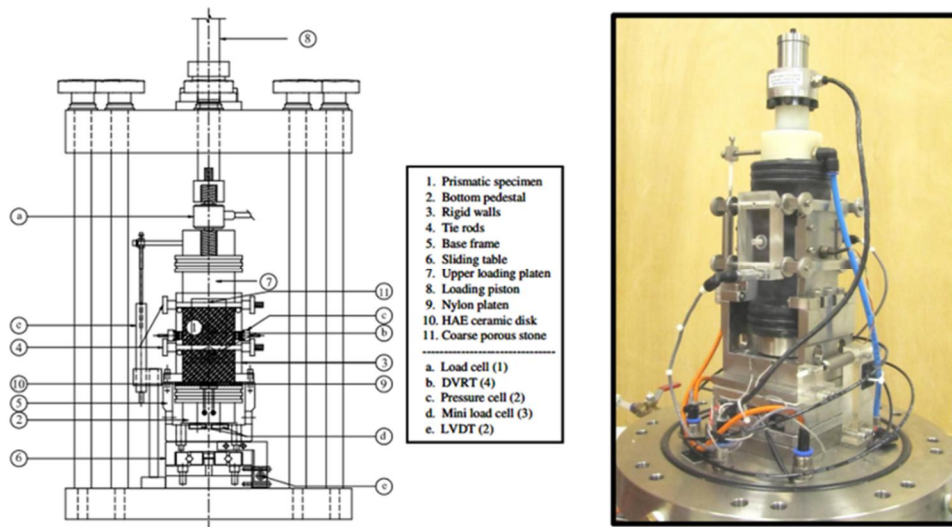


ภาพที่ 2-21 อัตราส่วนของความเค้นของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง (Wanatowski & Chu, 2007)

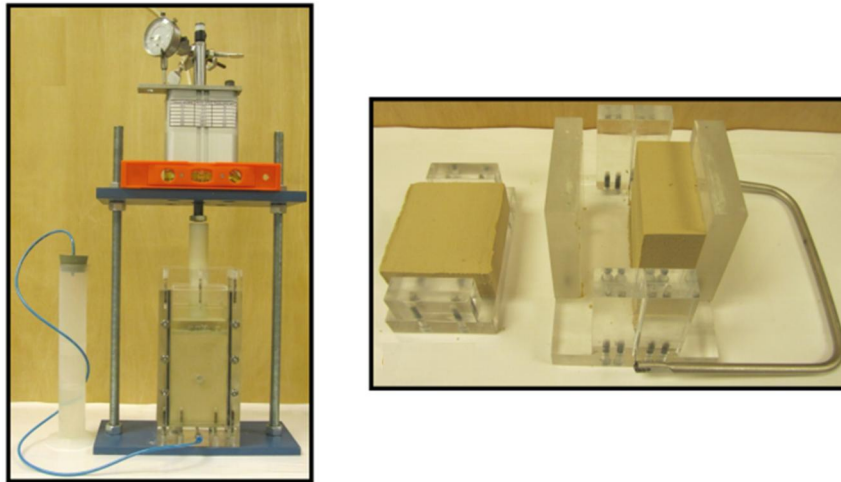


ภาพที่ 2-22 มุมเสียดทานประสิทธิผลของการทดสอบในสถานะแวดล้อมแบบความเครียด
 ในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง
 (Wanatowski & Chu, 2007)

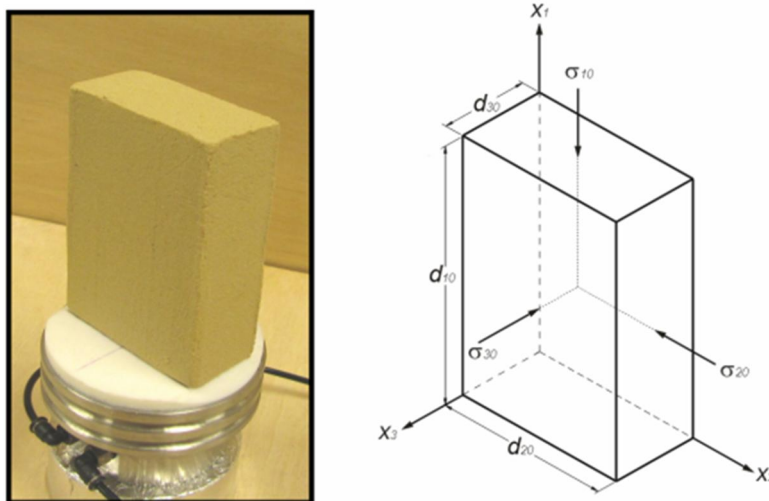
José, Laureano, and Arcesio (2012) ได้ทำการทดสอบดินในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบด้วยเครื่องทดสอบ Biaxial ดังภาพที่ 2-23 โดยใช้ดินที่เตรียมขึ้นระหว่าง Silty sand 75% และ Kaolin clay 25% แล้วทำการสร้างโครงสร้างดินโดยกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติภายนอกเครื่องทดสอบหลังจากสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำจึงทำการตัดแต่ง (Trim) ตัวอย่างดิน (ภาพที่ 2-24) เพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างกว้าง 30 มม. ยาว 60 มม. และสูง 90 มม. ดังภาพที่ 2-25 ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในลักษณะนี้ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนดินให้มากที่สุดและอีกประการหนึ่งผิวของตัวอย่างดินจะไม่สามารถแนบชิดกับผิวของแผ่นประกบได้อย่างสมบูรณ์ จึงส่งผลให้ค่าของการทดสอบในช่วงต้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้



ภาพที่ 2-23 เครื่องทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ โดยใช้เครื่องทดสอบ Biaxial (Jose et al., 2012)



ภาพที่ 2-24 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างและการตัดแต่งตัวอย่าง (Jose et al., 2012)



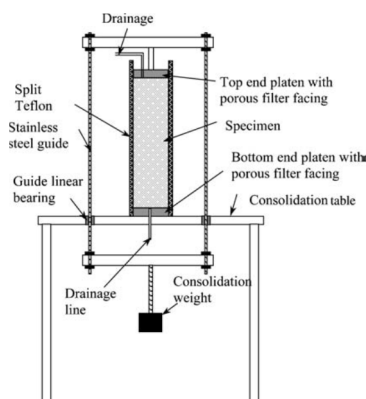
ภาพที่ 2-25 ตัวอย่างดินหลังการตัดแต่งมีขนาด 90 x 60 x 30 มม. (Jose et al., 2012)

2.2 การทดสอบแบบความเครียดในระนาบของดินเหนียว (Plan strain test in clay)

Hambly (1969) ได้ศึกษาผลกระทบของเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินเหนียว Kaolin ต่อมา Vaid and Campanella (1974) ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินที่ไม่ถูกรบกวน โดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) เปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบ (Plane strain condition) พบว่า ตัวอย่างที่ทดสอบ โดยเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบ จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) สูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนแต่ไม่ได้มีการกล่าวถึงลักษณะการวิบัติ

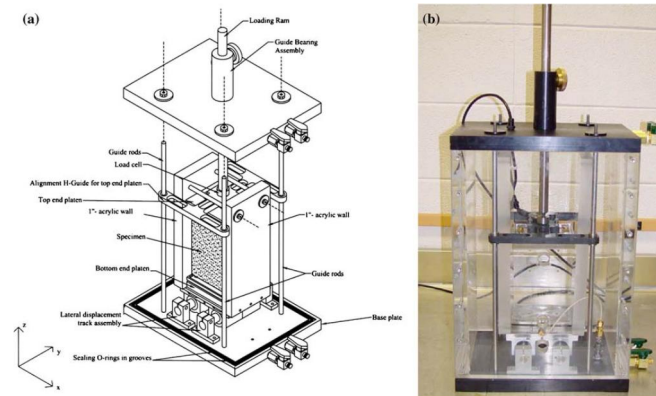
Khalid and Ibrahim (2007) ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวประกอบตัวใหม่ระหว่างดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial - test) กับดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plan strain test) เพื่อทำลายโครงสร้างดินเดิมก่อนการประกอบตัวใหม่ ดินจะถูกผสมเข้ากับน้ำที่ปริมาณความชื้น 2-2.5 เท่าของขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) Sheeran and Krizek (1971) ได้ทำการศึกษาข้อดีและข้อเสียของปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในดินเหลวประกอบตัวใหม่ได้ผล คือ ดินเหลวที่ใช้ปริมาณน้ำที่สูงจะมีข้อดีในเรื่องของการทำงานซึ่งสามารถบรรจุดินเข้าแบบได้ง่ายและสามารถไล่อากาศออกได้ง่าย อีกทั้งลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำอันเนื่องมาจากการบรรจุดินเข้าแบบ อย่างไรก็ตาม สำหรับดินเหลวที่มีปริมาณน้ำน้อยจะมีข้อดี คือ ลดเวลาการอัดตัวคายน้ำ Khalid and

Ibrahim (2007) ได้นำเอาดินเหลวไปประกอบตัวใหม่โดยผ่านการอัดตัวคายน้ำสำหรับตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) จะใช้แบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. สูง 483 มม. และแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 48 x 60 x 270 มม. สำหรับตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plan strain test) โดยแบบที่นำมาใช้ในการอัดตัวคายน้ำนั้นจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ผนังด้านข้างนั้นจะมีรูพรุนเพื่อเร่งการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดิน โดยจะใช้ค่าความเค้นในแนวตั้งที่ 180 kPa โดยระบบการให้แรงเค้นนั้นดังภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 ระบบการให้แรงเค้นในแนวตั้งเพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ภายใต้กระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Khalid & Ibrahim, 2007)

เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงดินตัวอย่างจะถูกนำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรงและขนาดตามต้องการและนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยดินตัวอย่างที่จะถูกนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plan strain test) จะทำด้วยเครื่องมือพิเศษที่มีชื่อว่า “Louisiana Plane Strain Apparatus” (Khalid & Ibrahim, 2007) ดังภาพที่ 2-27 และทำการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธี “ K_0 -Consolidation” ก่อนทำการเหน็บแบบไม่ระบายน้ำ การทำให้ตัวอย่างอิมตัวนั้นจะทำโดยการระบายน้ำ (De-aired water) ผ่านตัวอย่างดินเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสดินกับถุงยาง (Rubber membrane) สรุปผลการทดสอบดังภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-27 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ

(Khalid & Ibrahim, 2007)

| Exp. | Specimen size (mm) | e_i^a | $\sigma'_{3i}{}^b$ (kPa) | $\sigma'_{3q}{}^c$ (kPa) | $\sigma'_{1q}{}^d$ (kPa) | q_f (kPa) | EPWP _f (kPa) | ϕ'_f (deg.) | S_u^e (kPa) | S_u/σ'_{1q} | Failure mode |
|------|--------------------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| PS1 | $W = 48, L = 60,$ $H = 135$ | 1.29 | 26 | 101.5 | 251.2 | 159.1 | 31.5 | 32.5 | 79.5 | 0.316 | Shear band ($\theta_E = 59^\circ$) |
| PS2 | $W = 48, L = 60,$ $H = 129$ | 1.32 | 26 | 26 | 183.2 | 163.8 | 26 | 39.7 | 81.9 | 0.447 | Shear band ($\theta_E = 60^\circ$) |
| CTC1 | $D = 70,$ $H = 139.7$ | 1.28 | 26 | 89.3 | 181.1 | 103.5 | 51.5 | 35.5 | 51.8 | 0.286 | Diffuse bulging |
| CTC2 | $D = 70,$ $H = 133.4$ | 1.30 | 26 | 88.9 | 182.3 | 99.7 | 48.9 | 34.5 | 48.9 | 0.268 | Diffuse bulging |

^a Initial void ratio

^b Effective confining pressure at the beginning of the consolidation phase

^c Effective confining pressure at the end of the consolidation phase

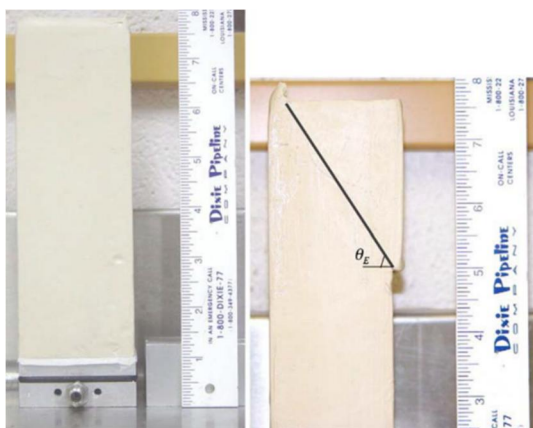
^d Major effective stress at the end of the consolidation phase

^e Undrained shear strength

ภาพที่ 2-28 ตารางสรุปผลการทดลองของ Khalid and Ibrahim (2007)

จากผลการทดสอบพบว่า การทดสอบการรับกำลังของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain compression test) จะเห็นแนวแถบการเฉือนได้อย่างชัดเจน ส่วนการทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกนที่บางกรณีไม่เกิดแนวแถบการเฉือนหลังการวิบัติของดินที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในภาพที่ 2-29 (a) และ (b) และยังพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบจะสูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนประมาณ 60% ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับ Vaid and Campanella (1974)

ดั่งภาพที่ 2-30 แต่ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการทดสอบแบบสภาวะแวดล้อมแบบความเครียด
 ในระนาบจะมีค่าน้อยกว่าที่ทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนประมาณ 50%
 ดั่งภาพที่ 2-31

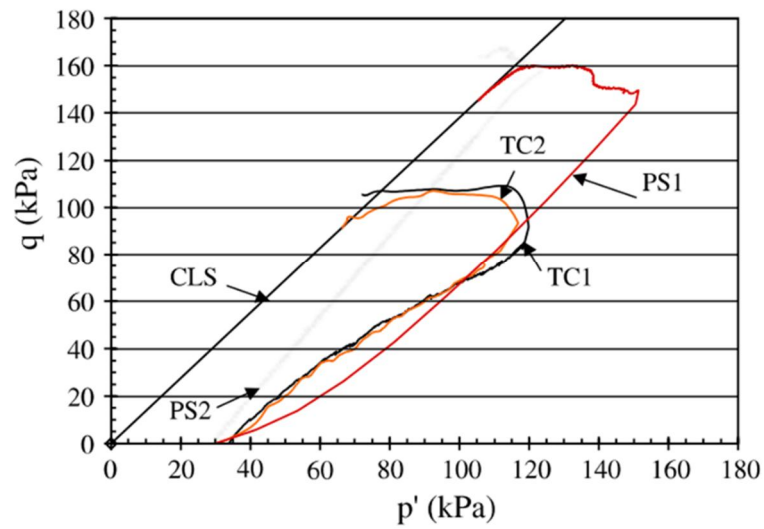


(a)

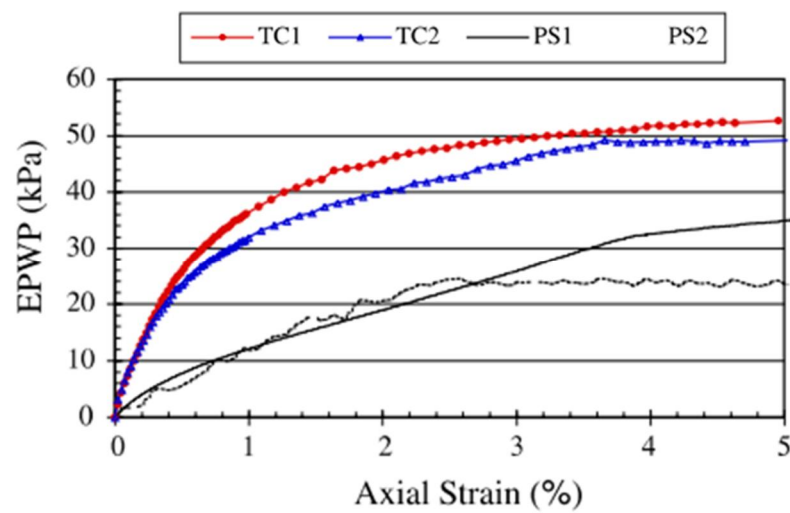


(b)

ภาพที่ 2-29 แถบแรงเฉือนของดินตัวอย่างที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน
 (Triaxial test) กับดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ
 (Plan strain test) (Khalid & Ibrahim, 2007)

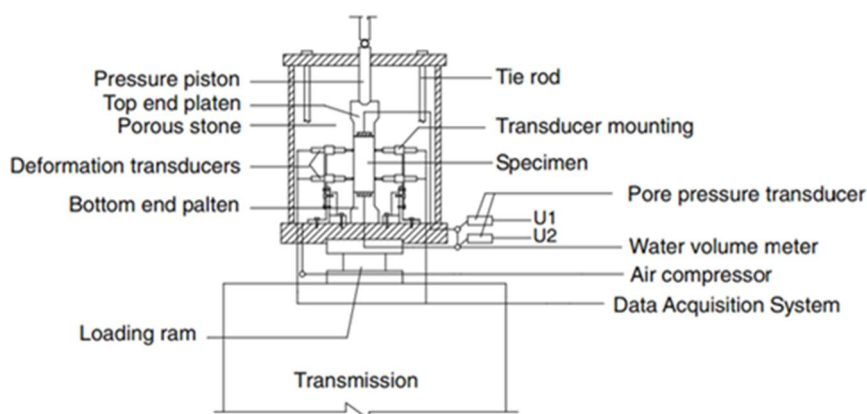


ภาพที่ 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ p' ของการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนและการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Khalid & Ibrahim, 2007)



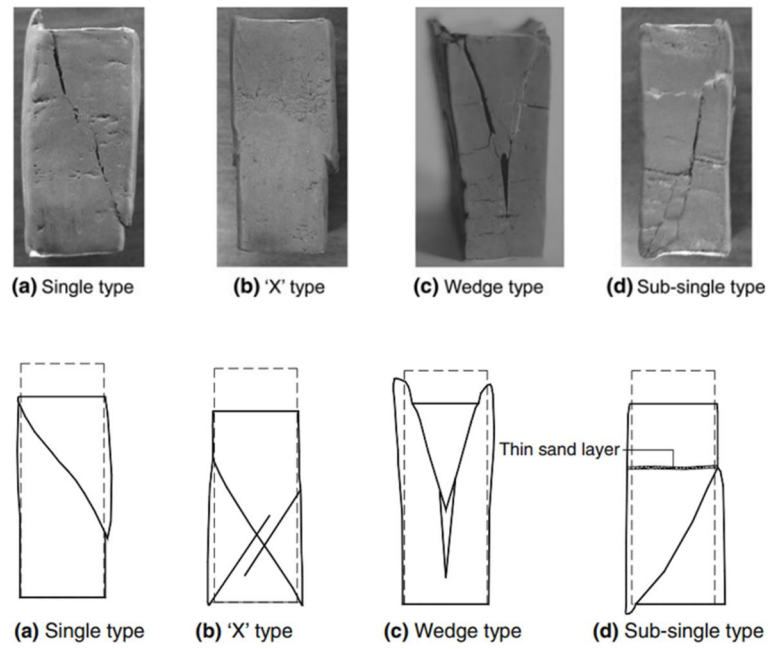
ภาพที่ 2-31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นกับอัตราทรุดตัวของตัวอย่างของการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนและการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Khalid & Ibrahim, 2007)

Juyun, Qihui, Bei, and Xihong (2012) ได้ทำการทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบโดยใช้ดิน Shanghai silty clay เพื่อศึกษาการเกิดแถบแรงเฉือนของตัวอย่างดินแล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวที่ส่วนหัวและท้ายของตัวอย่างเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ ดังภาพที่ 2-32 โดยใช้แรง Confining pressure เป็นแรงคั่นบวกแบบการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนที่ต่างกันตั้งแต่ 25-200 kPa และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด 70 x 70 x 25 มม. โดยทำการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า เกิดแถบแรงเฉือนขึ้นด้วยกัน 4 แบบ คือ Single type, 'X' type, Wedge type, & Sub-single type ดังภาพที่ 2-33 โดยการเกิดแถบแรงเฉือนในแต่ละแบบจะมีการเคลื่อนตัวระหว่างส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างที่มีความคล้ายคลึงกัน เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นที่ส่วนบนหรือส่วนล่างของตัวอย่างการเคลื่อนตัวด้านข้าง ด้านที่เกิดแถบแรงเฉือนจะมีค่ามากกว่าด้านที่ไม่เกิดแถบแรงเฉือน แต่เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนที่ตรงกลางของตัวอย่างการเคลื่อนตัวทั้งสองส่วนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันยกเว้นการเกิดแถบแรงเฉือนแบบ Wedge type ที่จะเกิดขึ้นได้เฉพาะด้านบนของตัวอย่างเท่านั้นจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างในส่วนบนมากกว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างในส่วนล่างเสมอ ค่าของแรงคั่นน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบสามารถวัดได้เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นแบบ Single type และ 'X' type ดังภาพที่ 2-34 และภาพที่ 2-35 แต่นอกเหนือจากการเกิดแถบแรงเฉือนทั้งสองแบบนี้แรงคั่นน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

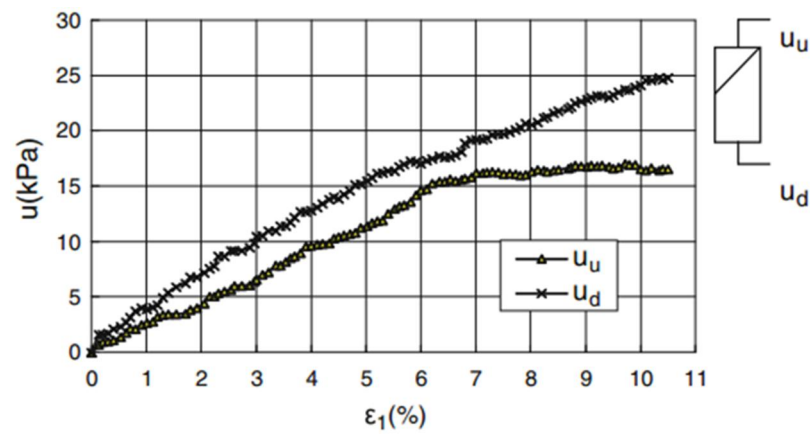


ภาพที่ 2-32 เครื่องทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

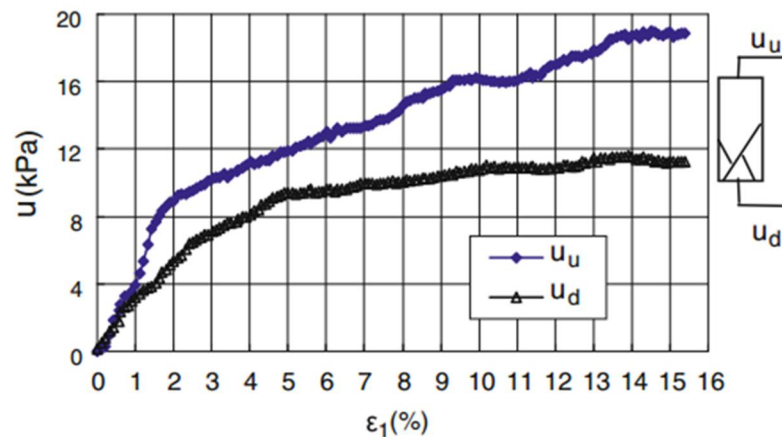
(Juyun et al., 2012)



ภาพที่ 2-33 แถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสถานะแวดล้อมแบบ
ความเครียดในระนาบ (Juyun et al., 2012)



ภาพที่ 2-34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคั้นน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง
ที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ Single type (Juyun et al., 2012)



ภาพที่ 2-35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง
ที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ 'X' type (Juyun et al., 2012)

แรงดันดินด้านข้างสถานะหยุดนิ่ง

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินที่สถานะหยุดนิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest, K_0) คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Effective horizontal stress) ต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) ในมวลดินซึ่งอยู่ในสถานะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างด้านข้าง โดยระนาบหลักของความเค้น (Principal planes) อยู่ในระนาบราบและระนาบตั้ง โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สถานะหยุดนิ่ง จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ ยกเว้นในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะหยุดนิ่งอาจมีค่าสูงถึงประมาณ 3.0 กรณีสำหรับทรายค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สถานะหยุดนิ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 สำหรับทรายแน่น และ 0.5 สำหรับทรายเป็นหลวม ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สถานะหยุดนิ่งสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติสามารถประมาณได้โดยใช้สมการต่าง ๆ ดังนี้

1. สมการของ Jaky

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2-9)$$

2. สมการของ Brooker and Ireland

$$K_{0NC} = 0.4 + 0.007(PI) \quad (2-10)$$

โดย PI คือ ดัชนีสภาพพลาสติก

$$K_{0NC} = 0.95 - \sin \phi' \quad (2-11)$$

3. สมการของ Bolton

$$K_{0NC} = \frac{1 - \sin(\phi' - 11.5^\circ)}{1 + \sin(\phi' - 11.5^\circ)} \quad (2-12)$$

สำหรับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ

1. สมการของ Wroth

$$K_0 = OCR \cdot K_{0NC} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu} (OCR - 1) \quad (2-13)$$

2. สมการของ Brooker and Ireland (1965)

$$K_{0OC} = K_{0NC} \sqrt{OCR} \quad (2-14)$$

3. สมการของ Schmidt

$$K_{0OC} = K_{0NC} \times OCR^\alpha \quad (2-15)$$

โดย $\alpha = \sin(1.2 \times \phi')$

Meyerhof เสนอให้ใช้ค่า $\alpha = 0.5$

Mayne และ Kulhawy เสนอให้ใช้ค่า $\alpha = \sin(\phi')$

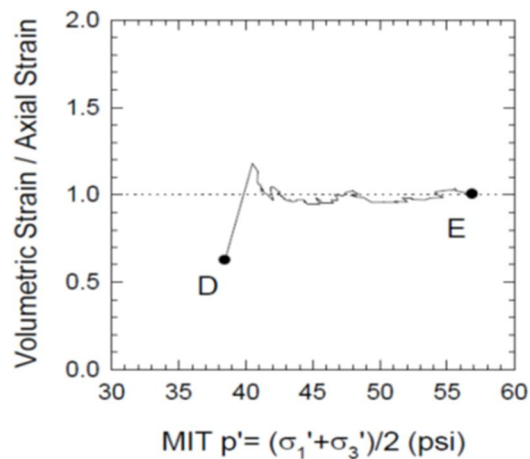
4. สมการของ Mayne and Kulhawy

$$K_0 = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (2-16)$$

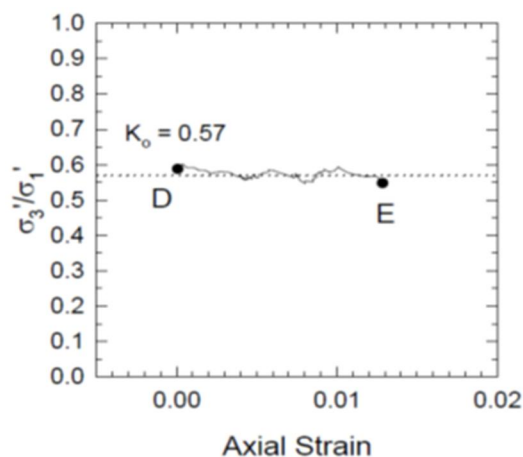
การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของดินนั้นสามารถหาค่าได้ทั้งจากการทดสอบในสนาม (In-situ tests) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นโดยทั่วไปจะสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากการทำ K_0 -Consolidated triaxial test ในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial test) ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากเนื่องจากผู้ทำการทดสอบจะต้องปรับความดันที่บริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Cell pressure or Confining pressure) เพื่อให้ไม่เกิดความเครียดด้านข้าง (Lateral strain = 0) ในขณะที่เนื้อดินตัวอย่างดินด้วยอัตราคงที่แบบระบายน้ำ ดังนั้นความเครียดในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับความเครียดเชิงปริมาตร (Vertical strain = Volume strain) โดยระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) จะสมมติให้ดินตัวอย่างนั้นยังคงรูปอยู่ในทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และเท่ากันตลอดความสูงซึ่งเป็นเรื่องที่ยาก

Baxter (2006) ได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial tests) ด้วยวิธี K_0 -Consolidated undrained triaxial test โดยในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (K_0 -Consolidation) ระหว่างจุด D ถึงจุด E ในภาพที่ 2-36 พบว่า

การปรับแรงดันด้านข้าง (Cell pressure or Confining pressure) เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain เท่ากับ 1 นั้นเป็นไปได้ยากมากโดยเฉพาะในช่วงต้น ๆ ($38 < p' < 41$ psi) และในช่วงที่ $p' > 41$ psi จะพบว่า อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain นั้นใกล้เคียง 1 ซึ่งทั้งหมดนี้จะส่งผลถึงความแม่นยำในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของดิน ดังแสดงในภาพที่ 2-37 อีกทั้งการทดสอบนี้จะต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากในการทดสอบ



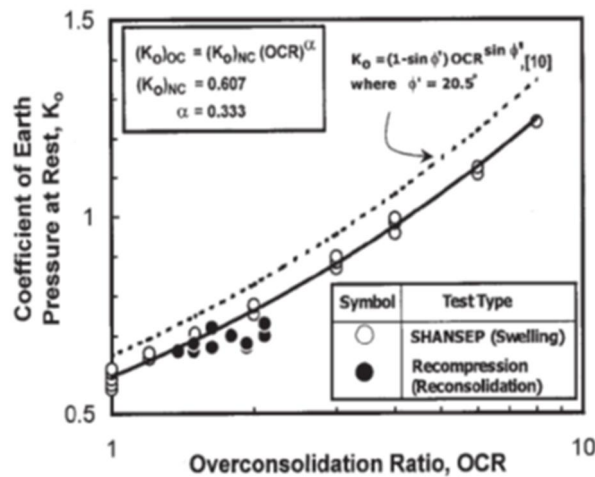
ภาพที่ 2-36 อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ K_0 -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial tests (Baxter, 2006)



ภาพที่ 2-37 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ K_0 -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial test (Baxter, 2006)

Seah and Lai (2003) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ (Undisturbed samples) ที่ความลึกไม่เกิน 8 ม. ในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial test) ด้วยวิธี K_0 -Consolidated undrained triaxial test และได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) ดังภาพที่ 2-38 และค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินอยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.607

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งพบว่า



ภาพที่ 2-38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) (Seah & Lai, 2003)

รูปแบบสมการที่นำเสนอ โดย Mayne and Kulhawy (1982) (สมการที่ 2-17) มีความเหมาะสมในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งในสภาวะอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) และในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) โดยใช้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') เท่ากับ 20.5°

$$K_0 = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (2-17)$$

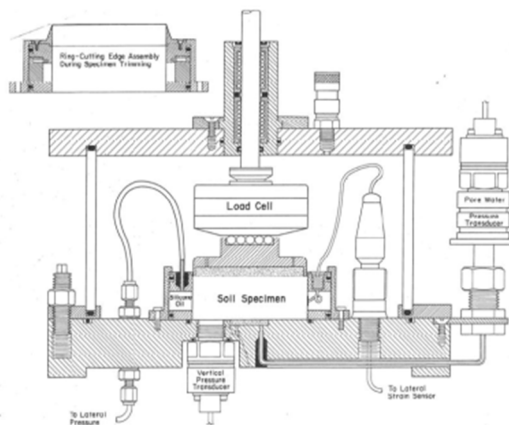
ดังนั้นเมื่อผู้ออกแบบต้องการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) ก็จำเป็นจะต้องทราบค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') ซึ่งจะต้องใช้ผลการทดสอบจาก Undrained triaxial compression test และต้องใช้ค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) สำหรับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) ซึ่งจะต้องใช้ผลการทดสอบ K_0 -Consolidation จากเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial test) หรือผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง Oedometer test

จากสมการที่ 2-17 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 (ภาพที่ 2-38 จุดที่ค่า $OCR = 1$) ซึ่งผู้เขียนมีสมมติฐานว่าช่วงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าความดันในขณะนั้น ซึ่งก็จะส่งผลโดยตรงต่อค่าการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain shear strength)

ดังนั้นหากสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครกับค่าการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain shear strength) ของดินเหนียวที่อยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) และดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) ก็จะสามารถเพิ่มความสะดวกให้ผู้ออกแบบสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งได้จากผลการทดสอบค่าการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain shear strength) ซึ่งสามารถประเมินได้จากการทดสอบในสนาม เช่น การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วยใบพัด (Vane shear test)

เครื่องมือ Oedometer พิเศษซึ่งมีวงแหวนภายในทำจาก Highly polished stainless steel และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของทรายขณะเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vardhanabhuti, 2006) โดยใช้ตัวอย่างทราย คือ Ottawa sand, Lake michigan Beach sand, และ Niigata sand ดังภาพที่ 2-39 เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและความสูงของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 76.2 มม. และ 25.4 มม. ตามลำดับ บริเวณกึ่งกลางของวงแหวนเป็น Diaphragm ที่มีความหนา 0.254 มม.

และติดตั้ง Strain gauges เพื่อตรวจสอบการยืดหดตัว (Lateral deformation) ของ Diaphragm ซึ่งถูกควบคุมโดยแรงดันจาก Silicone oil chamber ที่ประกบติดกับวงแหวนภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้หลักการดังกล่าวในการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดิน



ภาพที่ 2-39 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ (Vardhanabhuti, 2006)

สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและการตรวจสอบค่าของการอิ่มตัว

สมมติฐานที่สำคัญของนิยาม Terzaghi ที่มีต่อความเค้นประสิทธิภาพในมวลดินนั้น ต้องอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่ $S = 100\%$ ค่าของความอิ่มตัวนี้เมื่อมีความคลาดเคลื่อนหรือมีค่าต่ำกว่า 100% เพียงเล็กน้อยก็สามารถส่งผลกระทบต่อและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อพฤติกรรมของดินเป็นอย่างมาก ดังนั้นการทำให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการทดลองต่าง ๆ ในเชิงห้องปฏิบัติการ การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) เป็นการทดสอบหนึ่งที่ต้องใช้ตัวอย่างดินที่มีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ การทดสอบนี้จะสามารถทราบค่าการอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดินได้โดยการตรวจสอบค่า B-value

ค่าการอิ่มตัวด้วยน้ำ B-value ไม่ใช่ค่าที่เป็นคุณสมบัติของตัวอย่างดินแต่อย่างใด แต่ค่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งกับตัวแปลต่าง ๆ Skempton (1944) ดังสมการที่ 2-18

$$B\text{-value} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_{\text{oct}}} \quad (2-18)$$

เมื่อ Δu คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำที่เปลี่ยนไป

$\Delta \sigma_{\text{oct}}$ คือค่าความเค้นรวมเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไป

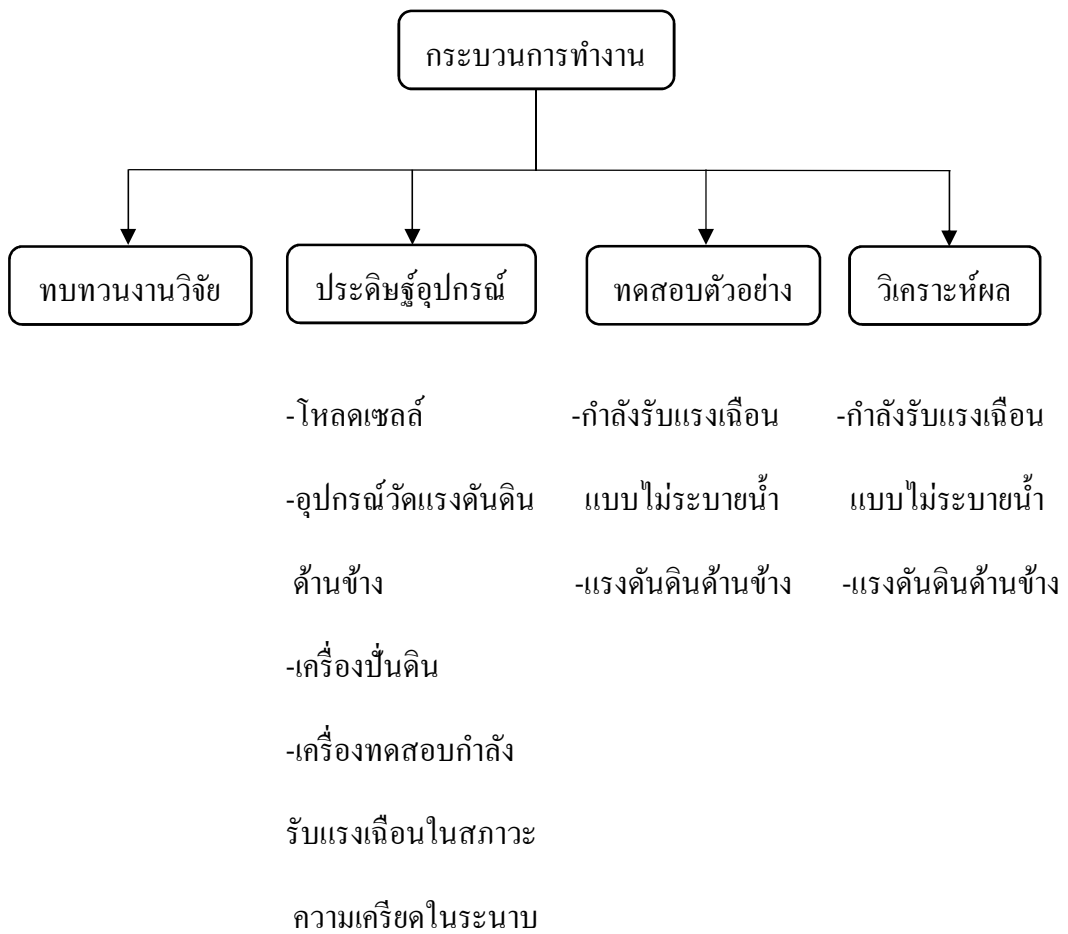
โดยค่าของสมการนี้ได้มาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ แต่สมการดังกล่าวผู้ที่ให้นิยามเป็นคนแรก คือ Bishop and Eldin (1950) และตัวอย่างต้องเป็นไปตามสมมติฐานดังนี้

1. ช่องว่างของเม็ดดินมีความเชื่อมต่อกัน
2. เม็ดดินมีความเป็นอีลาสติกและมีความเท่ากันทุกทิศทาง
3. พฤติกรรมของเม็ดดินอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผลและตัวอย่างดินต้องมีความเป็นอีลาสติกและมีความเท่ากันทุกทิศทาง
4. การกระจายตัวของเม็ดดินจะกระจายตัวเป็นแบบสุ่มทางสถิติ
5. ของเหลวในมวลดินต้องกระจายตัวอย่างเป็นเส้นตรง

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

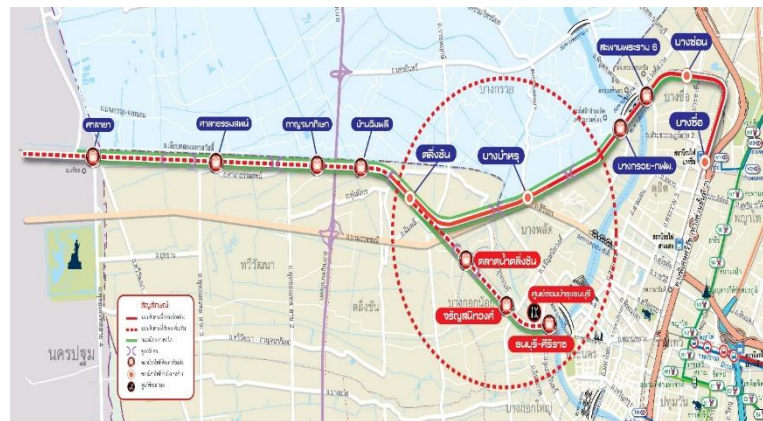
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาในกระบวนการทำงานซึ่งแสดงในแผนภาพดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 กระบวนการทำงานของงานวิจัย

การจัดหาตัวอย่างทดสอบ

การจัดหาดินตัวอย่างของโครงการนี้ ได้รับการอนุเคราะห์อย่างไม่เป็นทางการจาก บริษัท ยูนิค เอ็นจิเนียริงแอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้รับเหมาในโครงการระบบ รถไฟชานเมือง (สายสีแดง) เป็นหนึ่งในโครงการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าสายสำคัญของโครงข่าย ระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่จะเป็นแกนหลักในการเดินทาง ระหว่างใจกลางเมืองไปสู่ย่านชานเมืองโดยรอบ โดยโครงการแรกที่ก่อสร้างแล้วเสร็จเมื่อเดือน กรกฎาคม 2555 ได้แก่ โครงการสายสีแดง ช่วงบางซื่อ-ตลิ่งชัน และได้มีการศึกษาออกแบบก่อสร้าง สถานีเพิ่มเติมริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยารวมทั้งได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการขยายแนวเส้นทางจาก ตลิ่งชัน ไปถึงสาขลาเพื่อรองรับการเดินทาง ของประชาชนในเบื้องต้น ไว้ด้วยโดยแนวเส้นทาง โครงการ ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แนวเส้นทางโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง

โครงการวิจัยนี้ได้ขออนุญาตจากทางผู้จัดการ โครงการ โดยคาดว่าจะขอเข้าไปเก็บ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งก็ได้รับอนุญาตเนื่องจากปริมาณดินที่ขอนั้นมีปริมาณ ไม่มากนักและ ดินที่นำไปนั้นจะนำไปใช้เพื่อการศึกษาและวิจัย โดยพื้นที่ที่เข้าไปเก็บตัวอย่างดินนั้นอยู่ในบริเวณ พื้นที่ก่อสร้างสถานีกลางบางซื่อ ที่ชั้นความลึกของดินอยู่ที่ช่วงประมาณ 15 ม. จากผิวดิน ซึ่งขณะนั้นทางบริษัทได้ทำการก่อสร้างเข็มเจาะ ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การก่อสร้างเข็มเจาะในโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมือง สายสีแดง บริเวณ
สถานีกลางบางซื่อ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

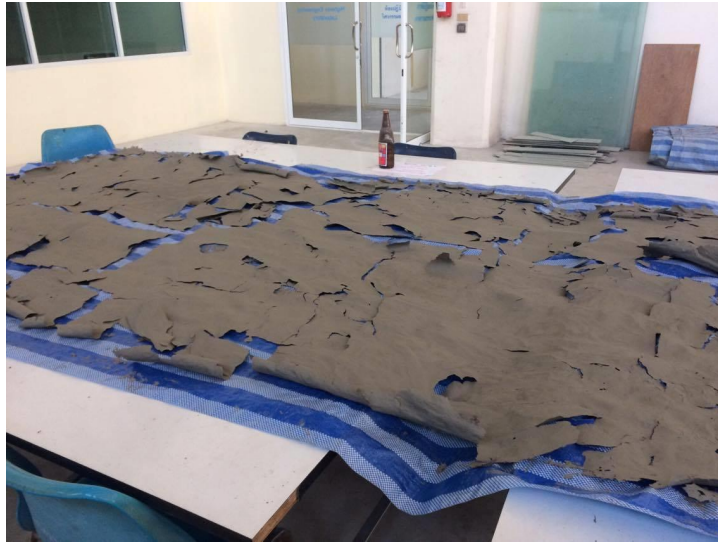
1. นำดินที่ได้จากภาคสนามมาตากในที่ร่มเพื่อลดค่าความชื้นดังภาพที่ 3-4 ในดิน
การตากดินแบบนี้ช่วยป้องกันไม่ให้ดินสูญเสียคุณสมบัติบางประการ
2. นำดินที่แห้งแล้วมาทุบด้วยก้อนยางดังภาพที่ 3-4 เพื่อให้ดินมีขนาดที่เล็กลงโดย
สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ได้ หลังจากนั้นนำเอาตัวอย่างดินใส่ในเครื่องปั่นดินแล้วให้
แรงดันลบแก่ตัวอย่างประมาณ -80 kPa ไว้ที่ 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-6
3. นำเอาน้ำที่ถูกกำจัดฟองอากาศ (De-airing water) เข้ามาผสมกับตัวอย่างดินที่ค่า
ความชื้น 1.2-1.4 เท่าของขีดจำกัดของเหลวโดยทำการแช่ดินกับน้ำภายใต้สภาพแรงดันที่เป็นลบ
เท่ากับ -80 kPa ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนทำการปั่นดินเข้ากับน้ำโดยใช้เวลาเท่ากัน ในทุก ๆ ขั้นตอนจะ
ให้แรงดันลบแก่ตัวอย่างตลอดเวลาเพื่อกำจัดฟองอากาศในเม็ดดิน
4. เมื่อตัวอย่างถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะทำการหยุดปั่นดินแต่ยังคงให้
แรงดันลบกับตัวอย่างดินและทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง เพื่อสังเกตว่าดินดังกล่าวเกิดการแยกตัวเนื่องจาก
ฟองอากาศภายในอีกหรือไม่ หลังจากนั้นจึงทำการบรรจุดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ
กระบวนการนี้อาศัยหลักการคล้าย ๆ กับกระบอกฉีดยา คือ นำตัวอย่างดินบรรจุลงในกระบอกโดย
ใช้แรงดันลบแก่กระบอกโดยให้ปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องปั่นดิน ดังภาพที่ 3-7 เมื่อดินเต็ม
กระบอกแล้วจะให้แรงดันจากกระบอกนิวมตักดินออกจากกระบอกเข้าเครื่องทดสอบ ดังภาพที่
3-8 ก่อนทำการดันดินเข้าเครื่องทดสอบจะทำการติดตั้ง Rubber membrane โดยการดึงถุงยางให้ได้
ความสูงที่ได้กำหนดไว้แล้วจึงทำการไล่ลมเข้าไปในระบบโดยใช้แรงดันลบแบบสองทาง

(Double vacuum) เพื่อกำจัดฟองอากาศให้ Porous stone และระบบการทดสอบ แล้วจึงทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกล็อกความสูงของตัวอย่างไว้ และทำการดันดินจนมีดินและน้ำส่วนเกินออกมาเพื่อให้มั่นใจได้ว่าในระบบทดสอบไม่มีอากาศตกค้างภายในระบบอีกแล้ว

5. หลังจากการดันดินเข้าไปในอุปกรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการตรวจสอบการอิ่มตัวด้วยของตัวอย่างดิน (Saturate) ด้วยการตรวจสอบค่า B เมื่อมีค่า Degree of saturate มากกว่าร้อยละ 98 จึงทำการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) แต่ตัวอย่างดินมีความสูงค่อนข้างมาก จึงต้องทำการเร่งการทรุดตัวโดยการใช้ Negative pore water pressure ร่วมกับ Vertical stress เข้าไปในตัวอย่างดิน จะใช้ค่า Negative pore water pressure ที่ร้อยละ 50 ของ Vertical stress หรือไม่เกิน 80% ของแรงดันบรรยากาศ ที่ประมาณ 80 kPa โดยความสูงสุดท้ายของการ Consolidation จะเท่ากับความสูงที่ได้คำนวณเอาไว้ตามอัตราส่วนช่องว่าง (ภาพที่ 3-9) โดยการยุบอัดตัวคายน้ำจะใช้กระบวนการ K_0 -Consolidation หรือเรียกว่า 1-D Consolidation

6. ขั้นตอนการ Consolidation ค่าของ Vertical stress จะใช้กระบอกลมนิวเมตริกโดยทำการปรับแก้แรงดันลมอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากกระบอกลมนิวเมตริกจะมีค่าแรงเสียดทานในกระบอกลมไม่คงที่ เมื่อตัวอย่างดินมีการทรุดตัว ค่า Vertical stress จะลดลงจากค่าที่ตั้งไว้ในตอนแรก ดังนั้นในการควบคุมค่า Vertical stress ให้สม่ำเสมอ นั้น เราจะใช้คอมพิวเตอร์สั่งงานผ่านโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะเขียนโปรแกรมควบคุมเป็นแบบ Close-loop โดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ คอมพิวเตอร์จะประมาณค่าแรงดันลมเข้าไปที่กระบอกลมนิวเมตริก ดังนั้นก็จะเกิด Vertical stress ที่ด้านบนของตัวอย่าง ซึ่งอ่านค่าโดยโพลดเซลล์ จากนั้นก็จะส่งสัญญาณกลับไปสู่คอมพิวเตอร์และคอมพิวเตอร์ก็จะประมวลผลเพื่อปรับแก้ค่าแรงดันลมให้ได้ค่า Vertical stress ที่ต้องการ โดยการปรับแก้ นั้น โปรแกรมจะทำการตรวจสอบทุก ๆ 4 วินาที และได้ค่าความละเอียดได้ถึง ± 1 kPa ดังภาพที่ 3-10

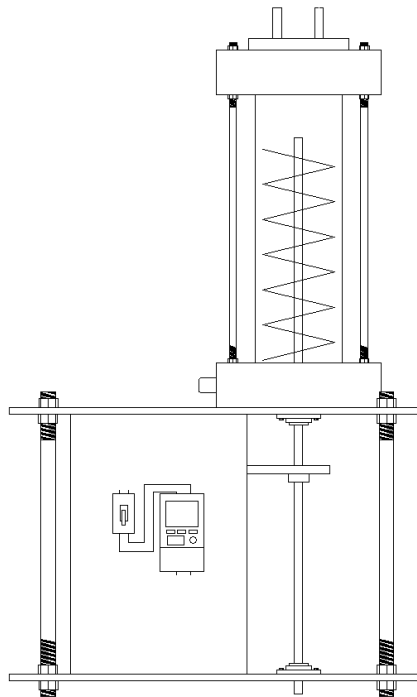
7. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำก็จะทำการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบต่อไป



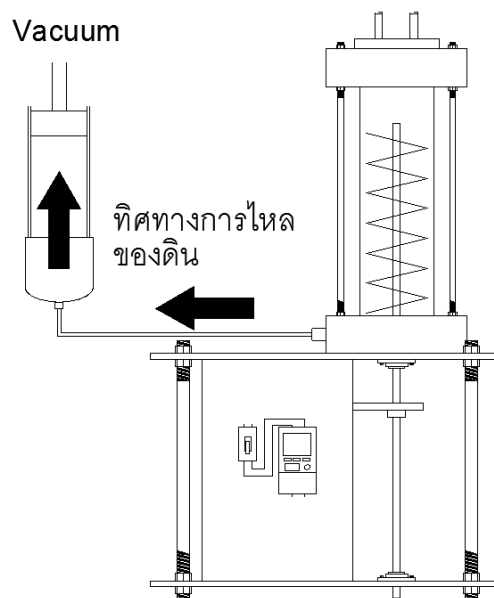
ภาพที่ 3-4 ตากดินในที่ร่มเพื่อลดปริมาณความชื้นในดิน



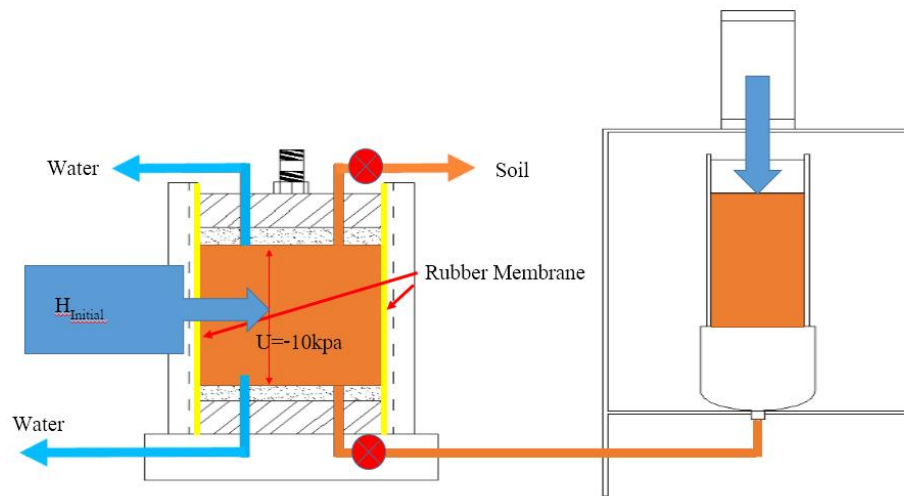
ภาพที่ 3-5 ทบดินแห้งเพื่อลดขนาดของเม็ดดินด้วยก้อนยาง



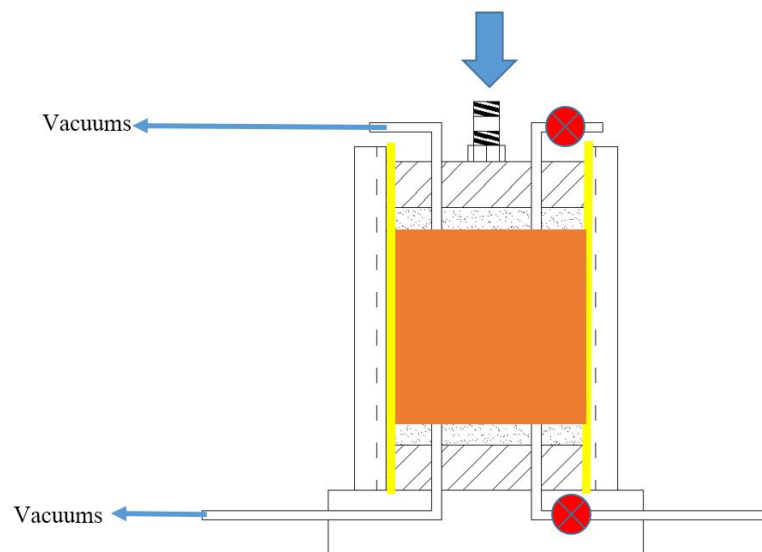
ภาพที่ 3-6 เครื่องปั้นดินที่ได้ออกแบบขึ้น



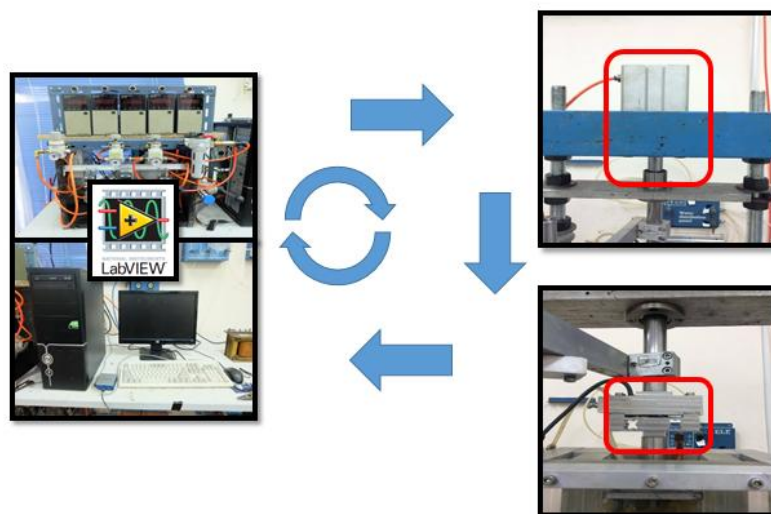
ภาพที่ 3-7 บรรจุดินเข้าสู่กระบอกลดแรงดันจากเครื่องปั้นดิน



ภาพที่ 3-8 ดันดินจากกระบอกบรรจุดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ



ภาพที่ 3-9 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน



ภาพที่ 3-10 การให้แรงเค้นในกระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน

อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ และประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง

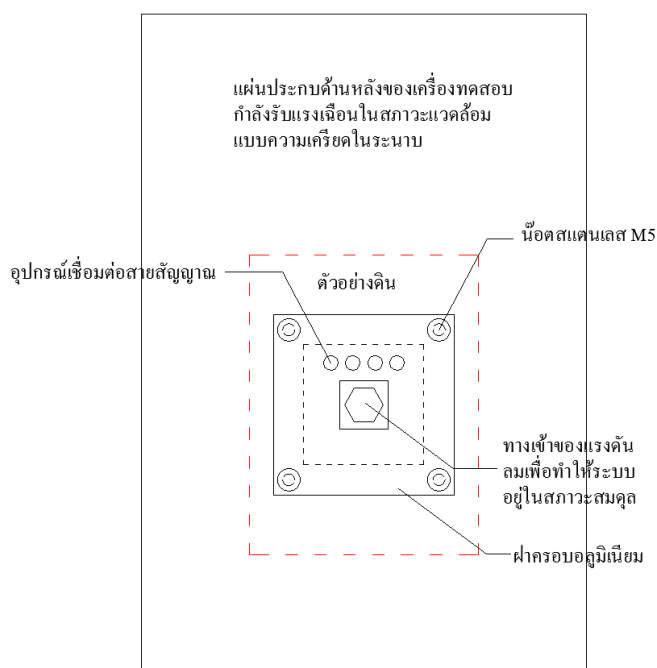
อุปกรณ์ตัวนี้จะถูกทำขึ้นจากอลูมิเนียมซึ่งถูกขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามผลจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเกิดความเค้นเกินกว่าค่าความเค้นคราก (Yield stress) อันจะทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับเกิดความผิดพลาดและวัสดุเกิดการเสียรูปถาวรขึ้น โดยเมื่อขึ้นรูปเสร็จก็จะทำการติดตั้งชุด Strain gauge ไว้ในตำแหน่งที่เกิดความเครียดดึงและความเครียดอัดสูงสุดเพื่อให้สัญญาณที่ได้มีคุณภาพและมีความชัดเจนที่สุด ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เช่นกัน

ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างถูกออกแบบให้ประกอบด้วยสองชิ้นส่วนสำคัญที่ประกอบเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 3-11 และประกอบไปด้วยดังนี้

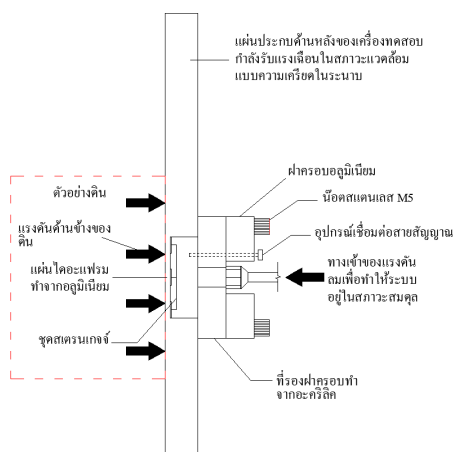
1.1 ฝาอลูมิเนียมด้านหลัง มีหน้าที่กักแรงดันลมอุปกรณ์นี้จะใช้หลักการสมดุล เมื่อแรงดันทั้งสองข้างของแผ่นไดอะแฟรมมีค่าเท่ากันก็จะไม่มีการเสียรูปเกิดขึ้น การที่จะหาจุดสมดุลของแผ่นไดอะแฟรมนั้น แผ่นไดอะแฟรมนี้ถูกติดตั้งชุดสเตรนเกจในจุดที่กำหนด เมื่อไม่เกิดการเสียรูปสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นที่จุดสมดุลจะสามารถวัดค่า

แรงดันดินที่สัมผัสกับแผ่นไดอะแฟรมได้จากค่าแรงดันลมที่ทำให้แผ่นไดอะแฟรมอยู่ในสภาวะสมดุลเพื่อให้เข้าปะทะกับแผ่นไดอะแฟรม การใช้แรงดันลมนี้จะใช้คอมพิวเตอร์สั่งงานผ่านชุดโปรแกรม โดยโปรแกรมนี้ทำการปรับแก้ค่าแรงดันลม ทุก ๆ 4 วินาที เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่ต้องการ และแม่นยำที่สุดเพราะแรงดันลมดังกล่าวนี้ ก็คือ แรงดันดินด้วย โดยจะถูกวัดออกมาเป็นความดัน และมีพื้นที่รับแรงกดที่ การให้แรงดันลมนั้นจะส่งผ่านสายแรงดันขนาด 6 มม. และยังมีตัวส่งสัญญาณออกมาเพื่อป้อนไฟเข้าแก่ระบบและรับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป ระหว่างฝาครอบกับแผ่นอลูมิเนียม จะมีระบบป้องกันการซึมผ่านของแรงดันลมเพื่อรักษาแรงดันให้คงที่

1.2 แผ่นไดอะแฟรม โดยไดอะแฟรมจะต้องถูกออกแบบความหนา T และหาตำแหน่งที่จะติดตั้งชุดสเตรนเกจด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จากภาพที่ 3-12 ด้านหลังของแผ่นไดอะแฟรมจะติดตั้งชุดสเตรนเกจ และด้านหน้าจะเป็นตัวรับแรงดันดินด้านข้าง



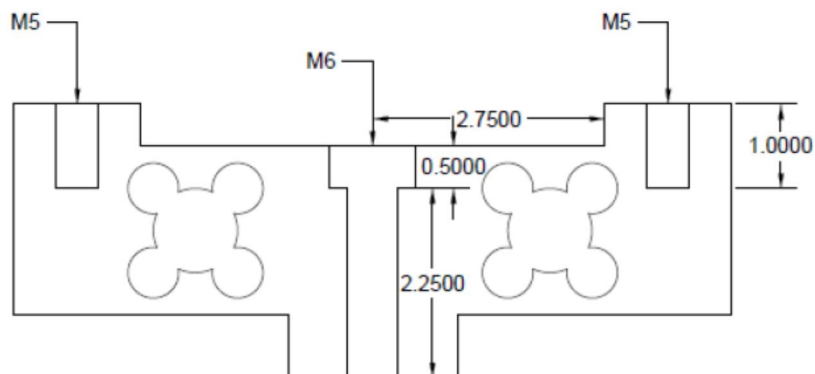
ภาพที่ 3-11 รูปด้านหน้าของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง



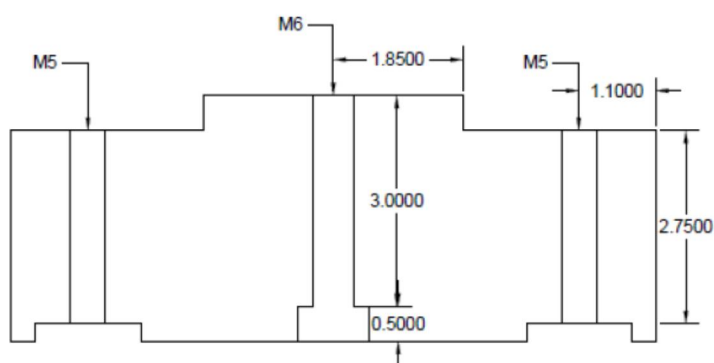
ภาพที่ 3-12 รูปตัดของอุปกรณ์วัดแรงคั้นคั้นด้านข้าง

2. โหลดเซลล์

รูปแบบของโหลดเซลล์ (Load cell) นั้นได้ประยุกต์มาจากพฤติกรรมการเสียรูปของคาน (Beam) โดยให้กำหนดแรงเป็นแบบจุด (Point load) ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ บริเวณรูเจาะด้านบนและจะเกิดความเค้นดึงที่ใต้ฐานบริเวณที่ใกล้กับจุดรับแรง และความเค้นอัดจะเกิดขึ้นบริเวณขอบที่ใกล้กับจุดรองรับ ซึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของโหลดเซลล์ (Load cell) นั้นจะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดสูงสุดในอุปกรณ์โหลดเซลล์ (Load cell) แล้วใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) และเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดในชิ้นส่วนของตัวโหลดเซลล์ (Load cell) หลังจากได้รับแรงกดหรือแรงดึงในแนวตั้ง โดยที่ความเครียดสูงสุดต้องไม่เกิดค่าที่กำหนดของทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) และวัสดุที่นำมาใช้ทำโหลดเซลล์ ในการวัดค่าของโหลดเซลล์ของงานวิจัยนี้จะสามารถวัดค่าออกมาเป็นความเค้นซึ่งแตกต่างจากการวัดในงานวิจัยอื่น ๆ ที่จะวัดค่าออกมาเป็นแรงโดยความเค้นที่วัดได้นี้ได้คำนวณมาจากแรงที่วัดได้จากตัวโหลดเซลล์หารกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งกดตัวอย่างที่มีค่าคงที่ (ไม่ถูกปรับแก้) ซึ่งความเค้นดังกล่าวได้มาจากการสอบเทียบจากแรงคั้นลมในระบบ ในเบื้องต้นนั้น จะทำการออกแบบและประดิษฐ์โหลดเซลล์ที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ 5 kN. ขนาดและรูปร่างของโหลดเซลล์ ดังภาพที่ 3-13 และภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-13 ภาพตัดด้านหน้าของชิ้นส่วน โหลดเซลล์ชิ้นล่าง



ภาพที่ 3-14 ภาพตัดด้านหน้าของชิ้นส่วน โหลดเซลล์ชิ้นบน

3. เครื่องปั๊มดิน

เครื่องปั๊มดินได้ถูกออกแบบโดยด้านบนของถังปั๊มมีวาล์วควบคุมเพื่อใช้ในการให้แรงดันแก่ถัง ด้านล่างของถังปั๊มมีท่อไว้สำหรับนำดินหรือน้ำออกจากถังปั๊มนี้ดังภาพที่ 3-6 ลักษณะที่พิเศษของเครื่องปั๊มดินสามารถระบุได้ดังนี้

3.1 ถังปั๊มสามารถใช้กับแรงดันที่เป็นลบได้มากถึง 100 kPa เพื่อใช้ดูดฟองอากาศออกจากตัวอย่างดินในขั้นตอนการผสมดิน

3.2 สามารถสร้างน้ำที่ไม่มีฟองอากาศได้ (De-air water)

3.3 สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 10-60 รอบ/ นาที และยังสามารถรักษากำลังของการปั๊มไว้คงที่แม้ว่าจะทำการปั๊มในรอบที่ต่ำมาก

3.4 สามารถปั้นตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาได้ ในข้อนี้จำเป็นต่อการปั้นตัวอย่างดินเป็นอย่างมากเพราะเมื่อทำการปั้นดินปกติจะปั้นกวนดินแบบดันขึ้นเพื่อดันฟองอากาศขึ้นสู่ด้านบนและเมื่อทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอบคั้นดินจะทำการปั้นลงเพื่อช่วยเป็นแรงขับให้ตัวอย่างดินไหลได้คล่องยิ่งขึ้น

4. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบ

ตัว Plane strain cell ชั้นในนั้นจะประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลัก ๆ คือ แผ่นอะคริลิกและแผ่นอลูมิเนียม ภาพที่ 3-15 ได้แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของ Plane strain cell ชั้นในซึ่งจะประกอบด้วย

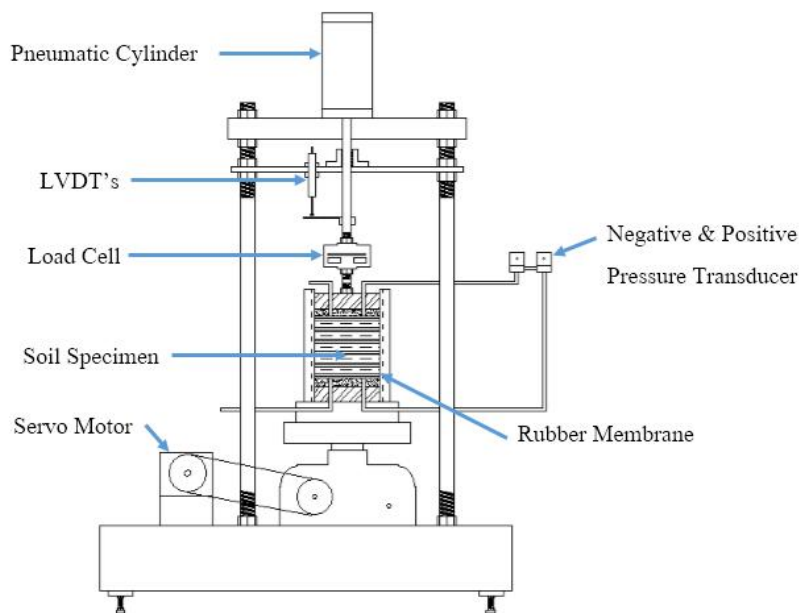
4.1 Load frame ทำหน้าที่สร้างแรงกระทำกับตัวอย่างแบบ Strain control ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนคั้นดินตัวอย่าง การควบคุมอัตราและระยะเวลาการคั้นจะสามารถควบคุมผ่านโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะถูกต้องเข้ากับ Servo motor

4.2 กระบอบกลมนิวมेटิก ทำหน้าที่สร้างแรงกระทำกับตัวอย่างแบบ Stress control ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งดินตัวอย่างนั้นจะต้องผ่านกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ (1D-Consolidation) เพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่

4.3 ลูกปืนสไลด์และคานบังคับ คานบังคับทำหน้าที่บังคับให้แกนส่งกำลังมีความมั่นคงและสามารถส่งแรงไปที่จุดกึ่งกลางของดินตัวอย่างได้อย่างแม่นยำโดยจะต้องอาศัยลูกปืนสไลด์เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแกนส่งกำลังกับคานบังคับ

4.4 แผ่น Porous stone ทำขึ้นจากทรายที่มีขนาดละเอียดใกล้เคียงกันและขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยยึดเม็ดทรายด้วยอีพ็อกซีในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อจะให้ก้อนทรายนั้นยังคงมีความพรุนและสามารถใช้เป็นตัวกรองไม่ให้เม็ดดินไหลตามน้ำออกไป โดยแผ่น Porous stone นี้จะทำการติดตั้งที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน

4.5 Servo motor ชุดเซอร์โวมอเตอร์นี้มีไว้สำหรับขั้นตอนการคั้นตัวอย่างแบบ Strain control โดยมีลักษณะพิเศษ คือ สามารถปรับรอบในการทำงานได้อย่างแม่นยำ รวมไปถึงยังคงให้แรงบิดที่คงที่แม้ใช้ในรอบการหมุนที่ต่ำมาก



ภาพที่ 3-15 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบ

การทดสอบตัวอย่าง

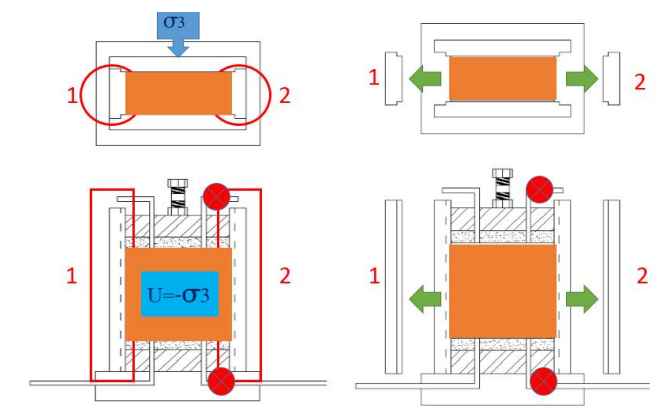
1. ก่อนทำการเฉือนตัวอย่างจะต้องทำการเปลี่ยนสถานะแวดล้อมจาก 1-D ให้เป็น Plan strain โดยมีขั้นตอนคือ Apply negative pore water pressure (Δu) ให้มีค่าเท่ากับแรงดันด้านข้าง (σ_2) ซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างหลังจากนั้นทำการปลดแผ่นอะคิลิกหมายเลข 1 และ 2 ออก ดังภาพที่ 3-16 เพื่อให้เสีรูปด้านข้างได้อย่างอิสระตรงตามสถานะแวดล้อมแบบ Plan strain การเฉือนตัวอย่างดินแบบนี้เทียบได้กับการเฉือนแบบ K_0 -Consolidated undrain test ในการทดสอบแบบ Triaxial test

2. ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะให้แก่ตัวอย่าง เพื่อวัดการเสีรูปด้านข้าง ภาพที่ 3-17

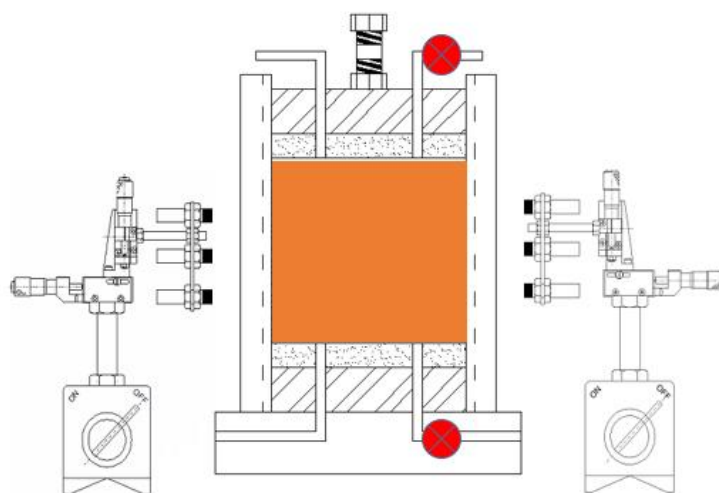
3. การให้แรงตอนเฉือน จะทำการล็อกแกนกระบอกนิวมตริกด้านบนไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ แล้วใช้คอมพิวเตอร์สั่งงานผ่าน โปรแกรมและชุดควบคุมไปยังเซอร์โวมอเตอร์ทำให้แกนของชุดอุปกรณ์เคลื่อนที่ขึ้นไปจะเรียกการเฉือนแบบนี้ว่า “Strain control” หลังจากนั้น อุปกรณ์วัดคุม (Tranducer) ทั้งหมดที่ได้ติดตั้งเอาไว้ ก็จะส่งค่าที่วัดได้กลับมายังชุดควบคุมเพื่อทำการเก็บข้อมูลตามเวลาที่กำหนด ในที่นี้จะเก็บประมาณทุก ๆ 4 วินาที โดยการเฉือนนี้จะเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

(Undrain) ใช้อัตราการเฉือนเท่ากับ 1% Strain/ min ทำการเฉือนจนตัวอย่างเสียสภาพที่ 15% Strain ดังภาพที่ 3-18

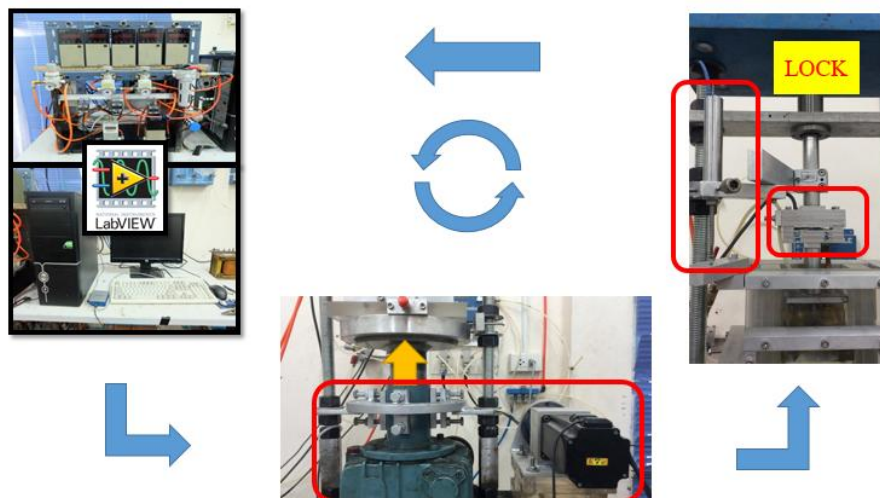
4. การเก็บข้อมูลจะใช้คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลผ่านโปรแกรมและชุดคำสั่ง โปรแกรมชุดนี้มีความสามารถทำได้ทั้งสั่งและเก็บข้อมูลในเวลาเดียวกัน การทดสอบจะเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้ ค่า K_0 ก่อนทำการเฉือน แรงดันในแนวตั้ง (Vertical stress) ระยะการยุบตัว (Displacement) แรงดันดินด้านข้าง (Horizontal stress) และแรงดันน้ำ (Pore water pressure)



ภาพที่ 3-16 การเปลี่ยนสถานะแวดล้อมจากการเสียรูปในหนึ่งมิติเป็นแบบสถานะความเครียดในระนาบ



ภาพที่ 3-17 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะให้แก่ตัวอย่าง



ภาพที่ 3-18 การควบคุมการทดสอบในขณะที่ทำการเงื่อนไขตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยจะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นภายในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา โดยนำตัวอย่างดินเหนียวที่เก็บตัวอย่างได้จากภาคสนามมาทำลายโครงสร้างแล้วทำการสร้างโครงสร้างใหม่โดยวิธีอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิตีก่อนทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ การศึกษาจะถูกอธิบายในบทนี้

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่นำมาใช้ในการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างดิน การติดตั้งตุ้มยาง และอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างรวมไปถึงการบรรจุดินเข้าสู่เครื่องทดสอบก่อนทำการอัดตัวคายน้ำ

1. การหาค่าคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะต้องทำการทำลายโครงสร้างดินเดิมของดินที่เก็บมาจากในสนาม โดยใช้ปริมาณน้ำสูงก่อนจะสร้างโครงสร้างใหม่ ดังนั้นจะต้องทราบค่าขีดจำกัดเหลวของดินก่อนเพื่อจะได้คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่มเข้าไปในตัวอย่างดิน ซึ่งปริมาณน้ำนี้จะต้องเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมในที่นี้จะใช้ประมาณ 1.2 เท่าของค่าขีดจำกัดเหลว ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อยเกินไปดินจะเหนียวทำให้การกำจัดฟองอากาศในดินนั้นทำได้ยาก และต้องใช้แรงดันที่สูงมากในการทำให้ดินไหลเข้าสู่เซลล์ทดสอบ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการคั่นดินเข้าเครื่องทดสอบ) แต่ถ้าใส่น้ำมากเกินไปก็ต้องตั้งตุ้มยางให้มีความสูงมากขึ้นทำให้มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำ นอกจากนี้ผู้ทดสอบยังต้องคำนวณค่าการทรุดตัวในหนึ่งมิติเมื่อการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าปริมาณน้ำ และค่าการทรุดตัวนี้จะใช้เป็นระยะการตั้งตุ้มยางเพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการเตรียมตุ้มยาง) ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติด้วยเครื่อง Oedometer ซึ่งจะใช้วงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 20 มม. การยุบอัดตัวคายน้ำจะใช้กระบวนการ K_0 -Consolidation หรือเรียกว่า 1-D Consolidation ก่อนเพื่อหาดัชนีการทรุดตัว (C_c) โดยผลของคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4-1 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ขุดขึ้นมาจากบริเวณเขตจตุจักร ที่ความลึกช่วง 8-10 เมตร จากการจำแนกประเภทดินด้วยมาตรฐาน USCS พบว่า ดินนั้นเป็น

ประเภท CH และเมื่อจำแนกชนิดแร่ของดินด้วยกราฟของ Casagrande พบว่าเป็นแร่ชนิด Montmorillonite

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่นำมาทดสอบ

| คุณสมบัติของดิน | ค่าของคุณลักษณะ |
|--------------------------|-----------------|
| ขีดจำกัดของเหลว LL (%) | 82 |
| ขีดจำกัดพลาสติก PL (%) | 43 |
| ดัชนีพลาสติก PI (%) | 39 |
| ค่าความถ่วงจำเพาะ Gs | 2.68 |
| ดัชนีของการทรุดตัว C_c | 0.0053 |

2. การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวก่อนดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบ

เพื่อให้การทำลายโครงสร้างของดินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงนำดินที่ได้จากภาคสนามมาย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อน แล้วจึงทำการทำลายโครงสร้าง (Remold) โดยเติมน้ำเข้าไป โดยปริมาณน้ำจะสามารถประเมินได้จากปริมาณน้ำเริ่มต้นจากนั้นจึงทำการปั้นดินกับน้ำให้เข้ากัน ที่ปริมาณน้ำช่วง 1.2-1.4 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดังภาพที่ 4-1 จากนั้นทำการกรองดินผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดประมาณ 1 มม. ที่ซ้อนทับกัน 4 ชั้น เพื่อกรองเศษวัสดุที่ไม่ใช่ดินเหนียวออกไป เช่น เปลือกหอย ก้อนกรวด เศษไม้ เป็นต้น ดังภาพที่ 4-2 นำดินเหนียวเหลวที่ได้มาตากในที่ร่มเพื่อไม่ให้ความร้อนทำลายดินในส่วนที่เป็นอินทรีย์ (Organic) โดยการตากจะทำการปาดดินเป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อที่จะสามารถลดค่าความชื้นได้รวดเร็วขึ้น ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-1 การย่อยดินและปั้นดินให้เข้ากันน้ำ



ภาพที่ 4-2 การกรองเศษหินและเปลือกหอยออกจากดินเหนียวเหลว

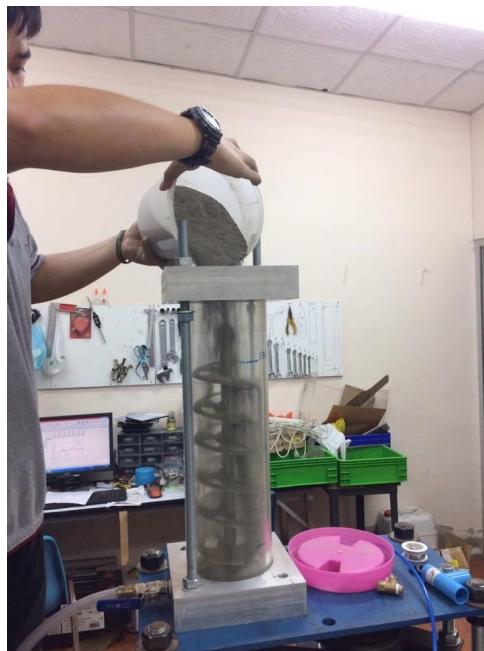


ภาพที่ 4-3 การปาดดินและตากดินในที่ร่มเพื่อลดปริมาณความชื้นในดิน

เมื่อดินแห้งแล้วจึงนำดินที่ได้จากการตากซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ แต่ยังมีขนาดที่ใหญ่กว่าที่ต้องการ จึงนำดินแผ่นมาบรรจุเข้าไปในกระสอบแล้วทุบ เพื่อให้มีขนาดเล็กลงด้วยค้อนยาง ดังภาพที่ 4-4 ทำการคัดแยกขนาดดิน โดยจะใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 หลังจากนั้นเทผงตัวอย่างดินที่ได้ใส่ในเครื่องปั้นดินที่ออกแบบขึ้นเป็นพิเศษ ซึ่งจะสามารถปั้นดินเหลวภายใต้สภาวะสุญญากาศได้โดยรายละเอียดจะขอกว่าในหัวข้อเครื่องปั้นดินเหลว จากนั้นเทดินผงเข้าไปในเครื่องปั้น ดังภาพที่ 4-5



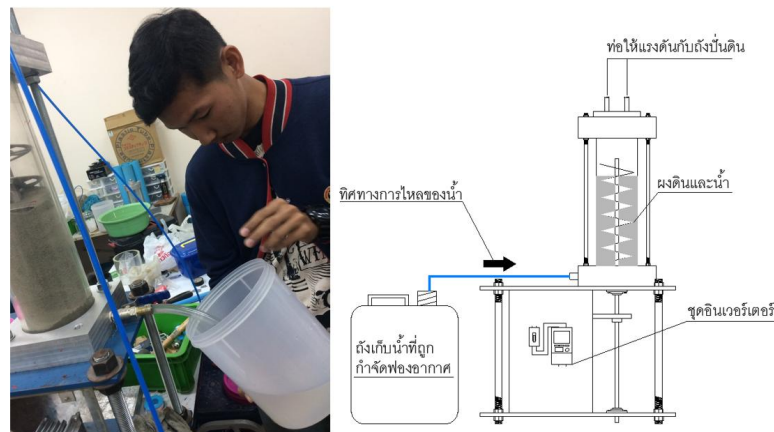
ภาพที่ 4-4 ทูบดินแห้งเพื่อลดขนาดของเม็ดดินด้วยก้อนยางจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40



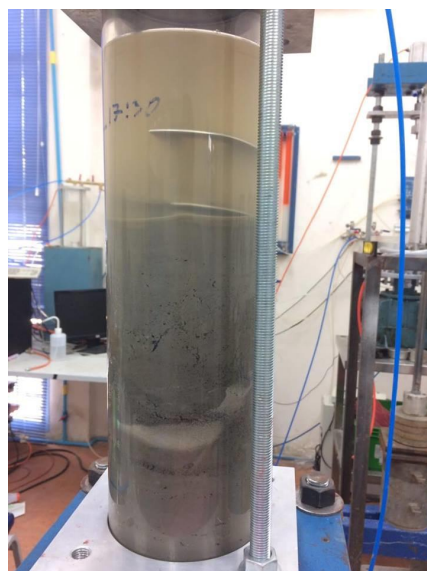
ภาพที่ 4-5 เทผงดินลงในเครื่องปั่นดิน

หลังจากนั้นนำเอาน้ำที่ถูกกำจัดฟองอากาศ (De-airing water) เข้ามาผสมกับตัวอย่างดิน ซึ่งน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นน้ำที่ผ่านเครื่องกรองน้ำระบบ Reverse osmosis โดยต้องการค่าความชื้นที่ 1.2 เท่าของขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit) ซึ่งปริมาณน้ำจะมีความสัมพันธ์กับระยะการดึงดูงยาง (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อการเตรียมดูงยาง) ประกอบกับมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะดึงสูงสุดที่ตัว Plane strain cell จะดึงได้ (68 มม.) และความสามารถในการยึดตัวต่อแรงดึงดูงยาง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ปริมาณน้ำที่มีค่ามากได้ การเติมน้ำเข้าไปในผงดินนั้นจะใช้วิธีดูน้ำเข้าไป

ในถังปั่นผ่านรูด้านล่างเพื่อให้ระบบปั่นและผงดินยังคงอยู่ในสุญญากาศ และน้ำที่ถูกกำจัด
 ฟองอากาศไม่ดีเข้ากับอากาศอีกครั้ง ดังภาพที่ 4-6 ทำการแช่ดินกับน้ำภายใต้สภาพแรงดันที่เป็นลบ
 เท่ากับ -80 kPa ที่ไว้ 24 ชั่วโมง โดยยังไม่เปิดระบบปั่นดิน ดังภาพที่ 4-7 ก่อนทำการปั่นดินเข้ากับ
 น้ำระบบยังคงให้ค่าแรงดันในถังปั่นเท่ากับ -80 kPa แก่ตัวอย่างตลอดเวลาเพื่อกำจัดฟองอากาศ
 ในเม็ดดิน



ภาพที่ 4-6 ผสมน้ำเข้ากับตัวอย่างดิน

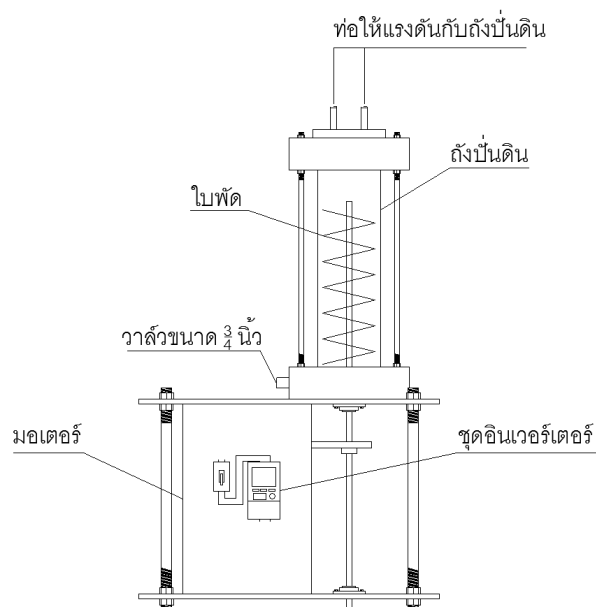


ภาพที่ 4-7 การแช่ตัวอย่างดินในสถานะสุญญากาศแล้วทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด

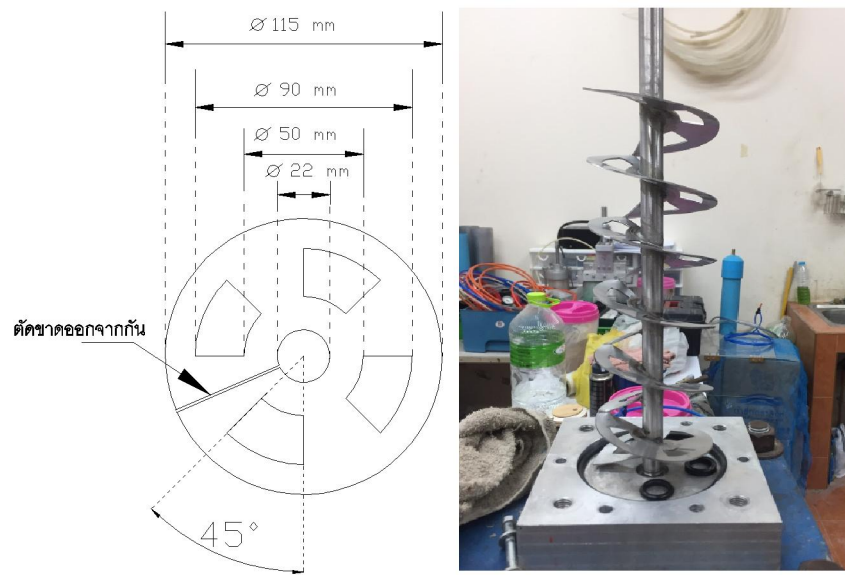
ทำการปั่นดินด้วยความเร็ว 15 รอบ/ นาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อดันดินจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ให้เข้ากับน้ำ โดยยังคงรักษาค่าแรงดันในถังปั่นเท่ากับ -80 kPa เมื่อตัวอย่างถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันตรวจสอบอีกครั้ง

3. หลักการและการออกแบบเครื่องปั่นดิน

เครื่องปั่นดินที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างนี้มีส่วนประกอบ คือ มอเตอร์ ถังปั่นดิน ใบพัด ชุดควบคุมความเร็วรอบและทิศทางของการหมุน ดังภาพที่ 4-8 โดยมีหลักการในการออกแบบคือ มอเตอร์สามารถหมุนด้วยความเร็วตั้งแต่ 5-60 รอบ/ นาที ตัวใบพัดได้ทำการออกแบบขึ้นในลักษณะเกลียวสว่านและยังสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านบนลงสู่ด้านล่างและหมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเพื่อให้ตัวอย่างมีความสม่ำเสมอและสามารถกำจัดฟองอากาศได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจากการออกแบบใบพัดให้มีช่องว่าง 4 ช่องโดยแต่ละเกลียวห่างกันประมาณ 7.5 ซม. และทำมุมกับแนวระดับประมาณ 30° ดังภาพที่ 4-9 เมื่อทำการเปิดเครื่องให้ใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกาดินเหลวก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างของถังปั่นและดินเหลวจะถูกรีดออกมาจากช่องของใบพัดออกมาเป็นเส้นดินเหลวด้วยแรงดันของใบพัดซึ่งทำให้อากาศที่อยู่ภายในดินระเบิดออกและสัมผัสกับแรงดันลบภายในถังปั่น ช่วยทำให้การกำจัดอากาศออกจากตัวอย่างดินเหลวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลักษณะการแตกตัวของอากาศ ดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-8 รูปใบพัดของเครื่องปั่นดิน



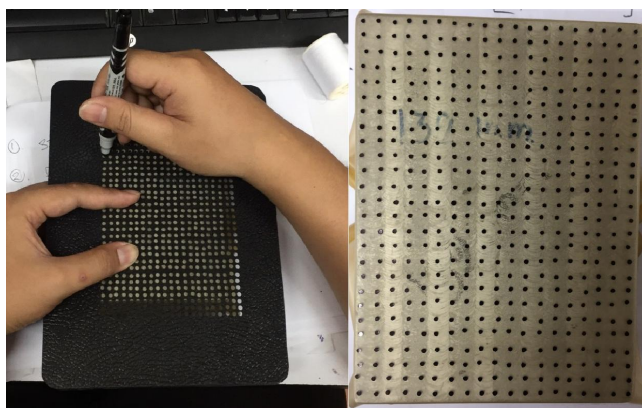
ภาพที่ 4-9 รูปใบพัดของเครื่องปั่นดิน



ภาพที่ 4-10 ฟองอากาศที่ระเบิดออกมาจากดินเหลว

4. การเตรียมถุงยาง

ก่อนมีการอัดดินเหลวเข้าสู่เครื่องทดสอบ Plane strain cell จะต้องทำการติดตั้งถุงยาง (Rubber membrane) เข้ากับเครื่องมือทดสอบก่อน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำถุงยางที่มีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้มาทำการวาดจุดลงคู่ลักษณะแถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นและยังสามารถนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างดินด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายได้ในอนาคต โดยการวาดจุดของถุงยางนี้จะทำการวาดจุดแบบกริด (Grid) จุดที่ถูกวาดขึ้นนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มม. มีระยะห่างระหว่างจุดประมาณ 5 มม. และตำแหน่งของจุดที่ถูกวาดขึ้นจะมีขนาดเท่ากับด้านกว้างและสูงของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบที่ 95 x 132 มม. ตามลำดับ วิธีการและภาพจุดบนถุงยาง ดังภาพที่ 4-11

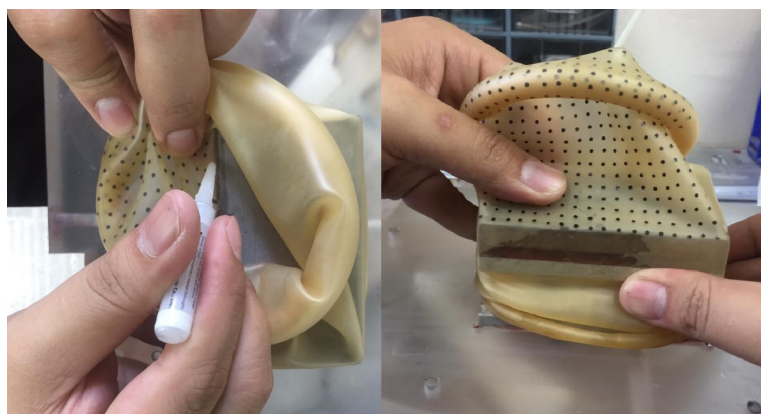


ภาพที่ 4-11 ขนาดและตำแหน่งของจุดแต่ละจุดที่ทำการวาดขึ้น

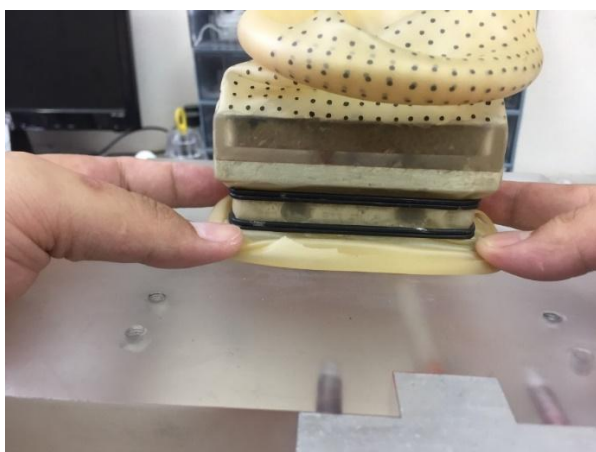
เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการวาดจุดของถุงยางเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะนำถุงยางนี้ไปติดตั้งกับเครื่องมือโดยสวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่างก่อน (ภาพที่ 4-12) ในการติดตั้งถุงยางเข้ากับแท่นกดจะใช้กาวร้อน (Cyanoacrylate) ติดถุงยางเข้ากับแท่นกดเพื่อไม่ให้ถุงยางที่อยู่ส่วนนอกเหนือจากตัวอย่างเกิดการขยับ ดังภาพที่ 4-12 และภาพที่ 4-13 หลังจากนั้นทำการสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นกด ดังภาพที่ 4-14 แล้วทำการเจาะรูถุงยางเพื่อให้เป็นรูเพื่อใช้ร้อยสกรู (Screw) ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างแรงกดให้กับโอริง (O-Ring) โดยใช้หัวแร้งในการเจาะ ดังภาพที่ 4-15 หลังจากนั้นจะทำการประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดแล้วใช้สกรู (Screw) เป็นตัวกดผ่านแผ่นอลูมิเนียมเพื่อซีล (Seal) ไม่ให้เกิดการรั่วซึม ดังภาพที่ 4-16 เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนทั้งหมดแล้วจึงทำติดตั้งถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบนอีกครั้งดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น (ภาพที่ 4-17 - ภาพที่ 4-21)



ภาพที่ 4-12 สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง



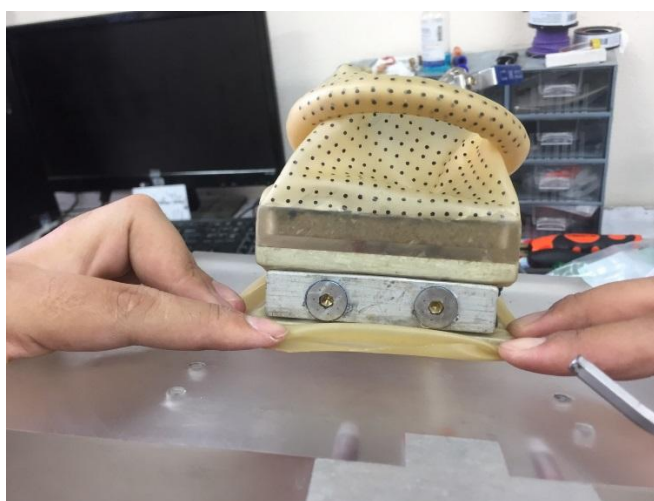
ภาพที่ 4-13 ติดถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง



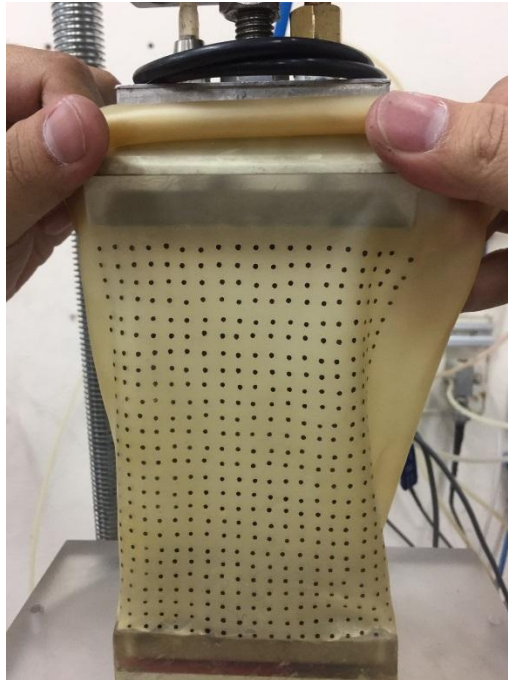
ภาพที่ 4-14 ติดตั้งโอริงเข้ากับแท่นกดด้านล่าง



ภาพที่ 4-15 ใช้หัวแร้งเจาะถ่วงยางเพื่อให้เป็นรูยึดสกรู



ภาพที่ 4-16 ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านล่าง



ภาพที่ 4-17 สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน



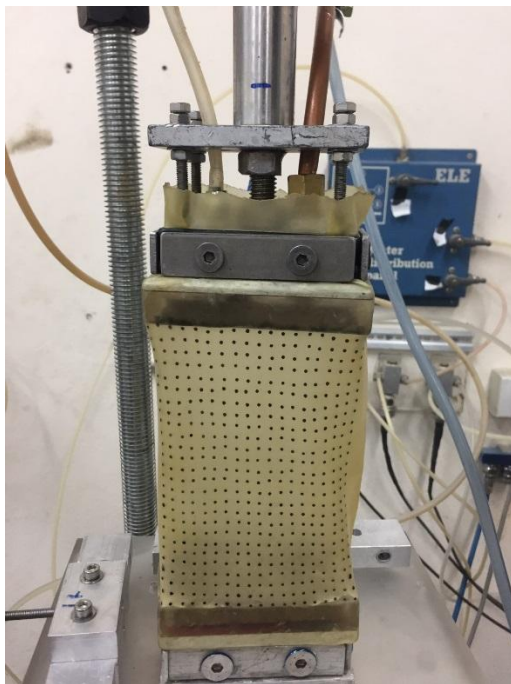
ภาพที่ 4-18 ติดถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน



ภาพที่ 4-19 ติดตั้งโอริงเข้ากับแท่นกดด้านบน

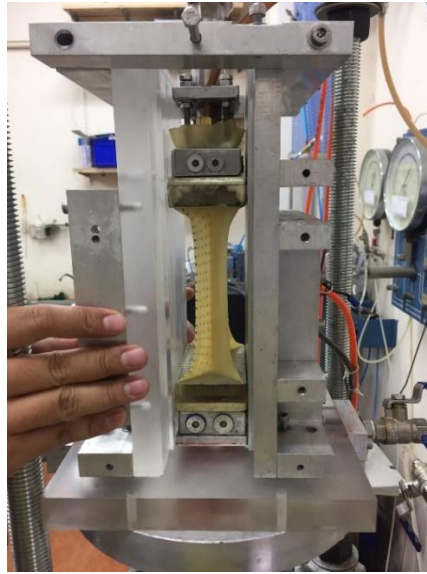


ภาพที่ 4-20 ใช้หัวแรงเจาะตุ้งยางเพื่อให้เป็นรูยึดสกรู

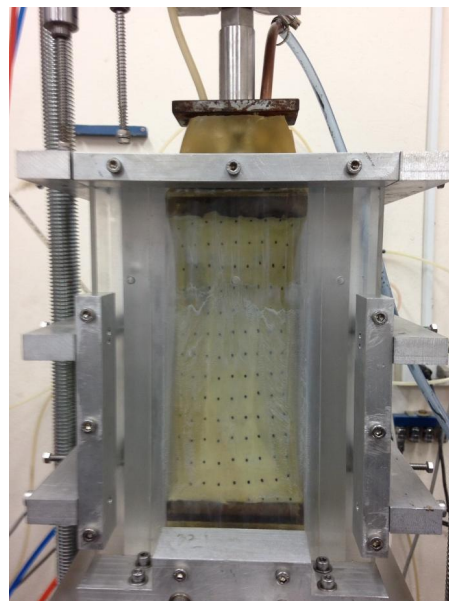


ภาพที่ 4-21 ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านบน

เมื่อติดตั้งถุงยางเข้ากับแท่นกดทั้งด้านบนด้านล่างเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านของตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือทดสอบเพื่อให้ตัวอย่างเกิดการทรุดตัวในหนึ่งมิลิเมตร (ภาพที่ 4-22) ก่อนทำการติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านเข้ากับเครื่องมือจะใช้ซิลิโคนกรีส (Silicone grease) ทาแผ่นประกบด้านที่สัมผัสกับถุงยาง และทาไว้รอบ ๆ ผิวถุงยางด้านนอกที่สัมผัสกับอุปกรณ์ทดสอบด้วยเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างเกิดการเคลื่อนตัว หลังจากนั้นทำการดึงถุงยางให้ได้ระยะตามที่ได้คำนวณค่าการทรุดตัวภายในหนึ่งมิลิเมตรซึ่งจะแปรผันตามค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างดินของแต่ละตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-23



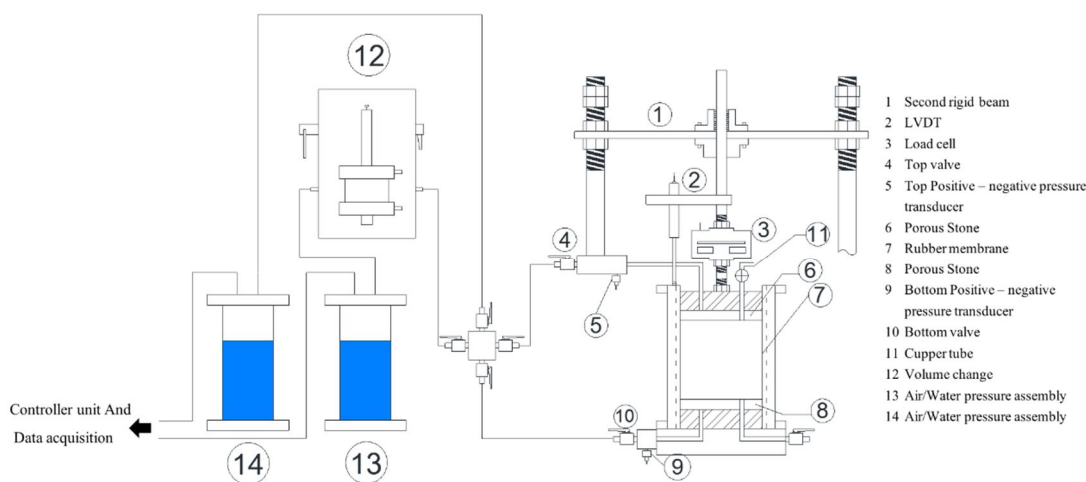
ภาพที่ 4-22 ติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านเข้ากับอุปกรณ์



ภาพที่ 4-23 ดึงถุงยางตามระยะที่ได้กำหนดไว้

5. ขั้นตอนการทำให้ระบบอิมตัวด้วยน้ำ

ก่อนทำการดันดินเข้าเครื่องทดสอบจะต้องทำให้ระบบทั้งหมดในเครื่องทดสอบอิมตัวด้วยน้ำก่อน โดยจะทำการไล่น้ำที่ถูกกำจัดฟองอากาศ (De-airing water) เข้าไปในระบบ ในที่นี้จะใช้แรงดันลบแบบสองทาง (Double vacuum) ซึ่งน้ำจะไหลจากถังแยกอากาศ (Air/ Water pressure assembly) หมายเลข 13 ดังภาพที่ 4-24 ผ่าน Volume change หมายเลข 12 แล้วเข้าสู่ด้านล่างผ่านขึ้นสู่ด้านบนของเซลล์ทดสอบโดยผ่านวาล์วหมายเลข 10 และ 4 ตามลำดับ น้ำที่ถูกนำเข้าไปในระบบจะนำเอาอากาศและน้ำที่ปนกันอยู่ไหลออกมารวมกันในถังหมายเลข 14 เพื่อแยกอากาศและน้ำออกจากกัน ในการไล่น้ำระบบจะทำการไล่น้ำประมาณ 3 ถึง 4 รอบ หรือจนกว่าฟองอากาศในระบบจะหมดไปซึ่งจุดประสงค์ของการไล่น้ำด้วยวิธีดังกล่าวมีขึ้นเพื่อกำจัดอากาศในถุงยาง (หมายเลข 7) และหินปูน (Porous stone) (หมายเลข 6 และ 8) ทั้งด้านบนและล่างของอุปกรณ์รวมไปถึงอากาศที่อยู่ในตัววัดแรงดันน้ำ (Negative & Positive pressure transducer) อีกด้วย (หมายเลข 5 และ 9) หลังจากนั้นทั้งระบบให้อยู่ในสถานะสุญญากาศที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ -80 kPa อีก 12 ชั่วโมง เมื่อเวลาครบแล้วก็จะทำการไล่น้ำเข้าสู่ระบบโดยใช้แรงดันลบแบบสองทาง (Double vacuum) อีก 1-2 ครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าฟองอากาศจะไม่ตกค้างในระบบ ภาพที่ 4-25 แสดงการไล่น้ำเข้าสู่ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 4-24 เซลล์ทดสอบแรงเฉือนในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ



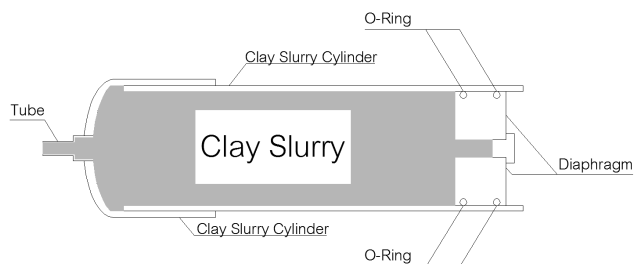
ภาพที่ 4-25 การใช้น้ำกำจัดฟองอากาศในระบบและเซลล์ทดสอบ

6. การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบ

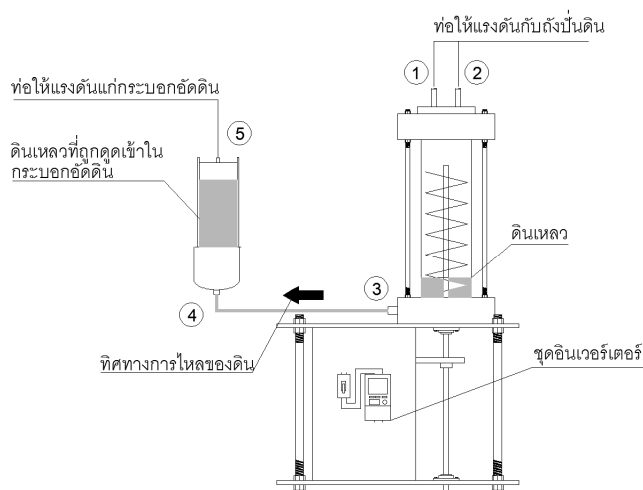
ก่อนทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบจะต้องทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอกอัดดินดินเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็มฉีดยาขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 4-26 และต้องทำการตรวจสอบสภาพความอึดตัวด้วยน้ำ ดังสมการที่ 4-1 ก่อนทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอกอัดดินเพื่อให้มั่นใจได้ว่าดินอยู่ในสภาพอึดตัวด้วยน้ำ

$$G_s \times w = S \times e \quad (4-1)$$

เมื่อดินมีความอึดตัวมากกว่าร้อยละ 98 ก็จะทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอกอัดดิน โดยต่อด้านล่างของกระบอกอัดดินดินเหลว (หมายเลข 4) ดังภาพที่ 4-27 เข้ากับด้านล่างของเครื่องปั่นดิน (หมายเลข 4) แล้วการปล่อยแรงดันในถังปั่นดินให้เป็นค่าแรงดันบรรยากาศโดยทำการเปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 หลังจากนั้นทำการเปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อให้ดินไหลเข้าสู่กระบอกอัดดินและให้แรงดันลบแก่ด้านบนกระบอกอัดดินดินเหลว (หมายเลข 5) และเร่งความเร็วรอบของใบพัดไปของเครื่องปั่นดินไปที่ 60 รอบ/ นาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อให้ดินไหลเข้าสู่กระบอกอัดดินโดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะถ่ายดิน เมื่อดินเต็มกระบอกแล้วจะนำแผ่นไดอะแฟรมออลูมิเนียมซึ่งซีล (Seal) ด้วยโอริง (O-Ring) เปิดวาล์วด้านบนแล้วกดเข้าไปด้านบนของกระบอกอัดดินเพื่อไล่อากาศด้านบนออกจากรูนั้นทำการปิดวาล์ว

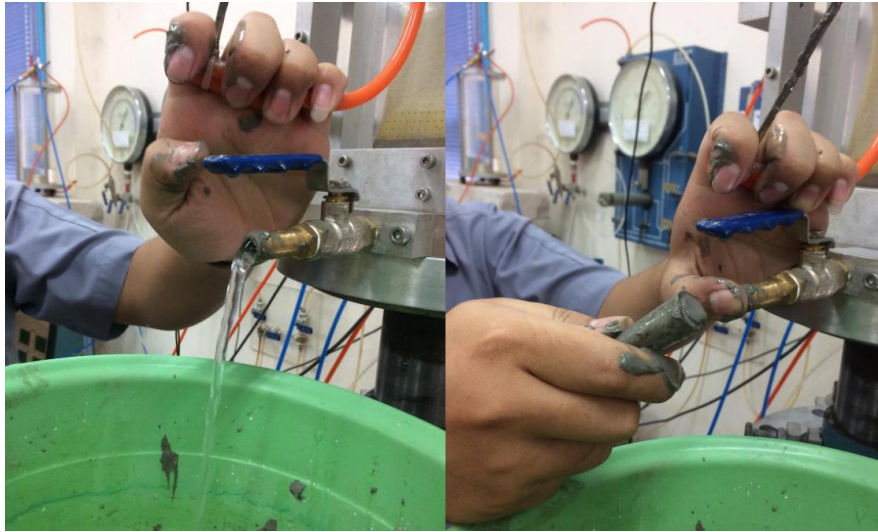


ภาพที่ 4-26 ภาพตัดของกระบอกอัดฉีดดินเหลว

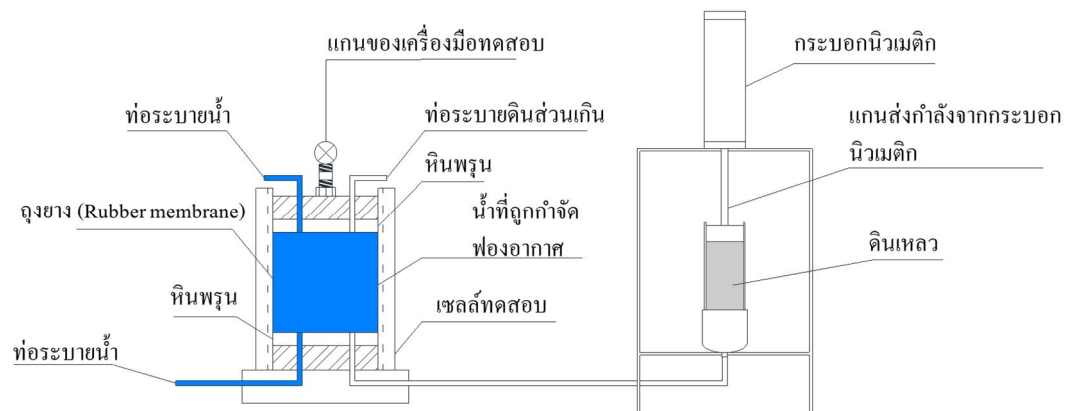


ภาพที่ 4-27 บรรจุดินเข้าสู่กระบอกดินจากเครื่องปั่นดิน

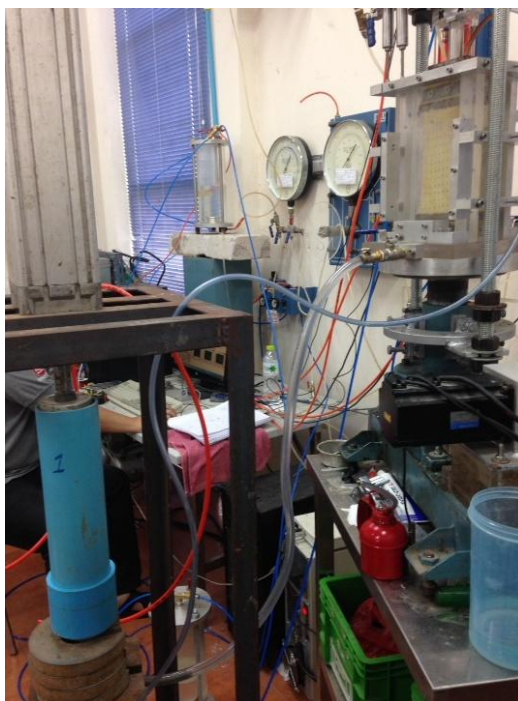
ในการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบนั้นจะใช้แรงกดจากกระบอกนิวเมติกกดผ่านแผ่นไดอะแฟรมอูมิเนียมเพื่อดันดินออกจากกระบอกเข้าเครื่องทดสอบ โดยการต่อท่อจากกระบอกอัดฉีดดินเหลวเข้ากับเครื่องทดสอบก่อนในขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากถ้าการเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกันมีอากาศค้างอยู่ทำให้ระบบไม่อึดตัวด้วยน้ำ โดยมีขั้นตอนเริ่มจาก ทำการปล่อยน้ำที่อยู่ในระบบออกมาทางวาล์วด้านล่างของเซลล์ทดสอบเพื่อไล่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบออกมา จากนั้นนำท่อที่ต่อจากกระบอกอัดฉีดดินมาต่อเข้ากับวาล์ว โดยจะทำการดันดินออกมาให้พ้นปลายท่อเพื่อให้ดินเหลวไล่อากาศที่ตกค้างภายในสายออกมา ดังภาพที่ 4-28 แล้วจึงต่อท่อเข้าระบบ โดยมีแผนผังการทำงาน ดังภาพที่ 4-29 และภาพที่ 4-30 แสดงภาพการทำงานจริงในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 4-28 ปล่อน้ำในระบบและดันดินออกจากท่อเพื่อไล่อากาศตกค้าง

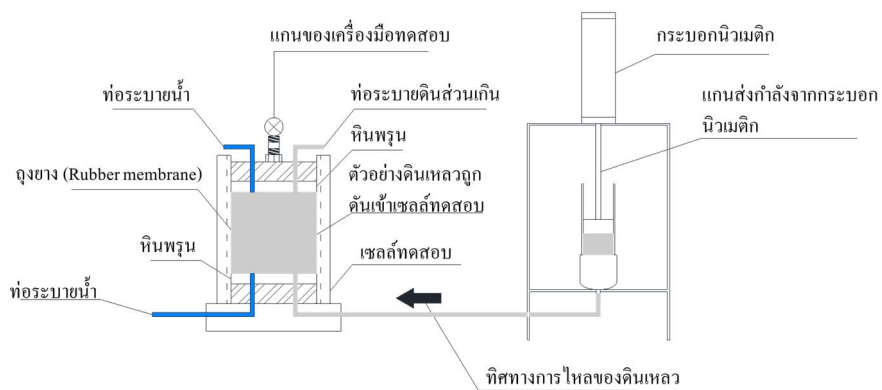


ภาพที่ 4-29 ติดตั้งกระบอคนิวเมติกเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ
กำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ



ภาพที่ 4-30 ติดตั้งกระบอกล้วนดินเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ
กำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ

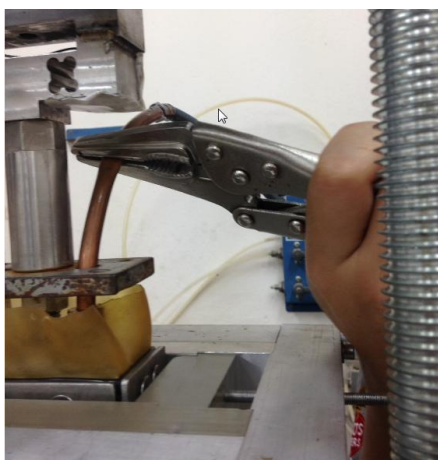
ทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกถือความสูงของตัวอย่างไว้โดยความสูงนี้ได้ถูก
คำนวณมาจากระยะในการดึงลวดยางที่ได้กล่าวมาในหัวข้อการเตรียมลวดยางโดยระบบได้
ดังภาพที่ 4-31 ในการดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบจะทำการดันดินจากด้านล่างของอุปกรณ์
เพื่อให้ดินเหลวเข้าไปไล่น้ำที่อยู่ภายในลวดยางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนจนมีดินและน้ำส่วนเกิน
ออกมาจากท่อระบายที่ได้เตรียมเอาไว้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าในระบบทดสอบไม่มีอากาศค้างภายใน
ระบบอีกแล้ว ดังภาพที่ 4-32 จากนั้นทำการซีล (Seal) ท่อที่ดินและน้ำที่ระบายออกมาด้วยการใช้คีม
บีบรัดให้ท่อทองแดงแนบสนิทเข้าด้วยกันเพื่อไม่ให้ระบบเกิดการรั่วซึม (ภาพที่ 4-33) ก่อนทำการ
บีบท่อเข้าด้วยกันจะใช้แผ่นยางปะเก็นสอดเข้าไปในท่อก่อนเพื่อให้การซีล (Seal) มีประสิทธิภาพ
มากยิ่งขึ้น เมื่อดินตัวอย่างเข้าสู่เครื่องทดสอบจนเต็มและพร้อมที่จะดำเนินการในขั้นตอนถัดไป
จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4-34



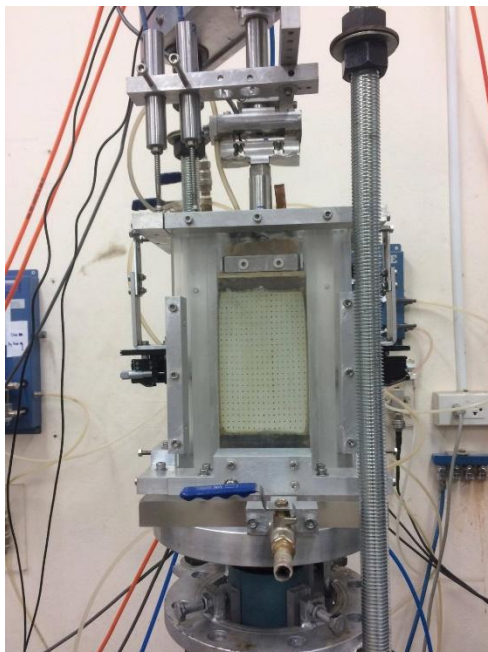
ภาพที่ 4-31 ทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกถือคความสูงของตัวอย่างไว้



ภาพที่ 4-32 ดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบจนมีดินและน้ำส่วนเกินออกมา



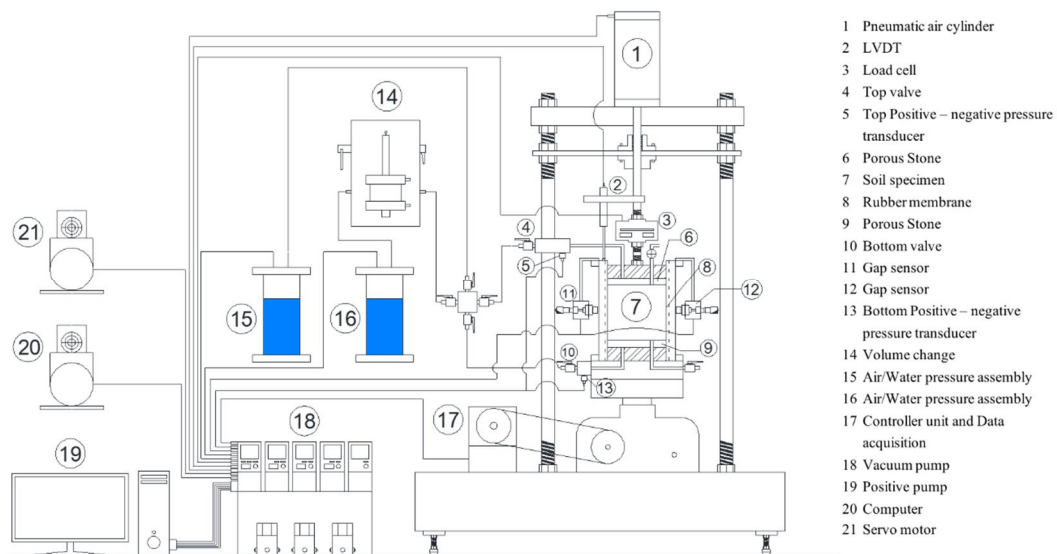
ภาพที่ 4-33 ซึลท่อทองแดงเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึม



ภาพที่ 4-34 ตัวอย่างดินเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในเครื่องทดสอบและพร้อมจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

อุปกรณ์

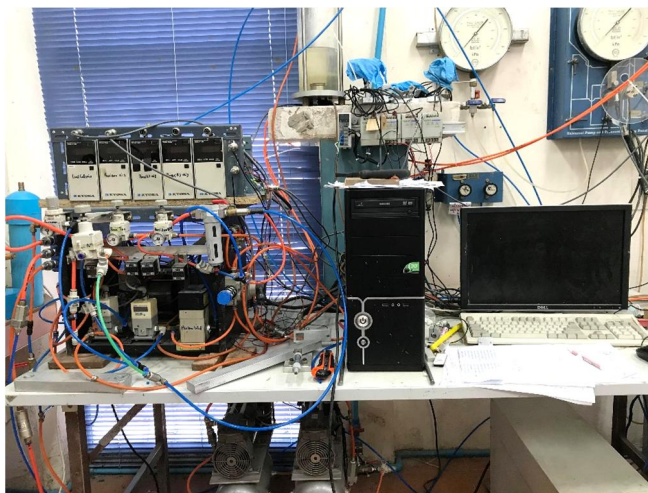
การทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังของดินในห้องปฏิบัติการนั้นจะต้องจำลองเงื่อนไขสถานะแวดล้อม (Boundary condition) ให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นจริงในสนามให้มากที่สุด โดยส่วนใหญ่วิธีที่เป็นที่นิยม คือ การทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) และการทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Triaxial compression test) โดยสถานะแวดล้อมของการทดสอบทั้งสองการทดสอบเป็นแบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) จากการพิจารณาสถานะแวดล้อมของความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในสนาม สถานะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียวนั้นไม่สามารถครอบคลุมงานก่อสร้างทั้งหมดของงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีซึ่งส่วนใหญ่จะมีสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain condition) ดังนั้นจึงมีการออกแบบอุปกรณ์ที่จะสามารถทดสอบดินภายใต้สถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ โดยอุปกรณ์นี้ได้ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา โดยมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ ดังภาพที่ 4-35 ซึ่งจะสามารถแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ชุดเฟรมทดสอบตัวอย่าง (ภาพที่ 4-36) และหน่วยควบคุมเครื่องมือซึ่งสั่งการด้วยระบบอัตโนมัติผ่านคอมพิวเตอร์ (ภาพที่ 4-37)



ภาพที่ 4-35 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ



ภาพที่ 4-36 เครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ



ภาพที่ 4-37 คอมพิวเตอร์และชุดควบคุมเครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดใน
ระนาบ

1. ระบบสำรองไฟฟ้า

ในกระบวนการอัดตัวคาน้ำของดิน (Consolidation) เพื่อให้ดินสร้างโครงสร้างขึ้นใหม่ รวมไปถึงการเดือนตัวอย่าง โดยปกติแล้วจะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 25-30 วัน ต่อการทดสอบหนึ่งตัวอย่าง ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องมือทดสอบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะอุปกรณ์ทดสอบได้ออกแบบให้คอมพิวเตอร์สั่งงานและเก็บข้อมูลผ่านโปรแกรม LabVIEW อยู่ตลอดเวลา เพื่อความสะดวกและความแม่นยำของการทดสอบ รวมไปถึงอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการต้องคงที่อยู่เสมอตลอดการทดสอบ (25°C) ดังนั้นระบบสำรองไฟในกรณีที่กระแสไฟฟ้าหลักขัดข้องจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ระบบสำรองไฟที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย เครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติ (Uninterruptible power source) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power generator) ดังภาพที่ 4-38 เมื่อกระแสไฟฟ้าหลักดับเครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติจะทำงานทันทีโดยไม่ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทดสอบหยุด โดยเครื่องสามารถสำรองไฟฟ้าให้กับเครื่องมือทดสอบอยู่ที่ประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติอีกครั้งโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบทดสอบได้นานต่อเนื่องสูงสุด 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-38 เครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. ระบบสำรองแรงดันลม

ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้จะเกิดจากแรงดันลมที่ถูกปล่อยมาจากเครื่องปรับแรงดันลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-pneumatic regulator) เข้าสู่ระบบกลมนิวเมติก (Pneumatic) เพื่อส่งต่อแรงให้กับด้านบนของตัวอย่าง (ดูรายละเอียดในภาพที่ 4-35) และยังรวมไปถึงระบบสมดุลของแรงดันลมด้านข้าง (ดูรายละเอียดในหัวข้ออุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง) เมื่อป้อนลมหลักเกิดเหตุขัดข้องหรือไฟฟ้าดับระบบสำรองแรงดันลมจะทำงานทันที โดยแรงดันลมจะถูกสร้างขึ้น โคนป้อนลมสำรอง ที่ถูกต่อเข้ากับระบบเครื่องทดสอบและระบบสำรองไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

3. เซลล์ทดสอบ (Plane strain cell)

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับดินเหนียวอ่อน โดยทำการอัดตัวคายน้ำด้านนอกของเซลล์ทดสอบก่อนแล้วทำการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อบรรจุเข้าสู่เซลล์ทดสอบด้วยการตัดแต่ง (Trim) โดยดินตัวอย่างไม่ถูกรบกวนนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมดินตัวอย่างให้ประกบเข้ากับเซลล์ทดสอบได้พอดีโดยไม่มีระยะห่างระหว่างดินกับเซลล์ทดสอบและยังคงรักษามุมและผิวของตัวอย่างให้สม่ำเสมอแน่นอนแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย เพราะตัวอย่างมีลักษณะที่นิ่มมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สร้างเซลล์การทดสอบขึ้นเพื่อจะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวโดยเซลล์ทดสอบนี้สามารถเตรียมตัวอย่างดินในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำไปจนถึงการทดสอบการรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบได้โดยที่ตัวอย่างดินจะไม่ถูกรบกวน โดยเซลล์ทดสอบนี้จะสามารถเตรียมตัวอย่างให้มีความกว้างเท่ากับ 55 มม. ยาว 95 มม. และสูง 130 มม. โดยความสูงของตัวอย่างจะถูกประเมินมาจากค่าของ C_c ซึ่งหาได้จากกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติด้วยเครื่องมือ Oedometer เซลล์ทดสอบจะประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลัก ๆ คือ แผ่นอะคริลิกและ

แผ่นอลูมิเนียม ดังภาพที่ 4-39 - ภาพที่ 4-42 ด้านหน้า (Plate A) และด้านข้าง (Plate C - D) ของ เซลล์ทดสอบทำขึ้นจากแผ่นอะคริลิกใสเพื่อให้มองเห็นตัวอย่างดิน ในส่วนของด้านหลัง (Plate B) ทำขึ้นจากอลูมิเนียมเพื่อสามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินได้ เซลล์ทดสอบนี้ได้ทำการออกแบบขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน โดยสามารถทำได้ 2 เงื่อนไข ได้แก่

3.1 การอัดตัวคายนํ้าในหนึ่งมิติ (PS1D) ในกระบวนการนี้จะทำการติดตั้งถุงยางเข้ากับส่วนควบทั้งบนและล่างของตัวอย่างที่อยู่ในเซลล์ทดสอบ โดยมีแผ่นประกบด้านหน้าและด้านหลังหรือ Plate A-B ตามลำดับประกบอยู่กับเซลล์ทดสอบ จากนั้นจึงนำแผ่นประกบด้านข้างทั้งสอง (Plate C-D) เข้ามาประกบด้านข้างทั้งสองด้านแล้วใช้สกรูยึดเข้ากับเซลล์ทดสอบ ดังภาพที่ 4-39 และภาพที่ 4-41 เพื่อให้ตัวอย่างทรุดตัวได้ในหนึ่งมิติเท่านั้น

3.2 การทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ (PS2D) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอัดตัวคายนํ้าในหนึ่งมิติ แกนส่งกำลังจะถูกยึดติดกับลูกปืนสไลด์ที่ติดตั้งเข้ากับคานบังคับด้านบนแล้วทำการถอดแผ่นประกบด้านข้างออก (Plate C - D) เพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบโดยตัวอย่างดินสามารถเคลื่อนตัวในแนวราบได้สูงสุดข้างละ 10 มม. หลังจากนั้นจึงนำเซนเซอร์วัดระยะ (Gab sensor) เข้ามาติดตั้งกับเซลล์ทดสอบทั้งด้านซ้ายและด้านขวาโดยการติดตั้ง จะมีตำแหน่งของการวัดการเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางของตัวทดสอบพอดี ดังภาพที่ 4-40 และภาพที่ 4-42

4. อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง

หลักการในการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างนี้ได้แนวคิดในการออกแบบมาจากเครื่องมือ Oedometer แบบพิเศษ ซึ่งใช้หาค่าการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สถานะอยู่นิ่งของทราย ที่ถูกสร้างโดย Vardhanabhuti (2006) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของงานวิจัยดังกล่าวมาประยุกต์เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่สามารถวัดแรงกระทำด้านข้างของดินได้อย่างแม่นยำและประหยัดโดยเปลี่ยนมาใช้แรงดันลมแทน เทคนิคนี้คณะผู้วิจัยขอเรียกว่า “เทคนิคสมดุลด้วยแรงดันลม (Air-Pressure balance technique)”

ระบบสมดุลด้วยแรงลมนี้อาจถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นประกบด้านหลัง (Plate B) ดังภาพที่ 4-41 อุปกรณ์ชิ้นนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเพื่อหาค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นซึ่งจะต้องไม่เกินค่าที่จุดคราก (Yield stress) ของวัสดุ รวมทั้งหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งชุดเซนเซอร์แกนเพื่อต้องการให้ผลจากการวัดมีความละเอียดสูงสุด โดยใช้ค่าแรงดันในการออกแบบที่ 200 kPa โดยมีขนาดและมิติ ดังภาพที่ 4-43 หลังจากขึ้นรูปขึ้นงานเสร็จสิ้นจะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4-44 อุปกรณ์นี้มีหลักการวัดแรงดันด้านข้างโดยสามารถสามารถอธิบายได้ คือ ที่จุดเริ่มต้น $P_1 = P_2 = 0$ จะเกิดแรงดันไฟฟ้า

เท่ากับ V_0 โดยที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\Delta V_{out} = 0$ ดังภาพที่ 4-45 (a) เมื่อมีแรงดันมากระทำด้านหน้าของแผ่น ในที่นี้จะใช้แรงดันลม P1 กระทำที่แผ่นไดอะแฟรม ($P_1 \neq 0$ $P_2 = 0$) ซึ่งติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge) ไว้ด้านหลังก็จะเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ และเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่ลบกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเริ่มต้น ($\Delta V = V_{out} - V_0 \neq 0$) เนื่องจากแผ่นไดอะแฟรมไม่อยู่ในสถานะสมดุล (ภาพที่ 4-45 (b)) ดังนั้นเพื่อปรับสมดุลของการเคลื่อนตัวไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal displacement) จะต้องใส่แรงดัน P2 เข้าไปที่ฝั่งตรงข้ามด้วยวิธีการสุ่มค่า (Trial and error method) โดยสถานะสมดุลของทั้งสองด้านจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปอยู่ในจุดเริ่มต้น คือ จุดที่ ($V_{out} = V_0$) โดยที่ค่า $P_1 = P_2 \neq 0$ (ภาพที่ 4-46 (a)) เมื่อสามารถปรับแรงดัน P2 ให้แผ่นไดอะแฟรมกลับมาอยู่ในสถานะสมดุล แผ่นไดอะแฟรมก็จะไม่มีการะในการรับค่าแรงดันและแรงดันลม P2 จะมีค่าเท่ากับแรงดัน P1 ซึ่งในระหว่างการทดสอบค่าแรงดัน P1 จะเปรียบเสมือนแรงดันด้านข้างของดินในขณะนั้น ในงานวิจัยนี้การปรับค่าของแรงดันลม P2 นั้นจะถูกปรับเพื่อให้แผ่นไดอะแฟรมอยู่ในสถานะสมดุลด้วยระบบอัตโนมัติควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์โดยชุดโปรแกรม LabVIEW ชุดโปรแกรมนี้จะควบคุมแรงดันลม P2 ด้วยตัวปรับแรงดันลมไฟฟ้า (Electro-pneumatic regulator) เพื่อความถูกต้องและแม่นยำชุดคำสั่งของโปรแกรมจะทำการสอบเทียบสถานะสมดุลทุก ๆ 4 วินาที โดยจะทำงานเป็นแบบวนลูป (Closed-loop) ดังภาพที่ 4-47 และเมื่อระบบตรวจจับได้ว่า แผ่นไดอะแฟรมรับภาระของแรงดันที่แตกต่างกันมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (± 1 kPa) ระบบจะทำการหาสถานะสมดุลอีกครั้งโดยใช้เวลาในการทำให้ระบบสมดุลอยู่ที่ 4-8 วินาที ซึ่งระยะเวลาในการหาจุดสมดุลของระบบนี้ไม่ส่งผลกระทบในการอ่านค่าแรงดันด้านข้างของดินเมื่ออยู่ในขั้นตอนอัดตัวคายน้ำ แต่จะส่งผลอย่างยิ่งในขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งการวัดค่าแรงดันด้านข้างจะต้องเป็นแบบทันทีทันใดซึ่งรอให้ระบบปรับแรงสมดุลไม่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุง วิธีการวัดค่าแรงดัน P1 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 4-2 คือ แรงกระทำ P1 นั้นสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดันลมเพื่อรักษาสมดุล P2 กับแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระไว้ในขณะนั้น (P_p) ซึ่งแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระไว้ในขณะนั้นจะมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจซึ่งจะทราบได้หลังจากการสอบเทียบ จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถวัดค่าแรงดัน P1 โดยไม่ต้องรอให้ระบบกลับมาอยู่ในสถานะสมดุลและทำให้การวัดค่าสามารถทำได้ทันทีทันใดและมีความแม่นยำสูง ดังภาพที่ 4-48

$$P_{1(cal)} = P_2 + P_D = P_2 + a(\Delta V) \tag{4-2}$$

โดยที่ $P_{1(cal)}$ = ค่าของแรงดันที่กระทำต่อผนังหรือค่าแรงดันดินด้านข้าง (kPa)

P_2 = ค่าแรงดันลมที่ใช้รักษาสมดุลในขณะนั้น (kPa)

P_D = ค่าแรงดันที่แผ่นไดอะเฟรมรับภาระอยู่ในขณะนั้น (kPa)

a = ค่าคงที่ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรง)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตาม เนื่องจากแผ่นประกบ B นั้นมีขนาดใหญ่และไม่ได้ขึ้นรูปจากโลหะที่มีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อนต่ำ (Low-thermal expansion coefficient) จึงทำให้มีผลกระทบของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 4-3 โดยค่า ΔV_T นั้นได้จากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ถูกฝังไว้ในแผ่นประกบ B ซึ่งรายละเอียดการหาค่าคงที่นั้นจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรง

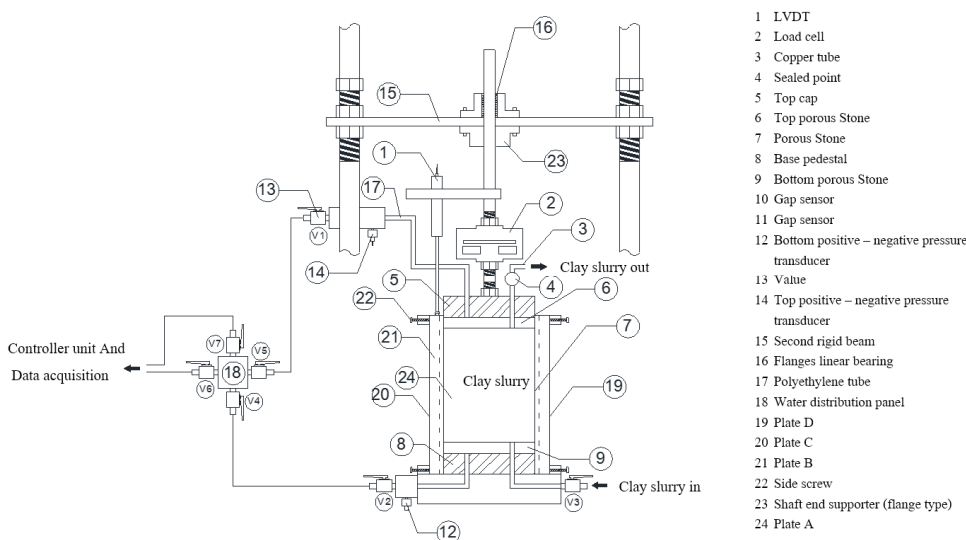
$$P_{1(cal)} = P_2 + a[\Delta V - b(\Delta V_T)] \tag{4-3}$$

โดยที่ $P_{1(cal)}$ = ค่าของแรงดันที่กระทำต่อผนังหรือค่าแรงดันดินด้านข้าง (kPa)

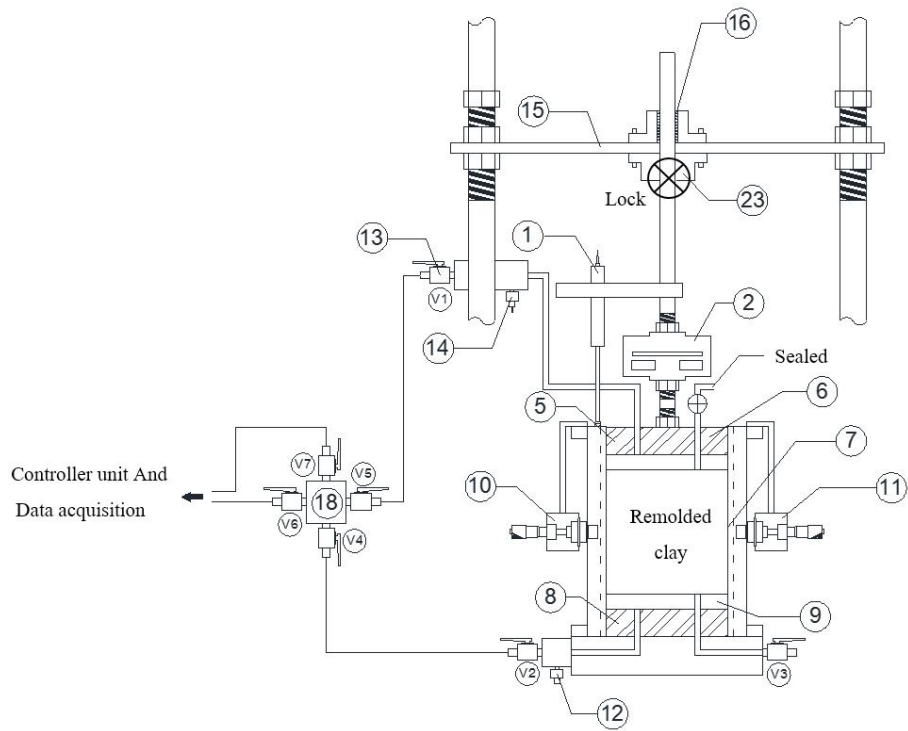
P_2 = ค่าแรงดันลมที่ใช้รักษาสมดุลในขณะนั้น (kPa)

a และ b = ค่าคงที่ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงและการสอบเทียบผลของอุณหภูมิ)

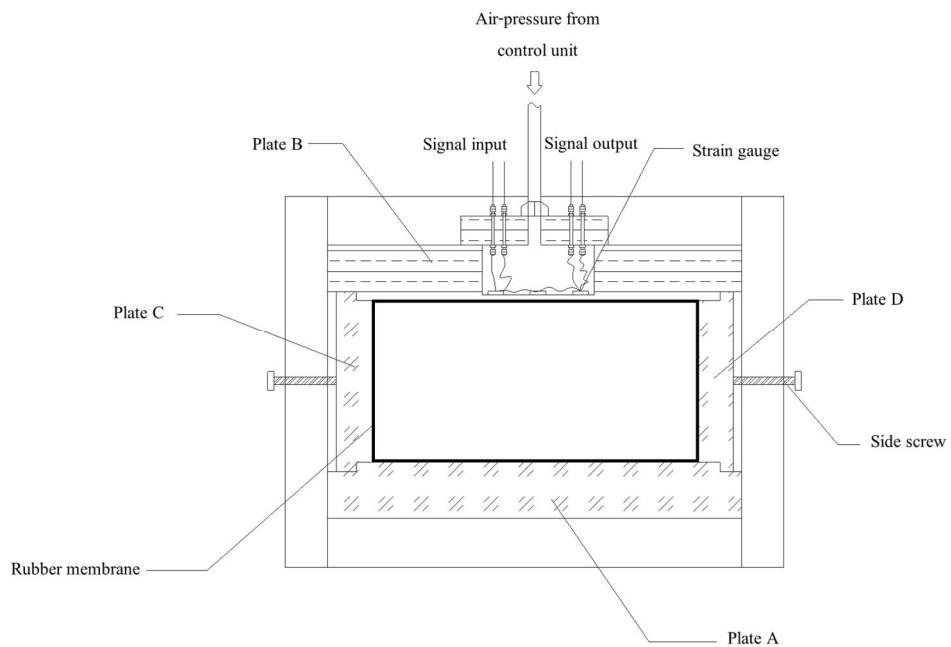
ΔV_T = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



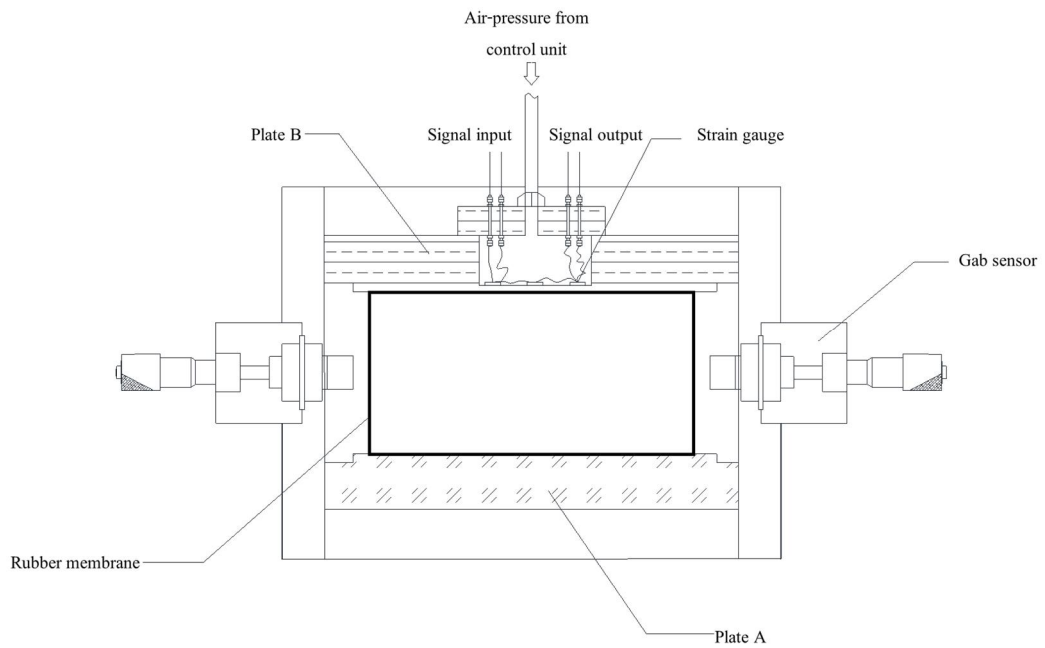
ภาพที่ 4-39 เซลล์ทดสอบสำหรับการวัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นแรก



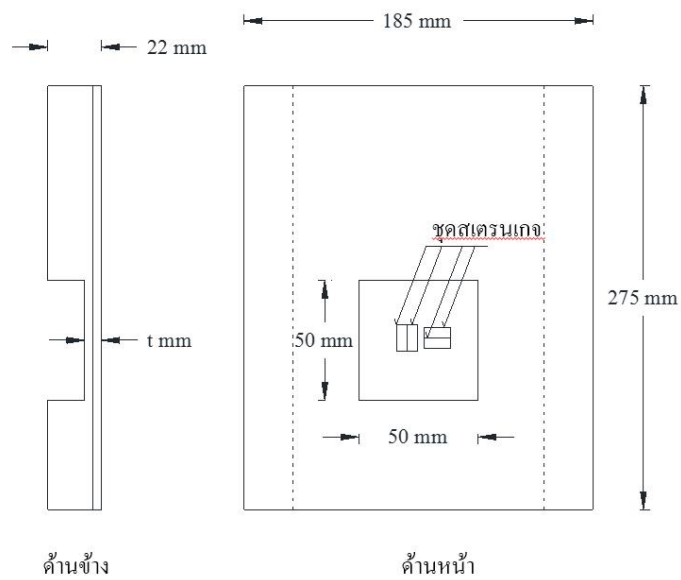
ภาพที่ 4-40 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นสองและขั้นตอนทดสอบแรงเฉือน



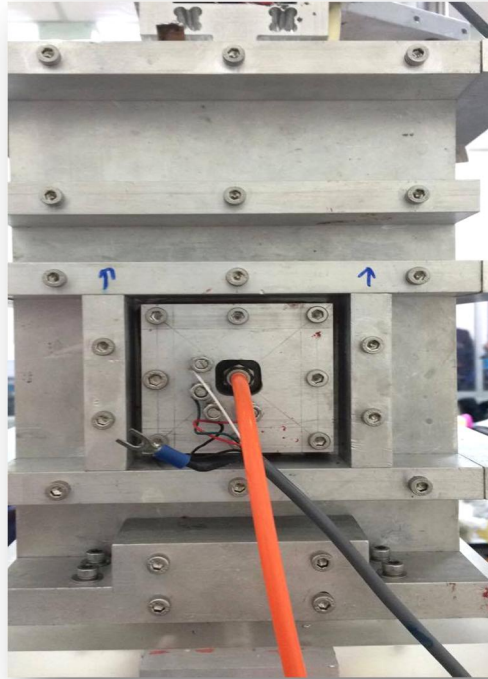
ภาพที่ 4-41 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติขั้นแรก



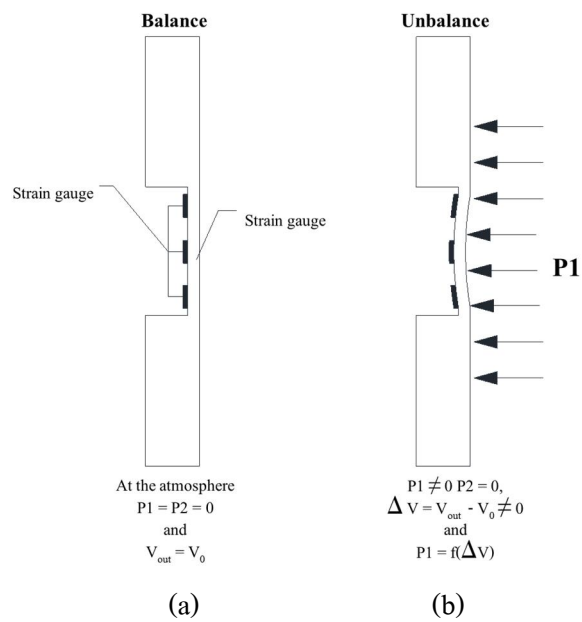
ภาพที่ 4-42 เซลล์ทดสอบสำหรับการอัดตัวภายน้ำในหนึ่งมิติขึ้นสองและขั้นตอนทดสอบแรงเฉือน



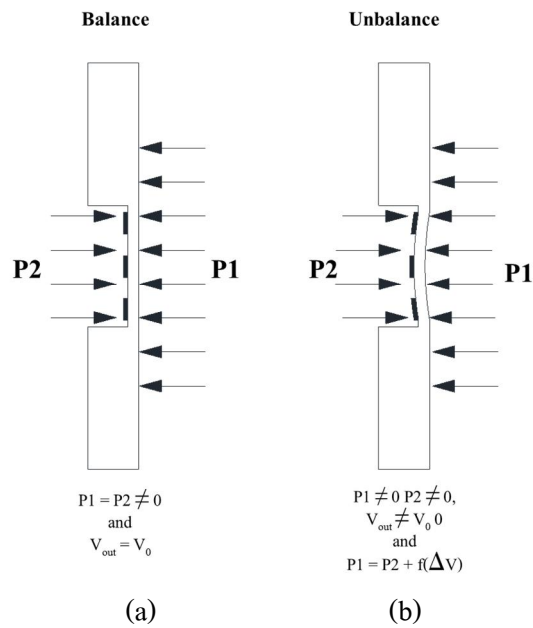
ภาพที่ 4-43 ขนาดของอุปกรณ์และตำแหน่งในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ



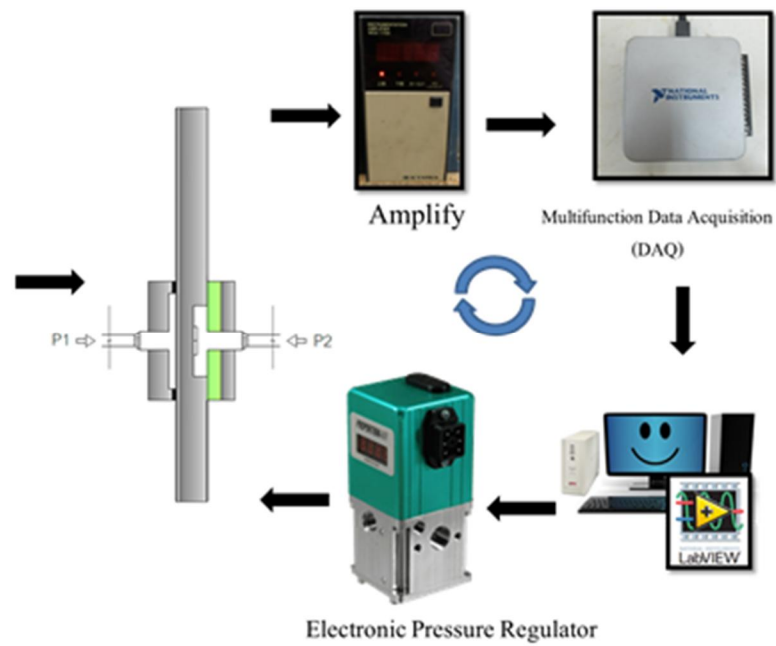
ภาพที่ 4-44 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง



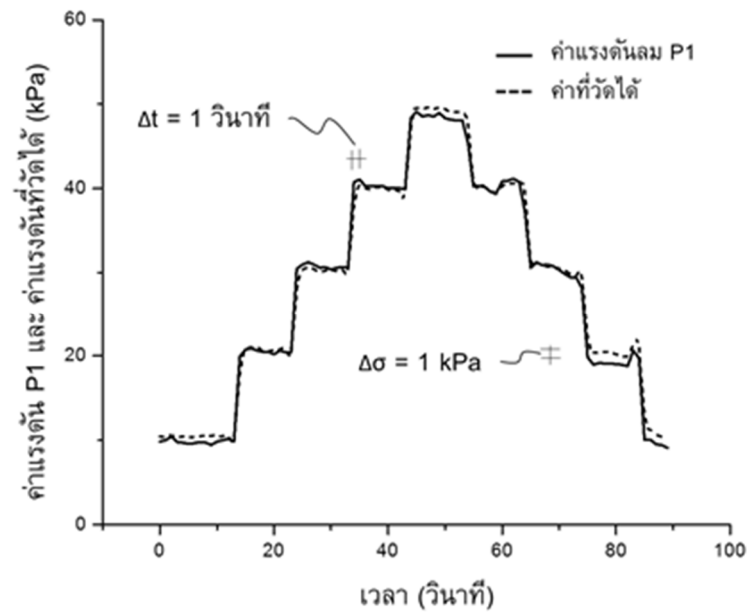
ภาพที่ 4-45 ระบบการทำงานของผนังด้านข้าง (a) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุล (b) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P_1 มากกระทำ



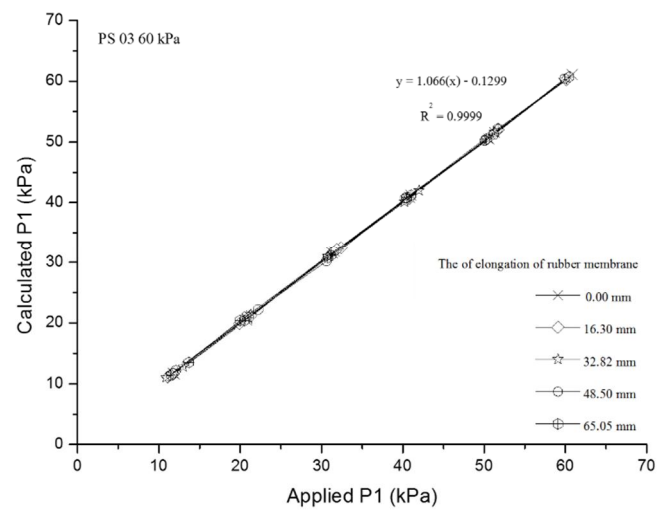
ภาพที่ 4-46 ระบบการทำงานของผนังด้านข้าง (a) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุล โดยมีแรงดัน P2 มากกว่าในทิศทางตรงกันข้ามกับ P1 (b) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุล โดยมีแรงดัน P1 มากกว่ามากกว่าแรงดัน P2



ภาพที่ 4-47 หลักการทำงานของ การให้แรงดัน P2



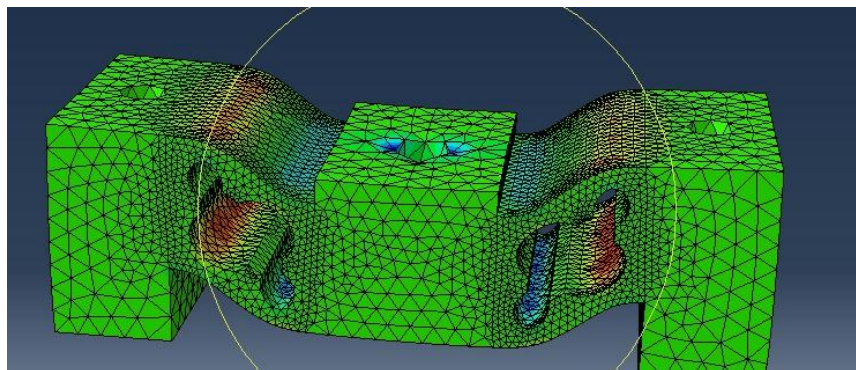
ภาพที่ 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดัน P1 และค่าแรงดันที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์กับเวลา



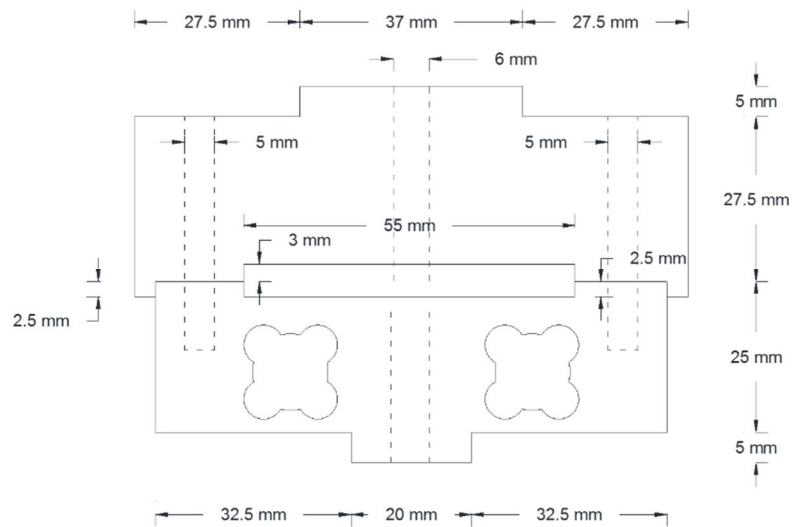
ภาพที่ 4-49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P1 และ P2 กับระยะของการดึงถุงยาง

5. โหลดเซลล์

ในการออกแบบรูปแบบของโหลดเซลล์ (Load cell) นั้น ได้ประยุกต์มาจากแนวคิดของ Dr. Hirakawa จากมหาวิทยาลัยโตเกียว (Tokyo university of technology) ท่านได้มีแนวคิดริเริ่มการออกแบบโหลดเซลล์ที่มีความเสถียรและง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยหลักการออกแบบ คือ เมื่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดได้รับน้ำหนักที่มากกระทำ อุปกรณ์จะเกิดการเสยรูปและอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดจะสามารถตรวจจับการเสยรูปนั้นออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่มากกระทำกับสัญญาณที่ส่งออกมา โดยโหลดเซลล์ที่ถูกประดิษฐ์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพาจะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด ดังภาพที่ 4-50 แล้วใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) รวมไปถึงได้ทำการปรับปรุงให้อุปกรณ์โหลดเซลล์มีรูปแบบที่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ซึ่งเราสามารถขึ้นรูปเองได้โดยเครื่องมิลลิ่ง (Milling) ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการประดิษฐ์เป็นอย่างมาก การออกแบบโหลดเซลล์จะออกแบบให้มีความสามารถในการรับแรงที่ 5 kN และมีกรออกแบบไว้ ดังภาพที่ 4-51

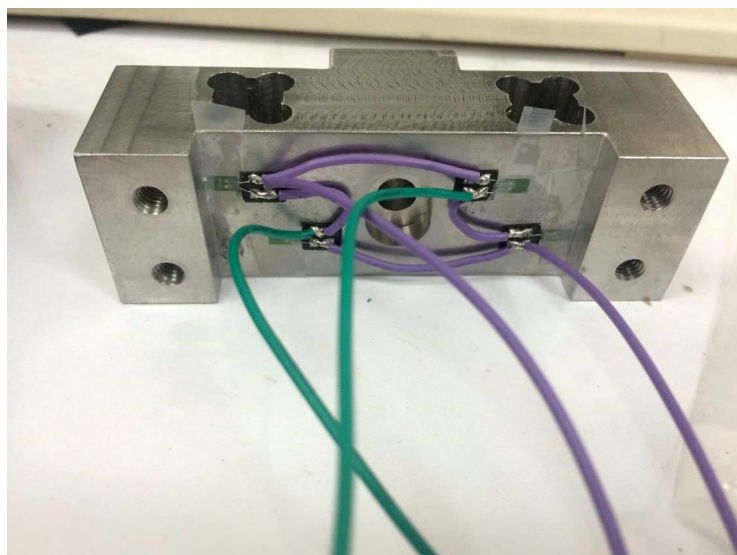


ภาพที่ 4-50 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด

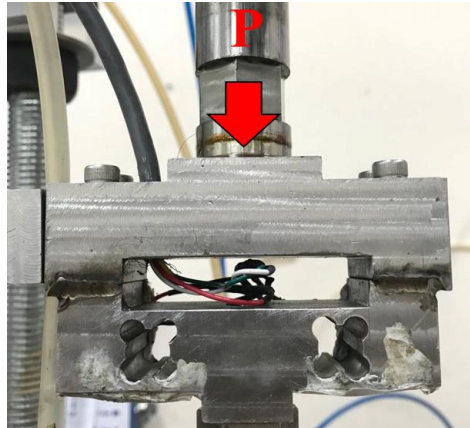


ภาพที่ 4-51 แบบโหลดเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบไว้

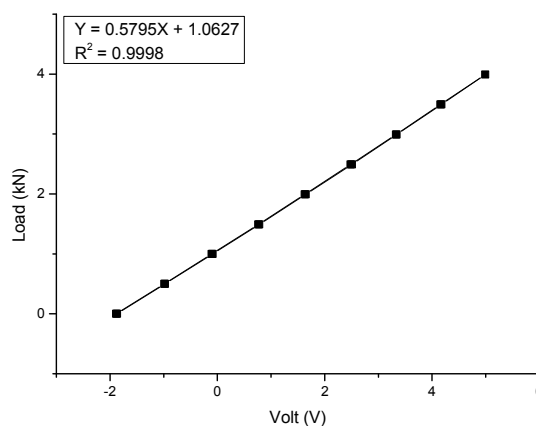
เมื่อขึ้นรูปโหลดเซลล์และทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ดังภาพที่ 4-52 เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะนำโหลดเซลล์ทั้งสองชิ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน (ภาพที่ 4-53) แล้วจึงทำการสอบเทียบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์ จากการสอบเทียบอุปกรณ์ดังกล่าวได้ ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงมีค่า $R^2=0.9998$ ดังภาพที่ 4-54



ภาพที่ 4-52 ติดตั้งชุดสเตรนเกจตามตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด



ภาพที่ 4-53 โหลดเซลล์หลังจากการขึ้นรูปตามที่ได้ออกแบบไว้



ภาพที่ 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า (Volt) และแรง (kN)

6. ชุด Load Frame

ในหลัก ๆ แล้วชุดเครื่องมือนี้จะประกอบไปด้วยชุดให้แรงแบบ Stress control โดยใช้กระบอกลมนิวเมติก และแบบ Strain control โดยใช้ชุดเซอร์โวมอเตอร์ Servo motor ชุดอุปกรณ์นี้ มีสามารถแบ่งระบบการทำงานออกมาได้เป็นหลายระบบ คือ

ระบบที่ 1 การอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ ในการให้แรงคั้นในแนวตั้งจะอาศัยการให้แรงลมผ่านอุปกรณ์จ่ายลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-Pneumatic regulator) โดยการสั่งคำสั่งจากชุดคอมพิวเตอร์ โดยแรงคั้นลมดังกล่าวจะส่งให้กับกระบอกลมนิวเมติก ทำหน้าที่สร้างแรงกระทำกับตัวอย่างแบบ Stress control ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งดินตัวอย่างนั้นจะต้องผ่าน

กระบวนการทรุดตัวคายน้ำ (Consolidation) เพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ โดยแรงดันที่ทำให้มาดังกล่าวจะถูกกระทำต่อด้านบนของตัวอย่างดิน โดยผ่านคานบังคับไปยังโหลดเซลล์ (Load cell) คานบังคับทำหน้าที่บังคับให้แกนส่งกำลังมีความมั่นคงและสามารถส่งแรงไปที่จุดกึ่งกลางของดินตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ โดยจะต้องอาศัยลูกปืนสไลด์เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแกนส่งกำลังกับคานบังคับ เมื่อแรงส่งผ่านโหลดเซลล์ลงสู่ตัวอย่างแล้ว ตัวโหลดเซลล์จะวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นและส่งกลับไปยังชุดควบคุมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าแรงกระทำที่ส่ง เมื่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นผิดเพี้ยนจากแรงกระทำที่ส่งไป ระบบจะทำการส่งงานผ่านชุดคำสั่งอีกครั้งเพื่อปรับแก้ค่า ระบบจะทำการตรวจสอบแบบนี้ทุก ๆ 4 วินาที เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด และระบบดังกล่าวสามารถควบคุมให้มีความละเอียดได้ถึง ± 1 kPa

ระบบที่ 2 การปรับแก้ค่าเนื่องจากแรงดึงของถุงยาง ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติในขั้นแรก ถุงยางจะถูกดึงให้ยืดออกเพื่อที่จะรองรับตัวอย่างดินเหลวที่จะถูกบรรจุเข้าสู่เซลล์ทดสอบ เมื่อดึงถุงยางยิ่งมากก็จะใช้แรงที่มากขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้แรงที่กดด้านบนของตัวอย่างมากกว่าปกติที่ตั้งไว้ หลังจากที่กระบวนการอัดตัวคายน้ำได้เริ่มขึ้นดินก็จะเริ่มเกิดการทรุดตัว ส่งผลให้ถุงยางที่ยืดออกหดกลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าแรงเนื่องจากแรงดึงของถุงยางโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการสอบเทียบระหว่างระยะของการดึงถุงกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่อ่านได้จากโหลดเซลล์ ดังภาพที่ 4-55 เข้ามาปรับแก้ ในการปรับแก้แรงดึงของถุงยางนี้ เมื่อทำการเปิดระบบ ระบบจะทำการปรับแก้อัตโนมัติโดยค่าของการปรับแก้จะขึ้นอยู่กับการยืดหดตัวของถุงยางกล่าวอีกอย่าง คือ จะขึ้นอยู่กับระยะการทรุดตัวของตัวอย่างดินนั่นเอง เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงการทรุดตัวก็จะสิ้นสุดตามไปด้วย ดังนั้นค่าของการปรับแก้เนื่องจากแรงดึงของถุงยางจะเป็นศูนย์ตามไปด้วย ดังนั้นค่าของความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างจะสามารถอธิบายตามสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_v = \sigma_{v(PAC)} + \sigma_{v(Rubber)} = c(\Delta V_{Load\ cell}) + d(r_e) \quad (4-4)$$

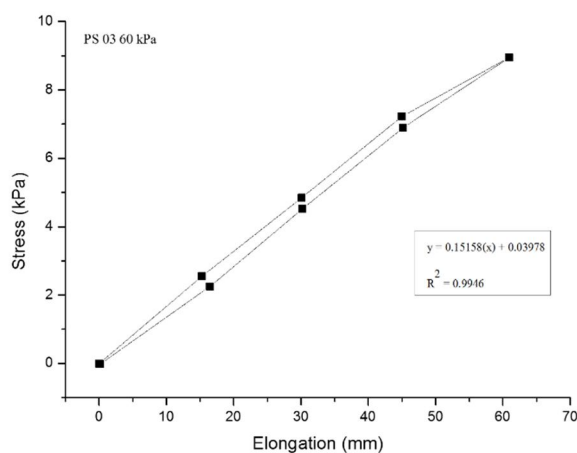
เมื่อ σ_v = ความเค้นรวมในแนวตั้ง (kPa)

$\sigma_{v(PAC)}$ = ความเค้นรวมในแนวตั้งที่เกิดจากกระบอกลมนิวเมติก (kPa)

$\sigma_{v(Rubber)}$ = ความเค้นรวมในแนวตั้งที่เกิดจากแรงดึงของถุงยาง (kPa)

c และ d = ค่าคงที่

r_e = ระยะยืดของถุงยาง (มม.)



ภาพที่ 4-55 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของยืดของถุงยางกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่อ่านได้จากโพลดเซลล์

ระบบที่ 3 การอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติครั้งที่สอง ระบบนี้จะใช้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างมาเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ซึ่งระบบจะประสานการทำงานระหว่างเซนเซอร์วัดระยะที่ติดตั้งไว้ด้านข้างของตัวอย่างกับเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อระบบตรวจจับได้ว่าดินมีการหดตัวด้านข้างก็จะสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานเพื่อกดดินเพื่อให้ตัวอย่างดินนั้นขยายตัวกลับมาที่จุดเดิมเพื่อรักษาสภาวะการทรุดตัวแบบหนึ่งมิติ

ระบบที่ 4 การให้แรงกดแบบ Strain control การให้แรงแบบนี้จะแตกต่างจากแบบแรกคือ แรงจะถูกขับเคลื่อนจากเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) โดยมอเตอร์แบบนี้มีลักษณะที่พิเศษแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไป คือ มีความสามารถในการปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่รอบที่ต่ำไปจนถึงสูงสุด แต่ยังคงรักษาแรงบิดได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถหมุนกลับทิศทางได้ทั้งทวนและตามเข็มนาฬิกา มอเตอร์ที่ติดตั้งแก่ชุด Load frame ชุดนี้ มีขนาด 750 วัตต์ และส่งกำลังผ่านสายพานให้กับชุดควมเกียร์ ชุดเกียร์ของเครื่องมือนี้สามารถรองรับแรงสูงสุดในการทดสอบได้ถึง 50 kN ในการให้แรงในลักษณะนี้สามารถครอบคลุมตั้งแต่การยุบตัวคายน้ำไปจนถึงการเหือนตัวอย่าง โดยชุดโปรแกรมยังสามารถกำหนดค่าของอัตราเร็วในการเหือน ความสูงของตัวอย่าง โดยโปรแกรมจะทำการเหือนตัวอย่างและหยุดเองเมื่อทำการเหือนเสร็จสิ้นลง

7. อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ

เนื่องจากตัวอย่างดินได้มีการทำลายโครงสร้างและประกอบตัวขึ้นใหม่ ในการทำงาน โครงสร้างของดินนั้นจึงต้องใช้ปริมาณน้ำสูงเพื่อทำลายโครงสร้างของดินเดิม ดังนั้นดินตัวอย่าง จึงมีปริมาณน้ำที่สูงตามไปด้วย จึงส่งผลต่อขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำจะยังใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้าง นาน ดังนั้นจึงต้องใช้แรงดันที่เป็นลบร่วมกับการให้ความเค้นในแนวตั้งเพื่อเร่งการทรุดตัวของดิน เป็นเหตุจึงต้องใช้อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำแบบ Negative & Positive pressure transducer อุปกรณ์วัด แรงดันน้ำนี้ มีความสามารถ คือ สามารถวัดค่าแรงดันได้ตั้งแต่ช่วง -100 ถึง 1000 kPa

8. ระบบควบคุมแรงดันลบอัตโนมัติ

ในขั้นตอนการยุบตัวคายน้ำของตัวอย่างนั้น เนื่องจากดินมีปริมาณน้ำที่สูงดังนั้นน้ำที่ถูก ขับออกมาจากตัวอย่างจึงมากตามไปด้วย เมื่อน้ำถูกขับออกมาจึงเข้าสู่ถังแยกน้ำแยกอากาศ (หมายเลข 15 และ 16 ในภาพที่ 4-35) เมื่อความสูงของน้ำในถังสูงขึ้นจะทำให้แรงดันที่ใช้ในระบบ จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ค่าแรงดันน้ำอยู่ตลอดเวลาโดยการทำงานระหว่างอุปกรณ์ จ่ายลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-Pneumatic regulator) แบบแรงดันลบและอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (Negative & Positive pressure transducer) จะทำงานร่วมกันแบบวนลูปและตรวจสอบตัวเองอยู่ ทุก ๆ 4 วินาที มีความแม่นยำอยู่ที่ ± 0.5 kPa

การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์

ในขั้นตอนการสอบเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือทั้งหมดนั้น จะถูกสอบเทียบก่อน ทำการทดสอบทุก ๆ ครั้ง ณ ห้องปฏิบัติการ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่สม่ำเสมอที่ 25°C และจะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องมือก่อนทำการสอบเทียบประมาณ 15 นาที ขึ้นไป หรือมากกว่า เพื่อทำการตรวจสอบและเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบที่มีระยะเวลาค่อนข้าง ยาวนานประมาณ 25-30 วัน ในการสอบเทียบอุปกรณ์จะแบ่งออกได้ตามหัวข้อ ดังต่อไปนี้

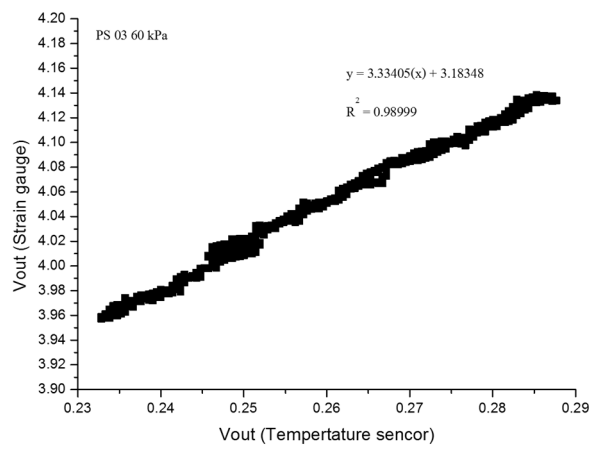
1. การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรง

ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการของอุปกรณ์จำพวก โพลดเซลล์ ระบบวัดแรงดันดิน ด้านข้าง และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ จำเป็นจะต้องติดตั้งถุงยางเข้ากับเซลล์ทดสอบเสียก่อนพร้อมทั้ง ติดตั้งแผ่นประกบเข้ากับเซลล์ทดสอบเพื่อเป็นตัวกักแรงดันให้แก่ระบบ ดังภาพที่ 4-39 และภาพที่ 4-41 จากนั้นทำการยึดแท่งกดด้านบนเข้ากับคานและลูกปืนสไลด์เพื่อไม่ให้อุปกรณ์เคลื่อนตัวได้ แนวตั้ง หลังจากนั้นจะปล่อยแรงดันลมที่ทราบค่าเข้าไปในถุงยาง ซึ่งจะเข้าทางด้านบนและด้านล่าง ของตัวอย่างผ่านแผ่นหินพรุนเข้าสู่เซลล์ทดสอบ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในการให้แรงดันเข้าไปนั้นจะใช้แรงดันตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 60 kPa สำหรับการสอบเทียบโพลดเซลล์

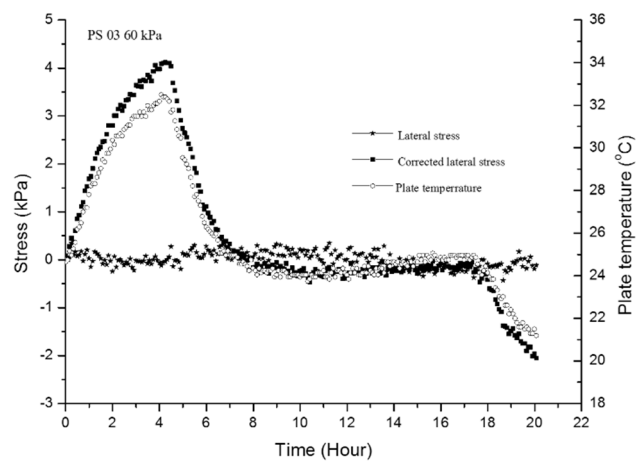
และผนังวัดแรงดันดินด้านข้าง และแรงดันที่ $-50-60$ kPa สำหรับอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการระหว่างความสัมพันธ์ของแรงดันที่ใช้สอบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยการอ่านค่าแรงดันลมที่ทราบค่าจะใช้ดิจิตอลเกจที่มีความละเอียดถึง 0.1 kPa เป็นตัวอ่านแรง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแรงดันที่ให้แก่ระบบมีความละเอียดที่เพียงพอต่อการสอบเทียบเมื่อทำการสอบเทียบ เมื่อทำการสอบเทียบเสร็จสิ้นจะได้ค่าคงที่ของสมการออกมานั้น คือ ค่า a และ c ในสมการที่ 4-2 และสมการที่ 4-4 ตามลำดับ

2. การสอบเทียบผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการทดสอบนี้ใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนานจึงเป็นไปได้ยากมากที่จะยังคงรักษาอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการให้คงที่อยู่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ เนื่องจากไฟฟ้าดับหรือเกิดเหตุอื่น ๆ ขึ้น ดังนั้นต้องทำการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการวัดของอุปกรณ์วัดแรงดันทุกตัวที่ใช้ในการทดสอบนี้ โดยการจำลองเหตุการณ์ คือ ทำการเปิดเครื่องปรับอากาศไว้ในตอนกลางคืน และปิดเครื่องปรับอากาศในตอนกลางวันซึ่งจะมีสภาพอากาศร้อนมากที่สุด โดยทำการทดสอบนี้ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากการตรวจสอบพบว่า มีเพียงระบบวัดแรงดันดินด้านข้างด้วยแผ่นไดอะแฟรมกับระบบแรงสมดุล (รายละเอียดในหัวข้ออุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง) นั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงการวัดแรงดันมากกว่า 1 kPa เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นจะต้องมีการปรับแก้ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับชุดสเตรนเกจที่ทั้งสองถูกติดตั้งไว้ในแผ่นประกบ B ดังภาพที่ 4-56 โดยความชันของกราฟความสัมพันธ์ คือ ค่าคงที่ b ในสมการที่ 4-3 หลังจากปรับแก้ผลของอุณหภูมิแล้ว พบว่า ผลของการวัดค่าแรงดันด้านข้างภายใต้แรงดันบรรยากาศนั้นค่อนข้างจะคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 4-57



ภาพที่ 4-56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับ
จุดสเตรนเกจที่ถูกติดตั้งในแผ่นประกบ B

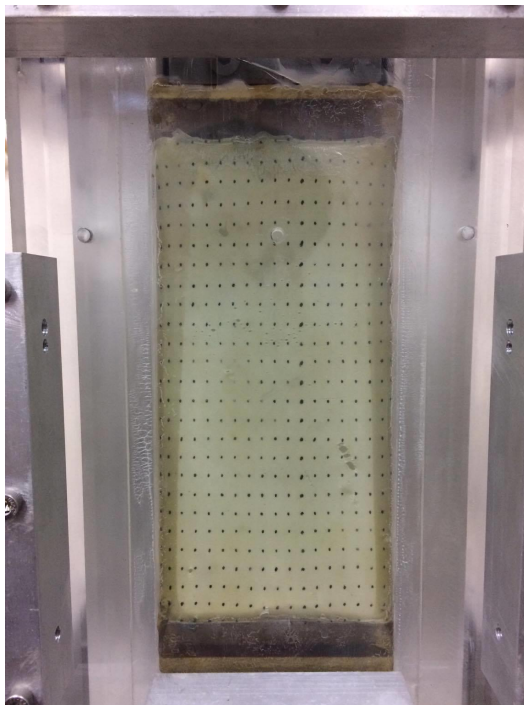


ภาพที่ 4-57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นก่อนและหลังปรับแก้ เนื่องจากผลของอุณหภูมิของ
อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง

การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

หลังจากการคั่นดินเข้าไปในอุปกรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะขึ้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินโดยกระบวนการอัดตัวคายน้ำ เพื่อสร้างโครงสร้างดินใหม่โดยจะแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ดังต่อไปนี้

1. การสร้างโครงสร้างใหม่ให้แก่ดิน (Reconstitute) ก่อนดำเนินการในขั้นตอนนี้จะต้องปล่อยให้แรงคั่นน้ำส่วนเกินภายในตัวอย่างดินที่เกิดจากการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบลดลงจนเท่ากับศูนย์เสียก่อน เนื่องจากในการอัดดินเข้าสู่เครื่องทดสอบดินที่ถูกอัดเข้าไปจะมีแรงคั่นน้ำส่วนเกินอยู่ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 85 kPa หลังจากการฉีดดินเหลวเสร็จ โดยแรงคั่นนี้ทำให้ดินเหลวคั่งลงข้างติดเข้ากับมุมของเครื่องทดสอบและคั่นเอาดินและน้ำส่วนเกินออกมา การระบายแรงคั่นน้ำส่วนเกินทำได้โดยเปิดวาล์วที่ด้านบนของตัวอย่าง (หมายเลข 4 ในภาพที่ 4-35) โดยจะยังคงทำการปิดวาล์วด้านล่างของตัวอย่าง (หมายเลข 10 ในภาพที่ 4-35) ไว้อยู่เพื่อวัดค่าแรงคั่นน้ำที่เปลี่ยนไป แล้วทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าแรงคั่นน้ำที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดแรงคั่นน้ำ (หมายเลข 13 ในภาพที่ 4-35) อ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ และตัวอย่างที่ถูกระบายเอาแรงคั่นน้ำส่วนเกินออกจะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4-58



ภาพที่ 4-58 ตัวอย่างที่ถูกระบายเอาแรงคั่นน้ำส่วนเกินออกมา

จากนั้นจะทำการปลดระบบล็อกแกนกดด้านบนตัวอย่างออกเพื่อจะเริ่มต้นกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่แต่ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบนี้มีปริมาณและน้ำความสูงค่อนข้างมากอีกทั้งยังเป็นดินเหนียวที่มีความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ จึงต้องทำการเร่งการทรุดตัวโดยการใส่แรงดันลบ (Negative pore water pressure) ร่วมกับ ความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress) เข้าไปในตัวอย่างดิน โดยในขั้นนี้จะใช้ค่าแรงดันลบร้อยละ 35 ของ ความเค้นในแนวตั้ง แต่ต้องไม่เกิน 80% ของแรงดันบรรยากาศอย่างใดอย่างหนึ่ง ภาพที่ 4-59 ได้แสดงการทำงานจริงในห้องปฏิบัติการระหว่างทำการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน



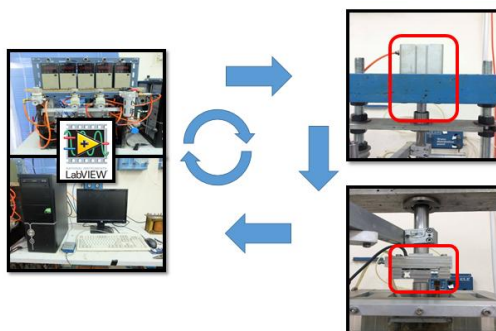
ภาพที่ 4-59 กระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน

ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างใหม่ค่าของระยะการทรุดตัวจะถูกวัดด้วย LVDT กู้ซึ่งสามารถสลับการใช้งานได้เมื่อตัวใดตัวหนึ่งทำงานจนปลายของก้านวัดใกล้จะสู่ระยะทางของการวัด ในการสร้างค่า Vertical stress จะใช้กระบอกลมนิวมติกโดยทำการปรับแก้แรงดันลมอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากกระบอกลมนิวมติกจะมีค่าแรงเสียดทานในการกระบอกไม่คงที่ เมื่อตัวอย่างดินมีการทรุดตัว ค่า Vertical stress จะลดลงจากค่าที่ตั้งไว้ในตอนแรก ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมค่า

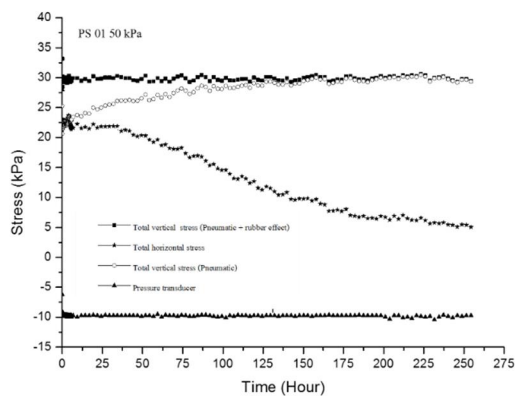
Vertical stress ให้สมมุติสมอนั้น โดยทำการเปิดระบบที่ 1 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อชุด Load frame) หลักการทำงานของโปรแกรมสามารถสรุปได้ตาม ภาพที่ 4-60 โดยคอมพิวเตอร์จะสั่งงานให้ชุดควบคุมให้ทำการสูบลมเข้าสู่อะกอลม เพื่อทำการกดด้านบนของตัวอย่างผ่าน โหลดเซลล์ ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ไฟฟ้าขึ้น สัญญาณไฟฟ้านี้จะถูกส่งกลับไปยังชุดควบคุมที่สั่งงาน โดยคอมพิวเตอร์เมื่อค่าแรงดันที่ ส่งให้กับตัวอย่างมีค่าต่างจากแรงที่ได้กำหนดไว้ชุดควบคุมจะทำการสูบลมเข้าเข้าไปอีกครั้ง โดยชุดโปรแกรมจะทำการตรวจสอบตัวเองทุก ๆ 4 วินาที มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวนลูป (Close loop) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่นำเสนอขึ้นจะต้องทำการการดึงดูยง ตามค่าการทรุดตัวของดินที่คำนวณเอาไว้ ดังอธิบายมาแล้วในตอนต้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเค้น รวมในแนวตั้ง ดังนั้นจะต้องทำการเปิดระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียด เพิ่มเติมในหัวข้อชุด Load frame) ควบคุมกัน ไปด้วยเพื่อลดทอนค่าความเค้นที่เกิดจากอะกอลม นิวเมติกซึ่งทำให้ค่าความเค้นรวมในแนวตั้งมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ดินเกิดการทรุดตัว ดังภาพที่ 4-61 จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าความเค้นที่เกิดจากอะกอลมนิวเมติกพร้อมกับแรงดึง ของดูยงจะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 kPa แต่ค่าของแรง เค้นในแนวตั้งที่สร้างโดยอะกอลมนิวเมติกเพียงอย่างเดียวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะการหดตัว ของดูยงเนื่อง จากอิทธิพลของแรงหดตัวกลับของดูยงจะลดลงตามระยะการทรุดตัวของดินและ จะกลับมามีค่าคงที่เมื่อดูยงกลับสู่ระยะเดิมที่ไม่มีการยึดตัวซึ่งจะต้องทำการปิดระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด ดังนั้นค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้าง ใหม่ นี้ จะมีค่าคงที่ตลอดการทรุดตัวของดินตัวอย่างซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างดินมีความสมมุติและ สามารถมั่นใจได้ว่าดินตัวอย่างนี้ยังคงเป็นดินเหนียวแบบอัดตัวปกติตลอดทั้งตัวอย่าง (Normally-consolidation) เมื่อเริ่มต้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำความเค้นที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะถูกส่งต่อไป ยังดินตัวอย่างซึ่งทำให้เกิดแรงดันกระจายออกไปทั่วทิศทางจึงต้องทำการเปิดระบบการวัดแรงดัน ดินด้านข้างด้วยการสมดุลแรงลมอัด โนมติ (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้ออุปกรณ์วัดแรงดันดิน ด้านข้าง) เพื่อวัดค่าความเค้นในแนวราบและเนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณน้ำในดินค่อนข้างมาก เมื่อเกิดการอัดตัวคายน้ำ น้ำจะไหลเข้าสู่ถึงแรงดันทำให้ระดับน้ำในถังสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าแรงดัน น้ำที่ส่งไปยังตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นระหว่างกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่แก่ตัวอย่างดิน จะต้องมีการเปิดระบบควบคุมแรงดันน้ำอัด โนมติ (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อระบบควบคุม แรงดันน้ำอัด โนมติ) เพื่อควบคุมค่าแรงดันน้ำให้คงที่ไม่ว่าจะมีความสูงของน้ำเพิ่มขึ้นในถังอัด

แรงดันเท่าไร ดังภาพที่ 4-61 จากภาพที่ 4-61 เห็นได้ว่า เมื่อเริ่มกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ แก่ตัวอย่างดินในช่วงแรกค่าของแรงดันดินด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงที่กระบอกลมนิวเมติกที่หักลอบอิทธิพลของถุงยาง ซึ่งพฤติกรรมนี้จะสามารถนำมาประเมินระดับความอึดตัวด้วยน้ำซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อการตรวจสอบระดับความอึดตัว

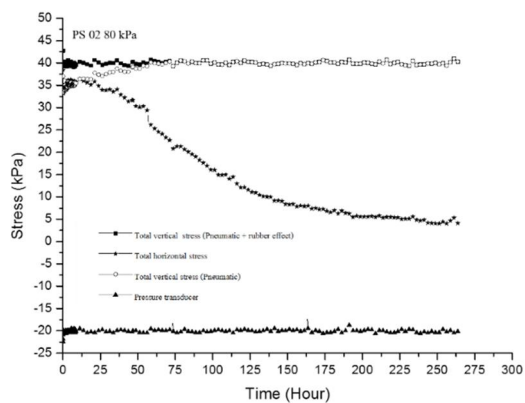
ในการตรวจสอบการสิ้นสุดของกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา (Log-time และ Root-time) และความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับการทรุดตัวในอดีต (Asaoka, 1978) ดังภาพที่ 4-62 - ภาพที่ 4-64 ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติค่าของแรงดันดินด้านข้างจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าของการทรุดตัวเมื่อเทียบกับเวลาในการทดสอบ จากภาพที่ 4-62 และภาพที่ 4-63 สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (C_v) ซึ่งได้ผลที่ใกล้เคียงกันทั้งสามตัวอย่างเท่ากับ 0.0125 mm/sec



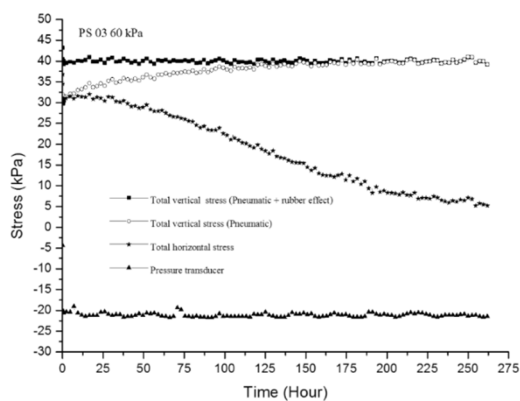
ภาพที่ 4-60 การให้แรงดันในแนวตั้งของกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน



(a)

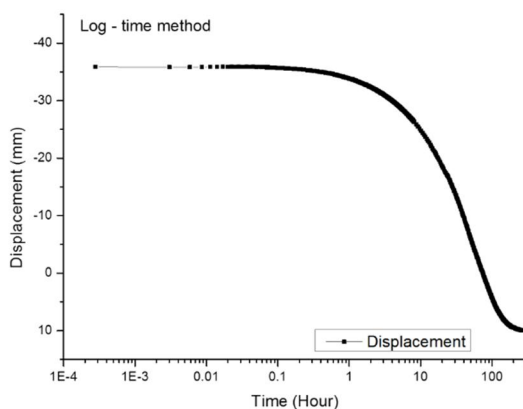


(b)

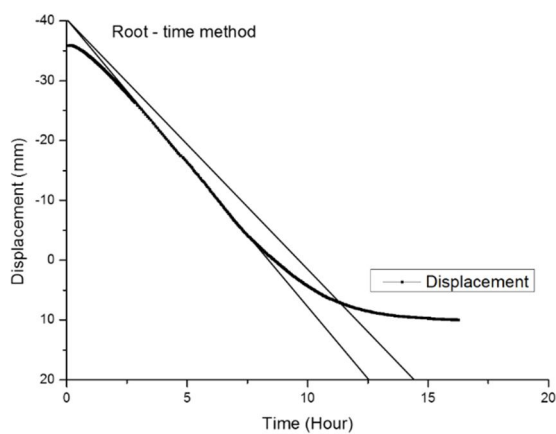


(c)

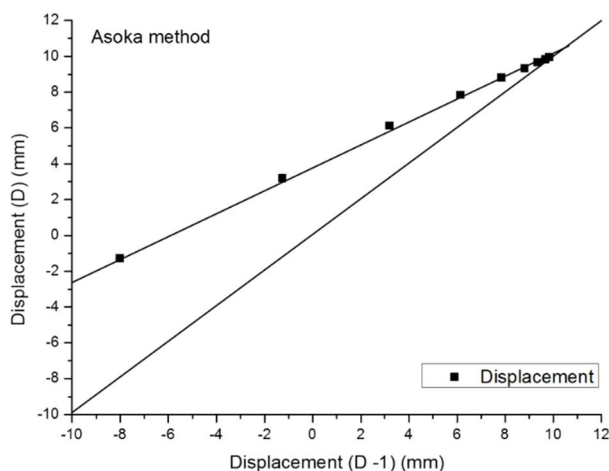
ภาพที่ 4-61 ความเค้นรวมในแนวตั้งเนื่องจากกระบอกลมนิวเมติกพร้อมกับแรงดึงดูขยง ความเค้นรวมในแนวตั้ง เนื่องจากกระบอกลมนิวเมติก และความเค้นรวมของแรงดันดินด้านข้าง กับเวลาในกระบวนการสร้าง โครงสร้างใหม่ของตัวอย่าง (a) PS 01 50 kPa (b) PS 02 80 kPa และ PS 03 60 kPa (c)



ภาพที่ 4-62 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลาด้วยวิธี Log-time



ภาพที่ 4-63 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลาด้วยวิธี Root-time



ภาพที่ 4-64 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดของอดีตและปัจจุบันด้วยวิธี Asaoka (1978)

2. การอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ (1D-Consolidation) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

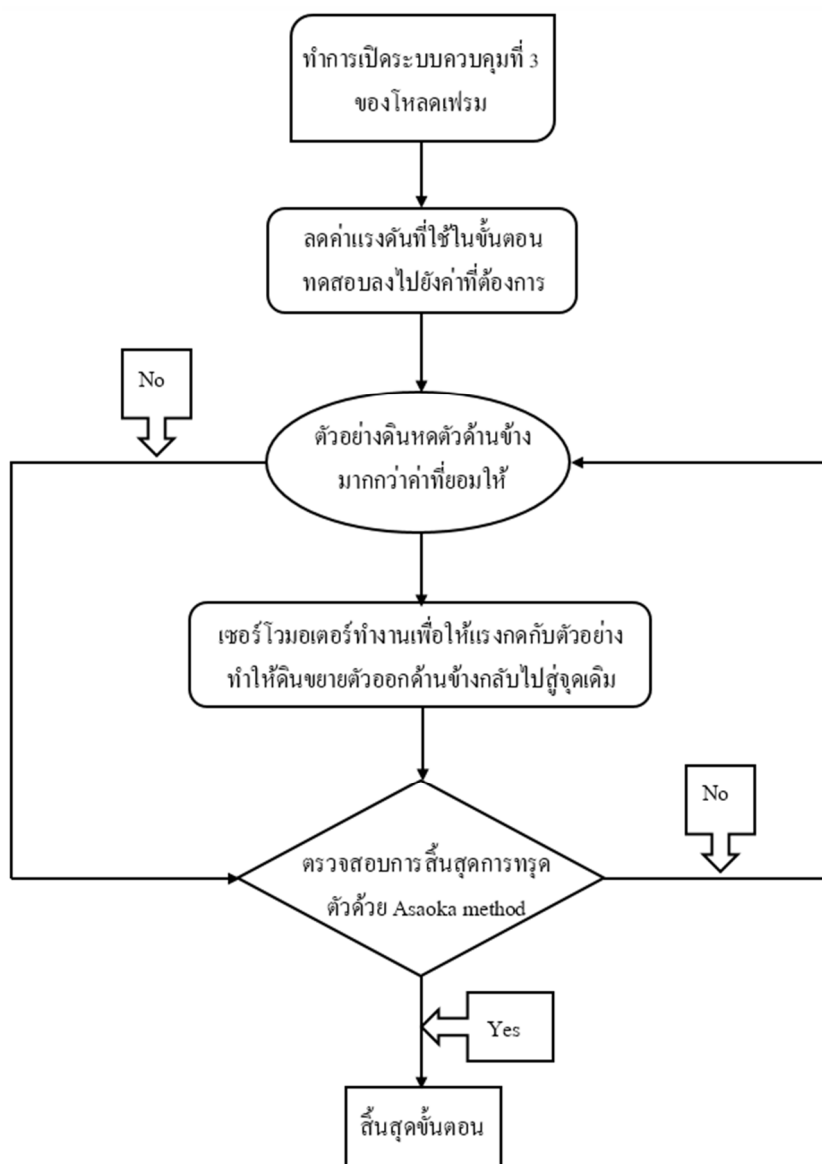
2.1 โดยวิธีการควบคุมการเคลื่อนตัวของดินด้านข้าง เริ่มจากทำการลดแรงดันน้ำและค่าของความเค้นในแนวตั้งของตัวอย่างลงเท่ากับค่าแรงดันด้านข้างที่เหลืออยู่หลังจากการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินสิ้นสุดลง ซึ่งสามารถอ่านได้จากอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง ทั้งนี้เพื่อป้องกันตัวอย่างดินเคลื่อนตัวออกด้านข้างเมื่อถอดแผ่นประกบด้านข้างออกโดยที่ค่าความเค้นประสิทธิผลทั้งในแนวตั้งและในแนวราบของดินยังมีค่าคงเดิมในจุดที่การสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินสิ้นสุดลง ซึ่งเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันน้ำแล้วจะต้องรอจนกว่าค่าแรงดันด้านข้างของดินตัวอย่างเป็นศูนย์ จากนั้นทำการถอดแกนส่งกำลังให้ยึดติดกับลูกปืนสไลด์ที่ติดตั้งกับคานด้านบนแล้วจึงถอดแผ่นประกบด้านข้างออกทางด้านซ้ายและขวาออก (แผ่น C และ D ดังภาพที่ 4-41) ดังนั้นสภาวะแวดล้อมของเครื่องมือจะเป็นแบบความเครียดในระนาบ แต่อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนนี้ต้องการให้ดินทรุดตัวในหนึ่งมิติเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินระหว่างดำเนินการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้างเข้ากับเซลล์ทดสอบทั้งทางด้านซ้ายและขวาของตัวอย่างดิน เพื่อวัดการเคลื่อนตัว ดังภาพที่ 4-40 และภาพที่ 4-42 (หมายเลข 11 และ 12) จากนั้นทำการเปิดระบบที่ 3 ของโปรแกรมควบคุมชุดโหลดเฟรม (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อชุด Load frame) ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังภาพที่ 4-65 แล้วทำการลดแรงดันลงกับตัวอย่างไปยังค่าที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะลดลงอีกประมาณ 5-10 kPa จากค่าแรงดันน้ำเดิม) เมื่อลดแรงดันน้ำลงตัวอย่างจะเกิดการหดตัวด้านข้าง เมื่อระยะการหดตัว

มากกว่าที่ยอมรับได้ซึ่งในงานวิจัยนี้จะยอมให้มีการเคลื่อนตัวแบบหดรัดเข้าไม่เกินข้างละ 0.05 มม. หรือรวมกันแล้วมีค่าไม่เกิน 0.1 มม. อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือในที่นี่จะยอมให้เกิดความผิดพลาดจากการทรุดตัวในแนวตั้งที่ร้อยละ 0.1 เมื่อเทียบกับความกว้างตัวอย่าง เมื่ออุปกรณ์ตรวจจับได้ว่าการหดตัวเข้ามากกว่าค่าที่กำหนด เฟรมจะทำการค่อย ๆ กดตัวอย่างลงอัด โน้มดิ้นทันทีเพื่อให้ตัวอย่างดินขยายตัวด้านข้างกลับไปอยู่จุดเดิม ชุดโปรแกรมจะทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวและทำการปรับแก้ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างตลอดเวลาจนกว่าการอัดตัวคายน้ำในขั้นที่สองนี้จะสิ้นสุดลงซึ่งในที่นี้จะใช้วิธี Asaoka (1978) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะสามารถมั่นใจได้ว่าตัวอย่างดินจะเกิดการทรุดตัวในหนึ่งมิติเท่านั้น (1D-Consolidation) และพร้อมทำการเงื่อนไขได้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบทันทีโดยตัวอย่างจะไม่ถูกรบกวนก่อนทำการเงื่อนไข 100% ภาพที่ 4-66 แสดงค่าความเค้นในแนวตั้งระหว่างดำเนินการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีนี้ ซึ่งจะทำให้การเก็บค่าทุก ๆ 30 นาที พบว่า ค่าแรงเค้นในแนวตั้งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างดินจะยังคงอยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidation) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีดังกล่าวสำหรับตัวอย่างที่ PS 01 50 kPa และ PS 02 80 kPa เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินในสภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of lateral earth pressure at rest, K_0) ก่อน แล้วใช้ค่าดังกล่าวในการกำหนดแรงดันก่อนทำการเงื่อนไขสำหรับตัวอย่าง PS 03 60 kPa ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนถัดไป

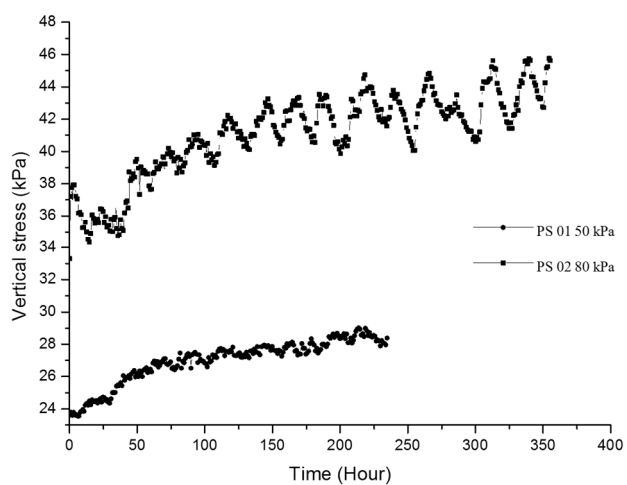
2.2 ด้วยการกำหนดค่าแรงดันเริ่มต้นให้กับตัวอย่างโดยตรง วิธีนี้จะดำเนินการโดยยังไม่มีกรลดแผ่นประกบด้านข้างออก (แผ่น C และ D ดังภาพที่ 4-41) หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะหยุดนิ่ง (K_0) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติของตัวอย่างดิน PS 01 50 kPa และ PS 02 80 kPa โดยค่า K_0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.49 ก็จะสามารถคำนวณค่าแรงดันเริ่มต้นก่อนทำการเงื่อนไขโดยที่ดินตัวอย่างยังคงอยู่ในรูปแบบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ (K_0 -Consolidation) โดยจะใช้ในตัวอย่าง PS 03 60 kPa ซึ่งต้องการค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งก่อนทำการเงื่อนไขเท่ากับ 60 kPa ดังนั้นจะต้องการค่าแรงดันน้ำเท่ากับ $-(60 \times 0.49) = -29.4$ kPa และต้องการค่าแรงกดในแนวตั้งเท่ากับ $60 - 29.4 = 30.6$ kPa ซึ่งค่าทั้งสองค่านี้จะถูกกำหนดให้กับตัวอย่างหลังจากที่การทรุดตัวคายน้ำขั้นแรกเสร็จสิ้นและรองจนกว่าการอัดตัวคายน้ำครั้งใหม่จะสิ้นสุดลงโดยใช้วิธี Asaoka (1978) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ จากนั้นจะทำการลดแผ่นประกบด้านข้างออก (แผ่น C และ D ดังภาพที่ 4-41) เพื่อเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมให้เป็นแบบความเครียดในระนาบแล้วจึงทำการเงื่อนไขต่อไป

หลังเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง โครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินและกระบวนการอัดตัวคายน้ำ สามารถนำเอาข้อมูลค่าอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นในแนวตั้งที่ใช้มาเปรียบเทียบกับใน

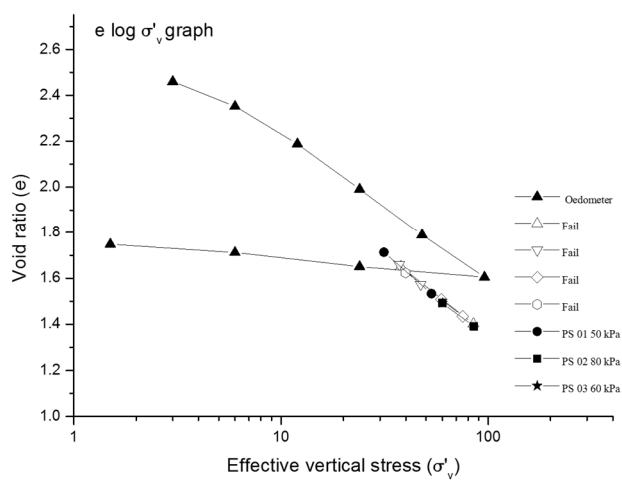
แบบ Semi-log ได้ผลการทดสอบ คือ การอัดตัวคายน้ำด้วยเซลล์ทดสอบที่นำเสนอจะมีเส้นแนวโน้มที่อยู่ต่ำกว่าเส้นที่ทำการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือแบบ Oedometer เพราะอัตราการทรุดตัวไม่เท่ากันโดยมีอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 8.07×10^{-5} มม./วินาที และ 7.41×10^{-5} มม./วินาที ตามลำดับ แต่เส้นแนวโน้มจะยังคงขนานกัน โดยการทรุดตัวที่ไวกว่าจะมีเส้นที่อยู่สูงกว่าการทรุดตัวที่ช้ากว่า (Jia, Chai, Hino, & Hong, 2010) ดังภาพที่ 4-67



ภาพที่ 4-65 การทำงานของกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ (1D - Consolidation)



ภาพที่ 4-66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวดิ่งกับเวลา



ภาพที่ 4-67 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับค่าความเค้นในแนวดิ่งที่ใช้เครื่องทดสอบแบบ Oedometer และ Plane strain cell

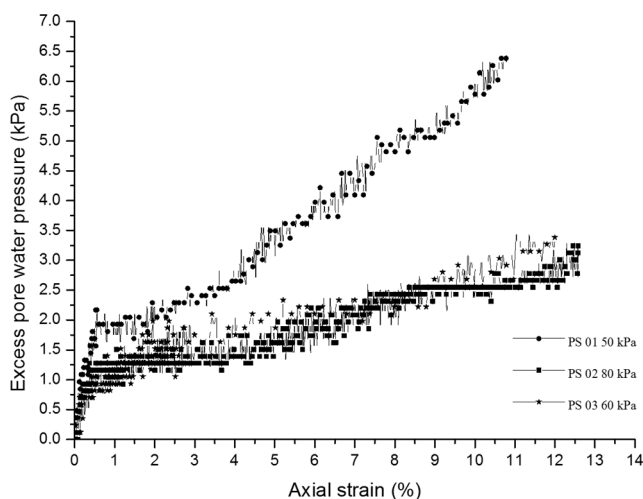
การเฉือนตัวอย่าง (Shearing)

ในการทดสอบการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการนำดินที่เก็บได้จากภาคสนามมาทำลายโครงสร้างเหลว แล้วจึงทำการสร้างโครงสร้างของดินด้วยปริมาณน้ำประมาณร้อยละ 1.2-1.4 เท่าของขีดจำกัดเหลว เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ (1D-Consolidation) ทั้งสองขั้นตอนแล้วจึงทำการเฉือนตัวอย่างโดยมีขั้นตอน คือ ทำการเปิดระบบที่ 4 ของโปรแกรมควบคุมชุดโพลดเฟรม (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อชุด Load frame) แล้วทำการล็อกแกนแท่งส่งกำลังเข้าสู่กบป็นสไลด์ที่ติดอยู่กับกานด้านบนของตัวอย่างทำการปิดวาล์วทั้งบนและล่างของตัวอย่าง (หมายเลข V1 และ V2 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-40) ซึ่งสภาวะแวดล้อมของเครื่องมือทดสอบจะเป็นแบบความเครียดในระนาบและติดตั้งเครื่องมือต่าง ๆ ดังภาพที่ 4-40 และภาพที่ 4-42 จากนั้นจะทำการเฉือนดินแบบไม่ระบายน้ำโดยใช้อัตราการเฉือนอยู่ที่ 0.5% Strain/ min และเฉือนตัวอย่างไปจนถึง 10% Strain ของความสูงของตัวอย่าง ในการเก็บข้อมูลของการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 0.5 วินาที ตั้งแต่เริ่มทดสอบไปจนถึงประมาณ 3% Strain หลังจากนั้นผ่านช่วงนี้ไปจะเปลี่ยนระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทุก ๆ 3 วินาที ไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ

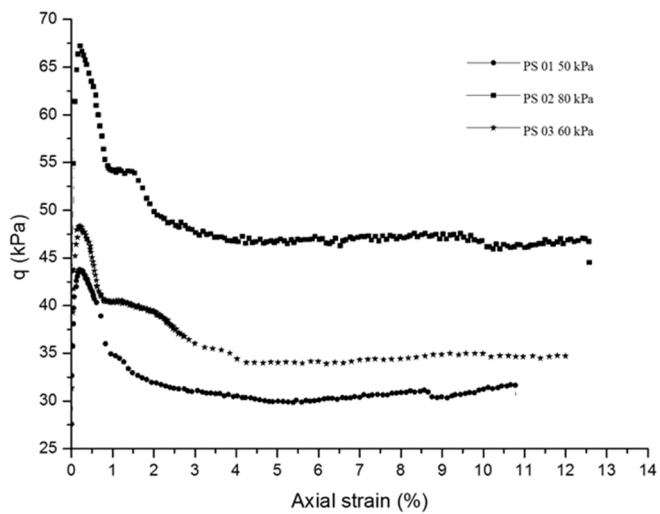
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง PS 01 50 kPa PS 02 80 kPa และ PS 03 60 kPa ซึ่งใช้ค่าความเค้นอัดในแนวตั้งในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำที่ 50 kPa, 80 kPa และ 60 kPa ตามลำดับ พบว่า ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่วัดได้จะเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นบวก) ขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดในแนวตั้ง ซึ่งหมายถึงมีการบีบตัวของเม็ดดินระหว่างทำการเฉือนและเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของดินเหนียวชนิดอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay, NC clay) ดังภาพที่ 4-68 จากภาพที่ 4-69 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deviatoric stress (q) กับค่าความเครียดในแนวตั้ง ซึ่งพบว่า ทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีลักษณะแบบ Softening เมื่อเลยจุด Peak และจะเข้าสู่ Residual state เมื่อสิ้นสุดการ Softening ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้น คล้ายคลึงกับการเฉือนดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปรกติ (Over-consolidated clay, OC clay) ในการทดสอบการรับกำลังแรงเฉือนด้วยเครื่อง Triaxial compression tests แต่จะต่างกันที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งถ้าเป็นดิน OC clay จะมีค่าเป็นบวกในตอนต้นและจะติดลบในช่วงท้ายของการเฉือนตัวอย่างดิน ภาพที่ 4-70 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deviatoric stress (q) กับค่า Effective mean stress (p') ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ค่าความเค้นอัดในแนวนิ่งในขั้นตอนอัดตัวคายน้ำมากขึ้น ค่าของความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองที่กล่าวมาจะมีลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยและยังสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะหยุดนิ่งในขณะที่เริ่มการเฉือนตัวอย่างได้เท่ากับ 0.49 ภาพที่ 4-71 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นอัดประสิทธิผลด้านข้าง (Effective horizontal stress) กับค่าความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical horizontal strain)

ซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการเหนือนและตกลงทันทีเล็กน้อย (Softening) เมื่อเหนือนเกินจุด Peak และเมื่อนำเอาค่าความเค้นอัดประสิทธิผลด้านข้างมาเป็นสัดส่วนกับค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) จะพบว่ามี การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4-72 ซึ่งจะแตกต่างเป็นอย่างมากจากวิจัยที่นำเสนอ โดย Khalid & Iblahim (2007) ซึ่งจะสมมุติให้อัตราส่วนดังกล่าวเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.5

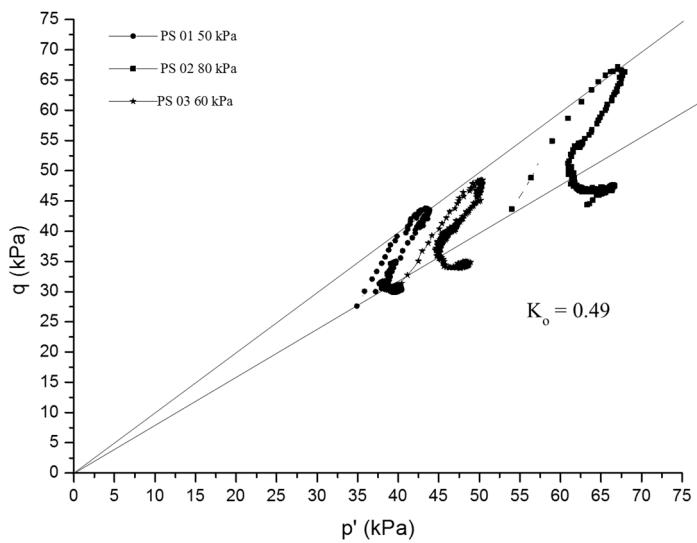
เมื่อสิ้นสุดการทดสอบการหาแรงเหนือนของตัวอย่างจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของจุดบนถุงยางจะมีลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นแบบกากบาท (Type X) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำเสนอ โดย Juyun et al. (2012) ดังภาพที่ 4-73 โดยตำแหน่งจุดต่าง ๆ บนถุงยางจะสามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้เทคนิคภาพถ่ายได้ในอนาคต



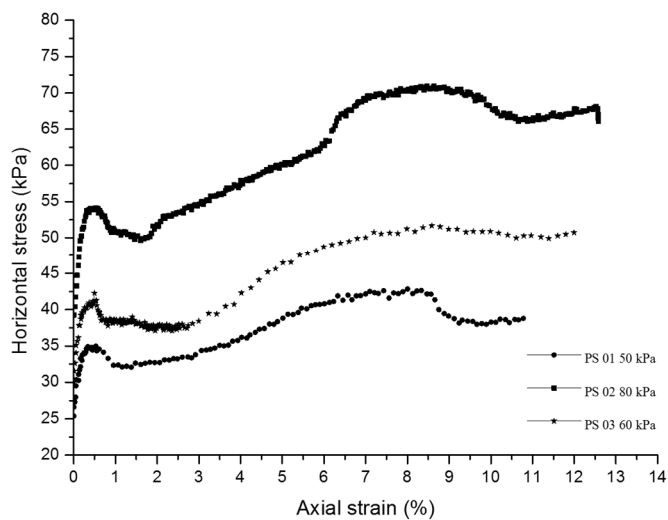
ภาพที่ 4-68 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง



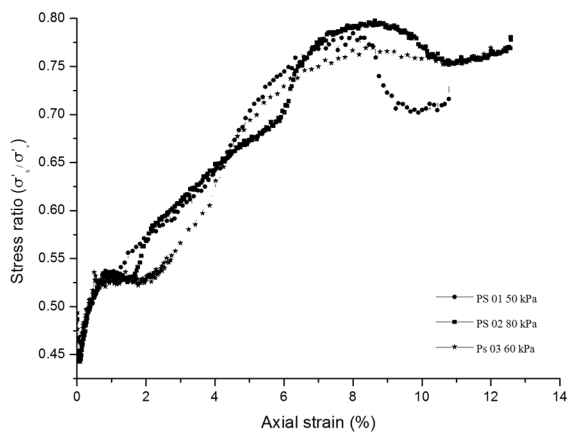
ภาพที่ 4-69 ความสัมพันธ์ระหว่าง q กับการเคลื่อนตัวในแนวนิ่ง



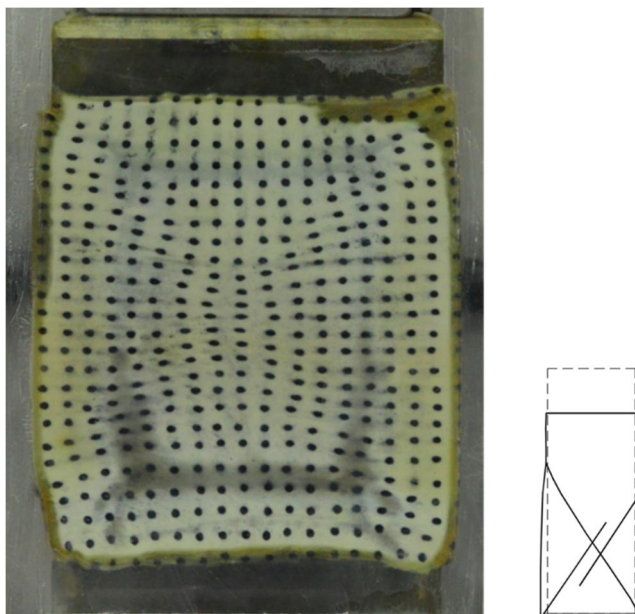
ภาพที่ 4-70 ความสัมพันธ์ระหว่าง q และ p'



ภาพที่ 4-71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นอัดประสิทธิภาพด้านข้าง (Effective horizontal stress) กับค่าความเค้นอัดในแนวดิ่ง (Vertical horizontal strain)



ภาพที่ 4-72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิภาพในแนวราบ (Effective horizontal stress) หารด้วยความเค้นประสิทธิภาพในแนวดิ่ง (Effective vertical stress) และความเค้นอัดในแนวดิ่ง (Vertical horizontal strain)



ภาพที่ 4-73 การเคลื่อนตัวของตำแหน่งที่ทำการระบุไว้บนผิวของถุงยาง

การตรวจสอบระดับความอิ่มตัว (Degree Of Saturate)

ในการทดสอบการรับกำลังของดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) มีการทดสอบระดับความอิ่มตัวโดยการตรวจสอบค่า B-value ให้มีความอิ่มตัวมากกว่าร้อยละ 95 แต่ในการทดสอบของงานวิจัยนี้ไม่สามารถตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำด้วยวิธีดังกล่าวได้ เนื่องจากไม่มีแรงดันน้ำด้านข้าง (Cell pressure) เพื่อบีบอัดตัวอย่าง ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าดินตัวอย่างจะมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเพียงพอเพื่อให้ตรงตามทฤษฎีความเค้นประสิทธิผลของ Terzaghi (1925) โดยจะทำการตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในระยะต่าง ๆ ของการทดสอบ ซึ่งแบ่งเป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินเหลวก่อนดันเข้าสู่เซลล์ทดสอบ หลังจากเสร็จสิ้นการเตรียมดินเหลว ซึ่งรายละเอียดแสดงในหัวข้อการเตรียมตัวอย่างดินเหลวก่อนดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบ จะทำการหยุดปั้นดินแต่ยังคงให้แรงดันลบที่ -80 kPa กับตัวอย่างดิน โดยแช่แรงดันลบนี้ไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อสังเกตว่าดินดังกล่าวเกิดการแยกตัวออกจากกัน เนื่องจากฟองอากาศภายในหรือไม่ถ้ามีการแยกตัวของดินเกิดขึ้น ดังภาพที่ 4-74 ก็ยังคงทำการปั้นดินในสภาวะแรงดันเท่ากับ -80 kPa ต่อไปอีก 12 ชั่วโมง แล้วทำการตรวจสอบอีกครั้งเมื่อไม่มีการแตกร้าวแสดงว่าขั้นตอนการกำจัดอากาศออกจากดินเหลวด้วยเครื่องปั้นดินที่ออกแบบขึ้นเสร็จสิ้น ก่อนทำการดันดินเหลวเข้าสู่เซลล์ทดสอบ ตัวอย่างดินเหลวดังกล่าวจะต้องถูกหาความอิ่มตัวด้วยน้ำเสียก่อน

โดยการบีบดินเหลวเข้าสู่ถ้วยที่รู้ปริมาตรที่แน่นอนแล้วทำการเคาะถ้วยเพื่อกำจัดฟองอากาศออกให้หมด จากนั้นจะเอาดินและถ้วยเข้าไปอบเพื่อหาปริมาณน้ำและน้ำหนักดินแห้ง และนำดินอีกส่วนไปหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างก่อนทำการฉีดดินเหลวเข้าเครื่องทดสอบ ดังตารางที่ 4-2 ชั้นตอนที่ 1



ภาพที่ 4-74 ตัวอย่างดินที่มีรอยแยกเนื่องจากฟองอากาศ

ตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบระดับความอิ่มตัวของดินในแต่ละชั้นตอน

| No. | ชั้นตอนที่ 1 | ชั้นตอนที่ 2 | | ชั้นตอนที่ 4 |
|--------------|--------------|--|--|--------------|
| | S (%) | $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v}$ (%) | $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_h}$ (%) | S (%) |
| PS 01 50 kPa | 99.74 | 98.67 | 99.48 | 96.72 |
| PS 02 80 kPa | 99.98 | 99.38 | 99.78 | 97.02 |
| PS 03 60 kPa | 100 | 99.82 | 99.87 | 96.22 |

หมายเหตุ: $\Delta \sigma_v$ = การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้ง

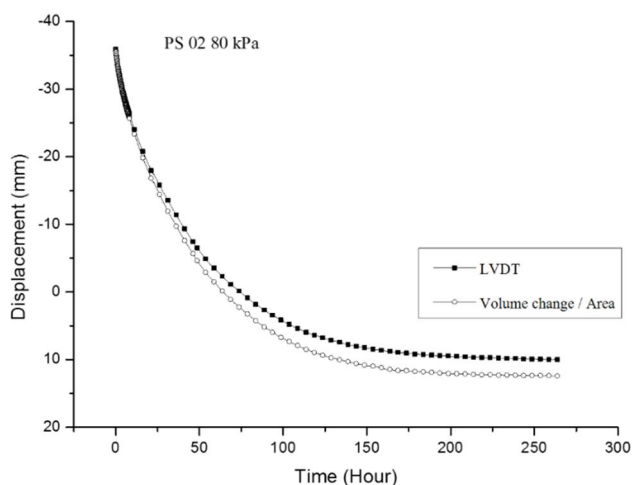
Δu = การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำส่วนเกิน

$\Delta \sigma_h$ = การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวราบ

S = ร้อยละของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่แก่ตัวอย่างดิน (Reconstitute) ก่อนเริ่มกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่จะมีการหาความอิ่มตัวด้วยน้ำก่อนการทดสอบ โดยทำการปิดวาล์วทั้งบน (หมายเลข 4) และล่าง (หมายเลข 10) ของตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-35 แล้วทำการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างดินเท่ากับความเค้นที่ต้องการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างใหม่ โดยจะยังคงปิดการปรับแก้แรงดึงของถุงยางไว้ (ระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อชุด Load frame) เมื่อตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำค่าของแรงดันที่อ่านได้จากโพลลเซลล์ อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำจะอ่านค่าได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบความอิ่มตัวด้วยน้ำได้โดย แบบที่หนึ่ง คือ การหาอัตราส่วนของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) หารด้วยค่าความเค้นในแนวตั้งที่อ่านได้จากโพลลเซลล์ ($\Delta \sigma_v$) และแบบที่สองทำได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) หารด้วยค่าความเค้นในแนวราบที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง ($\Delta \sigma_h$) ซึ่งค่าอัตราส่วนทั้งสอง ดังตารางที่ 4-2 ขั้นตอนที่ 2 หลังจากนั้นจะทำการเปิดระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด เพื่อเพิ่มแรงกดในแนวตั้งเนื่องจากการหดตัวกลับของถุงยาง อันจะทำให้ค่าแรงกดที่สร้างจากกระบอกลมนิวเมติกนั้นมีค่าลดลง จากภาพที่ 4-61 (a b และ c) จะพบว่า ค่าแรงดันด้านข้างของดินจะเท่ากับค่าแรงดันด้านบนที่ถูกหักผลกระทบของถุงยางออกแล้วพอดีซึ่งหมายความว่าดินมีความอิ่มตัวด้วย

3. ขั้นตอนการเปรียบเทียบระหว่างการทรุดตัวกับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่แก่ตัวอย่างดิน ในงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบโดยนำเอาปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดซึ่งจะต้องมีค่าเท่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งที่อ่านได้จาก LVDT เนื่องจากการทรุดตัวเฉพาะในแนวตั้ง จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงประมาณ 20% แรกของการทรุดตัว ค่าทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน แต่หลังจากนั้นค่าการทรุดตัวในแนวตั้งที่อ่านได้จาก LVDT น้อยกว่า ดังภาพที่ 4-75 เนื่องจากการเร่งการสร้างโครงสร้างใหม่แก่ตัวอย่างดินใช้แรงดันน้ำที่เป็นค่าลบ (Negative pore -water pressure) เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ที่มุมของตัวอย่างเกิดการหดตัวเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเนื่องจากค่าทั้งสองแตกต่างกันพบว่า มีค่า 3.82% 5.3% และ 6.12% สำหรับตัวอย่าง PS 01 50 kPa PS 02 80 kPa และ PS 03 60 kPa ตามลำดับ



ภาพที่ 4-75 การทรุดตัวเนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะและปริมาณน้ำไหลออกกับเวลา

4. การคำนวณค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำหลังจากการเขื่อนสิ้นสุดลง หลังจากเขื่อนตัวอย่างแล้วจะนำดินภายในไปอบเพื่อหาน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณน้ำที่อยู่ในดิน เพื่อจะสามารถนำมาคำนวณเป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังตารางที่ 4-2 ในขั้นตอนที่ 4 จากตารางที่ 4-2 พบว่าค่าของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในขั้นตอนที่ 4 จะมีค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำน้อยกว่าขั้นตอนที่ 1 และ 2 เนื่องจากเมื่อทำการให้แรงดันน้ำที่เป็นลบแก่ตัวอย่างเพื่อเร่งการทรุดตัวในกระบวนการอัดตัวคายน้ำค่าของแรงดันลบจะกระจายเข้าไปในตัวอย่างแบบทั่วทิศทางทำให้ดูยางเกิดการบีบรัด โดยเฉพาะขอบมุมของตัวอย่างส่งผลให้ปริมาตรของตัวอย่างเกิดการฝืดเพี้ยนไปดังนั้นเมื่อนำเอาปริมาตรดังกล่าวมาหารระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในขั้นตอนนี้จึงมีค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่น้อยกว่าในทุก ๆ ขั้นตอนแต่ยังคงมีระดับความอิ่มตัวที่มากกว่า 95% ทุก ๆ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ทำการพัฒนาและประดิษฐ์ขึ้นในภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ประกอบไปด้วย โหลดเซลล์ เซลล์ทดสอบ อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง และชุดโหลดเฟรมกด มีความสามารถในการวัดที่แม่นยำสูงมีความละเอียดในการวัดได้ถึง ± 1 kPa ในการเก็บข้อมูลและสั่งการทำงานของระบบทดสอบจะใช้คอมพิวเตอร์ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW สั่งงานผ่านชุดควบคุมโดยมีการทำงานของโปรแกรมเป็นลักษณะแบบวนลูป (Close-loop) ใช้เวลาในการตรวจสอบตัวเองทุก ๆ 4 วินาที และยังสามารถทำงานต่อเนื่องได้นาน 25-30 วัน โดยไม่ทำการหยุดพักตลอดระยะเวลาการทดสอบตัวอย่าง ดังนั้นเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ทำการพัฒนาและประดิษฐ์สามารถใช้ในการทดสอบที่ต้องการความละเอียดสูงและใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่ค่อนข้างนานเป็นอย่างมาก

การเตรียมตัวอย่างดินของงานวิจัยนี้โดยนำเอาดินจากภาคสนามมาทำลายโครงสร้างแล้วทำการสร้างโครงสร้างใหม่ด้วยปริมาณน้ำสูงโดยกระบวนการอัดตัวคาน้ำในหนึ่งมิติแล้วจึงทำการทดสอบเดือนตัวอย่างสามรถมั่นใจได้ว่าตัวอย่างจะไม่ถูกรบกวนในทุก ๆ ขั้นตอนหลังการอัดดินเหลวเข้าสู่เซลล์ทดสอบ 100% และดินมีความสม่ำเสมอเป็นอย่างมากโดยสามารถตรวจสอบได้จากระดับความอิ่มตัวของตัวอย่างดินทั้งก่อนอัดดินเหลวเข้าสู่เซลล์ทดสอบ ระหว่างการทดสอบ กระบวนการอัดตัวคาน้ำในหนึ่งมิติ และหลังสิ้นสุดการเดือนพบว่ามีความอิ่มตัวของทุก ๆ ตัวอย่างมากกว่าร้อยละ 95

จากผลการทดสอบการรับแรงเฉือนของตัวอย่าง PS 01 50 kPa PS 02 80 kPa และ PS 03 60 kPa ซึ่งใช้ค่าความเค้นอัดในแนวดิ่งในขั้นตอนการอัดตัวคาน้ำที่ 50 kPa 80 kPa และ 60 kPa ตามลำดับ พบว่า ทั้งสามตัวอย่างมีลักษณะแบบ Softening เมื่อเลขจุด Peak และจะเข้าสู่ Residual state และเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นรูปกากบาทในทุก ๆ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ และมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะหยุดนิ่ง (K_0) เฉลี่ยเท่ากับ 0.49

ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ทำการพัฒนาและประดิษฐ์ขึ้นเองในงานวิจัยนี้มีความละเอียดและความแม่นยำของการวัดค่าที่สูงมากโดยที่จริงจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณภาพของสายดินและสายส่งสัญญาณ ความยาวของสายส่งสัญญาณ อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ บริเวณรอบข้าง คุณภาพของวงจรขยายสัญญาณ อุณหภูมิระหว่างการทดสอบ รวมถึงกำลังการขยายสัญญาณ

2. ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำเพื่อสร้างโครงสร้างใหม่ของดินตัวอย่างยังใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างยาวนานต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นตอนของการอัดตัวคายน้ำที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับการเร่งการทรุดตัวด้วยเทคนิคการใช้ PVD ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

- พิเชษฐ์ มะโนรัตน์ (2548). *คุณลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบหนึ่งมิติของดินซีเมนต์ที่มีการบ่มด้วยความเค้นที่ปริมาณน้ำสูง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Amorndech, N. (2001). *Triaxial Tests With Selected Stress Paths On Soft Bangkok Clay From The Heavily Overconsolidated State*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Anuchit, U. (1998). *Triaxial Tests On Soft Bangkok Clay with Different Applied Stress Paths*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Asaoka, A. (1978). *Observational procedure of settlement prediction*. Soil and Foundations, 18(4), 87-101.
- Baxter, D.Y. (2006). *Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls*. Doctoral dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Belviso, S., Claustre, H., & Marty, J.C. (2001). *Evaluation of the utility of chemotaxonomic pigments as a surrogate for particulate DMSP*. Limnology and Oceanography, 46(4).
- Bergado, D. T., Chai, J. C., Miura, N., & Balasubramaniam, A.S. (1998). *PVD improvement of soft Bangkok clay with combined vacuum and reduced sand embankment preloading*. Geotechnical Engineering, Southeast Asian Geotechnical Society, 29(1), 95-121.
- Bishop, A. W., & Eldin, G. (1950). *Undrained Triaxial Tests on Saturated Sands and Their Significance in the General Theory of Shear Strength*. Géotechnique, 2(1), 13-32.
- Burland, J.B. (1990). *On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays*. Geotechnique, 40(3), 329-342.
- Casey, B. D. (2014). *The Consolidation and Strength Behavior of Mechanically Compressed Fine-Grained Sediments*. Doctoral dissertation, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Faculty of Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

- Chai, J. C., Hong, Z. S., & Shen, S. L. (2008). *Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain. Analyses versus performance*, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), 220-230.
- Chu, J., Yan, S., & Indraratna, B. (2008). *Vacuum preloading techniques-recent developments and applications*. Proc. 2008 GeoCongress : Geosustainability and Geohazard Mitigation, AN(eds), 586-595
- Gurung, S. B. (1992). *Yielding of Soft Bangkok Clay below the state Boundary Surface under Compression Condition*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Hambly, EC. (1969) *Plane strain behavior of soft clay*, Doctoral dissertation, Geotechnical Engineering, University of Cambridge.
- Jia, R., Chai, J. C., Hino, T., & Hong, Z. S. (2010). *Strain-rate effect on consolidation behaviour of Ariake clay*. *Geotechnical Engineering*, 163(GE5), 267-277.
- José, A. C., Laureano, R. H., & Arcesio, L. (2012). *Unsaturated Soil Response under Plane Strain Conditions Using a Servo/Suction-Controlled Biaxial Apparatus*. *ResearchGate*, doi:10.1007/978-3-642-31116-1_5
- Juyun, Y., Qihui, Z., Bei, Li., & Xihong, Z. (2012) *Experimental analysis of shear band formation in plane strain tests on Shanghai silty clay*. *Bull Eng Geo Environ*, 72, 107-114.
- Khalid, A. A., & Ibrahim, S. A. (2007). *Strain localization in clay: plane strain versus triaxial loading conditions*. *Geotech Geol Eng*, 25, 45-55.
- Khan, M. R. A. (1999). *Stress-Strain Behavior of Soft Bangkok Clay below the Dtate Boundary Surface under Anisotropic Condition*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Kim, S. R. (1991). *Stress Strain Behaviour and Strength Characteristics of Lightly Overconsolidated Clays*. Doctoral dissertation, AIT, Bangkok, Thailand.
- Kjellman, W. (1952). *Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure*. *Proceedings of the Conference on Soil Stabilization*, Massachusetts Institute of Technology, USA, 258-263.

- Kongkitkul, W. (2004). *Effects of material viscous properties on the residual deformation of geosynthetic-reinforced sand*: Doctoral dissertation, Geotechnical Engineering, University of Tokyo.
- Koutsoftas, D. C., & Ladd, C. C. (1985). *Design Strengths for an Offshore Clay*. Journal of Geotechnical Engineering, 111(3).
- Ladd, C. C., & Varallyay, J. (1965). *The influence of stress system on the behavior of saturated clays during undrained shear*. Research in Earth Physics Phase, Massachusetts Institute of Technology, 1(2), 260-263.
- Lena, T. (2000). *Behavior of Soft Clay below the State Boundary Surface with Stress Paths from Extension to Compression*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Mayne, P. W., & Kulhawy, F. H. (1982). *K_o -OCR relationships in soil*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108(GT6), 851-872.
- Navaneethan, T. (1999). *Extension Behavior of Soft Bangkok Clay with Selected Applied Stress Paths*. Master's thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Saowapakpiboon, J. (2010). *Behavior of Smearred Zone and Performance of PVD under Surcharge and Vacuum Preload with and without Heat*. Doctoral dissertation, AIT, Bangkok, Thailand.
- Seah, T. H., & Lai, K. C. (2003). *Strength and Deformation Behavior of Soft Bangkok Clay*. Geotechnical Testing Journal, 26(4).
- Skempton, A.W. (1944). *Note on the Compressibility of Clays*. Quarterly Journal of the Geological Society of London, London, 100, 119-135.
- Tang, M., & Shang, Q. (2000). *Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway*. Géotechnique, 50(6), 613-623.
- Tezaghi, K. (1925). *Erdbaumechnik Auf Boden-phsicalischen Grundlagen*. Dueticke, Vienna, 15-20.
- Uddin, K., Balasubramianiam, A. S., & Bergado, D. T. (1997). *Engineering Behavior of Cement-Treated Bangkok Soft Clay*. Geotechnical Engineering, 28(1), 89-119.

Vaid, Y. P., & Campanella, R. G. (1974). *Triaxial and Plane Strain Behavior of Natural Clay*.

ASCE, J Geotech Eng Div, *100*(GT3), 207–224.

Vardhanabhuti, B. (2006). *The coefficient of earth pressure at rest and deformation and densification of granular soils subjected to static and dynamic loading*. Doctoral dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Wanatowski, W., & Chu, J. (2007). A New Plane-Strain Apparatus and Plane-Strain Test on Sand. *ResearchGate*, doi:10.13140/2.1.3351.6801