

อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาวะความเครียดในระนาบ

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ^{1*} และ ชนม์พิสิทธิ์ ยาทั่วม²

มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130

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

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 20 ธันวาคม 2562

แก้ไข : 9 มิถุนายน 2563

ตอบรับ : 17 สิงหาคม 2563

คำสำคัญ :

การวัดแรงดัน / สมดุลแรงดันลม /

แรงดันดินด้านข้าง /

กำลังของดินแบบไม่ระบายน้ำ /

ความเครียดในระนาบ /

ดินเหนียวอ่อน

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้างเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ การทราบค่าแรงดันดินด้านข้างของดินนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่หนึ่งเมื่อการอัดตัวคายน้ำหลักสิ้นสุดลง อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ทางเดินของความเค้นโดยใช้แรงเค้นครบทั้ง 3 มิติ อุปกรณ์นี้ทำงานโดยใช้หลักการสมดุลด้วยแรงดันลมคือ เมื่อแรงดันทั้งสองข้างของแผ่นไดอะแฟรมมีค่าเท่ากัน แผ่นไดอะแฟรมก็จะไม่เกิดการเสียรูปและอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นที่จุดสมดุลนี้จะสามารถวัดค่าแรงดันดินที่สัมผัสกับแผ่นไดอะแฟรมได้จากค่าแรงดันลมที่ทำให้แผ่นไดอะแฟรมอยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง วิธีหาจุดสมดุลของแผ่นไดอะแฟรมนั้นทำได้โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งบนแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งต้องไม่เกินค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ค่าแรงดันลมที่จุดสมดุลจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมอัตโนมัติแบบป้อนกลับเพื่อทำการปรับแก้ค่าแรงดันลมอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ระบบจะใช้เวลาประมาณ 5-10 วินาที ในการปรับสมดุล ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในขั้นตอนการเฉือนที่จะต้องสามารถอ่านค่าแรงดันได้ทันทีทันใด งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีที่จะสามารถวัดค่าแรงดันได้โดยระบบยังไม่อยู่ในสภาวะสมดุล สำหรับค่าความหนาของแผ่นไดอะแฟรมที่เหมาะสมถูกออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์นี้มีความแม่นยำและมีความเร็วสูงในการวัดค่าความเค้น และสามารถนำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเหนียวภายใต้สภาวะความเครียดในระนาบได้

A Lateral Stress Measuring Apparatus for Shear Strength Determination of Soft Clay Under Plane Strain Condition

Piyachat Chattonjai^{1*} and Chonpisitt Yathuam²

Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi 20130

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

¹ Assistant Professor, Department Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Graduate Student, Department Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: December 20, 2019

Revised: June 9, 2020

Accepted: August 17, 2020

Keywords:

Pressure Measurement /
Air-Pressure Balance /
Lateral Earth Pressure /
Undrained Shear Strength /
Plane Strain / Soft clay

Abstract

This research aimed to design and construct an artificial device for measuring the magnitude of lateral stress of Bangkok soft clay under plane strain condition. Lateral stress is of importance as it is not only used to calculate the coefficient of lateral earth pressure at rest at the end of primary consolidation, but is also used to create 3-D stress path when a soil sample is sheared. According to the principle of equilibrium, when the pressures on both sides of a diaphragm plate are equal, deformation would not occur. As a result, the magnitude of soil stress beside the diaphragm plate can be measured by knowing the magnitude of applied air pressure that turns the diaphragm plate back to its equilibrium condition. Strain gauges are typically installed on the diaphragm plate at particular positions to detect the equilibrium condition; signals from strain gauge circuit must not nevertheless exceed the tolerance value. A suitable magnitude of the injected air pressure is then controlled via an automatic closed-loop control system. However, such a system would require approximately 5-10 seconds to reach an equilibrium; this lengthy time period is not suitable for the measurement of instantaneous lateral stress during shearing of a soil sample. Therefore, in this research, a new approach to measure the lateral stress without reaching an equilibrium condition is proposed and was tested. According to the calibration and test results, the newly developed apparatus has sufficient linearity and accuracy for measuring the lateral total stress.

1. บทนำ

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการนั้นมีความสำคัญที่อุปกรณ์และวิธีการทดสอบซึ่งจะต้องสามารถจำลองเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นจริงในสนามมากที่สุด จากการพิจารณาโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพีส่วนใหญ่พบว่ามีลักษณะเป็นการเสียรูปแบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain Condition) ดังนั้นผู้วิจัยหลายท่านทำการวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรม การรับแรงและการเสียรูปของดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

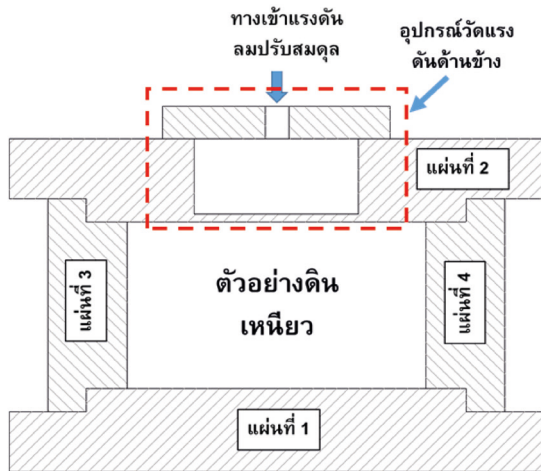
Kongkitkul [1] ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบรับแรงเฉือนแบบความเครียดในระนาบพร้อมทั้งศึกษาลักษณะแถบแรงเฉือนของตัวอย่างดินทราย Toyoura ในสภาวะแห้ง การให้ค่าแรงเค้นบีบอัดด้านข้าง (Confining Pressure) กับตัวอย่างนั้นจะให้ในลักษณะแรงดันอากาศที่มีค่าเป็นลบ (Partial Vacuuming Pressure) แทนที่การใช้แรงดันน้ำบีบอัดในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Tests) นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) ชนิดพิเศษไว้ด้านหลังของแผ่นประกบเพื่อวัดค่าแรงกระทำดินด้านข้าง Wanatowski และ Chu [2] ได้ฝังอุปกรณ์วัดแรงเค้นเข้าไปในแผ่นประกบเพื่อวัดแรงดันดินด้านข้างของทราย Changi ที่ถูกเฉือนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ แต่การฝังอุปกรณ์เข้ากับแผ่นประกบย่อมทำให้ผิวสัมผัสระหว่างถุงยางและแผ่นประกบด้านข้างไม่เสมอกัน Alshibli และ Akbas [3] ได้สร้างเครื่องมือทดสอบที่มีชื่อว่า “Louisiana Plane Strain Apparatus” เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมดินเหนียวอัดตัวปกติที่ทดสอบด้วยสภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Condition) กับแบบความเครียดในระนาบ โดยการเปรียบเทียบในลักษณะนี้ควรจะต้องใช้แรงเค้นทั้ง 3 แกนมาวิเคราะห์ แต่เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่สามารถวัดแรงเค้นด้านข้างของดินระหว่างการเฉือนได้ งานวิจัยดังกล่าวจึงใช้สมการที่นำเสนอโดย Chang และคณะ [4] ในการคำนวณค่าแรงดันด้านข้างของดินขณะทำการเฉือนแทน

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่ในห้องปฏิบัติการนั้นมักจะใช้เครื่องทดสอบแบบแรงอัดสามแกน [5-6] ซึ่งผู้ปฏิบัติจะต้องทำการปรับค่าแรงเค้นบีบอัดด้านข้างให้กับตัวอย่างดินเพื่อรักษาให้อัตราส่วนระหว่างค่าความเครียดในแนวตั้ง (Axial Strain) กับค่าความเครียดเชิงปริมาตร

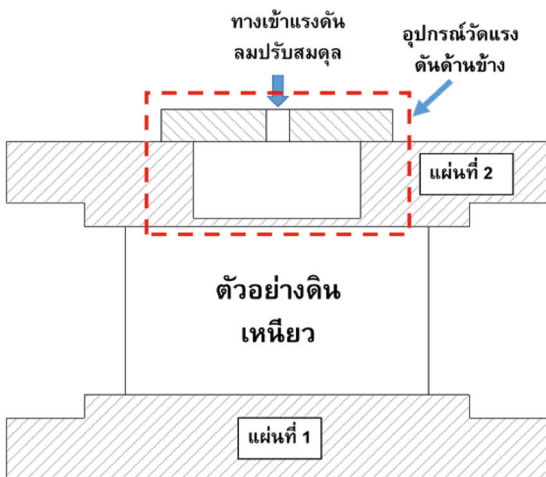
(Volumetric Strain) เท่ากับ 1 ตลอดกระบวนการอัดตัวคายนน้ำ ซึ่งผู้ปฏิบัติจะต้องใช้ทักษะและประสบการณ์ขั้นสูงเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด Vardhanabhuti [7] ได้ออกแบบเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินโดยปรับปรุงเครื่องมือ Oedometer ให้มีวงแหวนภายในทำจาก Highly Polished Stainless Steel และทำการวัดแรงดันดินด้านข้างจากแรงดันน้ำมันที่กระทำรอบข้างวงแหวน แรงดันนี้มีหน้าที่รักษาสมดุลของแรงดันทั้งสองด้านเอาไว้ ซึ่งในงานวิจัยที่นำเสนอนี้จะนำเอาเทคนิคดังกล่าวมาพัฒนาต่อโดยเปลี่ยนจากสมดุลของแรงดันน้ำมันให้เป็นสมดุลของแรงดันลม

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าแรงเค้นด้านข้างระหว่างกระบวนการเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดตัวคายนน้ำ (Consolidation) ใน 1 มิติ โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เข้าไปในแผ่นประกบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง (k_0) หลังจากการการอัดตัวคายนน้ำสิ้นสุดลง และสามารถวัดค่าแรงเค้นด้านข้างระหว่างทำการเฉือนตัวอย่างดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบซึ่งจะต้องถอดแผ่นประกบหมายเลข 3 และ 4 ออกเพื่อเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ให้เป็นแบบความเครียดในระนาบ ทำให้ทราบค่าความเค้นทั้ง 3 แกนอย่างถูกต้องขณะทำการเฉือนตัวอย่างอันจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำผลการทดสอบการเฉือนแบบความเครียดในระนาบไปเปรียบเทียบกับ การเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นในอนาคต

การออกแบบเพื่อที่จะให้อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดต้องอาศัยหลายปัจจัยโดยเฉพาะความหนาของแผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm Plate) ซึ่งเมื่อออกแบบให้หนาเกินไปจะทำให้อุปกรณ์สูญเสียความไว (Sensitivity) และความละเอียด (Resolution) แต่ถ้าบางเกินไปก็จะทำให้วัสดุที่นำมาใช้เกิดการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) อันจะทำให้เครื่องมือเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงนำระเบียบวิธีไฟไนท์-เอลิเมนต์ (Finite element method) เข้ามาช่วยในการออกแบบและหาตำแหน่งที่มีความเหมาะสมเพื่อติดตั้งชุดสเตรนเกจ (Strain Gauge) โดยที่วัสดุยังคงมีคุณสมบัติยืดหยุ่นอีลาสติก (Elastic) หลังได้รับแรงดันสูงสุด [8]



รูปที่ 1 รูปตัดด้านบนของเซลล์ทดสอบแบบความเครียดในระนาบที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ



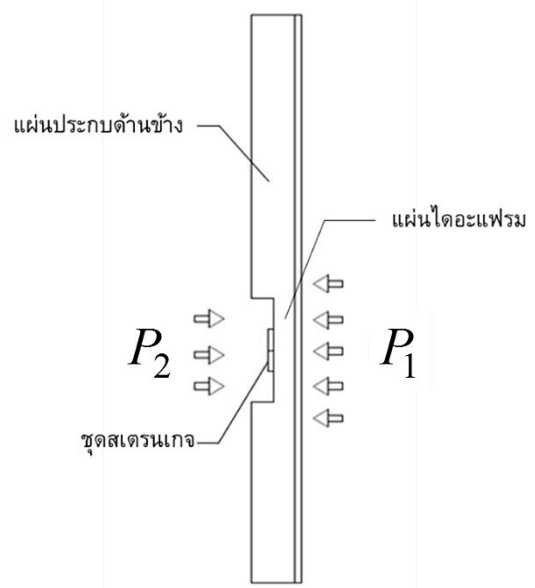
รูปที่ 2 รูปตัดด้านบนของเซลล์ทดสอบแบบความเครียดในระนาบที่ใช้ในขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง

นอกจากจะทำการออกแบบความหนาของแผ่นไดอะแฟรมที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ยังทำการประเมินความละเอียดในการวัดและประเมินประสิทธิภาพในการวัดแรงดันด้วยเทคนิคสมดุลของแรงดันลมทั้งแบบควบคุมแรงดันลมสมดุลด้วยมือและด้วยระบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำสูงซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้เสนอแนวทางปรับปรุงวิธีการวัดแรงดันด้านข้างในขณะที่ยังไม่สามารถสร้างแรงดันลมสมดุลได้จากผลการทดสอบการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันกระทำ

ที่ทราบค่ากับค่าที่วัดได้พบว่าอุปกรณ์นี้ทั้งความแม่นยำและความเร็วในการวัดดีมากสามารถนำมาใช้สำหรับการทดสอบดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบได้

2. หลักการและการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินด้วยเทคนิคสมดุลของแรงดันลม

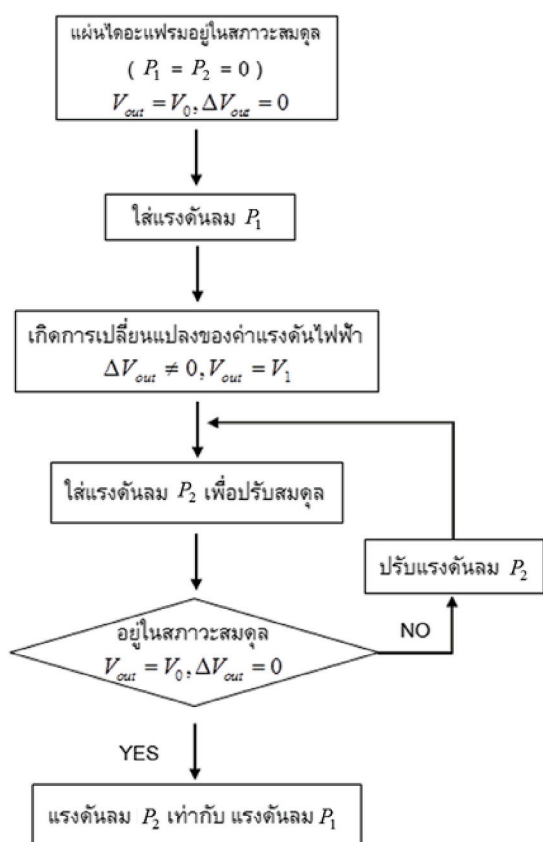
หลักการของอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 3 และ 4 คือ ที่จุดเริ่มต้นเมื่อแรงดัน $P_1 = P_2 = 0$ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_0 ออกมาจากชุดสเตรนเกจที่ต่อวงจรแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) โดยที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในสภาวะสมดุลนี้มีค่าเท่ากับ 0 ($\Delta V_{out} = 0$) เมื่อทำการใส่แรงดันลม P_1 เข้าที่แผ่นไดอะแฟรมจะเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบและเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคือ $\Delta V_{out} \neq 0, V_{out} = V_1$ โดยแผ่นไดอะแฟรมจะเป็นตัวรับภาระทั้งหมดจากการสูญเสียสภาวะสมดุลของแรงดัน



รูปที่ 3 ทิศทางของแรงดันที่กระทำต่อแผ่นไดอะแฟรมที่ถูกติดตั้งในแผ่นประกบหมายเลข 2

ดังนั้นเพื่อปรับสมดุลอีกครั้งจะต้องใส่แรงดัน P_2 เข้าไปที่ฝั่งตรงข้ามด้วยวิธีการสุ่มค่า (Trial and Error Method) สภาวะสมดุลของแรงดันทั้งสองด้านจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปอยู่ในจุดเริ่มต้นคือจุดที่ ($\Delta V_{out} \approx 0$) โดยที่ค่า $P_1 \approx$

$P_2 \neq 0$ สำหรับการทดสอบในดินจริง แรงดัน P_1 เปรียบเสมือนแรงดันดินด้านข้าง เมื่อสามารถปรับแรงดันลม P_2 ให้แผ่นไดอะแฟรมกลับไปอยู่ในสภาวะสมดุล นั้นหมายความว่าแรงดันลม P_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดันด้านข้างของดินตัวอย่าง โดยงานวิจัยนี้กำหนดความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.8 kPa

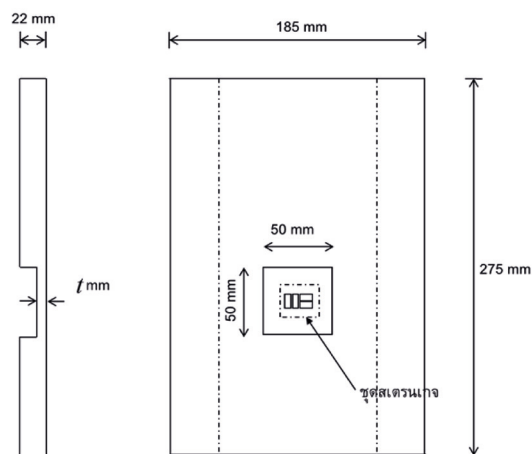


รูปที่ 4 หลักการของอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดิน

3. การออกแบบความหนา

ส่วนนี้จะกล่าวถึงการหาค่าความหนาแผ่นไดอะแฟรม (t) ที่เหมาะสมเนื่องจากต้องการรักษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นแบบเป็นเส้นตรง (Linear elastic) ของแผ่นไดอะแฟรมหลังจากรับแรงสูงสุดประมาณ 200 kPa รวมทั้งหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งชุดสเตรนเกจเพื่อต้องการให้ผลจากการวัดมีความละเอียดสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus เพื่อหาค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นซึ่งจะต้องไม่เกินค่าที่จุดคราก (Yield stress) ของวัสดุ

โดยตัวแผ่นประกบด้านข้างและแผ่นไดอะแฟรมจะถูกขึ้นรูปโดยมีมิติความยาวตามรูปที่ 5 และวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมเกรด 6063 ซึ่งเป็นเกรดทั่วไปในท้องตลาด ขึ้นรูปง่ายและมีราคาถูก โดยมีคุณสมบัติทางกลแสดงในตารางที่ 1



ด้านข้าง

ด้านหน้า

รูปที่ 5 ขนาดของอุปกรณ์และตำแหน่งในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ

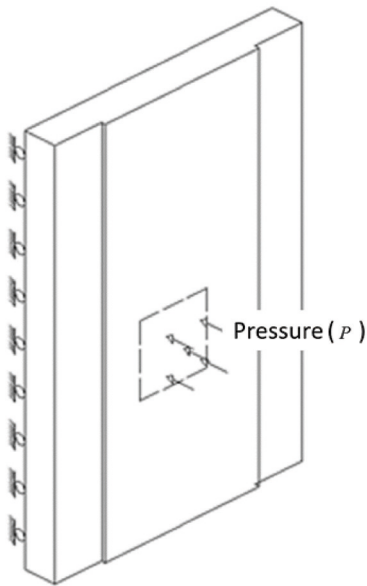
สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Constitutive model) จะใช้แบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง (Linear elastic) การใส่เงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ของการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6 การใส่แรงกระทำจะใส่เฉพาะที่ตำแหน่งของจุดวัดแรงเท่านั้น เนื่องจากการวิเคราะห์สนใจเฉพาะความหนาของจุดวัดแรง โดยค่า t ที่ออกแบบนั้นไม่ควรต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของการขึ้นรูปโลหะด้วยเครื่องมิลลิ่ง (Milling Machine) เมื่อค่า t นั้นบางเกินไปจะส่งผลให้เกิดการแอ่นตัวขณะทำการขึ้นรูปโลหะทำให้ความหนาของแผ่นไดอะแฟรมไม่สม่ำเสมอ

การวิเคราะห์จะกำหนดความหนา $t = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 มิลลิเมตรตามลำดับ จากนั้นจะหาแรงดัน P สูงสุดที่ทำให้แผ่นไดอะแฟรมเกิดค่าความเค้นดึงหรืออัดสูงสุดอย่างใดอย่างหนึ่งใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ในตารางที่ 2 โดยที่ทุกความหนา t จะเกิดค่าความเค้นดึงสูงสุดทั้งในแกน x และ y ที่ตำแหน่ง B และ F (รูปที่ 7 และ 8) ในส่วนของความเค้นอัดสูงสุดทั้งในแกน x

และ y เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง D และ H (รูปที่ 7 และ 8) ในที่นี้จะให้ความเค้นดึงมีค่าเป็นบวกและสมมุติให้ค่าความเค้นดึงและอัดที่จุดครากมีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 6063

Density (g/cm ³)	2.7
Young's Modulus (GPa)	68.9
Tensile Strength (MPa)	241
Yield Strength (MPa)	214
Poisson's ratio	0.33

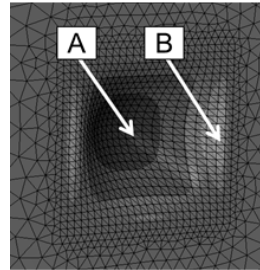


รูปที่ 6 การใส่เงื่อนไขสภาวะแวดล้อม

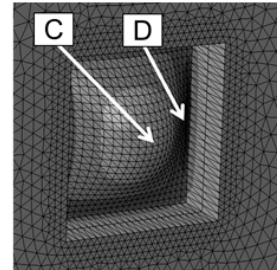
(Boundary condition) และตำแหน่งที่แรงกระทำด้านหน้า

ตารางที่ 2 ค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ

ค่าความเค้น (MPa)	ความหนา (mm)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Yield Stress	214	214	214	214	214
จุด B และ F	189	191	173	130	127
จุด D และ H	-201	-211	-207	-202	-207
จุด C และ G	106	107	95	96	95
จุด A และ E	-109	-118	-124	-126	-144

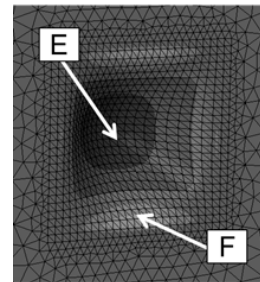


รูปที่ 7.1 ด้านหน้า

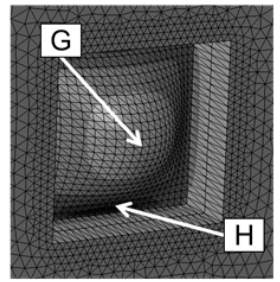


รูปที่ 7.2 ด้านหลัง

รูปที่ 7 บริเวณที่เกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุดในแนวแกน x



รูปที่ 8.1 ด้านหน้า

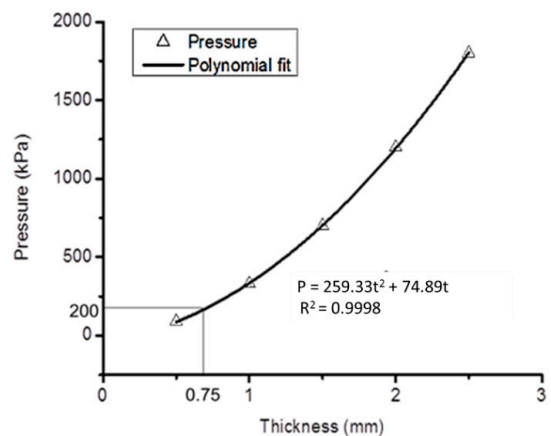


รูปที่ 8.2 ด้านหลัง

รูปที่ 8 บริเวณที่เกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุดในแนวแกน y

ผลการวิเคราะห์สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุด (P) ที่ไม่ทำให้แผ่นไดอะแฟรมเสียรูปถาวรกับความหนาของแผ่นไดอะแฟรม (t) ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบ Polynomial คือ

$$P = 259.33(t)^2 + 74.89(t) \quad (1)$$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดและความหนาของแผ่นไดอะแฟรม

การหาค่าความหนาสามารถทำได้โดยการแทนค่าแรงดันสูงสุดที่ออกแบบ 200 kPa เข้าในสมการที่ 1 ซึ่งจะได้ความหนา t เท่ากับ 0.746 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ดังนั้นในการออกแบบแผ่นไดอะแฟรมจึงใช้ความหนา t ที่ 1 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงดันสูงสุดที่รับได้เท่ากับ 334.23 kPa ทำให้มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.67

4. การกำหนดพื้นที่ติดตั้งชุดสเตรนเกจ

การกำหนดพื้นที่ที่จะติดตั้งชุดสเตรนเกจนั้นก็เป็นอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงกับความละเอียดในการวัด โดยทั่วไปควรใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Strain Gauge Circuit) เพื่อให้สัญญาณมีความชัดเจนที่สุด

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งมีหน้าที่แปลงการเปลี่ยนแปลงทางกลศาสตร์ที่เรียกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนจุดติดตั้งให้เป็นการแปลงความต้านทานไฟฟ้า เมื่อเชื่อมวงจรสเตรนเกจเป็นแบบวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) แรงดันไฟฟ้าขาออก จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\frac{V_{out}}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (2)$$

โดยที่

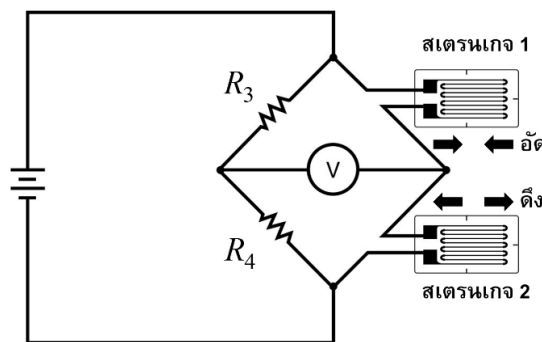
ΔR คือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (โอห์ม)

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (โวลต์)

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (โวลต์)

โดยหลักการแล้วการติดตั้งสเตรนเกจจะต้องติดตั้งให้ช่วงจุดวัดแรง (Gauge length) อยู่ในจุดที่เกิดค่าความเครียดสูงสุด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมากที่สุด แต่จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ พบว่าความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด H และ B ซึ่งไม่สามารถติดตั้งสเตรนเกจได้เนื่องจากอยู่บริเวณผิวสัมผัสด้านหน้าที่ต้องสัมผัสกับดินตัวอย่างอันทำให้แผ่นไม่เรียบเสมอกัน ส่วนความเครียดอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด D และ H ซึ่งก็ไม่สามารถติดตั้งสเตรนเกจได้เช่นกันเนื่องจากเป็นพื้นที่เข้ามุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องติดตั้งสเตรนเกจบริเวณกึ่งกลางแผ่นไดอะแฟรมในบริเวณพื้นที่จุด C และ G แบบทำมุม

ตั้งฉากต่อกัน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดความเครียดดึงทั้งในแนวตั้งและราบสูงสุดรองลงมา และการต้องจรรยาวิธสโตนบริดจ์ในงานวิจัยนี้จึงต้องต่อแบบครึ่งวงจรรบริดจ์ (Half-Bridge) ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งทำให้พจน์ ΔR_3 และ ΔR_4 ในสมการที่ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 10 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบครึ่งวงจรรบริดจ์ (Half-Bridge)

5. การตรวจสอบประสิทธิภาพ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบความเป็นเส้นตรง (Linearity) ขอบอุปกรณ์และความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันด้วยเทคนิคสมดุลของแรงดันลม วิธีการทดสอบแสดงในรูปที่ 11 เนื่องจากต้องการกักแรงดัน P_1 และ P_2 ให้กระทำกับด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นไดอะแฟรม ฝาครอบอะลูมิเนียมซึ่งตรงกลางเป็นช่องกลางจะถูกนำมาครอบตรงจุดวัดแรงดันแล้วซีลด้วยแผ่นยางประเก็นที่ถูกบีบอัดโดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (C-Clamp) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากชุดสเตรนเกจจะต้องถูกขยายให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง สัญญาณที่ถูกขยายจะส่งต่อไปที่ Data Acquisition เพื่อแปลงสัญญาณจากอนาล็อก (Analog Signal) ให้เป็นดิจิทัล (Digital signal) และจะส่งต่อไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

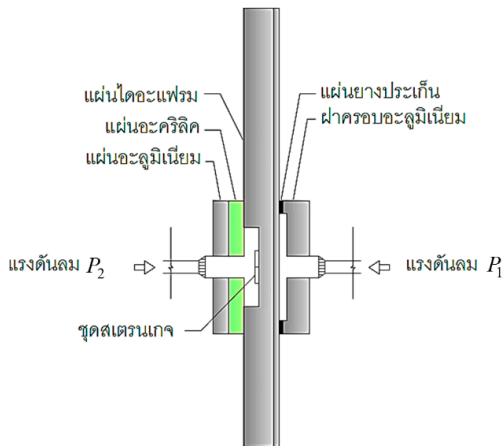
5.1 ตรวจสอบความเป็นเส้นตรง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจที่ติดตั้งไว้ภายในจุดวัดการเคลื่อนที่กับแรงดันลม (P_1) โดยปล่อยให้แรงดัน P_2 เท่ากับแรงดันบรรยากาศ แรงดันลม P_1 จะถูกปล่อยเข้าไปกระทำกับ

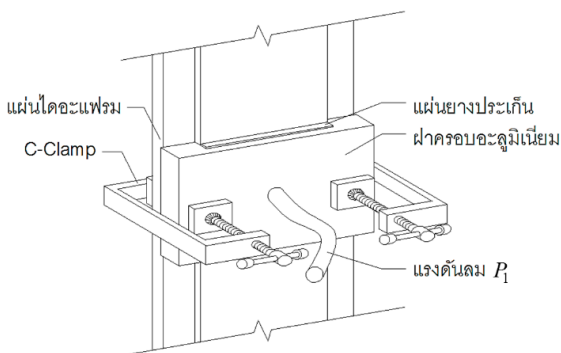
ด้านหน้าของแผ่นไดอะแฟรม การทดสอบจะทำทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันลม การเปลี่ยนแปลงแรงดัน P_1 จะทำทุกๆ 5 kPa จนถึงค่าสูงสุดที่ 65 kPa ซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าแรงดันมาตรฐานที่มีความละเอียด 0.1 kPa จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 12 สามารถหาสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงได้ตามสมการที่ (3) โดยมีความแม่นยำ $R^2 = 0.9992$

$$\Delta P_1 \text{ (kPa)} = 44.864 \times \Delta V_{out} \quad (3)$$

นอกจากต้องการประเมินความเป็นเส้นตรงแล้วยังต้องทำการประเมินค่าความละเอียดของการวัดซึ่งสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าขนาดของสัญญาณรบกวน (Noise) ดังแสดงในรูปที่ 13 กลับเข้าไปในสมการที่ 3 พบว่าการวัดมีความละเอียดเท่ากับ ± 0.425 kPa



รูปที่ 11.1 ภาพตัดด้านข้าง

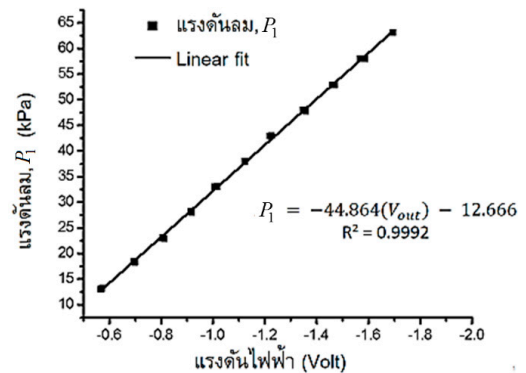


รูปที่ 11.2 การติดตั้งอุปกรณ์

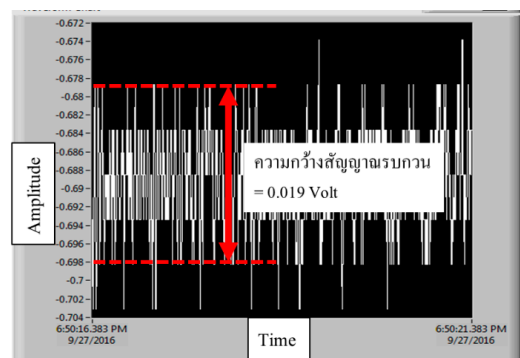
รูปที่ 11 วิธีการทดสอบโดยใช้แผ่นประกบ

5.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพการวัดแรงดัน

ในขั้นตอนนี้จะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบความแม่นยำของการวัดแรงดันด้านข้างด้วยเทคนิคสมมูลด้วยแรงดันลม โดยที่จุดเริ่มต้นจะต้องทราบค่าแรงดันลม P_1 ที่กระทำกับแผ่นไดอะแฟรมก่อน เมื่อระบบเสถียร ($\Delta V_{out} \neq 0$) แรงดันลม P_2 จะถูกปล่อยเข้าไปเพื่อปรับให้แผ่นไดอะแฟรมกลับมาอยู่ในสภาวะสมดุลอีกครั้งโดยผ่านการควบคุมแรงดันลมแบบมือหมุน (Manual Air-Pressure Regulator) โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้อยู่ที่ 0.8 kPa ดังนั้นเมื่อแทนค่าความคลาดเคลื่อนเข้าไปในสมการที่ 3 จะพบว่าเมื่อ $|\Delta V_{out}| \leq 0.0178$ โวลต์ จะถือว่าระบบอยู่ในสมดุล



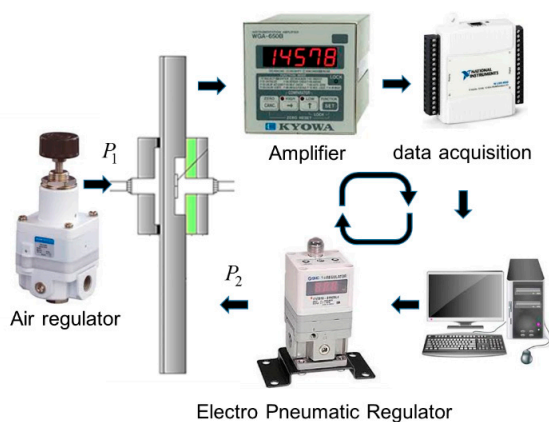
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P_1 กับค่าแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 13 การหาค่าขนาดของสัญญาณรบกวน

จากนั้นทำการเก็บค่าแรงดัน P_2 จากผลการทดสอบพบว่า การวัดแรงดันด้านข้างด้วยเทคนิคสมมูลด้วยแรงดันลมมีความแม่นยำดีมาก แต่การที่ต้องคอยปรับแรงดันลม P_2 ให้ระบบอยู่

ในสมดุด้วยมือตลอดการทดสอบนั้นเป็นเรื่องที่มีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบอัตโนมัติที่สามารถปรับแรงดันลม P_2 เพื่อให้ระบบอยู่ในสมดุลและสามารถหาค่าแรงดัน P_1 ได้อย่างแม่นยำ และต้องทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลม P_2 มาเป็นแบบควบคุมด้วยไฟฟ้า (Electronic pressure regulator) เพื่อให้รองรับกับระบบที่พัฒนาขึ้น โดยหลักการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 14 และ 15 แต่ยังคงใช้เงื่อนไขสถานะสมดุเดิมดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นโดยโปรแกรมจะทำการตรวจสอบสถานะสมดุของระบบทุกๆ 2 วินาที เมื่อพบว่าระบบไม่อยู่ในเงื่อนไขของสถานะสมดุก็จะทำการปรับแรงดัน P_2 โดยที่ขนาดการปรับค่าแรงดันต่อหนึ่งรอบการทำงานจะแบ่งเป็น 2 ระดับเพื่อความเร็วในการปรับสมดุคือ เมื่อ $|\Delta V_{out}| > 0.222$ Volt (สถานะเสียสมดุโดยแผ่นไดอะแฟรมรับภาระมากกว่า ± 10 kPa) ระบบจะปรับแรงดัน P_2 ครั้งละ 10 kPa นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวระบบจะปรับแรงดัน P_2 เพียงครั้งละ 1 kPa ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง P_1 กับ P_2 ที่ได้จากระบบปรับสมดุอัตโนมัติแสดงในรูปที่ 16 พบว่าค่าความชันของความสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 1.0072 ดังนั้นการหาค่าแรงดันด้วยเทคนิคสมดุด้วยแรงดันลมโดยใช้ระบบอัตโนมัตินี้มีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 14 อุปกรณ์การสร้างแรงดันสมดุด้วยระบบอัตโนมัติ

6. การปรับปรุงประสิทธิภาพ

ถึงแม้ระบบระบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังมีปัญหาในเรื่องของความล่าช้าในการปรับสมดุของ

โปรแกรมซึ่งกินเวลาประมาณ 5-10 วินาที ขึ้นอยู่กับขนาดของการเสียสมดุ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถนำอุปกรณ์นี้มาใช้ในการวัดค่าแรงดันดินด้านข้างในขั้นตอนการเฉือนดินภายใต้สถานะไม่ระบายน้ำได้ (Undrained Shear Tests) และต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้ระบบสามารถอ่านค่าแรงดันด้านข้างได้ทันทีซึ่งทำได้โดยการใช้สมการที่ 4

$$P_{1(cal)} = P_2 + P = P_2 + a(\Delta V_{out}) \quad (4)$$

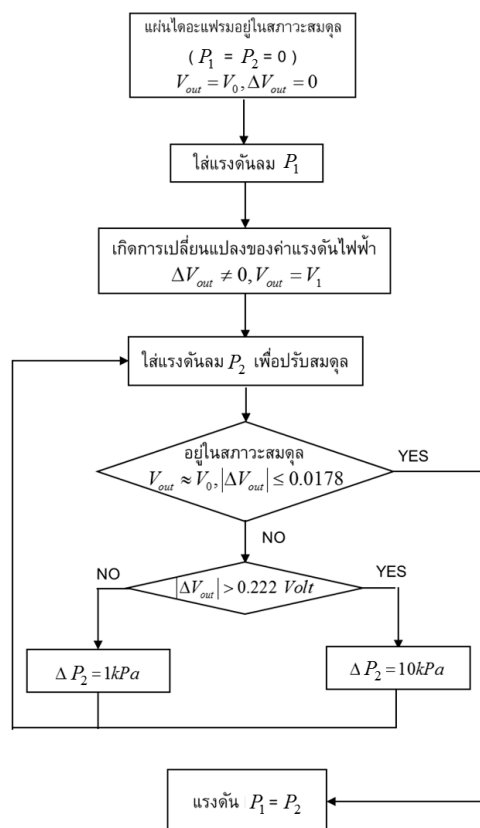
โดยที่

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

P_2 = ค่าแรงดันลมที่ใช้รักษาสมดุในขณะนั้น (kPa)

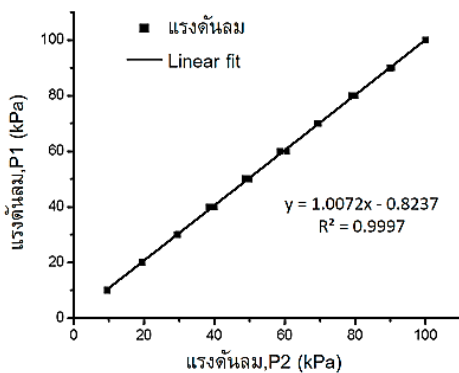
P = ค่าแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระอยู่ในขณะนั้น (kPa)

a = ค่าคงที่ได้จากการสอบเทียบ

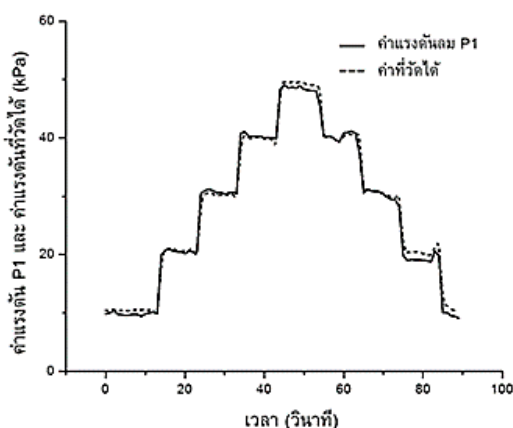


รูปที่ 15 หลักการทำงานของระบบสร้างแรงดันสมดุด้วยระบบอัตโนมัติ

จากสมการที่ 4 แรงกระทำ P_1 นั้นสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดันลมเพื่อรักษาสมดุล P_2 กับแรงดันที่แผ่นไคอะแฟรมรับภาระไว้ในขณะนั้น (P) ซึ่งค่า P นั้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔV_{out} กับค่าคงที่ซึ่งได้จากการสอบเทียบดังแสดงในสมการที่ 3 ดังนั้นค่า a จะมีค่าเท่ากับ 44.864 จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถวัดค่าแรงดัน P_1 โดยไม่ต้องรอให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งทำให้การวัดค่าสามารถทำได้อย่างทันทีทันใดและมีความแม่นยำสูงดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P_1 กับแรงดันลม P_2 ที่จุดสมดุล



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดัน P_1 และค่าแรงดันที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์กับเวลา

อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบเกิดการเสียสมดุล การทำงานของระบบปรับแรงดันอัตโนมัติยังคงทำงานควบคุมกันไป ทั้งนี้ระบบปรับสมดุลจะไม่ทำการเพิ่มค่า P_2 ให้เท่ากับค่า $a(\Delta V_{out})$ ที่เป็นขนาดของการเสียสมดุลในขณะนั้นภายในครั้งเดียว ถึงแม้ว่าการกระทำเช่นนั้นส่งผลให้แผ่นไคอะแฟรมกลับมาอยู่ในสมดุลได้อย่างรวดเร็วก็ตาม แต่กลับใช้วิธีให้ค่า P_2 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นครั้งละไม่เกิน 10 kPa และค่า P จะค่อยๆ ลดลงเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันลม P_2 ที่มีขนาดใหญ่อย่างกะทันหันซึ่งจะไปกระทบเข้ากับแผ่นไคอะแฟรมโดยตรง

กระบวนการปรับสมดุลนี้จะดำเนินการต่อเนื่องไปจนระบบเข้าสู่เงื่อนไขสภาวะสมดุลตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยระหว่างที่ระบบกำลังปรับสมดุลนั้น ค่าแรงดัน $P_{1(cal)}$ จะยังคงมีค่าคงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสมดุลจึงไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดค่าแรงดัน P_1

7. สรุปผลการศึกษา

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินด้วยเทคนิคสมดุลของแรงดันลมในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำมาใช้ในการวัดค่าแรงดันดินด้านข้างระหว่างกระบวนการเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และระหว่างทำการเฉือนตัวอย่างดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ ซึ่งทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่ง (k_0) หลังจากการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงและทราบค่าความเค้นทั้ง 3 แกนระหว่างทำการเฉือนตัวอย่างดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบเพื่อที่จะสามารถสร้างเส้นทางเดินของความเค้น (Stress path) ได้อย่างถูกต้องตัวแผ่นไคอะแฟรมที่อยู่ภายในแผ่นประกบด้านข้างนั้นถูกขึ้นรูปจากอะลูมิเนียมเกรด 6063 ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาถูก จากผลการออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์พบว่าแผ่นไคอะแฟรมขนาด 50x50 มิลลิเมตร ใช้ความหนาต่ำสุดที่ 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้สามารถรับความแตกต่างของแรงดันทั้งสองด้านเท่ากับ 334.29 kPa โดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวร จากผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันลมที่ทำการกระทำกับแรงดันไฟฟ้าซึ่งทำทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันลมนั้นอยู่บนเส้นตรงเดียวกันและมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า $R^2 = 0.9992$ จากการคำนวณหาค่าความละเอียดในการวัด

พบว่ามีความเท่ากับ ± 0.425 kPa ซึ่งคิดเป็น $\pm 0.425\%$ ของแรงดันสูงสุดที่ทำการทดสอบที่ 100 kPa

จากผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการวัดแรงดันด้วยเทคนิคสมดุลของแรงดันลมนั้นมีความแม่นยำสูง แต่หากต้องรอให้ระบบอยู่ในสมดุลจะทำให้เกิดความล่าช้าในการวัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการวัดความแรงดันในขณะที่ระบบไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอมีทั้งความแม่นยำและความเร็วในการวัดค่าแรงดันด้านข้างสูงและเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

8. ข้อเสนอแนะ

ความละเอียดที่คำนวณจากค่าสัญญาณรบกวนนั้น โดยแท้จริงแล้วขนาดของสัญญาณรบกวนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณภาพของสายดินและสายส่งสัญญาณ ความยาวของสายส่งสัญญาณ อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าอื่นๆ รอบข้าง คุณภาพของวงจรขยายสัญญาณ รวมถึงกำลังการขยายสัญญาณ

ความละเอียดของอุปกรณ์ยังขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งสามารถทำให้ดีขึ้นได้หากใช้เครื่องมือในการขึ้นรูปโลหะที่มีประสิทธิภาพกว่าการใช้เครื่องมือที่ต้นทุนต่ำ ความถูกต้องในการวัดนอกจากจะต้องอาศัยความละเอียดในการวัดค่าของแผ่นไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงดันลมนั้นที่จะนำมาใช้ในการรักษาสมดุล ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดแรงดันลมนั้นที่มีความละเอียดสูงที่ 0.1 kPa

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ วจพ. ๘/๒๕๕๗ และผู้วิจัยขอขอบคุณนายอัษฎา ชันพงษ์ และ นายอนุรักษ์ สุขรักษ์ นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มีส่วนช่วยในการทดสอบ อีกทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นอย่างสูงที่อนุเคราะห์ในการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

10. เอกสารอ้างอิง

1. Kongkitkul, W., 2004, Effects of Material Viscous Properties on the Residual Deformation of

Geosynthetic-Reinforced Sand, Doctoral Dissertation, Geotechnical Engineering, University of Tokyo.

2. Wanatowski, D. and Chu, J., 2006, "Stress-strain Behavior of a Granular Fill Measured by a New Plane-strain Apparatus," *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 29 (2), pp. 149–157.

3. Alshibli, K.A. and Akbas, I.S., 2007, "Strain Localization in Clay: Plane Strain Versus Triaxial Loading Conditions," *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 25 (1), pp. 45-55.

4. Chang, M.F., Teh, C.I. and Cao, L.F., 1999, "Critical State Strength Parameters of Saturated Clays from the Modified Cam Clay Model," *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (5), pp. 876–890.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Chattonjai, P., Yathoum, C. and Kochornna, C., 2018, "Submersible Load Cells for Triaxial Tests," *Chulachomklao Royal Military Academy Journal*, 16 (16), pp. 107–122. (In Thai)

