

## สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ประกอบตัวใหม่ขณะเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ<sup>1\*</sup> วีรพร พงศ์ติณบุตร<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130

และ พรเกษม จงประดิษฐ์<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

\* Corresponding Author: piyachatc@eng.buu.ac.th

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 17 มิถุนายน 2564

แก้ไข : 24 กุมภาพันธ์ 2565

ตอบรับ : 24 มีนาคม 2565

DOI: 10.14456/kmuttrd.2022.9

#### คำสำคัญ :

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่  
สถานะอยู่นิ่ง / แรงดันดินด้านข้าง /  
ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ /  
ระบบควบคุมอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในสภาวะอัดตัวปรกติ โดยทั่วไปแล้ว การหาค่าดังกล่าวต้องใช้เครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกน แต่วิธีดังกล่าวยุ่งยากเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องควบคุมความเครียดในแนวตั้งให้เท่ากับความเครียดเชิงปริมาตรในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าในหนึ่งมิติ ซึ่งหากไม่สามารถทดสอบตามเงื่อนไขดังกล่าว จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งที่วัดได้นั้นผิดพลาด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการ รวมทั้งชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแบบใหม่ เครื่องมือทดสอบทำงานร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำสูง ตลอดจนระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งทำให้สามารถวัดแรงเค้นประสิทธิผลได้ทั้งสามทิศทางและยังสามารถสร้างเงื่อนไขสถานะแวดล้อมได้ตรงกับที่เกิดขึ้นในสนาม ตัวอย่างดินถูกอัดตัวคายนํ้าโดยใช้แรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ วัดค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งเมื่อการอัดตัวคายนํ้าหลักสิ้นสุดลง จากผลการทดสอบ พบว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงมากในการควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินตัวอย่าง ในขณะที่ดินอยู่ระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้า ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งของดินเหนียวอัดตัวปรกติก่อนข้างคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับแรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่ใช้ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้า ตลอดจนค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของดิน

---

## Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest of Remolded Soft Bangkok Clay under Increasing Effective Vertical Stress

Piyachat Chattonjai<sup>1\*</sup>, Weraporn Phongtinnaboot

Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi 20130

and Pornkasem Jongpradist<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

\* Corresponding Author: [piyachatc@eng.buu.ac.th](mailto:piyachatc@eng.buu.ac.th)

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department Civil Engineering, Faculty of Engineering.

---

### Article Info

#### Article History:

Received: June 17, 2021

Revised: February 24, 2022

Accepted: March 24, 2022

DOI: 10.14456/kmuttrd.2022.9

---

#### Keywords:

Coefficient of Earth

Pressure at Rest /

Lateral Earth Pressure /

Soft Bangkok Clay /

Automatic Control

System

### Abstract

This research mainly focused on how to determine the coefficient of lateral earth pressure at rest ( $K_0$ ) for normally consolidated soft Bangkok clay. Traditionally, such a coefficient is determined using a triaxial test equipment. However, the procedures to perform  $K_0$ -consolidation via the triaxial test is highly complicated as it is necessary to maintain the vertical strain to be equal to the volumetric strain. The measured value of  $K_0$  would be erroneous if such a criterion could not be met. Therefore, a new methodology and artificial equipment are proposed in this research. The experiments were performed by using high precision sensors in combination with an automatic feedback control system that was able to measure stresses in three axes; the set up could reproduce significant boundary conditions in the field. The specimens were consolidated by differential pre-consolidation pressures. The values of  $K_0$  were measured at the end of the primary consolidation. The proposed automatic controlling system worked very well to constrain the lateral movement while consolidation was performed. The  $K_0$  value did not depend on both pre-consolidation pressures and undrained shear strength.

---

**1. บทนำ**

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่ง ( $K_0$ ) ของดินนั้นสามารถหาค่าได้ทั้งจากการทดสอบในสนาม (In-Situ Tests) และ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$k_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (1)$$

เมื่อ

$\sigma'_h$  คือ ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ

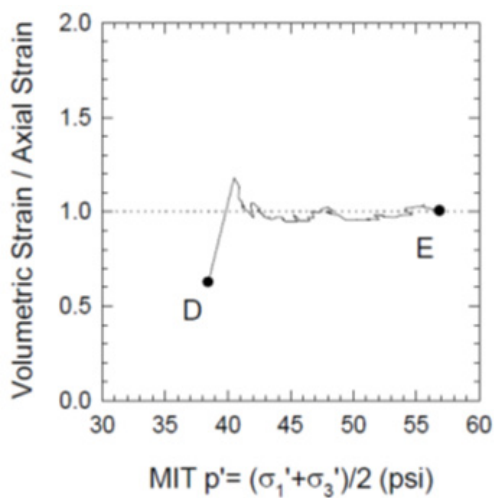
$\sigma'_v$  คือ ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง

สมการที่สามารถคำนวณหาค่า  $K_0$  นั้นมักจะนำเสนอออกมาในลักษณะสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical Equations) [1-5] สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นโดยทั่วไปจะสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากการทำ  $K_0$ -Consolidated Triaxial Test โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Tests) ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากเนื่องจากในช่วงการอัดตัวคายน้ (Consolidation) ผู้ทดสอบจะต้องปรับความดันที่บริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Cell Pressure หรือ Confining Pressure) เพื่อให้ไม่เกิดความเครียดด้านข้าง (Lateral Strain = 0) ดัง

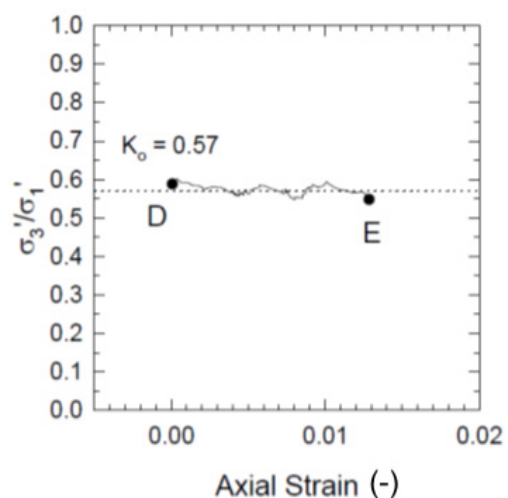
นั้นความเครียดในแนวตั้งจะต้องมีค่าเท่ากับความเครียดเชิงปริมาตร (Vertical Strain = Volumetric Strain) โดยภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวจะสมมุติให้ดินตัวอย่างนั้นยังคงรูปอยู่ในทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และเท่ากันตลอดความสูงระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้

Baxter [6] ได้ทดสอบหาค่าสมบัติการรับแรงเฉือนของดินผสมเบนโทไนท์ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Tests) ด้วยวิธี  $K_0$ -Consolidated Undrained Triaxial Test โดยในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ ( $K_0$ -Consolidation) ระหว่างจุด D ถึงจุด E ในรูปที่ 1 พบว่าการปรับแรงดันด้านข้าง (Cell Pressure or Confining Pressure) เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง Volumetric Strain กับ Axial Strain เท่ากับ 1 นั้นเป็นไปได้ยากมากโดยเฉพาะในช่วงต้นๆ ( $38 < p' < 41$  psi) และในช่วงที่  $P' > 41$  psi จะพบว่าอัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain นั้นใกล้เคียง 1 ซึ่งทั้งหมดนี้จะส่งผลถึงความแม่นยำในการหาค่า  $K_0$  ของดินอีกทั้งการทดสอบนี้จะต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากในการทดสอบ โดยการหาค่า  $K_0$  นั้นจะเฉลี่ยผลการทดสอบตั้งแต่จุด D ถึงจุด E ดังแสดงในรูปที่ 2

Seah และ Lai [7] ได้ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพแบบคงสภาพ (Undisturbed



รูปที่ 1 อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial Strain ระหว่างกระบวนการ  $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial Tests (Baxter [6])



รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ  $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial Tests (Baxter [6])

Samples) ที่ความลึกไม่เกิน 8 เมตรในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Tests) ด้วยวิธี  $K_0$ -Consolidated Undrained Triaxial Test เมื่อการอัดตัวคายน้ำหลัก (Primary Consolidation) สิ้นสุดลง จึงได้หาค่า  $K_0$  ของดินเหนียวที่อยู่ทั้งในสภาวะอัดตัวคายน้ำปกติ (Normally Consolidated Clay, NC) และอัดตัวคายน้ำมากกว่าปกติ (Overconsolidated Clay, OC) จากผลการทดสอบ พบว่า ค่า  $K_0$  ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในสภาวะ NC นั้นมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 0.55 ถึง 0.62 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.60 นอกจากนี้ยังนำเสนอสมการเพื่อหาค่า  $K_0$  ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งในสภาวะ NC และ OC โดยใช้โครงสร้างสมการที่นำเสนอโดย Mayne และ Kulhawy [8] เมื่อค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Angle of Internal Friction,  $\phi'$ ) เท่ากับ  $20.5^\circ$  ซึ่งได้จากผลการทดสอบการรับแรงเฉือน

การทดสอบเพื่อหาค่า  $K_0$  ในสนาม สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือทดสอบเช่น Cone Penetrometer Test (CPT), Pressuremeter และ Dilatometer [9-14] Prust และคณะ [12] ได้เปรียบเทียบค่า  $K_0$  ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินซึ่งหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้สมการของ Jacky [1] กับการทดสอบในสนามด้วยเครื่อง Self-boring Pressuremeter พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.75 และ 0.1 ถึง 0.3 ตามลำดับ Likitlersuang และคณะ [15] ได้ทดสอบหาค่า  $K_0$  ด้วยเครื่อง Pressurimeter Called Lateral Load Test ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายซึ่งคำนวณด้วยสมการที่ 1 โดยที่ค่าแรงเค้นรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress) หาได้จากสามวิธีคือ Creep Curve Method, Marsland & Randolph method [16] และ Hawkins method [17] ส่วนค่าแรงดันน้ำ (Pore-Water Pressure) ที่ใช้นั้นมีการคำนึงถึงผลกระทบของการสูบน้ำใต้ดินในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งวัดจากค่าจริงในสนามด้วยเครื่อง Standpipe Piezometer และ Electric Piezometer ผลการศึกษา พบว่า ค่า  $K_0$  ในชั้นดินเหนียวอ่อนจากวิธี Hawkins method มีค่า

เฉลี่ยประมาณ 0.68 ส่วนค่าที่ได้จากวิธี Creep Curve Method และ Marsland & Randolph Method มีลักษณะเกาะกลุ่มกันโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.5

Vardhanabhuti [18] ได้ศึกษาและออกแบบเครื่องทดสอบเพื่อหาค่า  $K_0$  โดยใช้เครื่อง Oedometer แบบพิเศษซึ่งจะมีวงแหวนภายในทำจาก Highly Polished Stainless Steel และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างโดยตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบนั้นคือ Ottawa Sand, Lake Michigan Beach Sand, และ Niigata Sand โดยเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและความสูงของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 76.2 มม. และ 25.4 มม. ตามลำดับ บริเวณกึ่งกลางของวงแหวนเป็น Diaphragm ที่มีความหนา 0.254 มม. ซึ่งติดตั้ง Strain Gauges เพื่อตรวจสอบการยืดหดตัว (Lateral Deformation) ของ Diaphragm ซึ่งถูกควบคุมโดยแรงดันด้วย Silicone Oil Chamber ซึ่งแน่นอนว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือดังกล่าวย่อมทำให้ดินเกิดการทรุดตัวในแนวตั้งได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าการใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Tests) แต่ก็ไม่สามารถนำตัวอย่างที่มีขนาดเล็กนี้ไปเฉือนเพื่อดูพฤติกรรมการรับแรงและการเสียรูปต่อไปได้

Chattonjai และ Yathuam [19] ได้ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ การทราบค่าแรงดันด้านข้างของดินนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการหาค่า  $K_0$  เมื่อการอัดตัวคายน้ำหลักสิ้นสุดลง อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ทางเดินของความเค้นโดยใช้แรงเค้นครบทั้ง 3 มิติ เมื่อดินถูกเฉือนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain Condition) อุปกรณ์นี้ทำงานโดยใช้หลักการสมดุลด้วยแรงดันลมคือ เมื่อแรงดันทั้งสองข้างของแผ่น Diaphragm มีค่าเท่ากัน แผ่น Diaphragm ก็จะไม่เกิดการเสียรูปและอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นที่จุดสมดุลนี้จะสามารถวัดค่าแรงดันดินที่สัมผัสกับแผ่น Diaphragm ได้จากค่าแรงดันลมที่ทำให้แผ่น Diaphragm อยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง โดยงานวิจัยนี้จะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้ในขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง

ใหม่ให้กับดินเหลวประกอบตัวใหม่ (Remolded Clay) เพื่อวัดค่าแรงเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Horizontal Effective Stress,  $\sigma'_h$ ) ก่อนที่จะถอดแผ่นประกบด้านข้างออกเพื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและลดแรงเสียดทานระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้า ซึ่งหากไม่มีอุปกรณ์ดังกล่าวก็จะไม่สามารถปรับให้แรงเค้นรวมด้านข้าง (Horizontal Total Stress,  $\sigma'_h$ ) ของตัวอย่างดินเป็นศูนย์ส่งผลให้ไม่สามารถถอดแผ่นประกบด้านข้างออกได้โดยที่ดินไม่เกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไปในขั้นตอนการทดสอบ อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ให้ค่าที่มีความเป็นเส้นตรงดีมาก โดยมีค่า  $R^2 = 0.9992$  และมีความละเอียดในการเท่ากับ  $\pm 0.425$  kPa

งานวิจัยนี้นำเสนอชุดเครื่องมือและวิธีการทดสอบเพื่อหาค่า  $K_0$  ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) ในสภาวะอัดตัวคายนํ้าปรกติ โดยการทรุดตัวในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้าจะเป็นการทรุดตัวในแนวตั้ง นอกจากนั้น ตัวอย่างดินที่ได้หลังการอัดตัวคายนํ้าสิ้นสุดลงจะสามารถนำไปทดสอบการรับแรงเฉือนทันที โดยไม่ต้องตัดแต่งตัวอย่างและไม่ต้องเคลื่อนย้ายตัวอย่างออกจากอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง ในบทความนี้จะแสดงเฉพาะการใช้ชุดเครื่องมือดังกล่าวในการหาค่า  $K_0$  เท่านั้น

## 2. การจัดหาตัวอย่างดินเหนียว

ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความลึก 3-4 เมตร จากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ซึ่งห่างจากสนามบินสุวรรณภูมิไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะทางประมาณ 7 กิโลเมตร ดินที่นำมาใช้นั้นมีค่าปริมาณน้ำตามธรรมชาติ (Natural Water Content) เท่ากับ 120% ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) และค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ที่ 54% และ 122% ซึ่งเมื่อจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification จะได้เป็น CH และเมื่อนำไปหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) มีค่าเท่ากับ 2.74 เมื่อพิจารณาค่าปริมาณน้ำจะพบว่าดินนี้เป็นดินที่มีค่าปริมาณน้ำสูงและเป็นดินเหนียวอ่อนมากเนื่องจากมีค่าปริมาณน้ำตามธรรมชาติใกล้เคียงกับค่าพิกิตเหลว

## 3. เครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือและโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องมือที่ได้มีการพัฒนาขึ้นใหม่ภายในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา โดยมีจุดมุ่งหมายในการสร้างเครื่องมือทดสอบที่มีความสามารถหลากหลาย ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงการใช้งานเพื่อหาค่า  $K_0$  เป็นหลัก องค์ประกอบหลักของเครื่องทดสอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

### 3.1 เซลล์ทดสอบ

เหตุผลสำคัญที่ต้องออกแบบเซลล์ทดสอบขึ้นมาใหม่คือต้องการจำลองสภาพจริงที่เกิดขึ้นในสนามได้อย่างสมบูรณ์ ขนาดของตัวอย่างดินหลังจากที่การอัดตัวคายนํ้าสิ้นสุดลงคือ กว้าง 90 mm ลึก 50 mm และสูง 130 mm รูปที่ 3 แสดงภาพแผ่นประกบ B (รูปที่ 4) ของเซลล์ทดสอบซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างที่นำเสนอโดย Chattonjai และ Yathuam [19] สมบัติเด่นของเซลล์ทดสอบตัวนี้อีกประการคือสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมได้อย่างง่ายดายทั้งแบบทรุดตัวในหนึ่งมิติ (One-Dimensional Consolidation, 1-D) แบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain, PS) และแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric, AS) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (Boundary Condition) แบบ 1-D (ดังแสดงในรูปที่ 4) เมื่ออยู่ในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่โดยใช้แผ่นประกบด้านข้างทั้งสี่ด้านเป็นตัวบังคับไม่ให้นดินตัวอย่างเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้าง และใช้แบบ AS ในขั้นตอนการอัดตัวคายนํ้า (ดังแสดงในรูปที่ 5) โดยจะถอดแผ่นประกบทั้ง 4 ด้านออก เทคนิคและวิธีการในการถอดแผ่นประกบออกนั้นจะกล่าวถึงในขั้นตอนการทดสอบ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแผ่นประกบ B นั้นมีขนาดใหญ่และไม่ได้ขึ้นรูปจากโลหะที่มีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อนต่ำ (Low-Thermal Expansion Coefficient) จึงทำให้มีผลกระทบของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องในการวัดค่าแรงดันด้านข้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องมีการปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2 อุณหภูมิของแผ่น



ประกบจะสามารถวัดได้โดยการฝังเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ในแผ่นประกบ B

$$P_{1(cal)} = P_2 + a[\Delta V - b(\Delta V_T)] \quad (2)$$

เมื่อ

$a$  = ค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Volt) กับหน่วยแรงที่กระทำ (kPa)

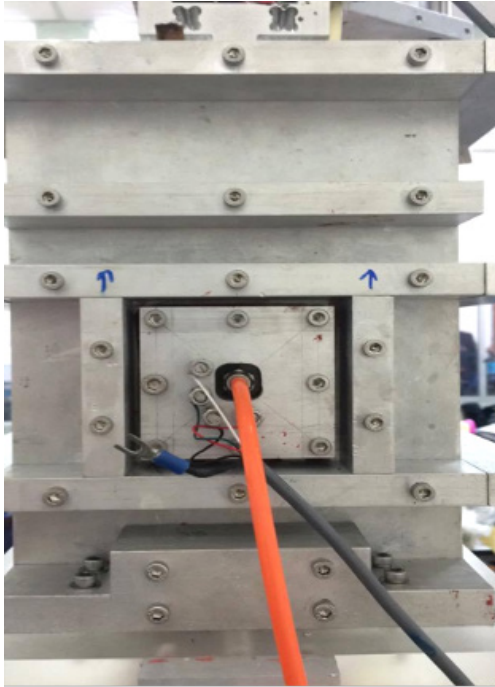
$b$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งไว้ภายในอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง

$\Delta V$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งไว้ภายในอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง

$\Delta V_T$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

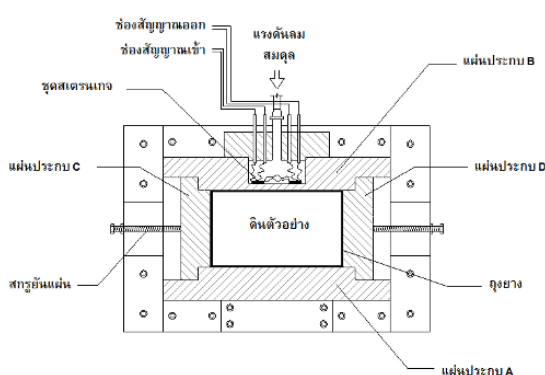
$P_2$  = ค่าแรงดันลมที่ใช้รักษาสมดุลของแผ่นไดอะแฟรมในขณะนั้น (kPa)

$P_{1(cal)}$  = ค่าแรงดันด้านข้างหลังการปรับแก้อุณหภูมิ (kPa)

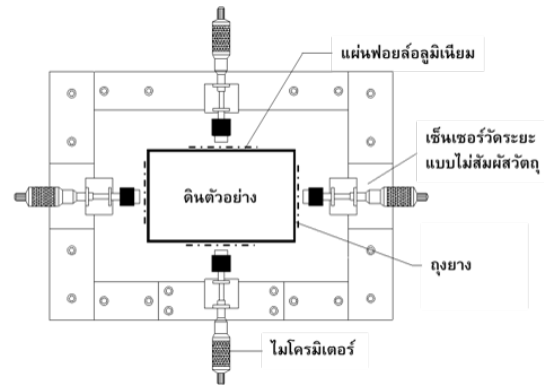


รูปที่ 3 แผ่นประกบ B

ภายในเซลล์ทดสอบติดตั้งถุงยางที่มีขนาดเส้นรอบวงเท่ากับเส้นรอบวงของเซลล์ทดสอบ ถุงยางนี้จะถูกยึดติดกับด้านข้างของหินพูนด้วยกาวร้อน (cyanoacrylate) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยุบระหว่างดินเหลวเกิดการทรุดตัว โดยหินพูนดังกล่าวจะมีการติดตั้งตะแกรง



รูปที่ 4 การทรุดตัวในหนึ่งมิติ (One-Dimensional Consolidation, 1D)

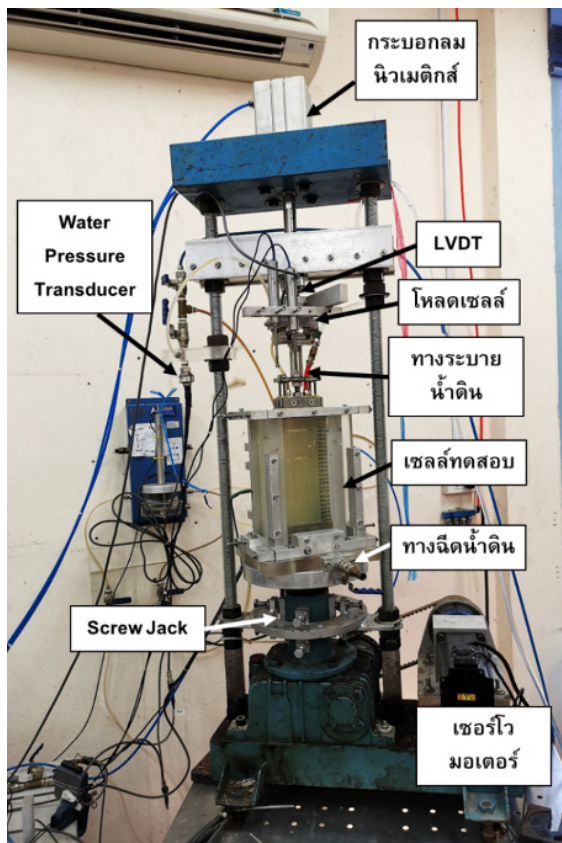


รูปที่ 5 เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric, AS) เดียว

สแตนเลสเบอร์ 500 ในด้านที่หินปูนจะสัมผัสกับดินเหลวโดยตรงเพื่อกันไม่ให้เม็ดดินเหนียวเล็ดลอดออกไปให้ได้มากที่สุด จากการทดสอบพบว่าเม็ดดินเหนียวเล็ดลอดออกมามีปริมาณที่น้อยที่สุดจากการทดสอบพบว่ามีตะกอนดินเพียงเล็กน้อยที่สามารถเล็ดลอดออกมาได้แต่มีปริมาณน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ

### 3.2 เพรมกดดิน

เนื่องจากต้องการกระบวนการสร้างโครงสร้างดินในขณะที่ดินอยู่ในสถานะของเหลวและอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างบนชุดเครื่องมือทดสอบเดียวกันโดยไม่ต้องมีการตัดแต่งหรือย้ายตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงสร้างเพรมกดดินที่มีสมบัติพิเศษขึ้นมาใหม่ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยแบ่งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติดังต่อไปนี้



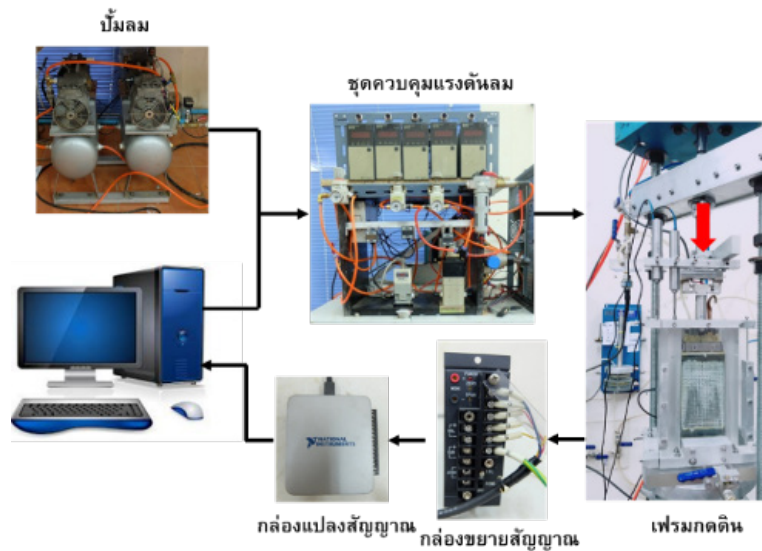
รูปที่ 6 ส่วนประกอบของเพรมกดดิน

#### 3.2.1 ระบบที่ 1 ควบคุมแรงเค้นในแนวตั้ง

ระบบนี้จะใช้ในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างใหม่ให้กับดินผ่านกระบวนการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง (Consolidation) ซึ่งจะต้องควบคุมแรงเค้นในแนวตั้งให้คงที่ตลอดเวลา การให้แรงเค้นในแนวตั้งจะอาศัยการจ่ายแรงลมผ่านอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-Pneumatic Regulator) ทำงานร่วมกับโหลดเซลล์ (Load Cell) ภายใต้โปรแกรมควบคุมแบบป้อนค่ากลับ (Closed-Loop Control) ซึ่งมีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 7 โดยแรงกดที่สร้างขึ้นจะกระทำผ่านคานบังคับไปยังโหลดเซลล์ (Load cell) คานบังคับทำหน้าที่บังคับให้แกนส่งกำลังมีความมั่นคงและสามารถส่งแรงไปที่จุดกึ่งกลางของดินตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ โดยจะต้องอาศัยลูกปืนสไลด์ (Linear Slide Bearing) เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแกนส่งกำลังกับคานบังคับ อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานดังกล่าวจะไม่มีผลต่อการวัดค่าแรงเค้นในแนวตั้ง เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งโหลดเซลล์อยู่ใต้คานบังคับ เมื่อแรงส่งผ่านโหลดเซลล์ลงสู่ตัวอย่างแล้ว ตัวโหลดเซลล์จะวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นและส่งกลับไปยังชุดควบคุมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าแรงกระทำที่สั่งโดยโปรแกรมควบคุมการทำงาน เมื่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นผิดเพี้ยนจากแรงกระทำที่กำหนด ระบบจะปรับแก้แรงดันลมผ่านชุดคำสั่งอีกครั้งเพื่อให้ค่าแรงเค้นผิดพลาดไม่เกินค่าที่ยอมให้ ( $\pm 0.4$  kPa) ระบบจะตรวจสอบแบบนี้ทุกๆ 4 วินาทีเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด

#### 3.2.2 ระบบที่ 2 การปรับแก้ค่าเนื่องจากแรงดึงของถุงยาง

ในกระบวนการสร้างโครงสร้างดินด้วยการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ ถุงยางจะถูกดึงให้ยืดออกตามค่าที่ได้คำนวณไว้เพื่อที่จะรองรับการหลุดตัวของดินเหลวที่จะเกิดขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติด้วยเครื่อง Oedometer ดังนั้นนอกจากจะมีแรงกดที่สร้างโดยครอบกลมนิวมेटิกด้วยระบบที่ 1 แล้ว ยังมีแรงหดกลับของถุงยางเพิ่มเข้ามาอีกด้วย ซึ่งส่งผลให้แรงที่กดด้านบนของตัวอย่างมากกว่า



รูปที่ 7 ระบบควบคุมแรงเค้นในแนวตั้ง (Stress Control)

ค่าที่ตั้งไว้ซึ่งไม่สามารถอ่านแรงดึงกลับของยางนี้ได้จาก โหลดเซลล์ จากการทดสอบค่าแรงดึงกลับของยางจะแปรผันตามระยะยืด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าแรงกดเนื่องจากแรงดึงกลับของยางเพื่อให้ได้ค่าแรงกดรวมที่แท้จริงโดยใช้สมการที่ 3 ในการคำนวณค่าแรง โดยจะต้องสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดของยางกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งที่อ่านได้จากโหลดเซลล์เพื่อมาปรับแก้

$$\sigma_v = \sigma_{v(PAC)} + \sigma_{v(Rubber)} = c(\Delta V_{Load\ cell}) + d(r_e) \quad (3)$$

เมื่อ

$\sigma_v$  = ความเค้นรวมในแนวตั้ง (kPa)

$\sigma_{v(PAC)}$  = ความเค้นในแนวตั้งที่สร้างจากกระบอกลม นิวเมติกจากการเปิดใช้งานระบบที่ 1 (kPa)

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

$\Delta V_{Load\ cell}$  = ค่าความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์ (Volt)

$c$  = ค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากโหลดเซลล์ (Volt) กับหน่วยแรงที่กระทำ (kPa)

$d$  = ค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟความ

สัมพันธ์ระหว่างระยะยืดตัวของยาง (mm) กับหน่วยแรงดึงกลับของยาง (kPa)

$r_e$  = ระยะยืดของยาง (mm)

### 3.2.3 ระบบที่ 3 การควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral strain Control) และควบคุมการลดของค่าแรงเค้นในแนวตั้ง (Vertical Stress Control)

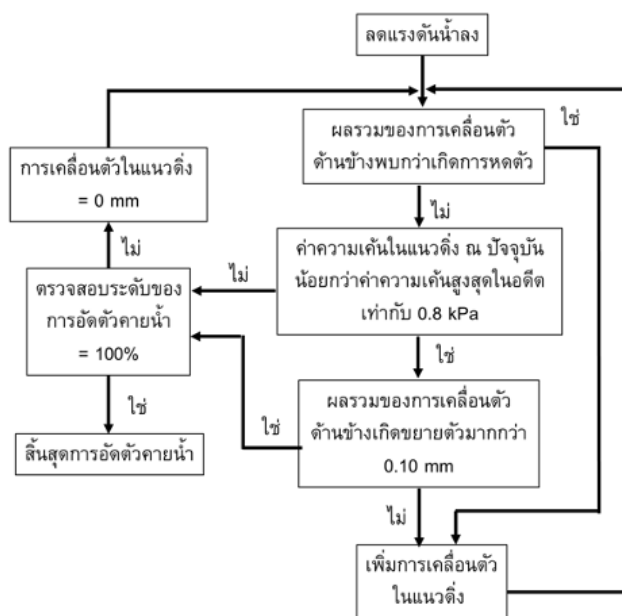
ถึงแม้ว่าตัวเซลล์ทดสอบจะมีอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างและสามารถคำนวณค่า  $K_0$  ได้หลังการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงโดยที่เซลล์ทดสอบยังอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบหนึ่งมิติ (รูปที่ 4) แต่งานวิจัยนี้เห็นว่าการใช้แผ่นประกบทั้ง 4 ด้านนั้นยังมีปัญหาในเรื่องของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นประกบกับยางถึงแม้ว่าจะมีการใช้สารหล่อลื่นทาบริเวณด้านข้างของตัวอย่างแล้วก็ตาม ซึ่งในประเด็นนี้จะแตกต่างกับกรณีที่ใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Tests) ที่ด้านข้างของยางเป็นน้ำจึงสามารถตัดปัญหาแรงเสียดทานออกไปได้ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของตัวอย่างให้เป็นแบบ AS (รูปที่ 5) หลังกระบวนการสร้างโครงสร้างดินใหม่สิ้นสุดลง โดยรายละเอียดของวิธีการเปลี่ยนนั้นจะอธิบายต่อไปในหัวข้อขั้นตอนการทดสอบ จากการทดสอบพบว่าดินตัวอย่างถูกรบกวนในขณะที่แผ่นประกบถูกถอดออก ดังนั้นจึงต้องทำการอัด



ตัวคายนํ้าในหนึ่งมิติอีกครั้ง แต่เนื่องจากเซลล์ทดสอบนี้ไม่มีเซลล์ครอบด้านนอกจึงไม่สามารถให้แรงบีบอัดด้านข้างจากนํ้า (Cell Pressure) เพื่อไปสร้างแรงเค้นได้เหมือนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน ดังนั้นจะไม่สามารถใช้วิธีการเดียวกันได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงใช้แรงดันนํ้าที่เป็นลบ (Negative Water Pressure) เข้ามาแทนการใช้ Cell Pressure ในการสร้างแรงบีบอัดด้านข้าง (Confining Pressure) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ Negative Water Pressure นั้นจะทำให้ดินเกิดการอัดตัวคายนํ้าแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation) ซึ่งไม่ตรงตามพฤติกรรมจริงในสนามที่การอัดตัวคายนํ้าจะเกิดขึ้นเฉพาะในแนวตั้ง งานวิจัยนี้จึงได้สร้างระบบควบคุมเพื่อบังคับให้ดินยังอยู่ภายใต้สภาวะอัดตัวคายนํ้าในหนึ่งมิติ

ระบบนี้จะใช้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างมาเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเพื่อรักษาไม่ให้ตัวอย่างดินที่อยู่ระหว่างการอัดตัวคายนํ้าด้วยแรงดันลบ (Vacuum Consolidation) เกิดการหดตัวด้านข้าง โดยระบบจะประสานการทำงานระหว่างเซนเซอร์วัดระยะที่ติดตั้งไว้ด้านข้างของตัวอย่างทั้ง 4 ด้านดังแสดงในรูปที่ 5 กับเซอร์โวมอเตอร์ที่ติดตั้งไว้กับเฟรมกดดินโดยมีหลักการการทำงานดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อระบบตรวจจับได้ว่าผลรวมของการเคลื่อนตัวด้านข้างทั้งสี่ด้านมีผล

เป็นลบ (หดตัว) ระบบจะสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานเพื่อกดดินอย่างช้าๆ ตัวอย่างดินก็จะเกิดการขยายตัวด้านข้าง ระบบจะกดตัวอย่างดินจนกว่าค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจะกลับมาเป็นศูนย์ แต่หากตัวอย่างดินไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง ตัวอย่างดินก็จะถูกปล่อยให้กระบวนการอัดตัวคายนํ้าดำเนินต่อไปด้วยการกระตุ้นให้เกิดการไหลของนํ้าอันเนื่องมาจากแรงดันนํ้าที่เป็นลบประสานกับแรงกดในแนวตั้งจนกว่ากระบวนการอัดตัวคายนํ้าจะสิ้นสุดลงซึ่งจะใช้ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งมาเป็นตัวกำหนด จากการใช้งานโดยควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างเพียงอย่างเดียวพบว่าจะเกิดปัญหาหาระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้า เนื่องจากค่าแรงเค้นในแนวตั้งลดลง (Unloading) ทั้งที่ดินตัวอย่างไม่ได้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการคลายความเค้น (Stress Relaxation) ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงระบบควบคุมโดยการเพิ่มระบบป้องกันการลดลงของค่าแรงเค้นในแนวตั้ง โดยใช้ไหลคเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของตัวอย่างเป็นตัวตรวจจับ เมื่อพบค่าความเค้นในปัจจุบันน้อยกว่าค่าความเค้นสูงสุดในอดีตเกิน 0.8 kPa ระบบก็จะสั่งงานให้เฟรมกดดินเพิ่มแรงกดเพื่อรักษาแรงเค้นในแนวตั้งให้คงที่ แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวจะทำงานก็ต่อเมื่อการเคลื่อนตัวด้านข้างรวมน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร

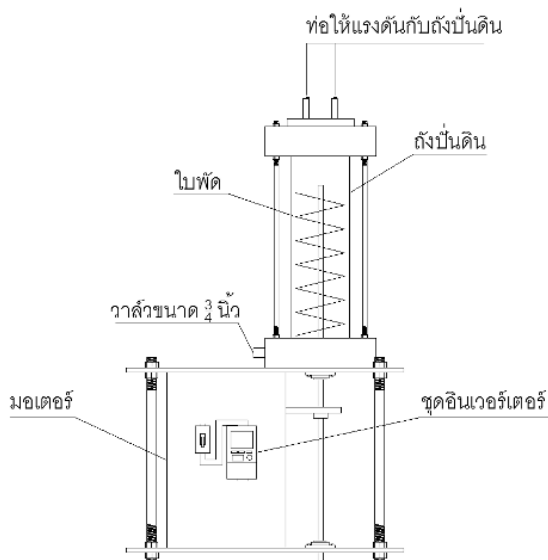


รูปที่ 8 ฟังก์ชันการทำงานของระบบการควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral strain Control) และการลดลงของค่าแรงเค้นในแนวตั้ง (Vertical Stress Control)

### 3.3 เครื่องปั้นดินระบบแรงดูด (Vacuum Mixing)

สาเหตุที่งานวิจัยนี้ต้องออกแบบเครื่องปั้นดินระบบแรงดูดเนื่องจากเซลล์ทดสอบไม่สามารถให้แรงดันน้ำด้านข้าง (Cell Pressure) เหมือนกับการทดสอบในเครื่องแรงอัดสามแกน (Triaxial Tests) ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะใช้หลักการของการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในตัวอย่างดิน (Back Pressure) เท่าๆ กับการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำด้านข้าง (Cell pressure) เพื่อให้ได้ตัวอย่างอิมิตัวด้วยน้ำได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการแก้ปัญหาโดยการทำให้ดินเหลวก่อนนำไปใช้มีสภาพอิมิตัวด้วยน้ำก่อน

เครื่องปั้นดินที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างนี้มีส่วนประกอบ คือ มอเตอร์ ถังปั้นดิน ใบพัด ชุดควบคุมความเร็วรอบและทิศทางของการหมุนดังรูปที่ 9 โดยมีหลักการในการออกแบบคือ มอเตอร์สามารถปรับความเร็วในการหมุนตั้งแต่ 5-60 รอบ/นาที ตัวใบพัดออกแบบขึ้นในลักษณะเกลียวลำเลียงและยังสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านบนลงสู่ด้านล่างหรือหมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนซึ่งจะทำให้ให้ดินเหลวมีเนื้อสม่ำเสมอและสามารถกำจัดฟองอากาศได้อย่างทั่วถึง การออกแบบใบพัดให้มีช่องว่าง 4 ช่อง เกลียวใบพัดแต่ละเกลียวห่าง 7.5 ซม. และทำ



รูปที่ 9 เครื่องปั้นดินระบบแรงดูด (Vacuum Mixing)

มุมกับแนวระดับประมาณ  $30^{\circ}$

เมื่อเปิดเครื่องให้ใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกาดินเหลวจะถูกรีดออกมาจากช่องของใบพัดทั้ง 4 ช่องทำให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ที่อยู่ภายในดินเหลวถูกบีบออกและดินเหลวที่สัมผัสกับแรงดันลบภายในถังปั่นจะช่วยกำจัดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 4. การสร้างโครงสร้างดิน

การสร้างโครงสร้างดินโดยใช้กระบวนการอัดตัวคายน้ำสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. นำดินไปผสมน้ำที่ปริมาณ 1.1 เท่าของขีดจำกัดเหลว (LL) แล้วนำไปทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง Oedometer Test เพื่อนำเอาผลการทดสอบนี้ไปคำนวณค่าการทรุดตัวเพื่อใช้กำหนดระยะตั้งถุงยาง

2. ติดตั้งถุงยางเข้ากับแผ่นกวด้านล่างและตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบสำรองไฟและระบบเตือนไฟฟ้าดับ

3. ตั้งระยะห่างระหว่างแผ่นกวด้านบนกับแผ่นกวด้านล่างให้เท่ากับค่าความสูงตัวอย่างสุดท้าย ( $t=130$  มิลลิเมตร) รวมกับค่าการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้น ( $\Delta t$ ) ซึ่งสามารถประเมินได้จากการคำนวณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวคายน้ำ (Compressibility Index) ที่หาค่าไว้ในขั้นตอนที่ 1 และปริมาณน้ำเริ่มต้นของตัวอย่างดินเหลวที่ใช้ จากนั้นติดตั้งเส้นใยจำนวน 2 เส้นเพื่อใช้ในการเร่งกระบวนการอัดตัวคายน้ำดังแสดงในรูปที่ 10 โดยเส้นใยนี้สามารถยึดหดตัวได้พอสมควร การติดตั้งเส้นใยทั้ง 2 เส้นควรตั้งให้ตั้งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการย้ายตำแหน่งระหว่างฉีดินเหลวเข้าเซลล์ทดสอบ

4. ปรับระยะห่างระหว่างแผ่นกวด้านบนให้เท่ากับค่า  $t$  แล้วติดตั้งปลายถุงยางเข้ากับแผ่นกวด้านบน จากนั้นทำการทาสารหล่อลื่นที่ผิวถุงยางและแผ่นประกบทั้งสองแผ่น ติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านของตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือทดสอบเพื่อสร้างเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมแบบ 1-D

5. ตั้งถุงยางกลับไปค่า  $\Delta t$  ที่ไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้พฤติกรรมการตั้งตัวกลับของถุงยางเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) ให้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 11

6. ปรับระยะการตั้งถุงยางให้กลับมาที่ค่าระยะยึดเท่ากับศูนย์ ( $\Delta t=0$ ) จากนั้นจึงทำการสอบเทียบอุปกรณ์

วัดค่าหน่วยแรงต่างๆ ประกอบด้วยโพลดเซลล์ อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง และเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ โดยใส่แรงดันลมเข้าไปในเซลล์ทดสอบซึ่งติดตั้งถุงยางไว้ภายในเพื่อจำลองสถานะที่มีแรงดันมากระทำ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าแรงดันลมซึ่งทำให้ได้ค่า  $a$  และ  $c$  ในสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

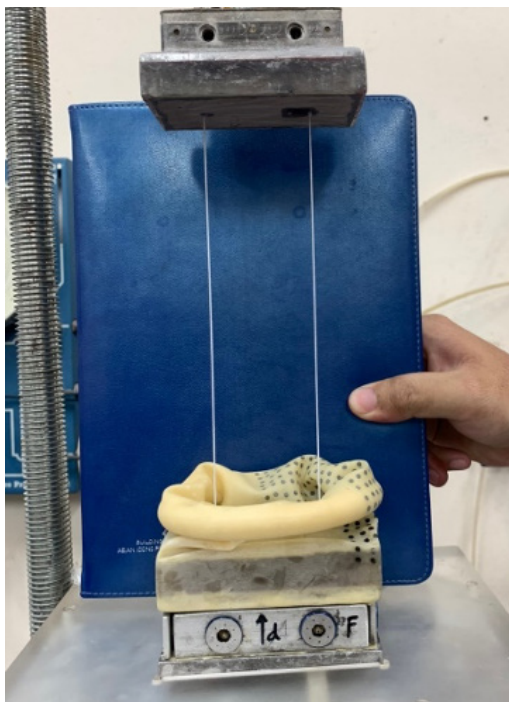
7. สอบเทียบอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) ของ Omega รุ่น LD610-100

8. สอบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิต่อการวัดค่าแรงดันด้านข้างเพื่อหาค่า  $b$  ในสมการที่ 2 โดยการจำลองสถานะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้ห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องปรับอากาศ

9. สอบเทียบผลกระทบของแรงดึงกลับของถุงยางต่อค่าความเค้นอัดในแนวตั้งเพื่อหาค่า  $d$  ในสมการที่ 3

10. เตรียมดินเหลวโดยใช้เครื่องปั่นดินระบบแรงดูด (Vacuum Mixing) ซึ่งได้อธิบายส่วนประกอบและ

หลักการการทำงานแล้วในหัวข้อ 3.3 กระบวนการเริ่มจากนำตัวอย่างที่เก็บจากภาคสนามมาผสมน้ำให้เหลวเป็นครีม จากนั้นเกลี่ยดินเหลวที่เตรียมไว้แล้วลงบนแผ่นพลาสติกให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ตากให้แห้งในอุณหภูมิห้องแล้วนำมาทุบด้วยค้อนยางให้เป็นเกล็ดดินขนาดเล็กประมาณ 5-7 มิลลิเมตร จากนั้นนำเกล็ดดินที่ได้ผสมกับน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองแบบ Reverse Osmosis (RO) ในเครื่องปั่นดินระบบแรงดูดโดยให้มีค่าปริมาณความชื้นมากกว่า liquid limit เพื่อให้ดินเหนียวกลับไปอยู่ในสถานะของเหลว ปั่นดินให้เข้ากับน้ำโดยระหว่างนี้จะใส่แรงดันสุญญากาศที่มีค่าเท่ากับ -60 kPa เข้าไปในถังปั่น ปั่นจนดินเหลวเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree Of Saturation) ในเบื้องต้น โดยใส่แรงดันสุญญากาศที่มีค่าเท่ากับ -60 kPa เข้าไปในถังปั่นโดยไม่มีการปั่นดินแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หากดินเหลวไม่เกิดการแตกร้าวถือว่าดินเหลวนี้อิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 10 การติดตั้งเส้นใยจำนวน 2 เส้นเพื่อใช้ในการแรงกระบวนการอัดตัวคายน้ำ



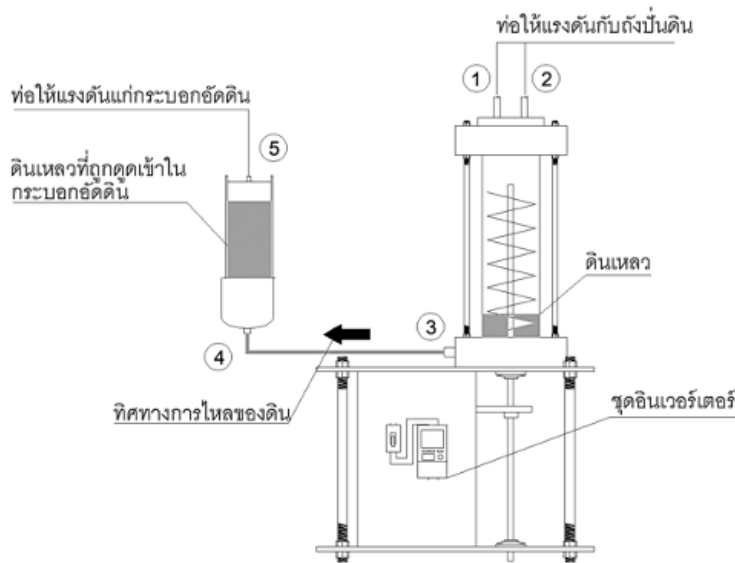
รูปที่ 11 การดึงถุงยาง

11. ไล่อากาศออกจากระบบทดสอบ กระบวนการนี้ทำได้โดยการไล่น้ำที่ถูกกำจัดอากาศ (De-aired water) เข้าไปในระบบทดสอบและถูกดึงที่ถูกติดตั้งไว้ก่อนหน้านี้ น้ำที่ใสเข้าไปจะเริ่มไล่อากาศออกจากหินพรุนด้านล่างขึ้นไปสู่หินพรุนด้านบน เมื่อน้ำเต็มถึงให้ดูคาน้ำออกจากทางด้านบน น้ำที่ถูกดูดออกก็จะไหลผ่านหินพรุนด้านบนแล้วนำพาเอาอากาศที่อยู่ในระบบทั้งหมดกลับเข้าไปในถังอัดแรงดันน้ำอีกครั้ง ทำขั้นตอนดังกล่าวประมาณ 6 ถึง 8 รอบหรือจนกว่าจะไม่มีอากาศไหลเข้าไปในถังอัดแรงดันน้ำ ขั้นตอนดังกล่าวจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้ระบบปราศจากอากาศ ถึงแม้ว่าจะไม่มีวิธีการประเมินได้ว่าอากาศทั้งหมดในระบบหมดไปในขั้นตอนนี้หรือไม่ แต่จะมีการประเมินระดับความอึดตัวของตัวอย่างดินก่อนเริ่มกระบวนการอัดตัวคาน้ำในขั้นตอนที่ 13 ด้วยสมการที่ 4 ซึ่งถ้าไม่สามารถกำจัดอากาศออกไปได้ การตรวจสอบค่าระดับความอึดตัวด้วยน้ำในขั้นตอนที่ 13 จะไม่ผ่านและจะไม่สามารถดำเนินการทดสอบต่อไปได้

12. นำดินเหลวออกจากถังปั่นดินโดยดูดออกจากทางด้านล่างของถังปั่นเนื่องจากไม่ต้องการให้ดินที่ถูกกำจัดอากาศแล้วในขั้นตอนที่ 10 กลับไปสัมผัสอากาศอีกครั้ง ดินเหลวจะถูกดูดเข้ากระบอกฉีดโดยใช้ระบบการดูดติดตั้งแสดงในรูปที่ 12 ปล่อยแรงดูดในถังปั่นดินให้

เป็นค่าแรงดันบรรยากาศ หลังจากนั้นให้แรงดันลมติดลบกับกระบอกอัดฉีดดินเหลวที่ตำแหน่งหมายเลข 5 เร่งความเร็วรอบของใบพัดเครื่องปั่นดินไปที่ 60 รอบ/นาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อช่วยผลักดันเหลวให้ไหลเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินโดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะถ่ายดิน ใบพัดที่หมุนตลอดเวลาจะช่วยเกลี่ยผิวดินเหลวให้ผิวหน้ามีระดับเสมอกันซึ่งจะไม่ทำให้ดินเหลวนั้นถูกดูดแบบกระจุกตัวจนเกิดรูอากาศทะลุลงไปด้านล่าง เมื่อดินเหลวไหลเข้าเต็มกระบอกแล้วจะนำแผ่นไดอะแฟรมอลูมิเนียมซีล (Seal) ด้วยโอริง (O-Ring) เข้ามาติดตั้งเปิดวาล์วด้านบนแผ่นไดอะแฟรมอลูมิเนียมแล้วกดลงไปที่ด้านบนของกระบอกอัดฉีดดินจนมีดินเหลวไหลออกมาเพื่อเป็นการไล่อากาศออกจากรูนั้นทำการปิดวาล์ว

13. ฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบที่ติดตั้งถูกวางไว้ภายใน โดยที่ภายในถูกบรรจุน้ำที่ถูกกำจัดอากาศเข้าไปเต็มถึงเพื่อรักษาตำแหน่งของเส้นใยที่ถูกติดตั้งไว้แล้วในขั้นตอนที่ 3 ถูกวางจะต้องถูกดึงขึ้นตามระยะการทรุดตัวในแนวตั้ง ( $\Delta t$ ) ที่คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ ในการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบจะใช้แรงกดจากกระบอกลมนิวเมติกกดผ่านแผ่นไดอะแฟรมอลูมิเนียมที่ติดตั้งภายในกระบอกฉีด ขั้นตอนที่ 12 เพื่อดันดินออกจากกระบอกให้ไหลเข้าไปในเซลล์ทดสอบโดยการต่อท่อจาก



รูปที่ 12 การนำดินเหลวออกจากเครื่องผสมดินเหลว



กระบอกอัดฉีดดินเหลวเข้ากับเซลล์ทดสอบ ในขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเนื่องจากถ้าการเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกันมีอากาศตกค้างอยู่จะส่งผลทำให้ระบบที่เตรียมไว้ในตอนแรกสูญเสียสภาพความอึดตัวด้วยน้ำ ดังนั้นก่อนการเชื่อมระบบจะต้องปล่อยน้ำที่อยู่ในถังยางออกมาทางวาล์วด้านล่างของเซลล์ทดสอบเพื่อไล่อากาศที่ค้างอยู่ในท่อลำเลียงดินเหลวให้หมดก่อนและต้องปล่อยให้น้ำไหลออกจากท่อตลอดระหว่างที่มีการเชื่อมต่อระบบ

ในการดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 13 ดินเหลวจะไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ระหว่างนี้จะค่อยๆ ระบายน้ำส่วนเกินที่อยู่ภายในถังยางออกทางท่อระบายน้ำและดินส่วนเกิน ระหว่างฉีดดินเหลวจะต้องมีการระบายน้ำในถังยางออกเป็นระยะๆ เพื่อให้ดินสามารถไหลเข้าไปแทนที่น้ำภายในถังยางได้ ฉีดดินเหลวจนมีน้ำและดินเหลวส่วนเกินไหลออกมาจากท่อระบาย และต้องแน่ใจว่าดินเหลวที่เข้าไปสัมผัสกับน้ำในช่วงแรงถูกระบายออกไปให้มากที่สุด เนื่องจากดินที่ถูกฉีดเข้าไปในช่วงแรกจะมีการสัมผัสกับน้ำที่อยู่ในถังยางค่อนข้างสูง ส่งผลให้ดินนั้นมีค่าปริมาณน้ำที่ผิดเพี้ยนไปมากและจะส่งผลโดยตรงต่อค่าการทรุดตัว จากนั้นทำการปิดตาย (Seal) ท่อระบายดินและน้ำส่วนเกิน การฉีดดินเหลวจะดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าไหลลดเซลล์ด้านบนจะสามารถอ่านค่าแรงเค้นในแนวตั้งได้ประมาณ 50 kPa จึงหยุดฉีดดินแล้ววัดระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) ของตัวอย่างดินด้วยการใช้สมการที่ 4

$$Sr\% = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \times 100 = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_h} \times 100 = \frac{\Delta \sigma_h}{\Delta \sigma_v} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ

$\Delta u$  คือ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore-water Pressure)

$\Delta \sigma_v$  และ  $\Delta \sigma_h$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในแนวตั้งและแนวราบ

14. นำตัวอย่างดินเหลวที่เหลือไปฉีดใส่ภาชนะที่ทราบปริมาตร แล้วนำไปอบหาค่าปริมาณน้ำและคำนวณระดับ



รูปที่ 13 การฉีดดินเหลว

ความอึดตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation)

15. เปิดวาล์วที่ด้านบนและล่างตัวอย่างเพื่อระบายแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ ) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการฉีดดินเหลวออกซึ่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

16. สร้างโครงสร้างดินเหนียวประกอบด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำโดยเปิดใช้งานระบบที่ 1 และ 2 ของเฟรมกดดิน (หัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2) เบื้องต้นให้ปิดวาล์วเพื่อไม่ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างก่อน จากนั้นเพิ่มแรงเค้นในแนวตั้ง ( $\Delta \sigma_v$ ) เข้าไปในดินตัวอย่าง รอจนกว่าค่า  $\Delta u$  และ  $\Delta \sigma_h$  จะคงที่จึงตรวจสอบค่าระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) อีกครั้งด้วยสมการที่ 4 (จุด A ในรูปที่ 15, 16 และ 17) เมื่อพบว่าดินมีระดับความอึดตัวด้วยน้ำมากกว่า 95% จึงค่อยเริ่มกระบวนการสร้างโครงสร้างดินด้วยการอัดตัวคายน้ำโดยใช้แรงเค้นในแนวตั้งร่วมกับแรงดันน้ำที่เป็นลบ โดยค่าแรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Terzaghi [20] การตรวจสอบการสิ้นสุดของกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินจะใช้วิธีของ Asaoka [21] ระหว่างที่ดินเกิดการทรุดตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ค่าแรงดึงกลับของถังยางจะลดลงตามลำดับแต่แรงที่กระทำโดยกระบอกกลมนิวเมติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อยังคงรักษาค่าความเค้นรวมในแนวตั้งให้คงที่ตลอดเวลา

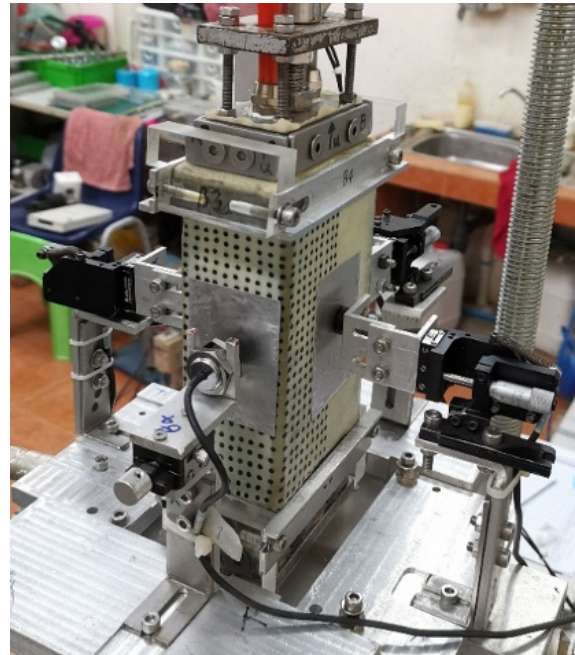


การทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะทำการปิดระบบที่ 2 ของเฟรมกดดินเมื่อผลการคำนวณแรงดึงกลับของถุงยางมีค่าน้อยกว่า 1 kPa ซึ่งงานวิจัยนี้แนะนำให้ต้องปิดระบบที่ 2 ของเฟรมกดดินในช่วงการทดสอบนี้เนื่องจากไม่ต้องการให้มีผลกระทบของแรงดึงกลับถุงยางในขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและการอัดตัวคายน้ำ ดังนั้นการประเมินค่าการทรุดตัวในแนวตั้งจะต้องมีความแม่นยำ หากการประเมินค่าการทรุดตัวผิดพลาดจนทำให้ดินตัวอย่างทรุดตัวน้อยกว่าค่าที่ต้องการจะส่งผลให้ค่าแรงดึงกลับถุงยางมีค่ามากกว่า 1 kPa และไม่สามารถปิดระบบที่ 2 ของเฟรมกดดินได้

#### 5. การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่นิ่งของดินเหนียวที่อยู่ในสภาวะอัดตัวคายน้ำปรกติ

เมื่อสิ้นสุดการสร้างโครงสร้างใหม่ให้กับดินตัวอย่าง ขั้นตอนต่อไปคือการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมให้เป็นแบบ AS โดยถอดแผ่นประกบทั้ง 4 ออก แต่ขั้นตอนนี้จะไม่สามารถทำได้หากค่าแรงเค้นรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress,  $\sigma_h$ ) ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะต้องลดค่าแรงเค้นรวมในแนวตั้ง (Total Vertical Stress,  $\sigma_v$ ) และแรงดันน้ำ (Pore-Water Pressure,  $u$ ) เท่ากับ  $\sigma_h$  ซึ่งจะทำให้ค่าแรงเค้นประสิทธิผลทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ยังคงมีค่าเท่าเดิม กระบวนการนี้จะต้องใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงและเมื่อค่า  $\sigma_h$  มีค่าน้อยกว่า 1 kPa จึงจะสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมได้ ช่วงการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมนั้นจะใช้ช่วงเวลาอยู่ระหว่างจุด B ถึงจุด C ดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ 17

ก่อนถอดแผ่นประกบทั้งสี่ด้านออกจะต้องปิดวาล์วระบายน้ำทั้งด้านบนและล่างก่อน จากนั้นยึดแกนกดด้านบนให้อยู่แน่นกับที่เพื่อให้อย่างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จากนั้นถอดแผ่นประกบออกทั้งสี่ด้านออกอย่างระมัดระวัง ติดแผ่นอลูมิเนียมที่ด้านข้างตัวอย่างและติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง (gab sensor) แบบไม่สัมผัสทั้ง 4 ด้านของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 14 จากนั้นสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะแบบไม่สัมผัสกับไมโครมิเตอร์ จากผลการทดสอบพบว่าหลังจากแผ่น

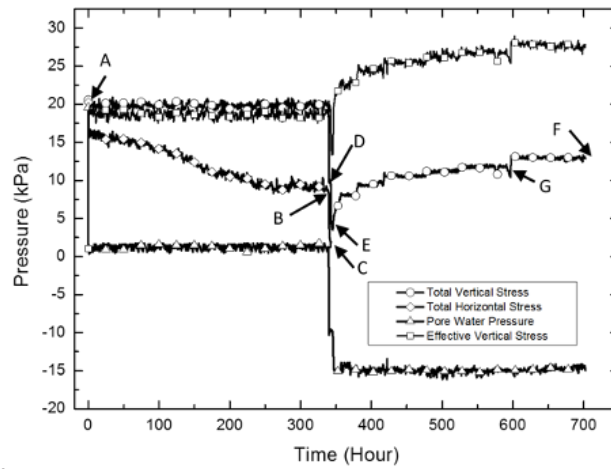


รูปที่ 14 การติดตั้ง gab sensor ที่ด้านข้างของตัวอย่างดิน

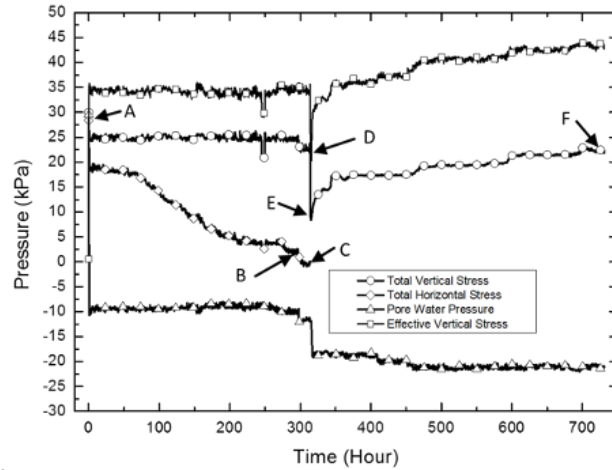
ประกบถูกถอดออก ค่าแรงเค้นรวมในแนวตั้งมีค่าลดลง ซึ่งเกิดขึ้นจากการถอดแผ่นประกบออกนั้นไปปรับกวดดิน การลดลงของค่าแรงเค้นแสดงอยู่ระหว่างจุด D และ E รูปที่ 15, 16 และ 17 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างดินใหม่ที่ปราศจากการรบกวนโดยสมบูรณ์ด้วยการอัดตัวคายน้ำอีกครั้ง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น การกระตุ้นดินตัวอย่างให้มีแรงเค้นประสิทธิผลมากขึ้นเพื่อให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำนั้นทำได้โดยการลดแรงดันน้ำลง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าการลดลงอยู่ระหว่าง 5-10 kPa ส่วนการควบคุมให้ดินตัวอย่างเกิดการทรุดตัวเฉพาะในแนวตั้งนั้นจะทำได้โดยเปิดการใช้งานระบบที่ 3 ของเฟรมกดดิน การตรวจสอบการสิ้นสุดของกระบวนการอัดตัวคายน้ำยังคงใช้วิธีของ Asaoka ซึ่งจุดดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งจุด F ดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ 17

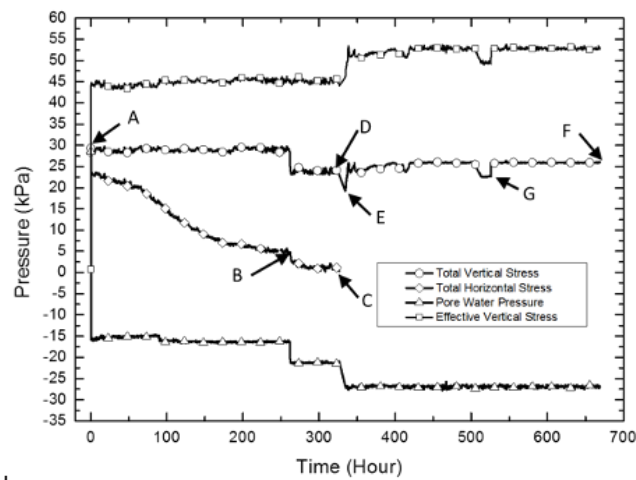
จากผลการทดสอบในรูปที่ 15, 16 และ 17 พบว่าในช่วงของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ดินตัวอย่างเกิดการคลายความเค้น (Stress Relaxation) ซึ่งทำให้



รูปที่ 15 แรงเค้นสำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนทำการเฉือนในตัวอย่าง AS-01



รูปที่ 16 แรงเค้นสำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนทำการเฉือนในตัวอย่าง AS-02



รูปที่ 17 แรงเค้นสำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนทำการเฉือนในตัวอย่าง AS-03

แรงเค้นในแนวตั้งลดลงในระหว่างจุด E ถึง F ถึงแม้ว่าระบบควบคุมเฟรมกดดินจะมีการควบคุมไม่ให้เกิดการคลายความเค้นเกิน 0.8 kPa แล้วก็ตาม แต่หากในกรณีที่มีการเคลื่อนตัวด้านข้างรวมกันแล้วเกิน 0.10 มิลลิเมตร ระบบก็จะปล่อยให้เกิดการคลายความเค้นขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการรักษาเงื่อนไขของสถานะแวดล้อมแบบการทรุดตัวในแนวตั้งมากกว่า เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าแรงดันน้ำที่เป็นค่าลบจะเริ่มดึงการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างดินให้หดกลับเข้ามาและทำให้กระบวนการอัดตัวคาน้ำในแนวตั้งที่หยุดไปสามารถกลับมาดำเนินการต่อไปได้ตามปรกติ

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯประกอบตัวใหม่ในสภาวะอัดตัวปรกติ (Normally Consolidated Clay) โดยใช้ค่าแรงเค้นประสิทธิผลที่จุด F ซึ่งจะได้ผลดังนี้คือ

#### ตัวอย่าง AS-01

ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำเท่ากับ 27.84 kPa

ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Effective Horizontal Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำเท่ากับ 14.59 kPa

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งเท่ากับ 0.52

#### ตัวอย่าง AS-02

ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำ เท่ากับ 42.77 kPa

ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Effective Horizontal Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำในเท่ากับ 21.46 kPa

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งเท่ากับ 0.50

#### ตัวอย่าง AS-03

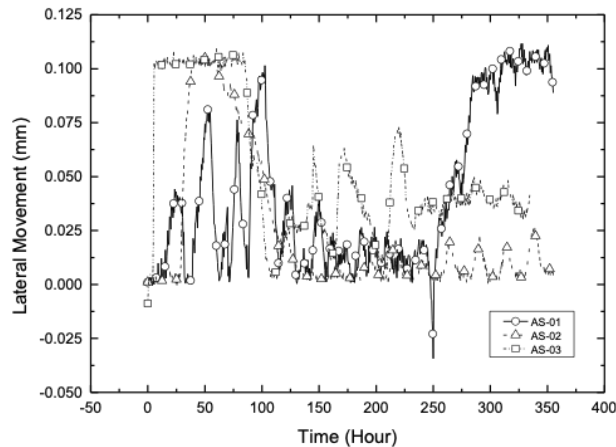
ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Vertical Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำเท่ากับ

52.95 kPa

ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Effective Horizontal Stress) ที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำเท่ากับ 26.88 kPa ค่า สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งเท่ากับ 0.51

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการอัดตัวคาน้ำหลังจากแผ่นประกบทั้งสองด้านถูกถอดออกยังมีสภาวะที่เกิดการทรุดตัวเฉพาะในแนวตั้งโดยมีค่าการเคลื่อนตัวรวมด้านข้างที่ยอมให้ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตรและจะไม่ยอมให้ดินเกิดการหดตัวตามที่ได้แสดงหลักการทำงานไว้ในรูปที่ 8 งานวิจัยนี้จึงได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเคลื่อนตัวรวมด้านข้างในรูปที่ 18 จากรูปดังกล่าวจะพบว่าระบบควบคุมการทำงานนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากแต่ในตัวอย่าง AS-01 มีช่วงที่ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างเกิดค่าติดลบอย่างชัดเจน (ดินเกิดการหดตัว) ทั้งที่ในเงื่อนไขการทำงานในรูปที่ 8 นั้นจะไม่ยอมให้ดินเกิดการหดตัว สาเหตุนี้เกิดเนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวโหลดเฟรมไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่องสำรองไฟที่มีระบบรักษาเสถียรภาพเหมือนกับคอมพิวเตอร์และชุดควบคุมการทำงานอื่นๆ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากเซอร์โวมอเตอร์เข้าไปรบกวนการทำงานของเซ็นเซอร์อื่นๆ จึงทำให้เซอร์โวมอเตอร์หยุดการทำงานไปชั่วขณะหนึ่ง แต่หลังจากทำการรีเซ็ต (Reset) การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ ระบบก็สามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ เมื่อระบบพบว่าดินเกิดการหดตัว ระบบจะเพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องเพื่อกดตัวอย่างดินจนการขยายตัวด้านข้างกลับมาที่ค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการลดลงและเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นในแนวตั้งอย่างฉับพลันดังแสดงที่จุด G ในรูปที่ 15 ซึ่งการลดลงนั้นเกิดจากการคลายความเค้นของดินตัวอย่าง

ประเด็นที่เซอร์โวมอเตอร์หยุดทำงานชั่วขณะนอกจากจะพบในตัวอย่าง AS-01 แล้ว ยังพบปัญหานี้ในตัวอย่าง AS-03 เช่นกัน แต่ในกรณีนี้ตัวอย่างดินยังไม่เกิดการหดตัวไปมากจนค่าติดลบ แต่สิ่งที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างดินคือการคลายความเค้น (Stress Relaxation) ซึ่งแสดงใน



รูปที่ 18 ผลรวมของการเคลื่อนตัวทั้งสี่ด้านในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำโดยแผ่นประกบทั้งสองด้านถูกถอดออก

จุด G ในรูปที่ 17 เมื่อระบบกลับมาทำงานได้ตามปกติ ระบบป้องกันการคลายความเค้นก็จะทำงานและเพิ่มแรงกดในแนวตั้งจนกว่าค่าความเค้นปัจจุบันต่างกับค่าความเค้นสูงสุดในอดีตไม่เกิน 0.8 kPa

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของทั้งสามตัวอย่างพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.51 ทั้งที่ใช้ค่าแรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำไม่เท่ากัน โดยหลักการแล้วดินที่ใช้ค่าแรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งสูงกว่าย่อมมีค่าความสามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่าเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ประกอบตัวใหม่ในสภาวะอัดตัวปรกติ (Normally Consolidated Clay) จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความสามารถในการรับแรงเฉือน หลังการทดสอบสิ้นสุดลงจะมีการตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเป็นครั้งสุดท้ายโดยการนำดินทั้งสามตัวอย่างเข้าไปอบเพื่อหาค่าปริมาณน้ำและน้ำหนักดินแห้ง จากผลการคำนวณพบว่าทุกตัวอย่างมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่า 98%

จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงแรกของการทดสอบที่ด้านหลังจุด A นั้นจะเกิดค่าแรงเค้นรวมด้านข้างมีค่าสูงสุดเนื่องจากแรงดันน้ำส่วนเกินยังไม่สามารถระบายออกไปได้และต้องอาศัยระยะเวลาในการระบาย เมื่อเวลาผ่านไปค่าความเค้นรวมด้านข้างจะลดลงตามลำดับ

จนมีค่าคงที่เมื่อการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง

## 6. สรุปผลการศึกษา

จากการผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ประกอบตัวใหม่ในสภาวะอัดตัวปรกติ (Normally Consolidated Clay) โดยใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบที่คิดค้นขึ้นมาใหม่พบว่าเครื่องมือสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในการควบคุมแรงกดในแนวตั้งให้คงที่ในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดินใหม่และการควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเหนียวในขั้นตอนของการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวโดยใช้เครื่องปั้นดินระบบดูดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถสร้างดินเหนียวที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำและเนื้อดินเหนียวมีความสม่ำเสมอ การออกแบบให้มีช่องระบายดินที่ด้านล่างไม่สามารถลำเลียงดินเหนียวออกจากถังปั่นได้โดยใช้แรงส่งจากใบพัดเพียงอย่างเดียว จะต้องมีการใส่แรงดูดเข้าไปในกระบอกฉีดดินเพื่อช่วยให้ดินเหนียวไหลได้ดี อีกทั้งยังสามารถรักษาสภาวะการอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวได้อีกด้วย

จากการตรวจสอบสภาวะความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวหลังจากทำการฉีดดินเหนียวเข้าไปในเซลล์ทดสอบพบว่าดินยังคงมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นวิธีการไล่อากาศออกจากระบบทดสอบและกรรมวิธีการฉีดดินเหนียวนั้นมีประสิทธิภาพดีมาก นอกจากนั้นแล้วหลังจากการทดสอบ



สิ้นสุดลงยังมีการตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำโดยคำนวณจากปริมาณน้ำในดิน พบว่าดินตัวอย่างยังคงมีความอิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงให้เห็นว่าระบบการติดตั้งถุงยางเข้ากับแผ่นกวดทั้งด้านบนและล่างมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปในตัวอย่างดินตลอดการทดสอบซึ่งใช้เวลานานมากในแต่ละตัวอย่าง

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯนั้นไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำจึงทำให้ค่าดังกล่าวก็จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเช่นกัน โดยจากผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมหานครที่อยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Clay) มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.51 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบในสนามในงานวิจัยของ Likitlersuang และคณะ [15] โดยที่ค่าความเค้นรวมด้านข้างนั้นหาได้จากวิธีของ Creep Curve Method และ Marsland & Randolph method

## 7. ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าการคำนวณค่าการทรุดตัวสุดท้ายของดินสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวคายน้ำ (Compressibility Index) และปริมาณน้ำเริ่มต้นของดินเหลว แต่การฉีดดินเหลวเข้าเซลล์ทดสอบที่มีน้ำอยู่ภายในถุงยางนั้นทำให้ค่าปริมาณน้ำในดินเหลวโดยเฉพาะในช่วงแรกของการฉีดมีค่าสูงเกินกว่าค่าที่คำนวณไว้ในตอนต้นเป็นอย่างมาก ส่งผลทำให้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายเกิดความผิดพลาด แนวทางป้องกันจะสามารถทำได้โดยการระบายดินเหลวออกจากเซลล์ทดสอบผ่านช่องระบายน้ำและดินส่วนเกินในปริมาณที่เหมาะสมจนแน่ใจได้ว่าดินเหลวในช่วงแรกของการฉีดถูกระบายออกแต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำในดินส่วนที่เหลือก็ยังคงมีปริมาณน้ำสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงต้องมีการเผื่อระยะการทรุดตัวเข้าไป โดยในงานวิจัยนี้จะเผื่อระยะการทรุดตัวเพิ่มเข้าไปอีก 5% จากค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้ นั้น

หมายถึงจะต้องตั้งถุงยางเพิ่มอีก 5% นั้นเอง โดยตัวเลขดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับดินชนิดนั้นๆ ได้ ทั้งนี้ระยะตั้งถุงยางจะส่งผลโดยตรงต่อความสูงสุดท้ายของตัวอย่างหลังกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง อาจส่งผลไม่มากสำหรับงานวิจัยนี้แต่ราบไคท์ที่ความสูงตัวอย่างอยู่เหนือพื้นที่วัดแรงดันด้านข้าง แต่ก็ไม่ควรผิดพลาดมากเกินไปเนื่องจากจะมีผลในเรื่องของแรงดึงหรือแรงต้านของถุงยางเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลให้การคำนวณแรงเค้นในแนวตั้งมีความยุ่งยากมากขึ้น ความสูงสุดท้ายของตัวอย่างจะส่งผลอย่างมากหากต้องการเลื่อนตัวอย่างเนื่องจากจะทำให้อัตราส่วนในด้านมิติของตัวอย่างเปลี่ยนไป

การนำดินตัวอย่างไปอบเพื่อหาค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำหลังการทดสอบเสร็จสิ้นจะต้องขุดดินออกจากผิวของถุงยางและแท่นหินพรุนให้มากที่สุดเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการคำนวณ

เนื่องจากการทดสอบกินเวลานานดังนั้นจะต้องวางแผนเรื่องของระบบสำรองไฟฟ้าและระบบแจ้งเตือนกรณีไฟฟ้าเกิดปัญหา โดยระบบสำรองไฟฟ้าแนะนำให้ใช้ประเภท Double Conversion Online เพื่อคงความเสถียรของระบบไฟฟ้าตลอดการทดสอบ

นอกจากนี้เพื่อความเชื่อมั่น ควรต้องมีการทดสอบเปรียบเทียบโดยใช้ดินเดียวกันกับชุดเครื่องมืออื่นหรือการทดสอบในสนามต่อไปในอนาคต

## 8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 212/2561 ผู้วิจัยขอขอบคุณนางสาวอิสริยาภรณ์ บัวแดง และนายจิรภัทร ร่วมพุ่ม ที่มีส่วนช่วยในการทดสอบ

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. Jáky, J., 1944, "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*, October, 7, pp. 355-358.



2. Brooker, E.W. and Ireland, H.O., 1965, "Earth Pressures at Rest Related to Stress History," *Canadian Geotechnical Journal*, 2 (1), pp. 1-15.
3. Bolton, M.D., 1991, A Guide to Soil Mechanics, M.D.& K.Bolton, Cambridge.
4. Worth, C.P., 1972, "General Theories of Earth Pressure and Deformation," *Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, pp. 33-52.
5. Schmidt, B., 1966, "Discussion of 'Earth Pressures at Rest Related to Stress History' by Brooker and Ireland (1965)," *Canadian Geotechnical Journal*, 3 (4), pp. 239-242.
6. Baxter, D.Y., 2006, Mechanical Behavior of Soil-Bentonite Cutoff Walls, Doctoral of Engineering Dissertation, Department of Civil Engineering, College of Engineering, The Virginia Polytechnic Institute and State University.
7. Seah, T.H. and Lai, K.C., 2003, "Strength and Deformation Behavior of Soft Bangkok Clay," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 26 (4), pp. 421-431.
8. Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H., 1982, " $K_0$ -OCR Relationships in Soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, 108 (6), pp. 851-872.
9. Wroth, C.P., 1975, "In Situ Measurement of Initial Stresses and Deformation Characteristics," *Proceedings of the ASCE, Specialty Conference on In Situ Stress Measurement of Soil Properties*, North Carolina State University, Geotechnical Engineering Division, pp. 181-230.
10. Rasheed, T., 1993, Dilatometer testing on Bangkok clay, Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
11. Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H., 2002, "Vibratory Compaction of Coarse-grained Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (3), pp. 695-709.
12. Prust, R.E., Davies, J. and Shuang, H., 2005, "Pressuremeter investigation for Mass Rapid Transit in Bangkok, Thailand," *Journal of the Transportation Research Board*, 1928, pp. 207-217.
13. Motan, E.S. and Gahr, M.A., 1984, "A Flat-Dilatometer Study of Lateral Soil Response," *Analysis and Design of Pile Foundations: Proceedings of a Symposium on Deep Foundations*, ASCE National Convention, San Francisco, pp. 232-248.
14. Marchetti, S., 1980, "In-Situ Tests by Flat Dilatometer," *Journal of the Geotechnical Division*, ASCE, 106 (GT3), pp. 299-321.
15. Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski D., Oh, E. and Balasubramaniam, A., 2013, "Geotechnical Parameters from Pressuremeter Tests for MRT Blue Line extension in Bangkok," *Geomechanics and Engineering*, 5 (2), pp. 99-118.
16. Marsland, A. and Randolph, M.F., 1977, "Comparisons on the Results from Pressuremeter Tests and Large In-situ Plate Tests in London Clay," *Géotechnique*, 27 (2), pp. 217-243.
17. Hawkins, P.G., Mair, R.J., Mathieson, W.G. and Muir Wood, D., 1990, "Pressuremeter Measurement of Total Horizontal Stress in Stiff Clay," *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Pressuremeter*, Oxford, pp. 321-330.
18. Vardhanabhuti, B., 2006, The Coefficient of Earth Pressure at Rest and Deformation and Densification of Granular Soils Subjected to Static and Dynamic Loading, Doctoral of Engineering Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, p. III.
19. Chattonjai, P. and Yathuam, C., 2020, "A Lateral Stress Measuring Apparatus for Shear

- Strength Determination of Soft Clay under Plane Strain Condition,” *KMUTT Research and Development Journal*, 43 (3), pp. 337-348. (In Thai)
20. Terzaghi, K., 1925, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke, Leipzig und Wien.
21. Asaoka, A., 1978, “Observational Procedure of Settlement Prediction,” *Soil and Foundations*, 18 (4), pp. 87-101.