



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาอิทธิพลของแรงเค้นอัดในอดีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของดินเหนียว  
อ่อนกรุงเทพภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

Study the effect of stress history on deformation characteristics of  
Bangkok soft clay in plane strain condition

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ

เสนีย์ เทียนเรียว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล

(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222943  
สัญญาเลขที่ 150/2559

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาอิทธิพลของแรงเค้นอัดในอดีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของดินเหนียว  
อ่อนกรุงเทพภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

Study the effect of stress history on deformation characteristics of  
Bangkok Soft Clay in plane strain condition

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ

เสนีย์ เทียนเรียว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุน รัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 150/2559 ขอขอบคุณนายชนม์พิสิทธิ์ ยาทั่วมนิตระดับปริญญาโทที่ช่วยเหลือในการพัฒนา วิธีการทดสอบ ขอขอบคุณนางสาวนพพร แซ่ตั้ง นายพัชระ วัฒนสนันท์ นายมาฆวัฒน์ ตันจินตนารัตน์ นาย เอกร์ศมี ศิลป์ทองทิพย์ นิสิตระดับปริญญาตรีที่ช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและเก็บข้อมูลการทดสอบ ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาเพื่อปรับปรุงการทดสอบให้ดีขึ้น สุดท้ายผู้วิจัย ขอขอบพระคุณครอบครัว ผู้บังคับบัญชา และเพื่อนร่วมงาน ที่ให้ความช่วยเหลือจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ข้าพเจ้าขอระลึกทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ  
เสนีย์ เทียนเรียว

## บทคัดย่อ

จากปัญหาในทางวิศวกรรมปฐพีที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนเช่น งานวิเคราะห์เสถียรภาพคันดิน, งานกำแพงกันดิน และ งานอุโมงค์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างดังกล่าวมา พบว่าการเสียรูปนั้นเป็นการเสียรูปแบบในระนาบ ซึ่งดินจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับระนาบที่เกิดการเสียรูป เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและการเสียรูปของดิน งานวิจัยส่วนใหญ่จะนำดินเหนียวอ่อนประกอบตัวใหม่ซึ่งถึงว่าเป็นตัวอย่างดินที่มีสภาพใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติมากที่สุดมาใช้ในการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินแบบแรงอัดสามแกน แต่หากพิจารณาเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของการทดสอบดังกล่าวนี้จะพบว่าเป็นแบบสมมาตรรอบแกนซึ่งไม่ตรงกับงานทางวิศวกรรมปฐพีที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้นซึ่งจะเป็นแบบความเครียดในระนาบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบซึ่งจะตรงกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในสนามมากกว่า อย่างไรก็ตามการทดสอบดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบนั้นจะมีปัญหาอย่างมากในขั้นตอนการตัดดินให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมและการสวมถุงยางเข้ากับตัวอย่างโดยไม่ทำให้เกิดการรบกวน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการแก้ปัญหาโดยการออกแบบเครื่องมือทดสอบใหม่เพื่อที่จะสามารถทำการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและเฉือนตัวอย่างแบบความเครียดในระนาบด้วยอุปกรณ์ชุดเดียวกัน การสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ทำได้โดยใช้เทคนิคการให้แรงเค้นในแนวตั้งประกบกับแรงดุดโดยที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยระบบแบบป้อนกลับ เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของการทดสอบจะถูกเปลี่ยนเป็นแบบความเครียดในระนาบเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำหลัก หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำเป็นครั้งที่สองและจะทำการเฉือนตัวอย่างทันทีเมื่อการอัดตัวคายน้ำหลักสิ้นสุดลง จากผลการทดสอบพบว่าค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเค้นที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วยการประเมินผลภาพถ่ายพบว่าตัวอย่างจะเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงที่ค่าความเค้นเฉือนลดลงและแถบแรงเฉือนนั้นจะเกิดขึ้นเป็นรูปตัว “เอ็กซ์” เมื่อสิ้นสุดการเฉือน



## Abstract

For many geotechnical engineering problems (e.g., stability of the slope, retaining wall and embankment, etc.) dealing with very soft clay deposit, their characteristics are of plane strain condition, in which the strain increment is kept zero in the out-of-plane direction. For achieving high repeatability of specimen preparation of very soft clay sample, reconstituting technique is widely adopted. The re-constituted specimens are then subjected to a program of advanced triaxial tests, which are of axis-symmetric condition, for study of, generally, the stress-strain behaviors, strength, and volumetric change characteristics. However, the above-mentioned characteristics observed in the axis-symmetric condition by triaxial tests are significantly different from the ones that would be observed in the plane strain condition, and therefore, plane strain compression (PSC) tests on very soft clay are necessary. One of difficulties found with typical reconstituted very soft clay for plane strain test are trimming the clay cake into the rectangular shape and installing the rubber membrane, while not disturbing the sample. In the present study, a special PSC apparatus, by which reconstituting for test specimen can be performed inside the confining chamber, and then, after the primary consolidation is completed, the PSC shearing can be applied successively, was newly developed. Reconstituting is performed by consolidating the injected slurry by a compression the top cap using an air cylinder with feedback control first system combined negative pore-water pressure (suction), After the first primary consolidation is finish, the boundary condition was changed to plane strain condition, and then, The second consolidation process is continue preformed in the same plane strain cell which its boundary condition were controlled by applied vertical deformation via computer controller. After finishing the second primary consolidation, the PSC shearing of specimen can be performed consecutively by applying vertical compression. According to testing results, the soil shear strength increases with increasing the consolidation pressure. The specimens failed via a well-defined shear band during softening stress regime, and the photogrammetric analysis can be performed later to determine the strain fields. The shear band shapes of all specimens were 'X' type at the end of shearing.

## สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายคำย่อในการวิจัย (List of abbreviation)	ด
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.4 กรอบแนวความคิด (Conceptual Framework) ของโครงการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 บทนำ	7
2.2 คุณลักษณะทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	8
2.3 หลักการของความเค้นประสิทธิผล	8
2.4 การยุบอัดตัว	9
2.4.1 การอัดตัวคายน้ำเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเค้นในแนวตั้ง	10
2.4.2 การอัดตัวคายน้ำเนื่องจากการใช้แรงดันลบ	11
2.5 นิยามของดินที่มีการประกอบตัวใหม่	12
2.6 การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน	14
2.7 การทดสอบแบบความเครียดในระนาบ	19
2.8 สัมประสิทธิ์แรงดันดินที่สภาวะหยุดนิ่ง	30

## สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	
3.1 บทนำ	34
3.2 การจัดหาตัวอย่างดินเหนียว	35
3.3 การพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติภายใต้สภาวะแวดล้อม ความเครียดในระนาบมหาวิทยาลัยบูรพา	35
3.3.1 Plane strain cell	35
3.3.2 ระบบสำรองไฟฟ้า	38
3.3.3 ระบบสำรองแรงดันลม	38
3.3.4 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง	38
3.3.5 โหลดเซลล์	43
3.3.6 ชุด Load Frame	44
3.3.7 ระบบควบคุมแรงดันน้ำอัดโนมัติ	46
3.3.8 เครื่องปั้นดินพิเศษ	46
3.4 การทดสอบตัวอย่าง	48
3.5 การหาแถบแรงเฉือนด้วยวิธีประมวลผลภาพ	50
3.6 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือทดสอบแบบความเครียดในระนาบ	51
<b>บทที่ 4 การทดลองและการผลทดลอง</b>	
4.1 บทนำ	53
4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	53
4.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวก่อนดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบ	53
4.2.2 การเตรียมฉวยงและการติดตั้ง	55
4.3 การสอบเทียบอุปกรณ์	63
4.3.1 อุปกรณ์ค่าความเค้น	63
4.3.2 อุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว	64
4.3.3 การสอบเทียบผลของอุณหภูมิแผ่นประกบด้านข้าง ต่อการวัดแรงดันดินด้านข้าง	64

## สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
4.4 การทำให้ระบบทดสอบอิมิตัวด้วยน้ำ	66
4.5 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบ	67
4.6 การอัดตัวคายนํ้า	72
4.6.1 การสร้างโครงสร้างใหม่ให้แก่ดิน	72
4.6.2 ช่วงการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม	76
4.6.3 การอัดตัวคายนํ้า	77
4.7 การเขื่อนตัวอย่าง	80
4.8 การประมวลผลด้วยภาพถ่าย	87
4.8.1 เลือภาพถ่ายในตำแหน่งที่สนใจ	87
4.8.2 กำหนดจุดอ้างอิงและแต่ภาพ	87
4.8.3 ทำการหาพิกัดจุด	87
4.8.4 จัดเรียงข้อมูล	89
4.8.5 การทำคอนทัวร์ของค่า Strain field	89
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผล	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
5.3 ผลผลิต (Output)	97
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	99
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	9
2.2 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน	15

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงทิศทางของความเค้น	2
1.2 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวที่ทดสอบโดยเครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ	3
1.3 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวที่ทำโดยเครื่องมือทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกน	3
2.1 ลักษณะการวิบัติของของคั่นดิน	7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของดินกับเวลา	10
2.3 แบบจำลองของสปริงที่ใช้อธิบายการยุบตัวของดิน	11
2.4 แบบจำลองการอัดตัวคายนํ้าโดยใช้สปริง	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้น intrinsic compression line (ICL) กับ sedimentation compression line (SCL)	13
2.6 ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบ แรงอัดสามแกน (triaxial compression test)	16
2.7 ผลการทดสอบ normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทาง ทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบ แรงอัดสามแกน (triaxial compression test)	17
2.8 ผลการทดสอบ normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทาง ทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบ แรงอัดสามแกน (triaxial compression test)	17
2.9 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบแรงดันสูง (Casey, 2014)	18
2.10 (ก) ดินที่บดละเอียดแล้วมาผสมเข้ากับนํ้า (Casey, 2014) (ข) ให้แรงดันลบกับตัวอย่างดินเพื่อสลายฟองอากาศ (Casey, 2014)	18
2.11 (ก) เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายนํ้าที่ให้แรงกดได้ไม่เกิน 250 kPa (Casey, 2014) (ข) เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายนํ้าที่ให้แรงกดได้สูงสุด 10,000 kPa (Casey, 2014)	19
2.12 ประกอบโมลเข้ากับอุปกรณ์และให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุยง (Kongkitkul, 2004)	20
2.13 ติดตั้งตะแกรงร่อนเข้ากับด้านบนของตัวอย่าง (Kongkitkul, 2004)	21

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.14 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Kongkitkul, 2004)	21
2.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของทราย (Kongkitkul, 2004)	22
2.16 ผลการทดสอบจากการทดลองและทางวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Kongkitkul, 2004)	22
2.17 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Wanatowski & Chu, 2007)	23
2.18 อัตราส่วนของความเค้นของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ และแบบสมมาตรของความเค้นของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียด ในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง (wanatowski & Chu, 2007)	24
2.19 มุมเสียดทานประสิทธิผลของการทดสอบในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ และแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง (wanatowski & Chu, 2007)	24
2.20 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ โดยใช้เครื่องทดสอบ Biaxial (Jose et al., 2012)	25
2.21 กระบวนการอัดตัวคายนํ้าของตัวอย่างและการตัดแต่งตัวอย่าง (Jose et al., 2012)	25
2.22 ตัวอย่างดินหลังการตัดแต่งมีขนาด 90 x 60 x 30 มม. (Jose et al., 2012)	26
2.23 ระบบการให้แรงเค้นในแนวตั้งเพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ ภายใต้กระบวนการอัดตัวคายนํ้า (Khalid & Ibrahim, 2007)	27
2.24 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบ (Khalid & Ibrahim, 2007)	28
2.25 (ก) แถบแรงเฉือนของดินตัวอย่างที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain test) (Khalid & Ibrahim, 2007) (ข) รูปแบบการวิบัติของดินด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) (Khalid & Ibrahim, 2007)	28
2.26 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Juyun et al., 2012)	29

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.27 แถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (Juyun et al., 2012)	29
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ Single type (Juyun et al., 2012)	30
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ 'X' type (Juyun et al., 2012)	30
2.30 อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial tests (Baxter, 2006)	31
2.31 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินจากการทดสอบ $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial test (Baxter, 2006)	32
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) (Seah & Lai, 2003)	33
2.33 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ (Vardhanabhuti, 2006)	33
3.1 ผังกระบวนการทำงาน	34
3.2 แนวเส้นทางโครงการระบบไฟชานเมืองสายสีแดง	35
3.3 ส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ	36
3.4 เครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ	36
3.5 Plane strain cell (ก) รูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดิน (ข) รูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนเฉือน	37
3.6 ภาพตัด plane strain cell (ก) ภาพตัดรูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดิน (ข) ภาพตัดรูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนเฉือน	38
3.7 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง	39



## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.8 ระบบการทำงานของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง	40
(ก) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุล	
(ข) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P1 มากกระทำ	
(ค) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P2 มากกระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับ P1	
(ง) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P1 มากกระทำมากกว่าแรงดัน P2	
3.9 หลักการทำงานเพื่อหาจุดสมดุลของแรงดัน	40
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดัน P1 และค่าแรงดันที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์กับเวลา	42
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P1 และ P2 กับระยะของการดึงถ่วง	42
3.12 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่ง ที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด	43
3.13 (ก) ติดตั้งชุดสเตรนเกจตามตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด (ข) โหลดเซลล์หลังจากประกอบส่วนบนและล่าง	44
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของยึดของถ่วงกับค่าความเปลี่ยนแปลง ของความเค้นที่อ่านได้จากโหลดเซลล์	45
3.15 การออกแบบเครื่องปั่นดิน	47
3.16 ใบพัดของเครื่องปั่นดิน	47
3.17 ฟองอากาศที่ระเบิดออกมาจากดินเหลว	48
3.18 การเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมจากการเสีรูปในหนึ่งมิติเป็นแบบสภาวะความเครียดในระนาบ	49
3.19 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างให้แก่ตัวอย่าง	49
3.20 การหาพิกัดจุดบนถ่วงโดยการวิเคราะห์ภาพถ่าย	50
3.21 ภาพซ้อนจุดบนถ่วงด้วยภาพก่อนและหลังการเลื่อน	51
3.22 แสดงการทำคอนทัวร์ Strain field	51
3.23 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือทดสอบแบบความเครียดในระนาบ	52
4.1 การขุดดินเป็นชั้นและการผสมดินกับน้ำ	53
4.2 การกรองดินและตากดิน	54

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.3 การทุบดินให้มีขนาดเล็กลงด้วยค้อนยาง	54
4.4 ลักษณะรอบแตกร้าวเมื่อดินเหลวยังมีอากาศอยู่ในมวลดิน	55
4.5 การพักยางเปียก	56
4.6 การอบถุงยาง	56
4.7 การโรยแป้งก่อนแกะถุงยาง	56
4.8 การวางแผ่นเพื่อทำการจุดถุงยาง	57
4.9 การสวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง	58
4.10 การติดตั้งถุงยางกับแท่นกดด้านล่าง	58
4.11 การสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นด้านล่าง	58
4.12 การเจาะรูถุงยางด้านล่าง	59
4.13 การประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดแล้วใช้สกรู (Screw)	59
4.14 สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน	60
4.15 การติดตั้งถุงยางกับแท่นกดด้านบน	60
4.16 การสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นด้านบน	61
4.17 การเจาะรูถุงยางด้านบน	61
4.18 ประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านบน	62
4.19 การติดตั้งแผ่นประกบทั้งสองด้านและการดึงถุงยาง	62
4.20 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความเค้นแบบต่างๆ	63
4.21 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว	64
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของอุณหภูมิกับชุดสเตรนเกจ	65
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นก่อนและหลังปรับแก้ เนื่องจากผลอุณหภูมิของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง	66
4.24 แสดงส่วนต่าง ๆ ของระบบการไล่อากาศ	67
4.25 ภาพตัดของกระบอกอัดฉีดดินเหลว	68
4.26 บรรจุดินเข้าสู่กระบอกดินจากเครื่องปั่นดิน	68
4.27 การปล่อยน้ำในระบบและการต่อท่อลำเลียงดินเหลวเข้าเครื่องมือทดสอบ	69

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.28 การติดตั้งกระบอกดันดินเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ	69
4.29 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ	70
4.30 การดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกกำหนดความสูงของตัวอย่างไว้	70
4.31 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องทดสอบจนมีดินและน้ำส่วนเกินออกมา	71
4.32 การซีลท่อทองแดงเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึม	71
4.33 กระบวนการทำงานในการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน	72
4.34 กระบวนการทำงานในการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน	73
4.35 ค่าความเค้นในแนวตั้งและด้านข้างรวมทั้งค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำที่เวลาต่างๆ (ก) PS 01-30 kPa (ข) PS 02-50 kPa และ (ค) PS 03-90 kPa	75
4.36 การตรวจสอบหาจุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธี Asaoka (1978)	76
4.37 การติดตั้ง gab sensor ที่ด้านข้างของตัวอย่างดิน	77
4.38 หลักการทำงานของกระบวนการอัดตัวคายน้ำ	78
4.39 การเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดขึ้นระหว่าง Oedometer test กับ Plane strain test	79
4.40 เส้นทางเดินของความเค้นในแกน $p'$ และ $q$ ในขั้นตอนการสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่	79
4.41 การตั้งกล้องถ่ายรูป	80
4.42 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลและความเครียดในแนวตั้ง	81
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง	82
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ ( $\sigma'_2$ ) กับค่าความเครียดในแนวตั้ง	83
4.45 เปรียบเทียบค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ ( $\sigma'_2$ ) กับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Chang และคณะในปี 1999	83
4.46 อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบต่อแนวตั้ง	84
4.47 เส้นทางเดินของแรงเค้นในแกน $p'$ และ $q$	85
4.48 Mohr's circle ที่จุด peak	85
4.49 Mohr's circle ที่จุด critical state	86

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.50 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่ทดสอบภายใต้ สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ	86
4.51 ภาพถ่ายช่วงต่างๆ ของการเฉือน	88
4.52 ภาพที่ถูกตัดส่วนที่ไม่จำเป็นออกและปรับปรุงจุดพบพร่อง	88
4.53 ภาพซ้อนจุดบนดูยงทั้งก่อนและหลังการเฉือน	89
4.54 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS01-30 kPa	90
4.55 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS01-30 kPa	90
4.56 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS01-30 kPa	91
4.57 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS02-50 kPa	91
4.58 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS02-50 kPa	92
4.59 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS02-50 kPa	92
4.60 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS03-90 kPa	93
4.61 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด A, B และ C	93
4.62 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด D และ E	94
4.63 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด A, B และ C	94
4.64 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด D และ E	95

## คำอธิบายคำย่อในการวิจัย (List of abbreviation)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำเต็ม
c	Cohesion
$\varepsilon$	Strain
ICL	Intrinsic compression line
$k_0$	Coefficient earth pressure at rest
kPa	Kilopascal
NC Clay	Normally consolidated clay
OC Clay	Over-consolidated clay
OCR	Overconsolidation ratio
p	Mean stress
p'	Mean effective stress
PAC	pneumatic air cylinder
$\phi$	Internal friction angle
ps	Plane strain
psi	Pounds per square inch
PVC	Polyvinylchloride
q	Deviatoric or shear stress
SCL	Sedimentation compression line
$\sigma$	Stress
u	Pore water pressures
$u_0$	Initial pore water pressures
$\Delta u$	Excess pore water pressure

# บทที่ 1

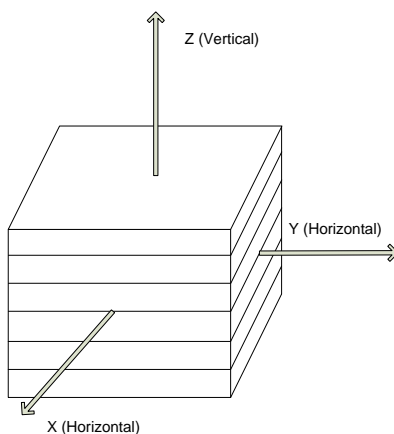
## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ในการออกแบบงานวิศวกรรมจำเป็นต้องทำการทดสอบหาคุณสมบัติการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน ซึ่งสามารถทำได้ทั้งการทดสอบในสนาม หรือการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธี มีทั้งข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีการทดสอบเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกต้องควรสอดคล้องกับทฤษฎีการพิบัติ ดังรูปที่ 2.1 ปัจจุบันวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดิน โดยหลักๆ ที่เป็นนิยมมีด้วยกันอยู่ 3 วิธี คือ 1. การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined test) เป็นการทดสอบหาแรงเฉือนดินแบบไม่ระบายน้ำโดยปราศจากแรงดันด้านข้าง ซึ่งการทดสอบนี้ใช้ได้เฉพาะกับดินเหนียวและไม่สามารถหาค่ามุมเสียดทานภายในได้ 2. การทดสอบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินที่มีทั้งความเครียดดิ่งและแนวราบ เมื่อมีการถมดินจะทำให้เพิ่ม  $\Delta\sigma_1$  ในแนวตั้ง ซึ่งเดิมที่มีแรงกระทำอยู่ก่อนแล้ว จะเกิดการ วิบัติด้านข้าง 3. การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ง่ายที่และรวดเร็ว ผลที่ได้จากการทดสอบมักจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากกำหนดให้ระนาบของการวิบัติเป็นแนวราบ จึงไม่สามารถหาความเครียดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ระนาบพิบัติที่เกิดขึ้นอาจไม่มีสภาพใกล้เคียงกับธรรมชาติ การทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ การทดสอบที่นิยมที่สุดคือ การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน จะมีสภาวะแวดล้อมเหมาะสมกับงานประเภทเสาเข็มและฐานราก แต่หากพูดถึงงานอุโมงค์ ถนน เขื่อน กำแพงกันดิน งานเหล่านี้มีการเสียรูปในแนวระนาบเพียง 2 แกน ซึ่งการทดสอบอัดสามแกนไม่สามารถหาสภาวะแวดล้อมแบบ Plane strain ดังนั้นจึงมีการทำวิจัยพฤติกรรมการรับแรงและเสียรูปของดินในสภาวะแวดล้อมแบบ Plane strain ขึ้น

ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีการทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (axisymmetric triaxial compression test) นั้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดิน รวมไปถึงพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) โดยสภาวะแวดล้อม (boundary condition) ของการทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกนนั้นจะกำหนดให้ค่าความเค้น (stress) ในทิศทาง X และ Y มีขนาดเท่ากัน (ทิศทางของแกนได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.1) จากนั้นจึงให้ค่าการทรุดตัว (displacement) ที่ด้านบนของตัวอย่าง ตามอัตราความเร็วที่กำหนด (strain rate) ในทิศทาง Z ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดในทิศทาง X และ Y ก็ยังคงมีขนาดเท่ากันตลอดการทดสอบ ซึ่งเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม (boundary condition) ของการทดสอบดังกล่าวจะเป็นแบบสมมาตรรอบแกนเดียว

(axisymmetric condition) จากการพิจารณาภาวะแวดล้อมของการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในงานก่อสร้าง ภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียวนั้น จะใกล้เคียงกับการก่อสร้าง เช่น งานเสาเข็ม งานออกแบบฐานรากของถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่ งานฐานรากตื้นที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างไม่มากนัก ซึ่งเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนเดียวนั้นไม่สามารถครอบคลุมงานก่อสร้างทั้งหมด ทางด้านวิศวกรรมปฐพีที่งานก่อสร้างส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (plane strain condition)

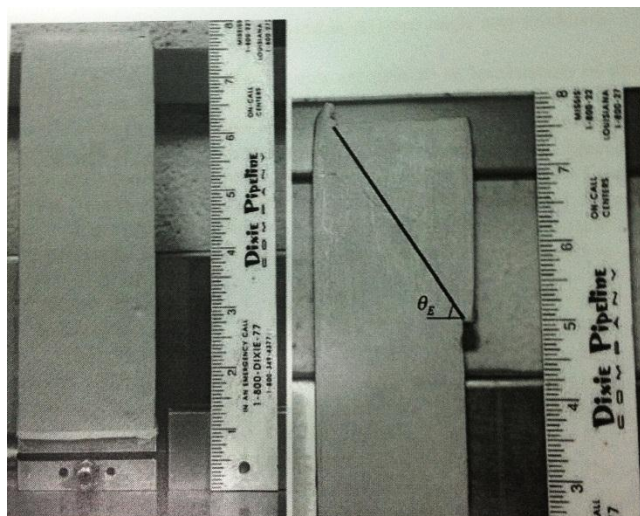


รูปที่ 1.1 แสดงทิศทางของความเค้น

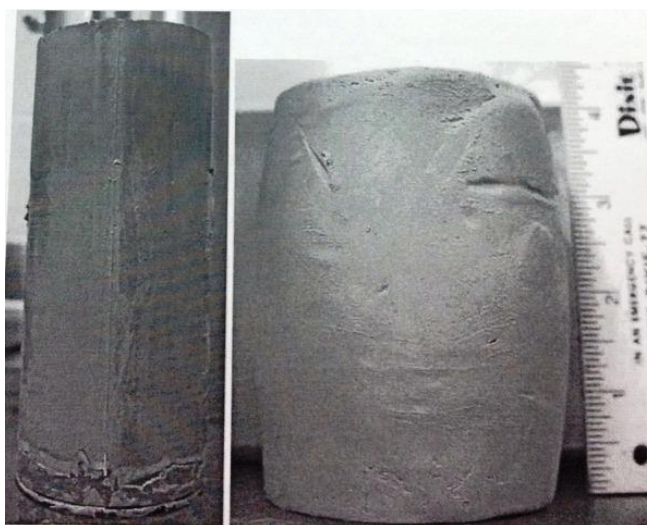
โดยงานก่อสร้างที่มีลักษณะเงื่อนไขของสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกับความเครียดในระนาบ เช่น งานอุโมงค์ งานคันดินยาว งานเขื่อน งานฐานรากตื้นที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูงมาก ๆ งานกำแพงกันดิน ดังนั้นจากเหตุผลในเรื่องของเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมความเค้นกับความเครียดที่ไม่สอดคล้องกับงานก่อสร้างบางประเภท ประกอบกับคุณสมบัติของดินนั้นจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (anisotropic) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาและวิจัยหาคุณสมบัติการรับกำลังของดินในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ เพื่อให้ตรงตามสภาพสภาวะแวดล้อมจริงตามประเภทงานก่อสร้างดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดความแม่นยำและความสอดคล้องในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างดินที่ทำการพิจารณา

นอกจากข้อจำกัดในเรื่องของสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดที่บางครั้งไม่ตรงกับสภาพจริงในสนามแล้ว การหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกนยังมีข้อบกพร่องในการตรวจสอบแนวแถบการเฉือน (shear band) ซึ่งการทดสอบในบางครั้ง ดินวิบัติโดยไม่เกิดแนวแถบการเฉือนซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริงในสนามเมื่อโครงสร้างดินเกิดการวิบัติโดยเฉพาะในกรณีของกำแพงกันดินสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ทำโดย Alshibli และ Akbas ในปี 2007 ได้ทำการทดสอบดินเหนียวชนิดเดียวกันพบว่าการทดสอบการรับกำลังของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ (plane strain compression test) จะเห็น

แนวแถบการเฉือนได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 1.2) ส่วนการทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกนบางกรณีไม่เกิดแนวแถบการเฉือนหลังการวิบัติของดินที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 1.3)



รูปที่ 1.2 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวที่ทดสอบโดยเครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ  
(Alshibli และ Akbas, 2007)



รูปที่ 1.3 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวที่ทำโดยเครื่องมือทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกน  
(Alshibli และ Akbas, 2007)

ในส่วนของการทำนายพฤติกรรมและการเสียรูปของดินนั้น ก็เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อให้สามารถทำนายลักษณะและพฤติกรรมของการเสียรูปของดินที่จะส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนในโครงสร้างต่าง ๆ เช่น อาคาร ถนน และ อุโมงค์ และโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับสถานที่



ก่อสร้าง ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างเป็นอย่างมากในกรณีที่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันในโครงสร้างที่ต่อเนื่องกัน (differential settlement) ทั้งสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างใต้ดินนั้นมีความซับซ้อนมาก อันเนื่องมาจากปัจจัยในด้านขั้นตอนของงานก่อสร้างและดินยังเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่ยากจะไปกำหนดคุณสมบัติทางกลและที่สำคัญคือ พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของดินนั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยสมการแบบอีลาสติก (elasticity Model) ด้วยปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาในขั้นต้นนั้นทำให้การทำนายพฤติกรรมการเสีรูปของโครงสร้างใต้ดินนั้นไม่สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วยมือหรือการใช้สูตรสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ (ในกรณีที่ไม่ได้สมมุติว่าดินนั้นมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก) ดังนั้นการวิเคราะห์ที่ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element analysis) จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายพฤติกรรมทรุดตัวของดินนั้นจะประกอบไปด้วยสองด้านหลัก ๆ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) และงานพัฒนาความสามารถในการคำนวณ โดยใช้เทคนิควิธีการทางตัวเลข (numerical method) เข้ามาช่วยในการประมาณค่าคำตอบของสมการพีชคณิต การทำวิจัยและพัฒนาอย่างหลังนั้นมักจะพบน้อยมากในการทำวิจัยของสาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นสิ่งที่พบได้มากกว่า ซึ่งการที่จะให้ได้ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นมีความถูกต้องสูงสุด ชนิดและความสามารถของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงตามพฤติกรรมของวัสดุนั้นก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญมาก การพัฒนาแบบจำลองนั้นจะต้องเริ่มต้นด้วยการทดสอบวัสดุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณส่วนผสม อุณหภูมิ ความเค้นเริ่มต้น อัตราการเสีรูป (strain rate) และเส้นทางของหน่วยแรง (stress path) หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อค่าการรับกำลังและการเสีรูปของวัสดุนั้น ๆ ที่ทำการพิจารณาแล้วนำเอาผลการทดสอบนั้นมาหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่เราสนใจของวัสดุนั้นตามชนิดของแบบจำลอง จากนั้นก็นำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการแบบจำลอง แล้วจึงนำไปใช้กับระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุต่อไป ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสีรูปของดินนั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ส่วนแบบจำลองที่นิยมใช้กับดินเหนียว เช่น Cam-Clay Model Modified และ Cam-Clay Model ฯลฯ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองนั้นสร้างมาจากพื้นฐานของการทดสอบดินแบบการรับกำลังดินในแบบสามแกน (triaxial test) ซึ่งอธิบายในตอนต้นแล้วว่า ไม่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานก่อสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานกำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ดังนั้น ผลการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ (plane strain compression test) จะสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานที่กล่าวมาขั้นต้นได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีแนวคิดจากสภาวะแวดล้อมแบบความเครียด

ในระนาบ (plane strain) ยังลดปัญหาความยุ่งยากของตัวสมการ และการนำเอาไปใช้ในระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของแรงเค้นอัดในอดีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ
2. เพื่อพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ
3. พัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่ไม่ถูกรบกวนก่อนทำการเฉือน
4. ศึกษาการพัฒนาแถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย
5. พัฒนาการรู้ด้านเทคนิคกลไกการวัดคุมระบบอัตโนมัติ เพื่อจะนำมาเพิ่มความสะดวกและความแม่นยำในการทดสอบ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายของงบประมาณการสั่งซื้อชุดเครื่องมือจากต่างประเทศที่มีราคาสูง
6. เพื่อนำผลการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) และยังสามารถนำแบบจำลองนั้นไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรมทางไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ต่อไปในอนาคต

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาคุณลักษณะการรับกำลังและการเสีรูปร่างทั้งลักษณะแถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ( Bangkok Soft Clay) ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) แบบไม่ระบายน้ำ โดยจะเส้นทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันเพื่อสร้างโครงสร้างดินในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำก่อนทำการเฉือน นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเครื่องมือ อุปกรณ์วัดแรงดัน และโปรแกรมควบคุมและบันทึกข้อมูลระบบอัตโนมัติร่วมไปถึงการพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวอย่างโดยไม่ต้องตัดแต่งตัวอย่างก่อนทำการเฉือน

## 1.4 กรอบแนวความคิด (Conceptual Framework) ของโครงการวิจัย

ในการออกแบบโครงสร้างดินนั้น นอกจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างดินแล้ว ผู้ออกแบบยังต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเสีรูปร่างและสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างได้ดิน นั้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานกำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมและมีการก่อสร้างมากในกรุงเทพมหานคร งานก่อสร้างทั้งสองชนิดนี้มีความอันตรายและมีความเสี่ยงสูงมาก ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สินของประชาชนที่อาศัยอยู่โดยรอบสถานที่ก่อสร้าง ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปร่างให้ตรงตามลักษณะของ

สภาวะแวดล้อมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินนั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยสมการแบบอีลาสติก (elasticity model) อีกทั้งคุณสมบัติของดินนั้นจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (anisotropic) ประกอบกับความซับซ้อนในกระบวนการก่อสร้าง ดังนั้นจึงยากในการทำนายที่พฤติกรรมการเสีรูปร่างที่จะทำการคำนวณให้ถูกต้องด้วยมือหรือสูตรสำเร็จได้ ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์จึงเป็นที่นิยมและเข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหา จากการวิเคราะห์ลักษณะสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานกำแพงกันดินและงานอุโมงค์ ซึ่งจะพบว่าสภาวะแวดล้อมของความเค้นกับความเครียดเป็นแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) โดยเส้นทางของหน่วยแรง (stress path) จะแตกต่างกันไปตามตำแหน่ง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาคุณลักษณะการรับกำลังและการเสีรูปร่างภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) รวมถึงอิทธิพลของแรงเค้นในอดีตของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) เพื่อนำผลการศึกษาดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) และสามารถทำนายพฤติกรรมโครงสร้างดินได้อย่างถูกต้องและแม่นยำต่อไปในอนาคต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

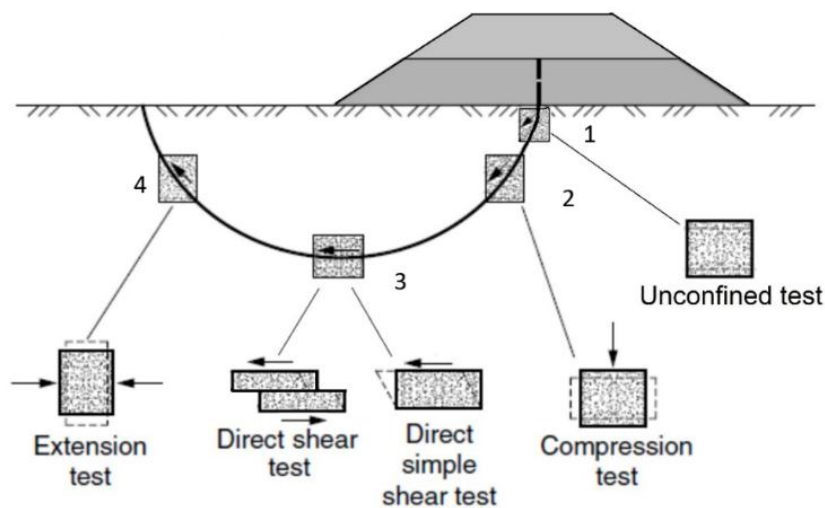
1. ทราบถึงการศึกษาอิทธิพลของแรงเค้นอัดในอดีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ รวมถึงการพัฒนาแถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเฉือน เพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบโครงสร้างใต้ดินให้มีความถูกต้องตรงตามพฤติกรรมการเสีรูปร่างที่แท้จริงในสนาม
2. สามารถพัฒนาเครื่องมือทดสอบดินแบบความเครียดในระนาบที่มีประสิทธิภาพสูง
3. สามารถพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนประกอบตัวใหม่ที่ไม่ถูกการรบกวนใดๆ ก่อนทำการเฉือน
4. สามารถบูรณาการความรู้ทางด้านไฟฟ้า เครื่องกล และการวัดคุม เพื่อนำมาพัฒนาด้านเทคนิคกลไกการวัดคุมระบบอัตโนมัติ เพื่อจะนำมาเพิ่มความสะดวกและความแม่นยำในการทดสอบ รวมถึงยังสามารถลดค่าใช้จ่ายของงบประมาณการสั่งซื้อชุดเครื่องมือจากต่างประเทศที่มีราคาสูง
5. สามารถนำผลการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปร่างของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) ต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในการออกแบบงานวิศวกรรมจำเป็นต้องทำการทดสอบหาคุณสมบัติการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของดิน ซึ่งสามารถทำได้ทั้งการทดสอบในสนาม หรือการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธี มีทั้งข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีการทดสอบเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกต้องควรสอดคล้องกับเงื่อนไขสถานะแวดล้อมรวมไปถึงทฤษฎีการพิบัติดังรูปที่ 2.1 ปัจจุบันวิธีการทดสอบหาลังรับแรงเฉือนดิน โดยหลักๆ ที่เป็นนิยมนิยมด้วยกันอยู่ 3 วิธี คือ 1. การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined test) เป็นการทดสอบแรงอัดดินโดยปราศจากแรงด้านข้างเพื่อหาลังต้านทานแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งการทดสอบนี้จะไม่สามารถหาค่ามุมเสียดทานภายในได้ 2. การทดสอบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) เป็นการทดสอบแรงเพื่อหาค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดิน โดยการสร้างเงื่อนไขสถานะแวดล้อมแบบสมมาตรในแนวแกน (axisymmetric) การทดสอบนี้ จะสามารถควบคุมค่าความเค้นทั้งแนวตั้งและด้านข้างตัวอย่างทดสอบได้ อีกทั้งยังสามารถเฉือนดินได้ทั้งในสถานะระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ 3. การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ง่ายที่และรวดเร็ว การเฉือนจะมีการกำหนดระนาบของการวิบัติในแนวราบ



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวิบัติของของคั้นดิน

การทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ การทดสอบที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินได้ดีที่สุดคือ การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน แต่เนื่องจากเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมนั้นเหมาะกับงานประเภทเสาเข็มหรือฐานรากแผ่วงกลมเท่านั้นเนื่องจากการทดสอบเป็นแบบสมมาตรในแนวแกน แต่หากพิจารณาถึงประเภทอุโมงค์ ถนน เขื่อน กำแพงกันดิน ซึ่งโครงสร้างจะก่อสร้างในลักษณะแนวยาวจึงมีการเสียรูปในแนวระนาบเพียง 2 แกนเท่านั้น (Plane strain condition) ดังนั้นการทดสอบอัดสามแกนจึงไม่เหมาะกับงานที่มีพฤติกรรมการเสียรูปแบบ Plane strain ด้วยเหตุนี้จึงมีการทำวิจัยพฤติกรรมการรับแรงและเสียรูปของดินในสภาวะแวดล้อมแบบ Plane strain ขึ้นโดยนักวิจัยหลายท่าน โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทต่อไป

## 2.2 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

## 2.3 หลักการของความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

จากการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินต่าง ๆ ค่าความเค้นประสิทธิผล ( $\sigma'$ ) นั้นได้ถูกอธิบายโดยนิยามของ Terzaghi (1925) และนิยามนี้เป็นจริงเสมอมา โดยความเค้น ( $\sigma$ ) ที่มีค่ามากจะต้องถูกพิจารณาความเค้นประสิทธิผลด้วย ความเค้นเปรียบเสมือนแรงกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัสรอบ ๆ ของวัตถุ เมื่อเกิดแรงกระทำดังกล่าวแรงนี้จะส่งผ่านไปยังโครงสร้างอื่น ๆ ที่อยู่ในดินซึ่งประกอบไปด้วยเม็ดดินและช่องว่างในที่นี้ช่องว่างคือน้ำเมื่อน้ำถูกแรงกระทำก็จะเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ ) ทำให้ส่วนของมวลดินนี้ถูกน้ำและเม็ดดินเป็นตัวรับกำลัง ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าความเค้นประสิทธิผลต้องนำแรงดันน้ำส่วนเกินมาหักลบออกดังสมการ

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

สมการนี้ถูกยอมรับและได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่สังเกตได้ว่าความหมายของความเค้นประสิทธิผลนั้นไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตาม ในหลายๆ งานวิจัยได้นำทฤษฎีของ Terzaghi ไปปรับปรุงเพื่อที่สามารถใช้ดินตั้งแต่ดินที่มีความอ่อนไปจนถึงแข็งมาก

**ตารางที่ 2.1** ขนาดของคุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
(Uddin, Balasubramianiam & Bregado, 1997)

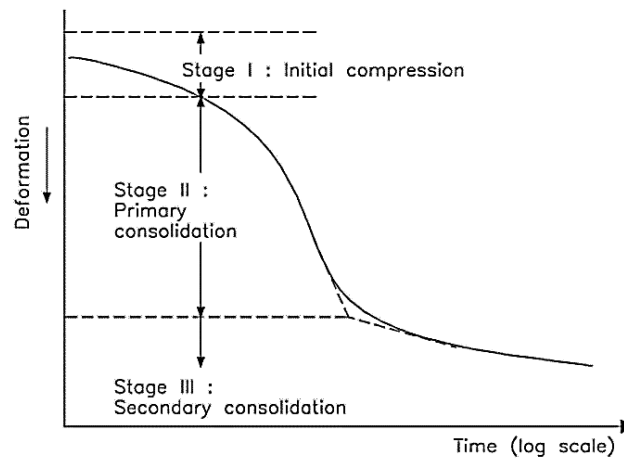
คุณสมบัติของดิน	ค่าของคุณลักษณะ
ปริมาณน้ำในมวลดิน $W$ (%)	76-84
ขีดจำกัดของเหลว $LL$ (%)	103
ขีดจำกัดพลาสติก $PL$ (%)	43
ดัชนีพลาสติก $PI$ (%)	60
ดัชนีของเหลว $LI$	0.62
การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain size distribution)	
ดินเหนียว (%)	69
ดินทรายแป้ง (%)	28
ทราย (%)	3
หน่วยน้ำหนักรวม $\gamma_t$ (kN/ m <sup>3</sup> )	14.3
หน่วยน้ำหนักแห้ง $\gamma_d$ (kN/ m <sup>3</sup> )	7.4

## 2.4 การยุบอัดตัว (Compressibility)

การทรุดตัว หมายถึง การยุบตัวลงในแนวดิ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินในส่วนของ ปริมาตรน้ำหรืออากาศ ส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างในมวลดินมีค่าลดลง ซึ่งถ้ามวลดินมีความอึดตัวด้วยน้ำและ เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากปริมาตรน้ำเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น พฤติกรรมนี้จะเรียกว่าการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) การยุบตัวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดัง แสดงในภาพที่ 2.2 คือ

1. การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) เป็นการทรุดตัวเนื่องจากคุณสมบัติ ยืดหยุ่นของดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการรับน้ำหนักหรือมีแรงมากระทำ
2. การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement) ในช่วง การยุบอัดตัวครั้งแรก (Primary consolidation) จะเกิดขึ้นหลังจากการทรุดตัวทันที และจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ต้องใช้เวลานานจนกว่าจะสิ้นสุดการทรุดตัว เกิดจากการลดลงของปริมาตรของดินเมื่อน้ำไหลออกมาจาก มวลดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวซึ่งยอมให้น้ำไหลซึมผ่าน ได้้น้อยมาก อาจต้องใช้เวลานานหลายปี
3. การทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary settlement) จะเป็นการทรุดตัวอันเนื่องจากการคืบ

(Creep) หรือคุณสมบัติพลาสติกของดินภายใต้การรับแรง เกิดหลังจากการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวของดินสิ้นสุด



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของดินกับเวลา (Terzaghi, 1925)

สำหรับดินทรายหรือชั้นดินที่น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย อาจพิจารณาได้ว่าการทรุดตัวจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้าง สำหรับดินเหนียว น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก การยุบอัดตัวของดินประเภทนี้ จึงเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน

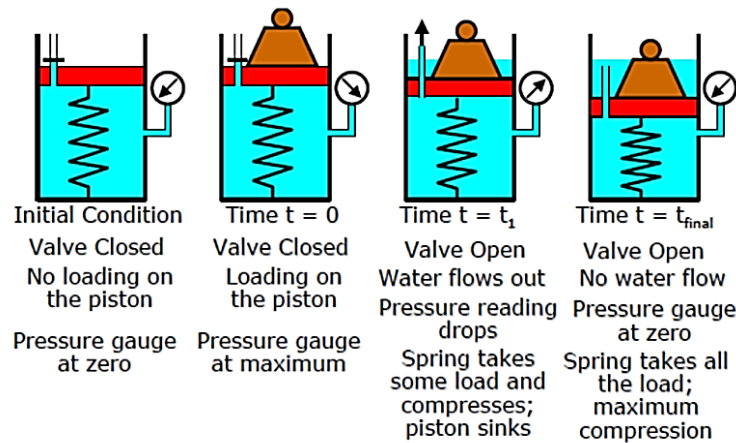
#### 2.4.1 การอัดตัวคายนํ้าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเค้นในแนวตั้ง

การอัดตัวคายนํ้า (Consolidation) คือ การที่ดินมีการระบายน้ำออกเมื่อตัวอย่างดินมีหน่วยแรงมากระทำซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างดินเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการยุบตัวของดิน (Consolidation settlement) สาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวเพราะเมื่อน้ำที่อยู่ภายในชั้นดินไหลซึมออกมาจะทำให้แรงดันน้ำและปริมาตรของดินลดลงส่งผลให้เกิดการทรุดตัว การทรุดลักษณะนี้จะเกิดหลังจากการทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) และจะเกิดในชั้นดินที่มีน้ำไหลซึมผ่านได้ช้า เช่น ดินเหนียว เป็นต้น

เราใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายนํ้าของ Terzaghi ซึ่งสามารถหาได้ทั้งค่าการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวแบบคายนํ้า โดยพิจารณาการไหลของน้ำในทิศทางเดียว (One-Dimensional consolidation) มีสมมติฐานดังนี้

1. ดินเหนียวทั้งชั้นเป็นดินที่มีเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้น (Homogeneous)
2. ดินเหนียวอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (100% Saturation)
3. การไหลเกิดขึ้นในทิศทางเดียวเท่านั้น คือ แนวตั้ง
4. การไหลแบบ laminar flow ดังนั้น Darcy's law และ Continuity equation ของการไหลของน้ำผ่านมวลดินสามารถใช้ได้

5. ระหว่างเกิดการทรุดตัวหรืออัดตัวคายน้ำ ค่า  $k$  และ  $m_v = \frac{a_v}{(1+e)}$  คงที่ “Low Strain Consolidation”
6. การทรุดตัวของมวลดินเกิดจากการไหลออกของน้ำในมวลดินเท่านั้น โดยเนื้อดินหรือเม็ดดินและน้ำจะเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกดอัดได้ (Incompressibility)



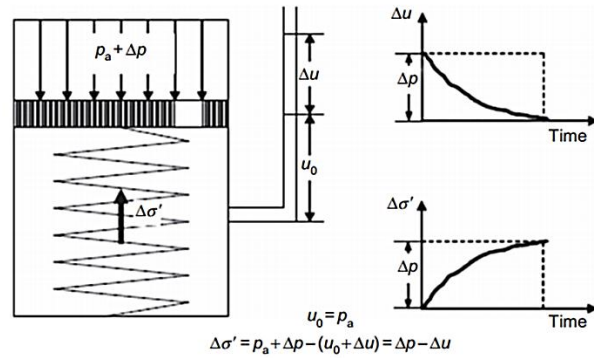
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของสปริงที่ใช้อธิบายการยุบตัวของดิน (Terzaghi, 1925)

จากภาพที่ 2.3 อธิบายการยุบตัวของดิน Terzaghi โดยสรุปไว้ว่า โครงสร้างดินเปรียบได้เสมือนสปริงภายใต้แรงเค้นกระทำ ( $\sigma$ ) เมื่อถูกแรงเค้นกระทำกับตัวอย่างดินอิมตัว ในชั้นแรก แรงเค้นจะส่งถ่ายไปยังส่วนที่เป็นของเหลวในมวลดิน ในที่นี้คือ น้ำ ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในมวลดินจะค่อย ๆ ถูกระบายออก ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินค่อย ๆ ลดลง แรงเค้นจะถูกถ่ายไปยังเม็ดดิน และเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งแรงดันน้ำส่วนเกินเท่ากับศูนย์ แรงเค้นทั้งหมดจะถูกถ่ายไปยังเม็ดดินทั้งหมดเรียกสถานะนี้ว่า จุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแบบปฐมภูมิ (Primary consolidation stage)

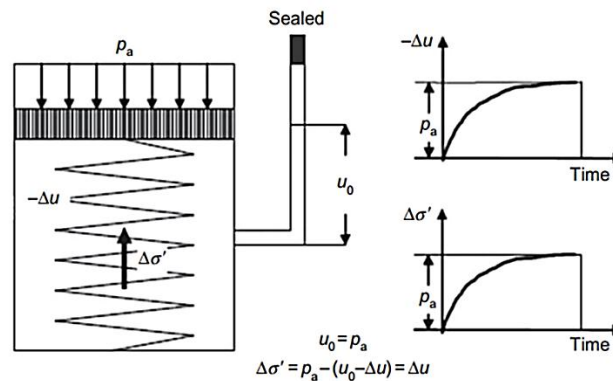
#### 2.4.2 การอัดตัวคายน้ำเนื่องจากการใช้แรงดันลบ (Vacuum Consolidation)

การใช้แรงดันลบ (Vacuum) เพื่อให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากการอัดตัวคายน้ำเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเค้นในแนวดิ่ง คือ จะไม่มีการให้แรงเค้นที่ผิวดินเพื่อบีบอัดน้ำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินแล้วไหลออกมาจากมวลดิน แต่จะเป็นการใช้แรงดันน้ำที่มีค่าเป็นลบไปเพิ่มค่าความเค้นอัดประสิทธิผลตามสมการที่ 2.1 ทำให้น้ำในดินออกมา Chu, Yan, & Indraratna, 2008 ใช้รูปที่ 2.4 อธิบายความแตกต่างของวิธีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเค้นประสิทธิผลระหว่างการใช้แรงดันลบกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดในแนวดิ่ง





(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 แบบจำลองการอัดตัวคายน้ำโดยใช้สปริง (ก) ใช้ระบบให้น้ำหนักกดทับ (ข) ใช้ระบบให้แรงดันลบ (Chu & Yan, 2005)

### 2.5 นิยามของดินที่มีการประกอบตัวใหม่ (Reconstituted clay)

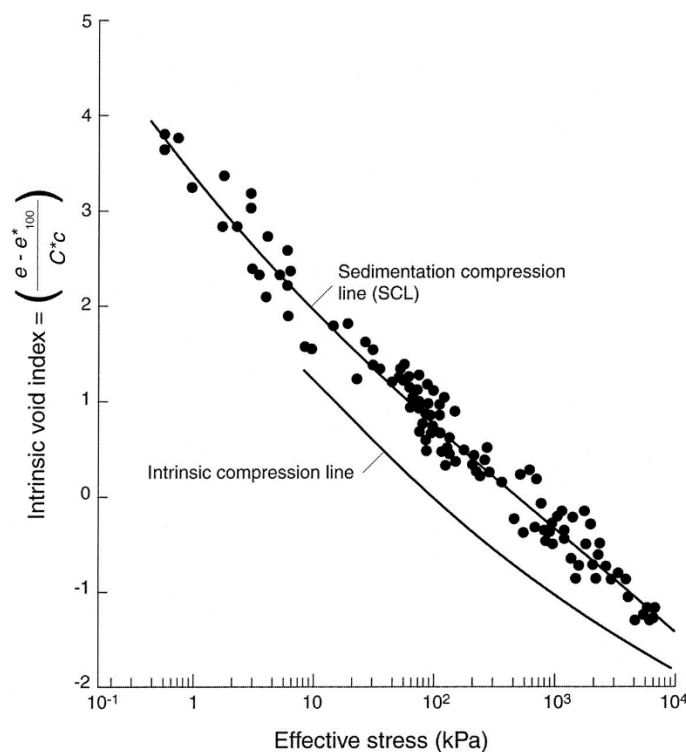
ดินเหนียวอ่อนที่มีการประกอบตัวใหม่ (Reconstituted clay) หมายถึง ดินเหนียวอ่อนที่ถูกผสมด้วยปริมาณน้ำที่มีค่ามากกว่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit) ถึง 1.5 เท่าของขีดจำกัดของเหลว แล้วทำการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติ (Burland, 1990) โดยเทอมของ Intrinsic จะถูกใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่ทำการประกอบตัวใหม่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

ค่าพารามิเตอร์  $I_p$  ในรูปที่ 2.5 สามารถใช้เปรียบเทียบการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนธรรมชาติและดินเหนียวอ่อนที่ทำการประกอบตัวใหม่ เมื่อพิจารณาส่วนที่มีการอัดตัวคายน้ำตามปกติโดยอัตราส่วนช่องว่าง  $e_0$  ซึ่งอยู่ภายใต้ความเค้นประสิทธิผล ค่าดัชนีช่องว่างหาได้โดยสมการที่ 2.2

$$I_{v0} = \frac{e + e_{100}^*}{C_c^*} \quad (2.2)$$

โดยที่  $e_{100}^*$  และ  $C_c^*$  หาได้จากการทดลองการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test)

เมื่อพิจารณาการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติและดินที่มีการอัดตัวจากการประกอบตัวใหม่ได้ Skempton (1944) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 2-7 เส้นตรงที่ถูกสร้างจากผลของการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติซึ่งพล็อตจากค่า  $I_{v0}$  และ  $\log \sigma'_v$  เรียกเส้นตรงเส้นนี้ว่า Sedimentation compression line (SCL) ส่วนเส้นตรงที่ถูกสร้างขึ้นมาจากดินประกอบตัวใหม่เรียกว่า Intrinsic compression line (ICL)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้น intrinsic compression line (ICL) กับ sedimentation compression line (SCL) (Burland 1990)

จากภาพที่ 2.5 สามารถสังเกตได้ว่าในช่วงตั้งแต่ค่า  $\sigma'_v$  เท่ากับ 100-1,000 kPa เส้นตรงจากการอัดตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ (SCL) และเส้นตรงจากการอัดตัวเนื่องจากการประกอบตัวใหม่ (ICL) มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่ขนานกัน ซึ่งค่าความเค้นประสิทธิผลของดินที่มีการตกตะกอนตามธรรมชาติจะมีค่าสูงกว่าความเค้นประสิทธิผลของดินที่มีการประกอบตัวใหม่ประมาณ 5 เท่า ซึ่งเกิดจากความแตกต่างใน

เรื่องโครงสร้าง (Fabric) ของเม็ดดินและการยึดเหนี่ยวกัน (Bonding) ระหว่างเม็ดดิน โดยผลกระทบอันเกี่ยวเนื่องจากโครงสร้างดินได้ถูกทำการศึกษาครั้งแรก โดย Terzaghi (1925) และมีข้อเสนอแนะ Skempton (1944) พบว่าหลังจากที่ความดันเพิ่มขึ้นมากกว่า 1,000 kPa. แนวโน้มของ ICL และ SCL จะเข้ามาบรรจบกัน

## 2.6 การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)

การทดสอบหาค่ากำลังต้านแรงเฉือนของดินที่มีสภาพใกล้เคียงกับดินตามธรรมชาติมากที่สุดโดยเฉพาะงานเกี่ยวกับเสาเข็ม ฐานรากแบบกลม เป็นต้น เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนความดันบริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Confining pressure) ให้มีสภาพใกล้เคียงกับดินตามธรรมชาติที่อยู่ลึกลงไปจากผิวดินและสามารถควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลเข้าออกจากมวลดินได้สะดวก ทั้งนี้ยังสามารถหาได้ทั้งความเค้นรวม (Total stress) และความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) ของตัวอย่างดิน ซึ่งหลักการของ Triaxial test จะแตกต่างไปจาก Direct shear test ในการหาค่า Soil strength parameters ดังนี้

1. Triaxial test จะมีแรงดันตั้งฉากกับผิวของตัวอย่างดินเท่านั้น ส่วนมากแรงดันด้านข้างจะคงที่แล้วเพิ่มแรงดันด้านบนจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ
2. ระบายหรือแนวการวิบัติของตัวอย่าง ไม่สามารถกำหนดแนวการวิบัติได้ดังเช่นที่เกิดขึ้นใน Direct shear test และ
3. เปลี่ยนแปลงควบคุมน้ำทั้งแรงดันและการไหลของตัวอย่างดินทำได้สมบูรณ์ โดยอาศัย Drainage value และ Volume change indicator

ซึ่งการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน นี้สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. CU – TEST หมายถึง การทดสอบที่มีขั้นตอนการยุบตัวของตัวอย่างดิน (Consolidation) ก่อนแล้วจึงเพิ่มน้ำหนักกระทำตามแนวแกน โดยไม่ยอมให้มีการระบายน้ำ (Undrain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

2. CD – TEST หมายถึง การทดสอบที่มีขั้นตอนการอัดตัวของตัวอย่างดิน (Consolidation) ก่อนแล้วจึงเพิ่มน้ำหนักกระทำตามแนวแกน โดยยอมให้มีการระบายน้ำ (Drain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

3. UU –TEST หมายถึง การทดสอบที่ไม่มีขั้นตอนการอัดตัวของตัวอย่างดิน (Unconsolidation) และไม่ยอมให้มีการระบายน้ำ (Undrain) ออกจากตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนกดตามแนวแกน

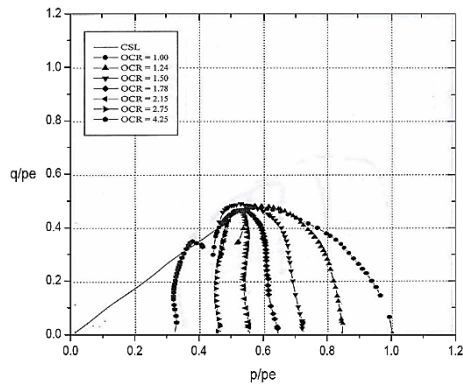
ในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี การทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Axisymmetric triaxial compression test ) นั้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดิน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) รวมไปถึงการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) ของการทดสอบค่าการรับกำลังดิน ในแบบสามแกนนั้นจะเป็นแบบ

สมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) ส่วนของการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อหาเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดังตามตารางที่ 2.2 และผลการทดสอบ ดังรูปที่ 2.6 ถึง 2.8

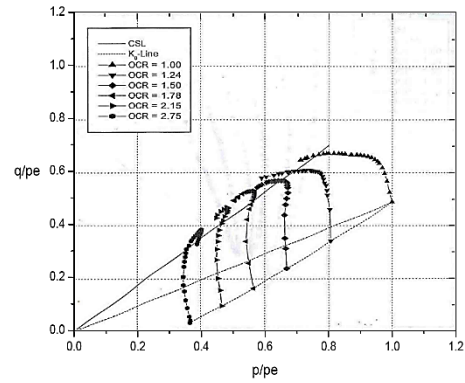
ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ที่แตกต่างกัน

Author	Test description				
	OCR	$p_{max}$ (kpa)	$q/p_e$	$p/p_e$	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°

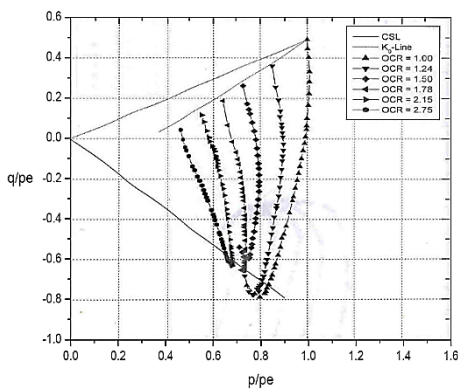
Casey (2014) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยเครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนแรงดันสูง (High pressure triaxial) ดังรูปที่ 2.9 โดยนำตัวอย่างไปทำลายโครงสร้างเสียก่อน แล้วจึงประกอบตัวใหม่ (Re-sedimentation) วิธีการเริ่มจากนำตัวอย่างดินจะถูกตากในที่ร่มเพื่อลดความชื้นของดิน จากนั้นนำมาบดแล้วนำดินมาผสมน้ำอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.10 (ก) ใช้แรงดันที่เป็นลบแก่ตัวอย่างดินนี้เพื่อไล่ฟองอากาศ ดังรูปที่ 2.10 (ข) แล้วจึงนำเอาตัวอย่างดินนี้ไปทำการอัดตัวคายน้ำ ใช้ค่าความเค้นในแนวตั้งเริ่มต้นที่ 30 kPa โดยจะแบ่งแรงเค้นเป็นสองช่วง คือ ที่แรงเค้นไม่เกิน 250 kPa ดังรูปที่ 2.11 (ก) และช่วงที่สองจะเป็นแรงเค้นที่มากกว่า 250 - 10,000 kPa โดยอุปกรณ์ชิ้นนี้ถูกเรียกว่า “Pneumatic Actuator” ดังรูปที่ 2.11 (ข) และทำการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธี “ $K_0$ - Consolidation” เพื่อนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) โดยใช้แบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.5 มม. มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) เท่ากับ 3 เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง ดินตัวอย่างจะถูกนำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรงและขนาดตามต้องการและนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือน ซึ่งตัวอย่างนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain triaxial test)



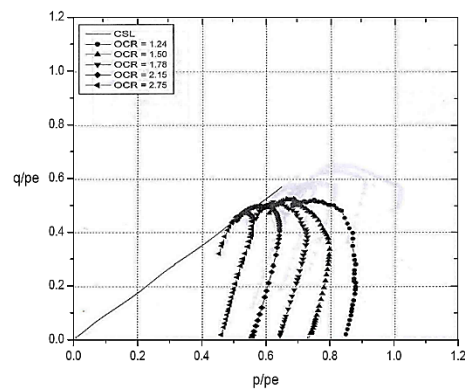
(ก)



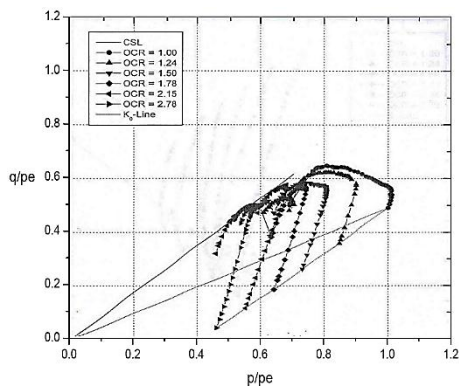
(ข)



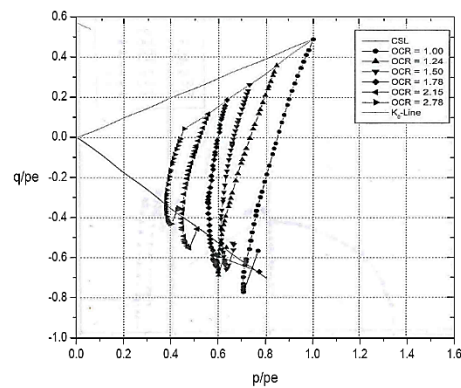
(ค)



(ง)

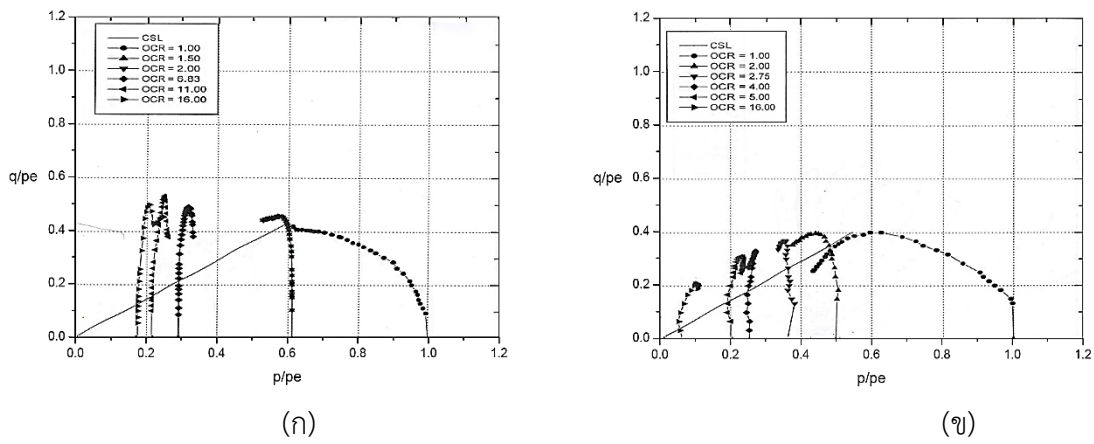


(จ)

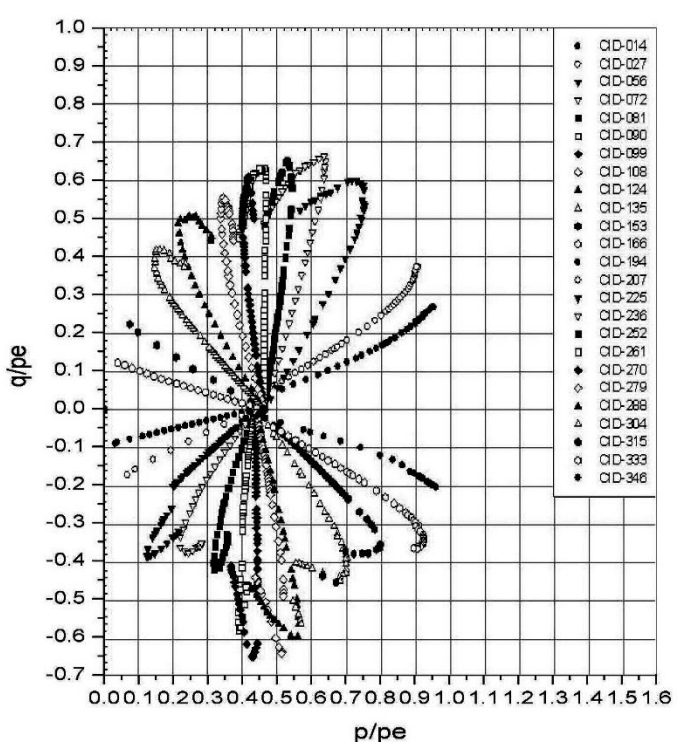


(ฉ)

รูปที่ 2.6 ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) ที่ทดสอบโดย Kim (1991): (ก) CIU Tests, (ข)  $CK_0UC$  Tests, (ค)  $CK_0UE$  Tests, (ง) CID Tests, (จ)  $CK_0DC$  Tests, (ฉ)  $CK_0DE$  Tests



รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบ normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) ที่ทดสอบโดย Gurung (1992): (ก) CIP Tests, (ข) CIU Tests



รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบ normalized stress paths ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯภายใต้เส้นทางของหน่วยแรง (stress path) ที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) โดย CIDE Tests นั้นทดสอบโดย Anuchit ในปี 1998 และ CIDE Tests ทดสอบโดย Navanneethan ในปี





รูปที่ 2.9 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบแรงดันสูง (Casey, 2014)

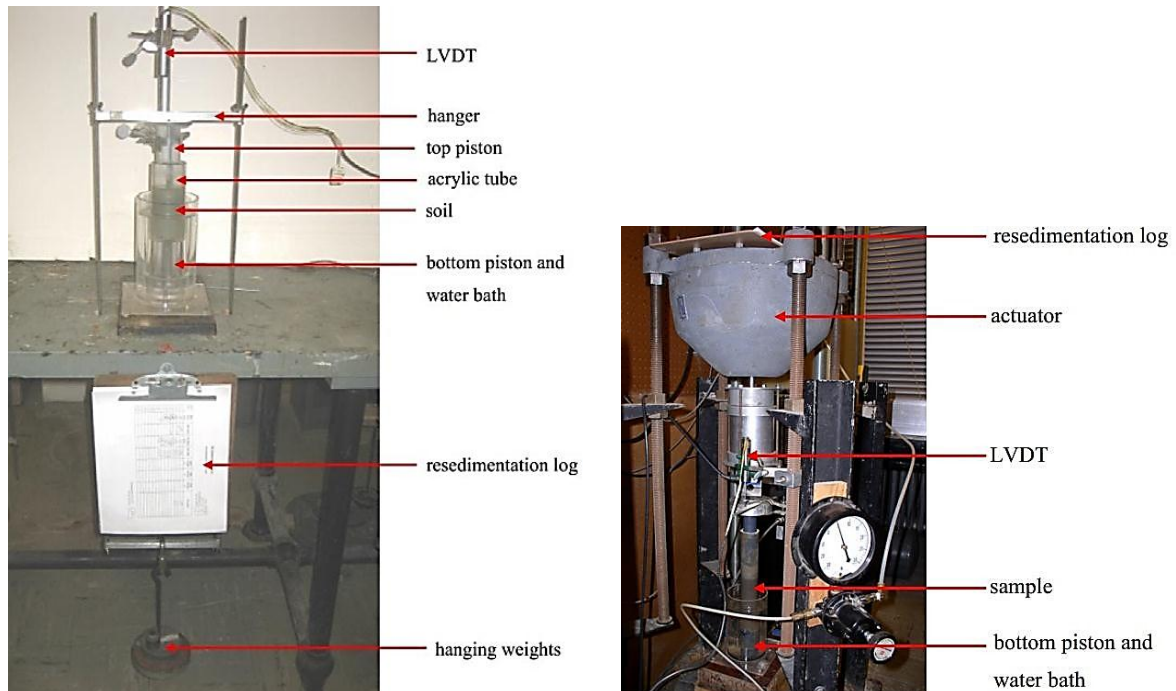


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 (ก) ดินที่บดละเอียดแล้วมาผสมเข้ากับน้ำ (Casey, 2014) (ข) ให้ความร้อนให้กับตัวอย่างดินเพื่อ  
สลایฟองอากาศ (Casey, 2014)



รูปที่ 2.11 (ก) เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้ไม่เกิน 250 kPa (ข) เครื่องมือการทดสอบยุบอัดตัวคายน้ำที่ให้แรงกดได้สูงสุด 10,000 kPa (Casey, 2014)

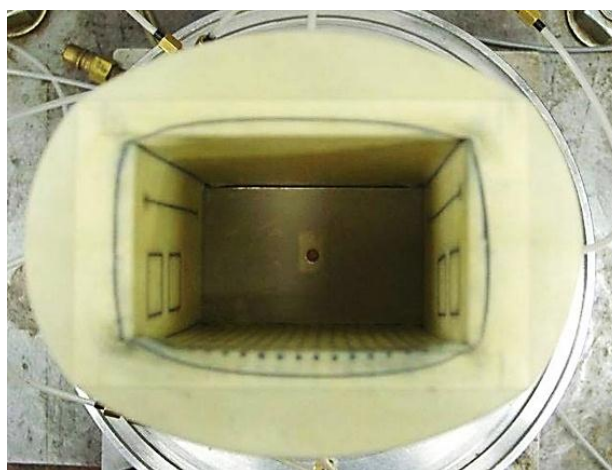
## 2.7 การทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain test)

การทดสอบหาค่าการรับกำลังดินในแบบสามแกน (Axisymmetric triaxial compression test) นั้นได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาคุณสมบัติการรับกำลังและการเสียรูปของดิน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) รวมไปถึงการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยสภาวะแวดล้อม (Boundary condition) แบบสมมาตรรอบแกนเดียว (Axisymmetric condition) ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดกับงานบางส่วนโดยเฉพาะในงาน ค้นดิน งานกำแพงกันดิน และงานอุโมงค์ ซึ่งมีสภาวะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดของงานดังกล่าวเป็นแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) จึงได้มีการพัฒนาการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive model) เพื่อให้สภาวะแวดล้อมของความเค้นและความเครียดสอดคล้องกับงานก่อสร้างจริงมากที่สุด ปัจจุบันมีอยู่สองกลุ่มใหญ่ ในการทดสอบการรับกำลังแรงเฉือนในสภาวะความเครียดในระนาบคือ การทดสอบแบบความเครียดในระนาบของดินทราย (Plane strain test in sand) และการทดสอบแบบความเครียดในระนาบของดินเหนียว (Plane strain test in clay)

Kongkitkul (2004) ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบรับแรงเฉือนแบบความเครียดระนาบพร้อมทั้งศึกษาลักษณะแถบแรงเฉือนของตัวอย่างดินทราย Toyoura โดยใช้ตัวอย่างมีขนาดกว้าง 62 มม. ยาว 96 มม.



และสูง 120 มม. ใช้อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นที่ 0.665 และใช้ถุงยางที่มีขนาดความหนา 0.3 มม. เพื่อเป็นแยก ระหว่างตัวอย่างดินกับอุปกรณ์การทดสอบและใช้ซิลิโคนกรีฑาระหว่างผิวถุงยางกับตัวอย่างเพื่อลดแรงเสียดทาน จากนั้นนำโมลมาประกอบกับชุดเครื่องมือ ให้แรงดันลบกับตัวอย่างลดแรงเสียดทาน แล้วจึงนำโมลเข้ามา ประกอบกับชุดเครื่องมือแล้วให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุงยางที่ 20 kPa เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ใน รูปทรงสี่เหลี่ยมตามแบบของโมล ดังรูปที่ 2.12 จากนั้นนำตัวอย่างลงโมลผ่านชุดตะแกรงร่อน ดังรูปที่ 2.13 แล้วจึงทำการถอดโมลออก ทำการติดตั้งผนังด้านข้างเพื่อสร้างสภาวะความเครียดในระนาบอุปกรณ์วัดคุม ต่างๆให้กับชุดทดสอบก่อนทำการเฉือนตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.14 ในการทดสอบนี้จะใช้แรงดันลบเริ่มต้นที่ 30 kPa ส่วนการหาความเครียดของของตัวอย่างจะใช้วิธีถ่ายภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล ใช้แรงกดในแนวตั้ง เริ่มต้นเท่ากับ 50 kN และใช้ชุดเกียร์ขับเคลื่อนโดยที่ชุดเกียร์นี้ถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ (Tatsuoka, Santucci de Magistris) และใช้อัตราการเคลื่อนที่เท่ากับร้อยละ 0.04 ต่อนาที พบว่ากราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นในแนวตั้งกับความเครียดระนาบเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการ วิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ที่จุด A, B, C ของทั้งสองเส้นมีค่าแรงเค้นในแนวตั้งที่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเมื่อทำ การวิเคราะห์แถบแรงเฉือนที่จุดเดียวกันนี้ จะเกิดแถบแรงเฉือนในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 2.16



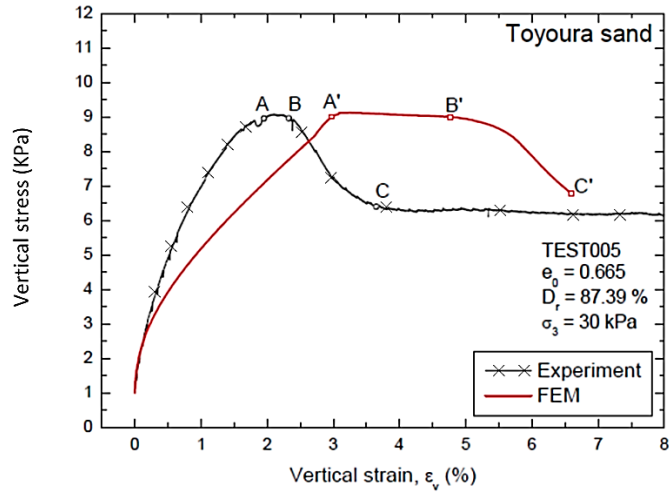
รูปที่ 2.12 ประกอบโมลเข้ากับอุปกรณ์และให้แรงดันลบกับผิวสัมผัสระหว่างโมลกับถุงยาง (Kongkitkul, 2004)



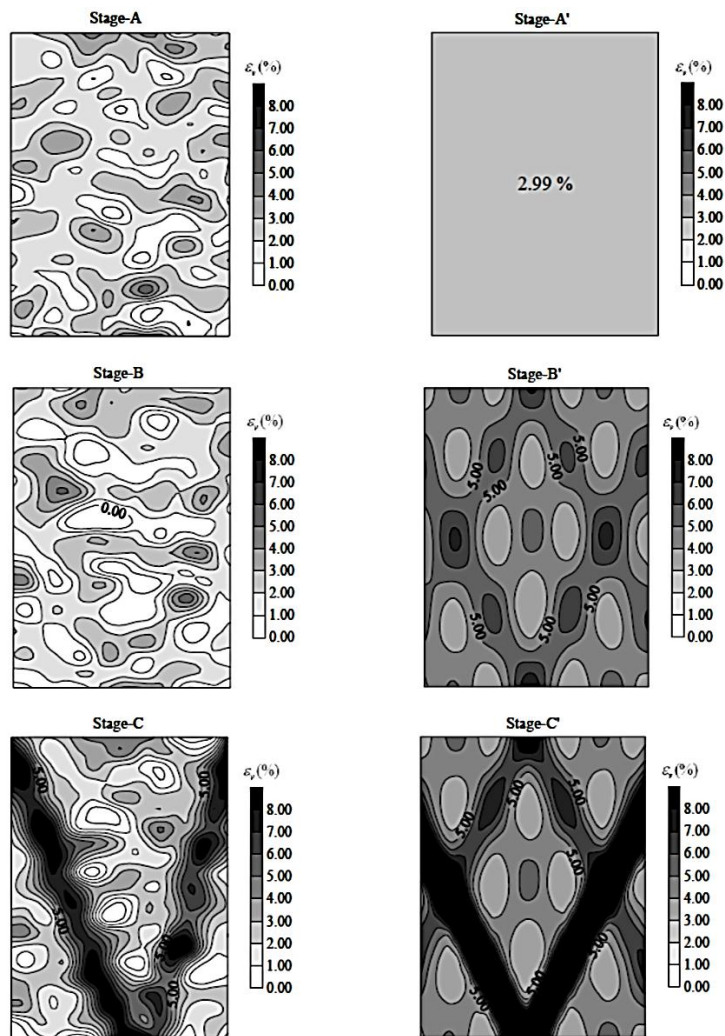
รูปที่ 2.13 ติดตั้งตะแกรงร้อนเข้ากับด้านบนของตัวอย่าง (Kongkitkul, 2004)



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Kongkitkul, 2004)

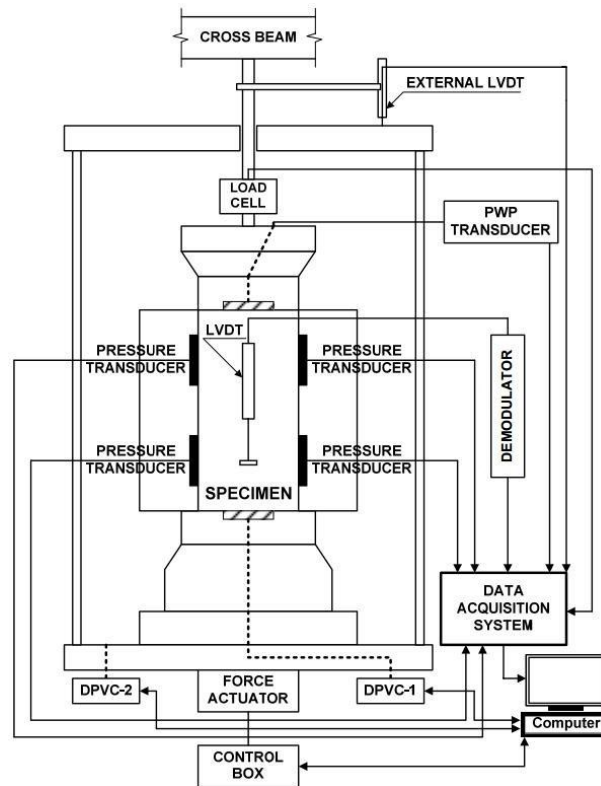


รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของทราย

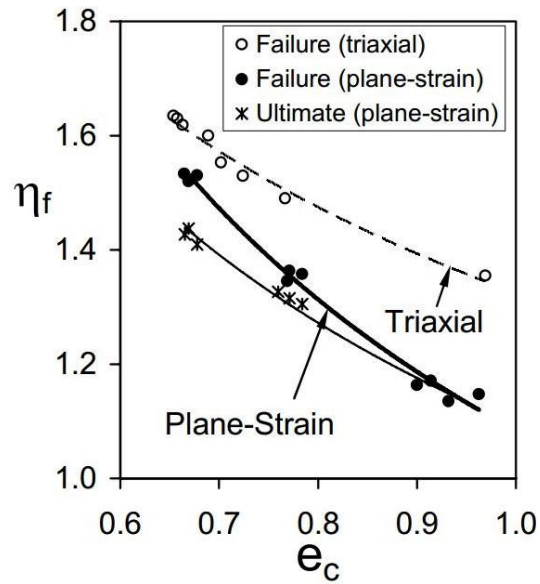


รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบจากการทดลองและทางวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

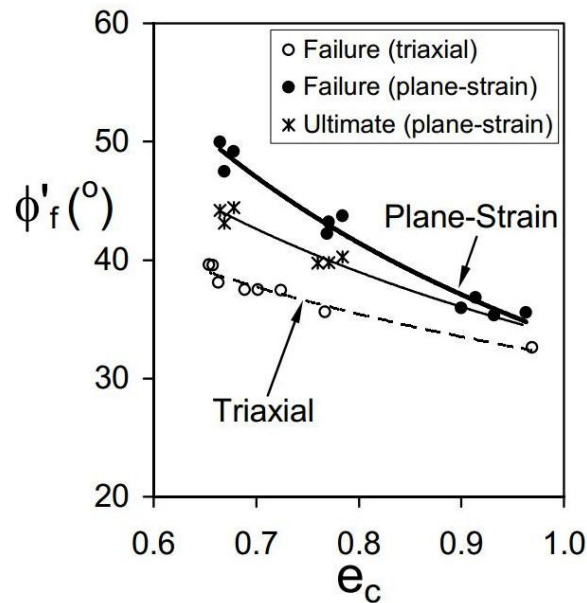
Wanatowski and Chu (2007) ทำการทดสอบการหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) โดยใช้ทราย Changi ขนาดกว้าง 60 มม. ยาว 60 มม. และสูง 120 มม. ใช้การอัดตัวคายน้ำแบบ  $K_0$  – Consolidation ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันเข้ากับตัวอย่างดังรูปที่ 2.17 เพื่อวัดค่าแรงดันด้านข้างของตัวอย่างดิน จากนั้นใช้แผ่นประกบแนบเข้ากับตัวอย่าง เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบขึ้น ข้อเสียการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดินแบบนี้ คือ จะเกิดผลกระทบเนื่องจากรอยต่อของอุปกรณ์วัดแรงดันกับแผ่นประกบด้านข้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หลังจากประกอบแผ่นด้านข้างเสร็จสิ้นจึงทำการเฉือนตัวอย่างในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทดสอบแบบรอบแกนสมมาตรอยู่เล็กน้อยแต่จะมีค่าตรงกันข้ามในเทอมของค่ามุมเสียดทาน ดังรูปที่ 2.18 และดังรูปที่ 2.19 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมทำการทดสอบ (Wanatowski & Chu, 2007)



รูปที่ 2.18 อัตราส่วนของความเค้นของการทดสอบในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบและแบบสมมาตรของความเค้นของการทดสอบในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง (wanatowski & Chu, 2007)

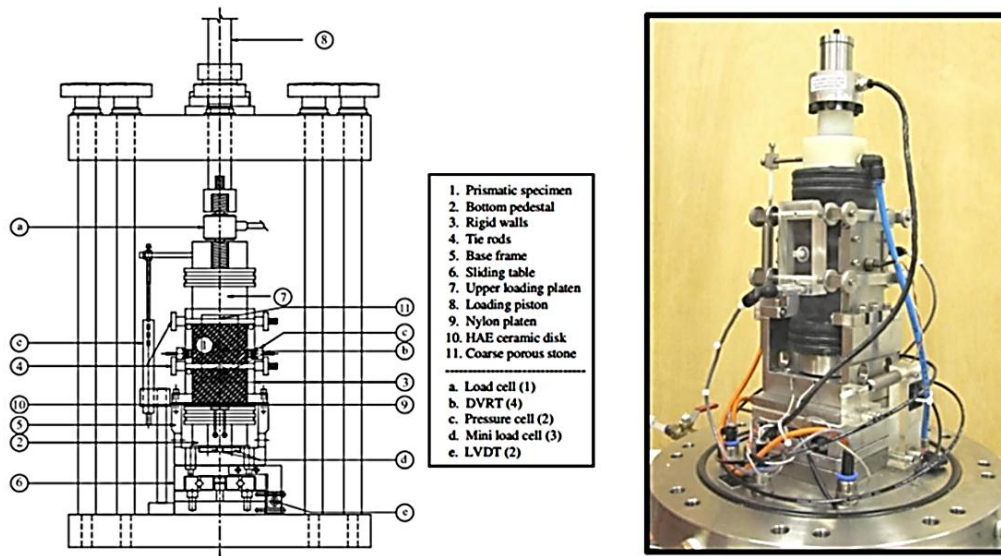


รูปที่ 2.19 มุมเสียดทานประสิทธิผลของการทดสอบในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบและแบบสมมาตรรอบแกนกับอัตราส่วนช่องว่าง (wanatowski & Chu, 2007)

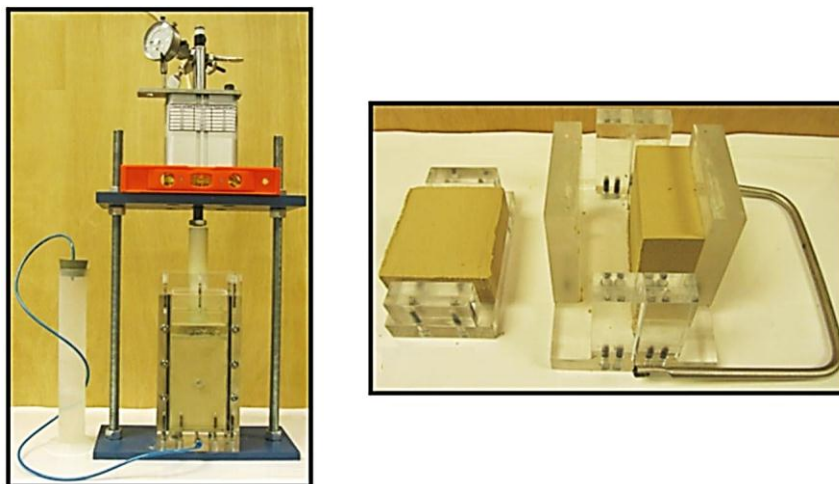
José, Laureano, and Arcesio (2012) ทำการทดสอบดินในสถานะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบด้วยเครื่องทดสอบ Triaxial ดังรูปที่ 2.20 โดยใช้ดินที่เตรียมขึ้นระหว่าง Silty sand 75% และ Kaolin



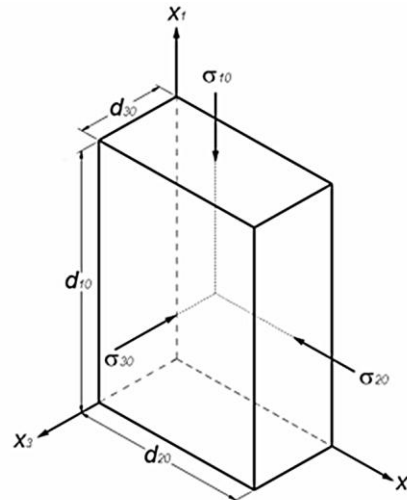
clay 25% เริ่มด้วยการทำโครงสร้างดินใหม่ โดยกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้วจึงค่อยทำการตัดแต่ง (Trim) ตัวอย่างดิน ดังรูปที่ 2.21 เพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างกว้าง 30 มม. ยาว 60 มม. และสูง 90 มม. ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในลักษณะนี้ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนดินและอีกประการหนึ่งคือผิวของตัวอย่างดินจะไม่สามารถแนบชิดกับผิวของแผ่นประกบได้อย่างสมบูรณ์ จึงส่งผลให้ค่าของการทดสอบในช่วงต้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบโดยใช้เครื่องทดสอบ Biaxial (Jose et al., 2012)



รูปที่ 2.21 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างและการตัดแต่งตัวอย่าง (Jose et al., 2012)



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างดินหลังการตัดแต่งมีขนาด 90 x 60 x 30 มม. (Jose et al., 2012)

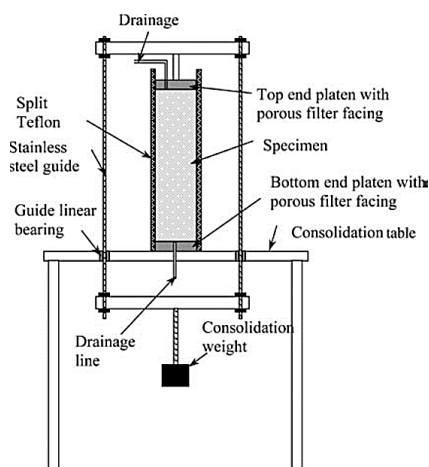
Hambly (1969) ศึกษาผลกระทบของเส้นทางของหน่วยแรง (Stress path) ต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินเหนียว Kaolin ต่อมา Vaid and Campanella (1974) ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมการเสียรูปของดินที่ไม่ถูกรบกวนโดยใช้เครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) เปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบ (Plane strain condition) พบว่า ตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) สูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนแต่ไม่ได้มีการกล่าวถึงลักษณะการวิบัติ

Sheeran and Krizek (1971) ได้ทำการศึกษาข้อดีและข้อเสียของปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในดินเหลวประกอบตัวใหม่ พบว่าดินเหลวที่ใช้ปริมาณน้ำที่สูงจะมีข้อดีในเรื่องของการทำงาน ซึ่งสามารถบรรจุดินเข้าแบบได้ง่ายและสามารถไล่อากาศออกได้ง่าย อีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำอันเนื่องมาจากการบรรจุดินเข้าแบบอย่างไรก็ตาม สำหรับดินเหลวที่มีปริมาณน้ำน้อยจะมีข้อดีในการช่วยลดเวลาการอัดตัวคายน้ำ

Khalid and Ibrahim (2007) ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวประกอบตัวใหม่ระหว่างดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) กับดินที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain test) โดยเริ่มจากการทำลายโครงสร้างดินเดิมก่อนการประกอบตัวใหม่ ด้วยการผสมเข้ากับน้ำที่ปริมาณความชื้น 2-2.5 เท่าของขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) จากนั้นจึงเอาดินเหลวไปประกอบตัวใหม่โดยผ่านการอัดตัวคายน้ำ แล้วจึงค่อยนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) จะใช้แบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. สูง 483 มม. และแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 48 x 60 x 270 มม. สำหรับตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบ

ความเครียดในระนาบ (Plane strain test) โดยแบบที่นำมาใช้ในการอัดตัวคายน้ำนั้นจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ผนังด้านข้างนั้นจะมีรูพรุนเพื่อเร่งการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินโดยจะใช้ค่าความเค้นในแนวตั้งที่ 180 kPa โดยระบบการให้แรงเค้นนั้นดังรูปที่ 2.23

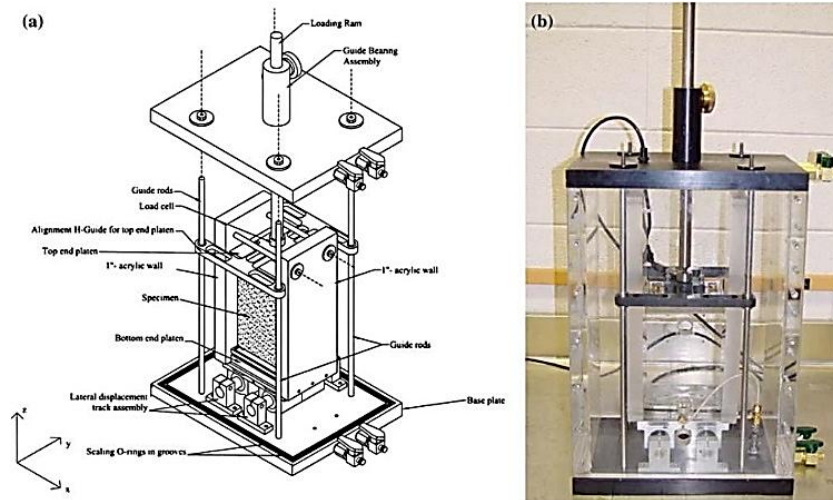
เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงดินตัวอย่างจะถูกนำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรงและขนาดตามต้องการและนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยดินตัวอย่างที่จะถูกนำไปทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain test) จะทำด้วยเครื่องมือพิเศษที่มีชื่อว่า “Louisiana Plane Strain Apparatus” (Khalid & Ibrahim, 2007) ดังรูปที่ 2.24 และทำการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธี  $K_0$ -Consolidation” ก่อนทำการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ การทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวนั้นจะทำโดยการระบายน้ำ (De-aired water) ผ่านตัวอย่างดินเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสดินกับถุงยาง (Rubber membrane)



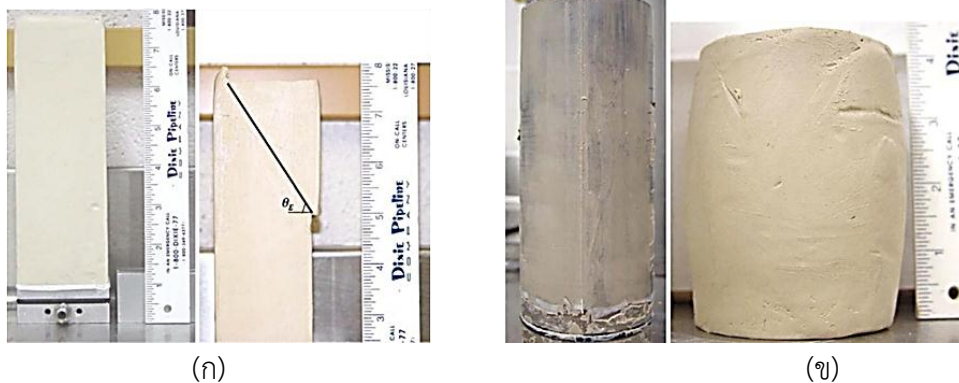
รูปที่ 2.23 ระบบการให้แรงเค้นในแนวตั้งเพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ภายใต้กระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Khalid & Ibrahim, 2007)

จากผลการทดสอบว่าการทดสอบการรับกำลังของดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain compression test) จะเห็นแนวแถบการเฉือนได้อย่างชัดเจน ส่วนการทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกนที่บางกรณีไม่เกิดแนวแถบการเฉือนได้อย่างชัดเจนส่วนการทดสอบการรับกำลังดินในแบบสามแกนที่บางกรณีไม่เกิดแนวแถบการเฉือนหลังการวิบัติของดินที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ก) และ (ข) และยังพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบแบบความเครียดในแนวระนาบจะสูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนประมาณ 60% ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับ Vaid and Campanella (1974) แต่ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการทดสอบแบบสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบจะมีค่าน้อยกว่าที่ทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบดินแบบแรงอัดสามแกนประมาณ 50%





รูปที่ 2.24 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะความเครียดในระนาบ  
(Khalid & Ibrahim, 2007)

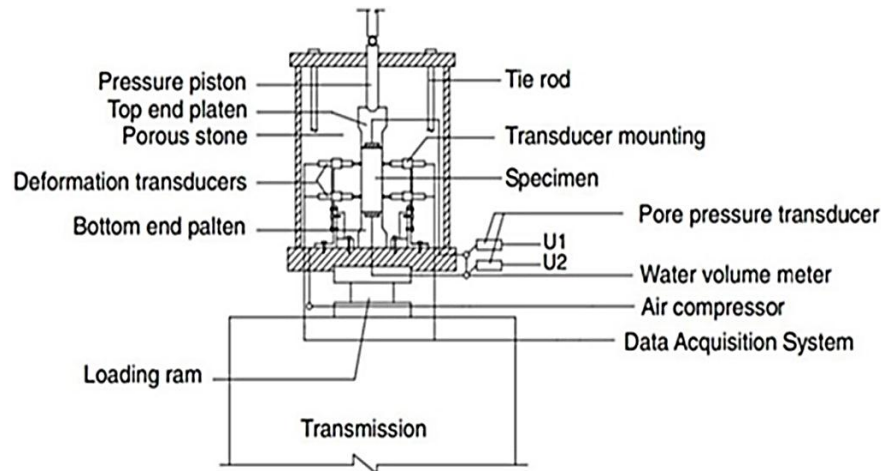


รูปที่ 2.25 (ก) แถบแรงเฉือนของดินตัวอย่างที่ทดสอบด้วยการทดสอบแบบความเครียดในระนาบ  
(Plane strain test) (ข) รูปแบบการวิบัติของดินด้วยการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)  
(Khalid & Ibrahim, 2007)

Juyun, Qihui, Bei, and Xihong (2012) ทำการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนในสถานะแวดล้อมแบบ plane strain โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบ ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งใช้แรง Confining pressure เป็นแรงดันบวกแบบการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนที่ต่างกันตั้งแต่ 25-200 kPa ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด 70 x 70 x 25 มม. ทำการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

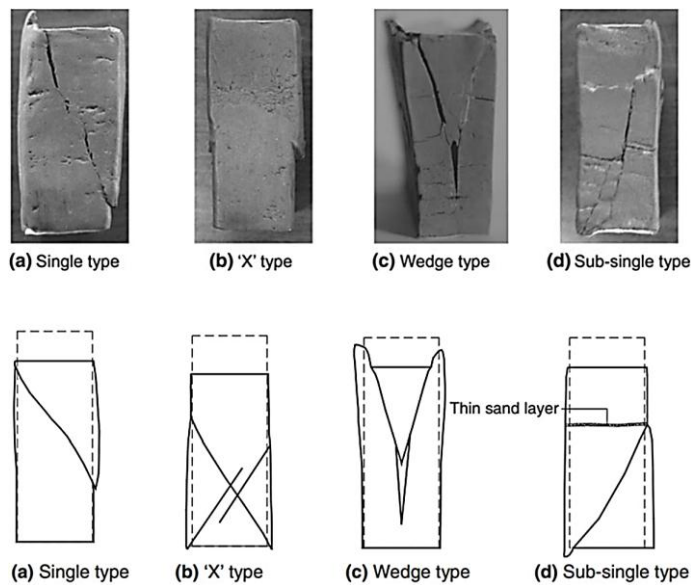
จากผลการทดสอบพบว่า เกิดแถบแรงเฉือนเกิดขึ้นด้วยกัน 4 แบบ คือ Single type, 'X' type, Wedge type, & Sub - single type ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งการเกิดแถบแรงเฉือนในแต่ละแบบจะมีการเคลื่อนตัวระหว่างส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างที่มีความคล้ายคลึงกัน เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นที่ส่วนบนหรือ

ส่วนล่างของตัวอย่างการเคลื่อนตัวด้านข้าง ด้านที่เกิดแถบแรงเฉือนจะมีค่ามากกว่าด้านที่ไม่เกิดแถบแรงเฉือน แต่เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนที่ตรงกลางของตัวอย่างการเคลื่อนตัวทั้งสองส่วนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันยกเว้นการเกิดแถบแรงเฉือนแบบ Wedge type ที่จะเกิดขึ้นได้เฉพาะด้านบนของตัวอย่างเท่านั้นจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างในส่วนบนมากกว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างในส่วนล่างเสมอ ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบสามารถวัดได้เมื่อเกิดแถบแรงเฉือนขึ้นแบบ Single type และ 'X' type ดังรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 นอกเหนือจากการเกิดแถบแรงเฉือนทั้งสองแบบนี้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก



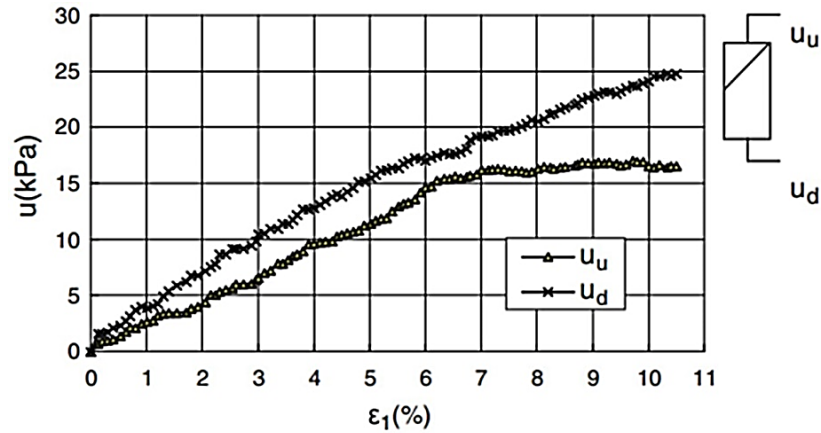
รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ

(Juyun et al., 2012)

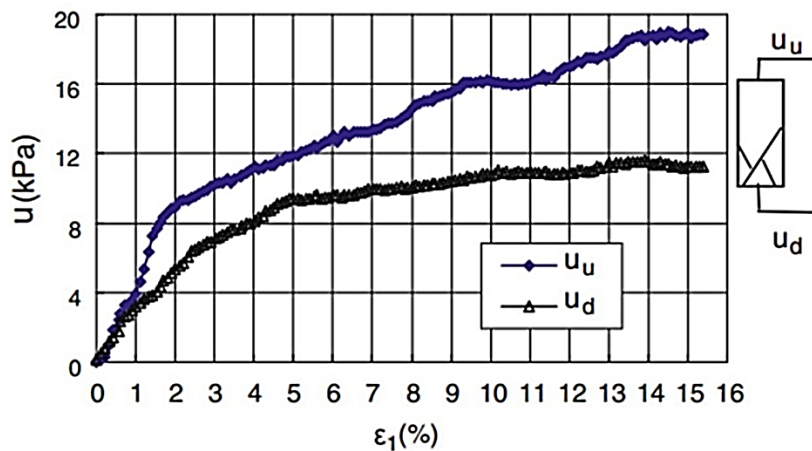


รูปที่ 2.27 แถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดใน

ระนาบ (Juyun et al., 2012)



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ Single type (Juyun et al., 2012)



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดแถบแรงเฉือนแบบ 'X' type (Juyun et al., 2012)

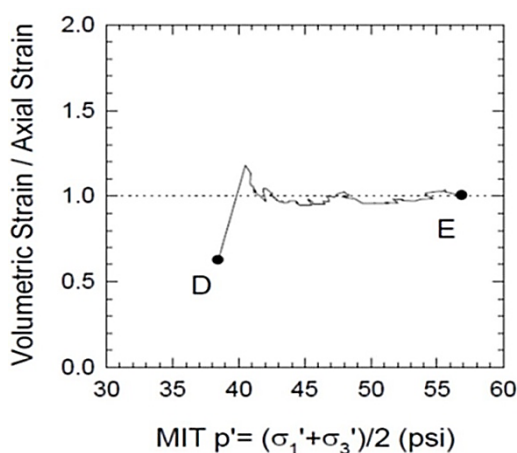
## 2.8 สัมประสิทธิ์แรงดันดินที่สภาวะหยุดนิ่ง

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินที่สภาวะหยุดนิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest,  $K_0$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (Effective horizontal stress) ต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) ของมวลดินซึ่งอยู่ในสภาวะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างข้าง โดยระนาบหลักของความเค้น (Principal planes) อยู่ในระนาบราบและระนาบตั้งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สภาวะหยุดนิ่ง จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ ยกเว้นในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สภาวะหยุดนิ่งอาจมีค่าสูงถึงประมาณ 3.0 กรณีสำหรับทรายค่า

สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 สำหรับทรายแน่น และ 0.5 สำหรับทรายหลวม

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินนั้นสามารถหาค่าได้ทั้งจากการทดสอบในสนาม (In-situ tests) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นโดยทั่วไปจะสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากการทำ  $K_0$ -Consolidated triaxial test ซึ่งเครื่องทดสอบจะต้องปรับความดันที่บริเวณผิวของมวลดินด้านข้าง (Cell pressure or Confining reasure) เพื่อให้ไม่เกิดความเครียดด้านข้าง (Lateral strain = 0) ในขณะที่เนื้อตัวอย่างดินด้วยอัตราคงที่แบบระบายน้ำ ดังนั้นความเครียดในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับความเครียดเชิงปริมาตร (Vertical strain = Volume strain) โดยระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) จะสมมติให้ดินตัวอย่างนั้นยังคงรูปอยู่ในทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และเท่ากันตลอดความสูงซึ่งเป็นเรื่องที่น่าพิศวงได้ยาก

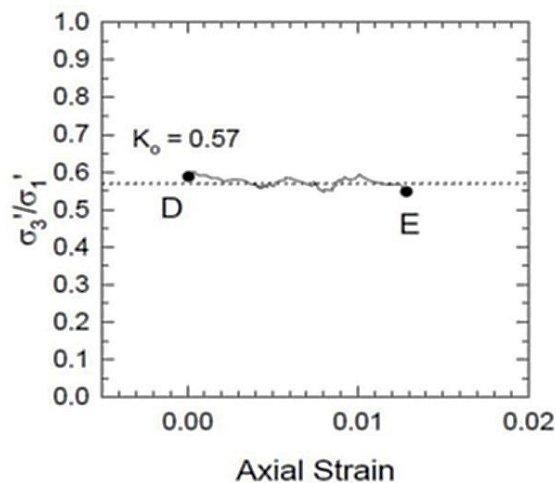
Baxter (2006) ได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial tests) ด้วยวิธี  $K_0$ -Consolidation undrained triaxial ระหว่างจุด D ถึงจุด E ดังรูปที่ 2.30 พบว่าการปรับแรงดันด้านข้าง (Cell pressure or Confining pressure) เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain เท่ากับ 1 นั้นเป็นไปได้ยากมากโดยเฉพาะในช่วงต้น ( $38 < p' < 41$  psi) และในช่วงที่  $P' > 41$  psi ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain นั้นใกล้เคียง 1 และทั้งหมดนี้จะส่งผลถึงความแม่นยำในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินดังแสดงในรูปที่ 2.31 อีกทั้งการทดสอบนี้จะต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญเป็นอย่างมากในการทดสอบ



รูปที่ 2.30 อัตราส่วนระหว่าง Volumetric strain กับ Axial strain ระหว่างกระบวนการ  $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial tests (Baxter, 2006)

Seah and Lai (2003) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯแบบคงสภาพ (Undisturbed samples) ที่ความลึกไม่เกิน 8 ม. ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial test) โดยวิธี  $K_0$ -Consolidated undrained triaxial test และได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) ดังรูปที่ 2.32 และค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินอยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.607 จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งพบว่า รูปแบบสมการที่นำเสนอโดย Mayne and Kulhawy (1982) ดังสมการที่ 2.3 มีความเหมาะสมในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯทั้งในสภาวะอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) และในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay) โดยใช้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction,  $\phi'$ ) เท่ากับ  $20.5^\circ$

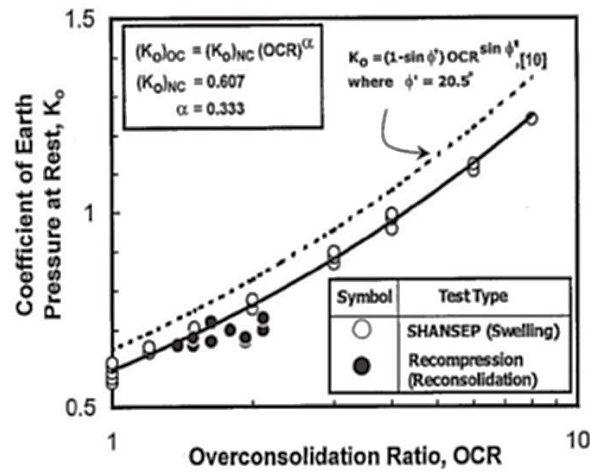
$$k_o = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad 2.3$$



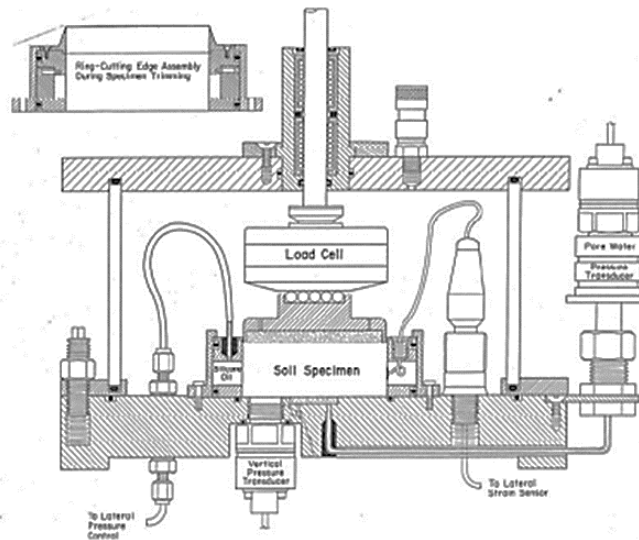
รูปที่ 2.31 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของดินจากการทดสอบ  $K_0$ -Consolidation ด้วยเครื่อง Triaxial test (Baxter, 2006)

เครื่องมือ Oedometer มีความพิเศษตรงที่มีวงแหวนภายในทำจาก Highly polished stainless steel และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของทรายเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vardhanabuhti, 2006) โดยใช้ตัวอย่างทราย คือ Ottawa sand, Lake Michigan Beach sand, และ Niigata sand ดังรูปที่ 2.33 เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและความสูงของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 76.2 มม. และ 25.4 มม. ตามลำดับ บริเวณกึ่งกลางของวงแหวนเป็น Diaphragm ที่มีความหนา 0.254 มม. และติดตั้ง Strain gauges เพื่อตรวจสอบ

การยืดหดตัว (Lateral deformation) ของ Diaphragm ซึ่งถูกควบคุมโดยแรงดันจาก Silicone oil chamber ที่ประกบติดกับวงแหวนภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้หลักการดังกล่าวในการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างของดิน



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งของดินกับค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) (Seah & Lai, 2003)



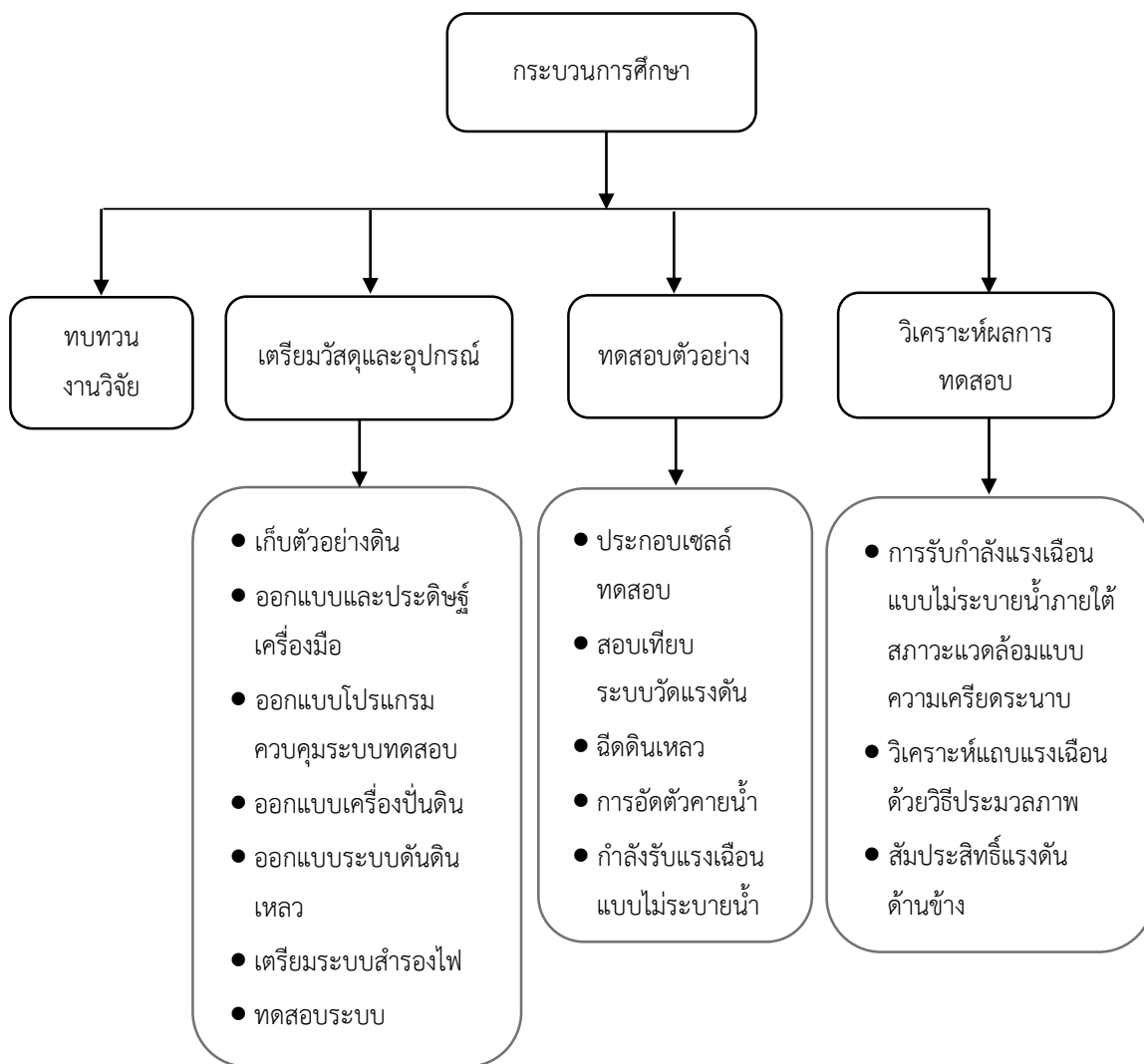
รูปที่ 2.33 เครื่องมือ Oedometer พิเศษ (Vardhanabhuti, 2006)

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาในกระบวนการของการทำงาน โดยขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน แสดงในแผนภาพ ดังต่อไปนี้

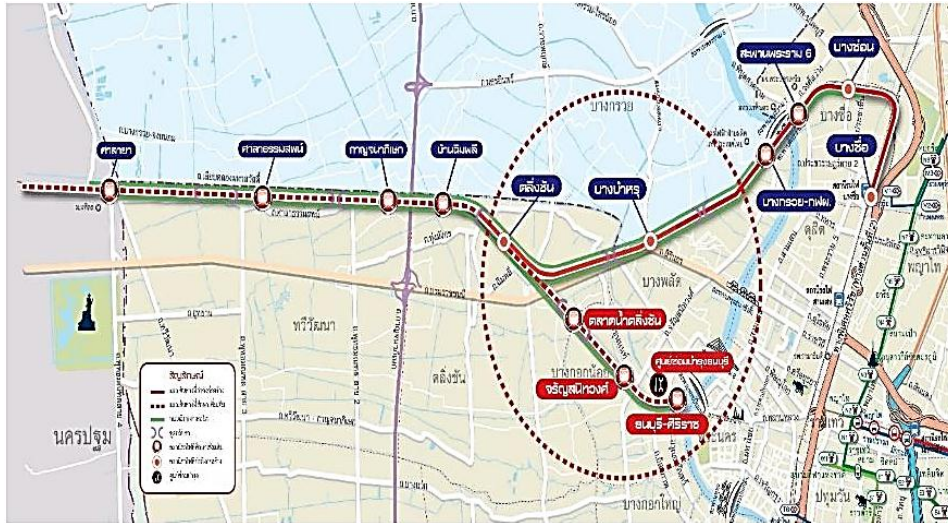


รูปที่ 3.1 ผังกระบวนการทำงาน



### 3.2 การจัดหาตัวอย่างดินเหนียว

ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัท ยูนิค เอ็นจิเนียริงแอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้รับเหมาในโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมือง (สายสีแดง) โดยขอเข้าไปเก็บตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ ซึ่งได้รับอนุญาตเนื่องจากปริมาณดินที่ขอนั้นมีปริมาณไม่มากนักและดินที่นำไปนั้นจะนำไปใช้เพื่อการศึกษาและวิจัย พื้นที่ที่เข้าไปเก็บตัวอย่างดินนั้นอยู่ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างสถานีกลางบางซื่อ ที่ชั้นความลึกของดินอยู่ที่ช่วงประมาณ 15 ม.



รูปที่ 3.2 แนวเส้นทางโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง

### 3.3 การพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติภายใต้สภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบมหาวิหิตยาลัยบูรพา

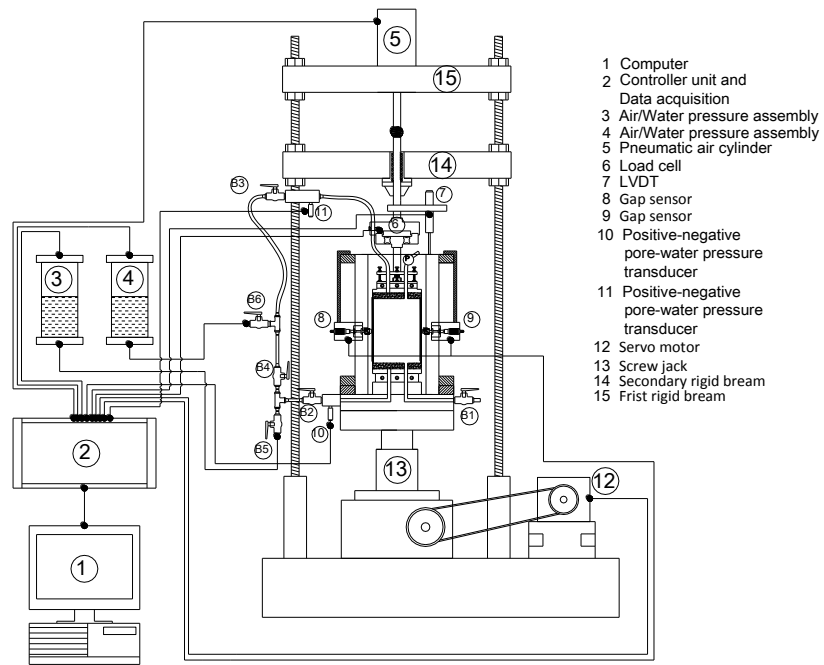
เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติภายใต้สภาวะแวดล้อมความเครียดพัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบสำคัญมีดังในรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีส่วนประกอบสำคัญคือ

#### 3.3.1 Plane strain cell

หัวใจสำคัญที่ต้องมีการออกแบบ plane strain cell ขึ้นมาใหม่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการสร้างโครงสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ด้วยการอัดตัวค้ำน้ำและทำการเชื่อมตัวอย่างดินพบอุปกรณ์เดียวกัน ซึ่งจะทำให้ไม่ต้องการตัดแต่งตัวอย่างและการเคลื่อนย้ายตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ส่งผลให้ตัวอย่างมีโครงสร้างที่สมบูรณ์ปราศจากการรบกวนใดๆ ก่อนทำการเชื่อม ขนาดของตัวอย่างที่ได้ทำการออกแบบไว้คือ กว้าง 90 mm ลึก 50 mm และสูง 130 mm plane strain cell ตัวนี้สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมได้ง่าย ซึ่งเมื่ออยู่ในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดิน ด้านทั้งสี่จะถูกประกบแน่นดังแสดงในภาพที่



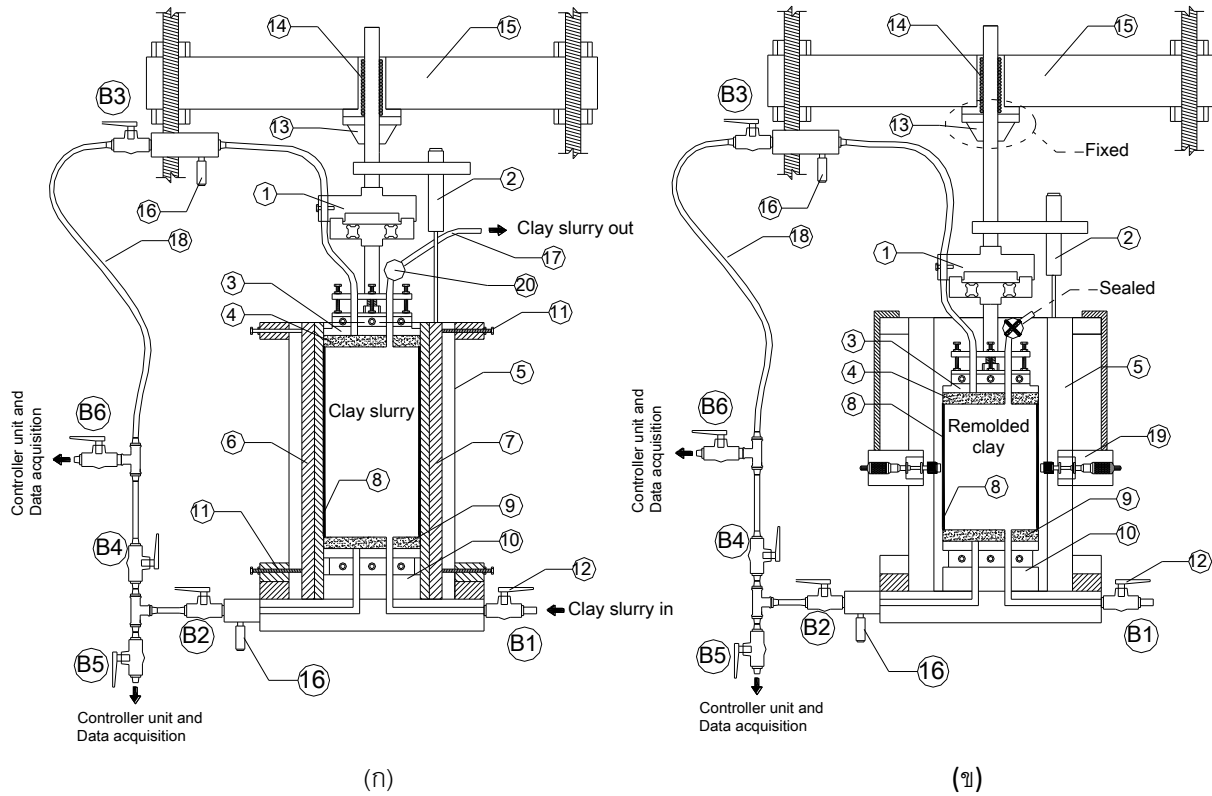
3.5 (ก) และเมื่อต้องการเงื่อนไขตัวอย่าง เงื่อนไขในสภาวะแวดล้อมของเซลล์ทดสอบจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแบบ ความเครียดในระนาบดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) และภาพตัดแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ

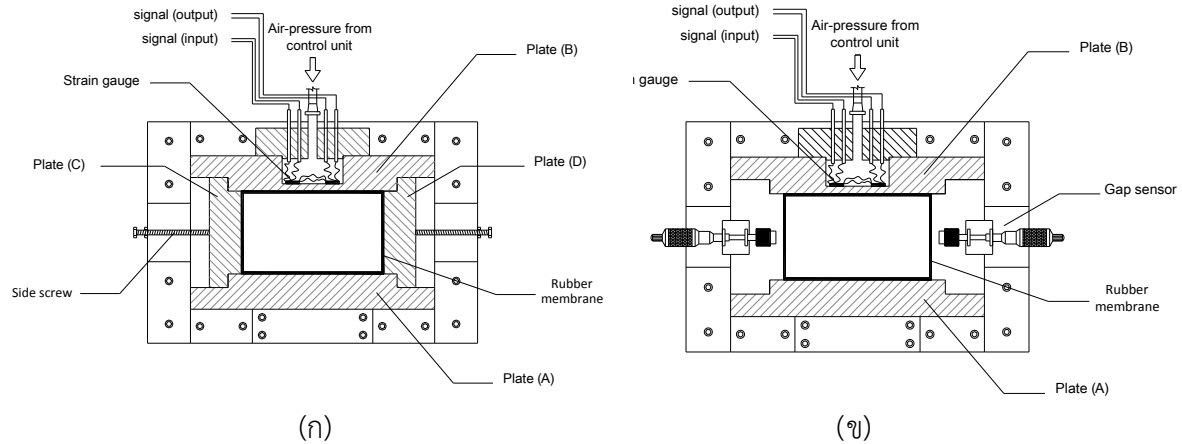


รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงเฉือนในสภาวะแวดล้อมความเครียดในระนาบ



- |                     |                                       |  |
|---------------------|---------------------------------------|--|
| 1. Load cell        | 9. Bottom porous stone                | 16. Positive-negative pore-water pressure transducer |
| 2. LVDT             | 10. Base pedestal                     | 17. Copper tube                                      |
| 3. Top cap          | 11. Side screw                        | 18. Polyethylene tube                                |
| 4. Top porous stone | 12. Ball valve                        | 19. Gap sensor                                       |
| 5. Plate B          | 13. Shaft end supporter (flange type) |  |
| 6. Plate C          | 14. Flanged linear bearing            |  |
| 7. Plate D          |                                       |  |

รูปที่ 3.5 Plane strain cell (ก) รูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดิน (ข) รูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนเฉือน



รูปที่ 3.6 ภาพตัด plane strain cell (ก) ภาพตัดรูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดิน  
(ข) ภาพตัดรูปแบบเซลล์ทดสอบในขั้นตอนเนื้อ

### 3.3.2 ระบบสำรองไฟฟ้า

ระบบสำรองไฟมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการวิจัยนี้ ซึ่งจะใช้ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าหลักขัดข้อง โดยอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติ (Uninterruptible power source) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power generator) ในการทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าหลักดับเครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติจะทำงานทันที โดยไม่ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทดสอบหยุด ซึ่งเครื่องสามารถสำรองไฟฟ้าให้กับเครื่องมือทดสอบอยู่ที่ประมาณ 20 นาทีหลังจากนั้นจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องสำรองไฟฟ้าอัตโนมัติอีกครั้งโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถจ่ายไฟฟ้าให้แก่วัสดุทดสอบได้นานต่อเนื่องสูงสุด 8 ชั่วโมง

### 3.3.3 ระบบสำรองแรงดันลม

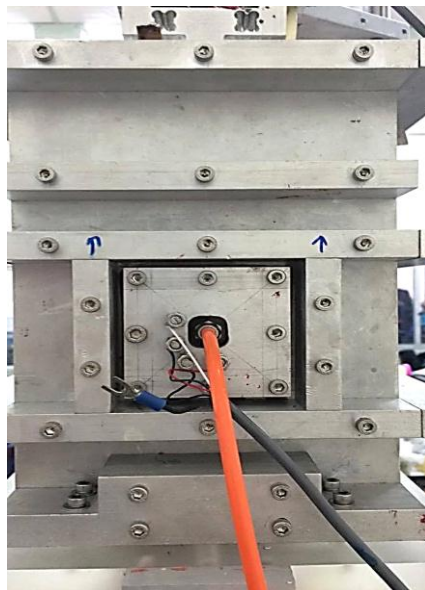
กระบวนการอัดตัวคายนํ้าของตัวอย่างดิน แรงที่เกิดในแนวตั้งนั้นเกิดจากแรงดันลมที่ถูกปล่อยมาจากเครื่องปรับแรงดันลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-pneumatic regulator) เข้าสู่ระบบกลมนิวเมติก (Pneumatic) เพื่อส่งต่อแรงให้กับด้านบนของตัวอย่าง รวมไปถึงระบบสมดุลของแรงดันลมด้านข้าง กรณีปั๊มลมหลักเกิดเหตุขัดข้องหรือไฟฟ้าดับ ซึ่งระบบสำรองแรงดันลมจะทำงานแทน ซึ่งแรงดันลมนี้จะถูกสร้างขึ้นโดยปั๊มลมสำรองที่ถูกต่อเข้ากับระบบเครื่องทดสอบและระบบสำรองไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

### 3.3.4 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง

หลักการในการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างนี้ได้แนวคิดในการออกแบบมาจากเครื่องมือ Oedometer แบบพิเศษ ซึ่งใช้หาค่าการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินที่สภาวะอยู่หนึ่งของทรายที่ถูกพัฒนาโดย Vardhanabhuti (2006) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของงานวิจัยดังกล่าวมาประยุกต์เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่

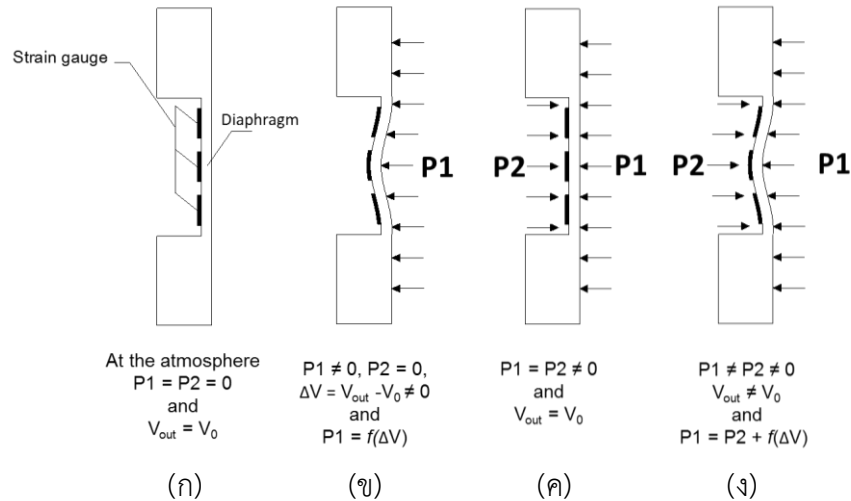
สามารถวัดแรงกระทำด้านข้างของดินได้อย่างแม่นยำและประหยัด โดยเปลี่ยนมาใช้แรงดันลมแทน เทคนิคนี้  
 คณะผู้วิจัยขอเรียกว่า “เทคนิคสมดุลด้วยแรงดันลม (Air-Pressure balance technique)”

ระบบสมดุลด้วยแรงลมนี้อาจถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นประกบด้านหลัง (Plate B ในรูปที่ 3.5) อุปกรณ์ชิ้นนี้  
 จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเพื่อหาค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดที่  
 เกิดขึ้นซึ่งจะต้องไม่เกินค่าที่จุดคราก (Yield stress) ของวัสดุ รวมทั้งหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง  
 ชุดสเตรนเกจ (strain gauge) เพื่อต้องการให้ผลจากการวัดมีความละเอียดสูงสุด โดยใช้ค่าแรงดันในการ  
 ออกแบบที่ 200 kPa หลังจากชิ้นรูปชิ้นงานเสร็จสิ้นจะมีลักษณะ ดังภาพที่ 3.7

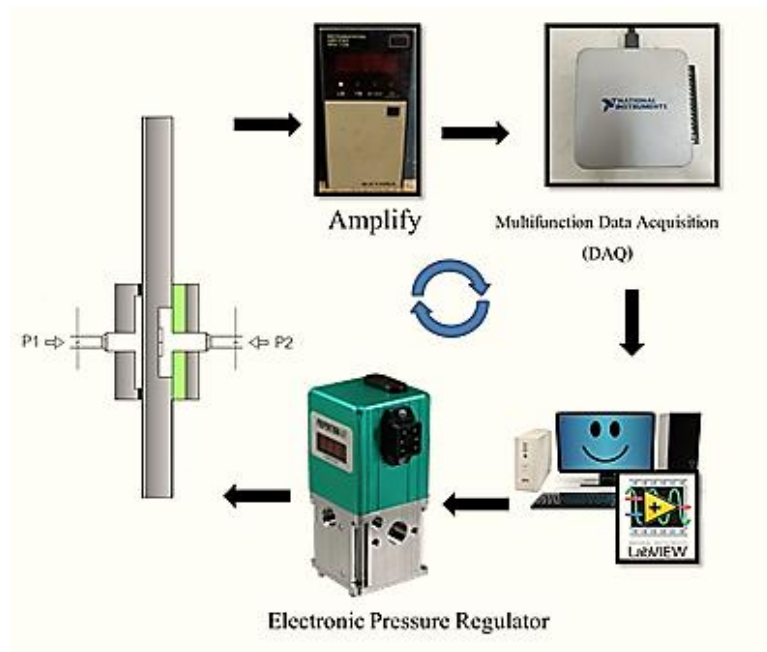


รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง

อุปกรณ์นี้มีหลักการวัดแรงดันด้านข้างโดยสามารถอธิบายได้ คือ ที่จุดเริ่มต้น  $P_1 = P_2 = 0$   
 จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ  $V_0$  โดยที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $\Delta V_{out} = 0$  ดังแสดงในรูปที่  
 3.8 (ก) เมื่อมีแรงดันมากระทำด้านหน้าของแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข) ในที่นี้จะใช้แรงดันลม  $P_1$  กระทำที่  
 แผ่นไดอะแฟรม ( $P_1 \neq 0$   $P_2 = 0$ ) ซึ่งติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge) ไว้ด้านหลังก็จะเกิดการเคลื่อนตัวใน  
 แนวราบและเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่ลบกับแรงดันไฟฟ้าที่  
 จุดเริ่มต้น ( $\Delta V = V_{out} - V_0 \neq 0$ ) เนื่องจากแผ่นไดอะแฟรมไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นเพื่อปรับสมดุลของ  
 การเคลื่อนตัวไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal displacement) จะต้องใส่แรงดัน  $P_2$  เข้าไปที่  
 ฝั่งตรงข้ามด้วยวิธีการสุ่มค่า (Trial and error method) โดยสภาวะสมดุลของทั้งสองด้านจะเกิดขึ้นได้ก็  
 ต่อเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปอยู่ในจุดเริ่มต้น คือจุดที่ ( $V_{out} = V_0$ ) โดยที่ค่า  $P_1 = P_2 \neq 0$  ดังแสดงในรูปที่  
 3.8 (ค)



รูปที่ 3.8 ระบบการทำงานของอุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง (ก) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุล (ข) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P1 มากกระทำ (ค) แผ่นอยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P2 มากกระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับ P1 (ง) แผ่นไม่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยมีแรงดัน P1 มากกระทำมากกว่าแรงดัน P2



รูปที่ 3.9 หลักการทำงานเพื่อหาจุดสมดุลของแรงดัน

เมื่อสามารถปรับแรงดัน P2 ให้แผ่นไดอะแฟรมกลับมาอยู่ในสภาวะสมดุล แผ่นไดอะแฟรมก็จะไม่มีภาระในการรับค่าแรงดันและแรงดันลม P2 จะมีค่าเท่ากับแรงดัน P1 ซึ่งในระหว่างการทดสอบค่าแรงดัน P1 จะเปรียบเสมือนแรงดันด้านข้างของดินในขณะนั้น ในงานวิจัยนี้การปรับค่าของแรงดันลม P2 นั้นจะถูกปรับเพื่อให้แผ่นไดอะแฟรมอยู่ในสภาวะสมดุลด้วยระบบอัตโนมัติควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์ ชุดโปรแกรมนี้จะ

ควบคุมแรงดันลม P2 ด้วยตัวปรับแรงดันลมไฟฟ้า (Electro-pneumatic regulator) เพื่อความถูกต้องและแม่นยำชุดคำสั่งของโปรแกรมจะทำการสอบเทียบสภาวะสมดุลทุก ๆ 4 วินาที โดยจะทำงานเป็นแบบวนลูป (Closed-loop) ดังรูปที่ 3.9

และเมื่อระบบตรวจจับได้ว่า แผ่นไดอะแฟรมรับภาระของแรงดันที่แตกต่างกันมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ( $\pm 1$  kPa) ระบบจะทำการหาสภาวะสมดุลอีกครั้งโดยใช้เวลาในการทำให้ระบบสมดุลอยู่ที่ 4-8 วินาที ซึ่งระยะเวลาในการหาจุดสมดุลของระบบนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อในการอ่านค่าแรงดันด้านข้างของดินเมื่ออยู่ในขั้นตอนอัดตัวคายน้ำ แต่จะส่งผลอย่างยิ่งในขั้นตอนการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งการวัดค่าแรงดันด้านข้างจะต้องเป็นแบบทันทีทันใดซึ่งรอให้ระบบปรับแรงสมดุลไม่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงวิธีการวัดค่าแรงดัน P1 ตามรูปที่ 3.8 (ง) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 3.1 คือ แรงกระทำ P1 นั้นสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดันลมเพื่อรักษาสมดุล P2 กับแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระไว้ในขณะนั้น ( $P_D$ ) ซึ่งแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระไว้ในขณะนั้นจะมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจซึ่งจะทราบได้หลังจากการสอบเทียบ จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถวัดค่าแรงดัน P1 โดยไม่ต้องรอให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาวะสมดุลและทำให้การวัดค่าสามารถทำได้ทันทีทันใดและมีความแม่นยำสูงดังแสดงในภาพที่ 3.10

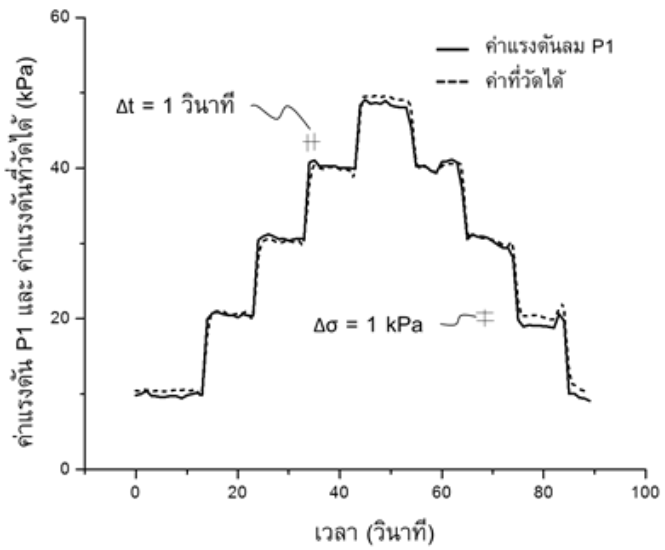
$$P_{1(cal)} = P_2 + P_D = P_2 + a(\Delta V) \quad (3.1)$$

โดยที่  $P_{1(cal)}$  = ค่าของแรงดันที่กระทำต่อผนังหรือค่าแรงดันดินด้านข้าง (kPa)  
 $P_2$  = ค่าแรงดันลมที่ใช้รักษาสมดุลในขณะนั้น (kPa)  
 $P_D$  = ค่าแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมรับภาระอยู่ในขณะนั้น (kPa)  
 $a$  = ค่าคงที่ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรง)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแผ่นประกบ B นั้นมีขนาดใหญ่และไม่ได้ขึ้นรูปจากโลหะที่มีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อนต่ำ (Low-thermal expansion coefficient) จึงทำให้มีผลกระทบของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 3.2 โดยค่า  $b$  นั้นได้จากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ถูกฝังไว้ในแผ่นประกบ B ซึ่งรายละเอียดการหาค่าคงที่นั้นจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรง

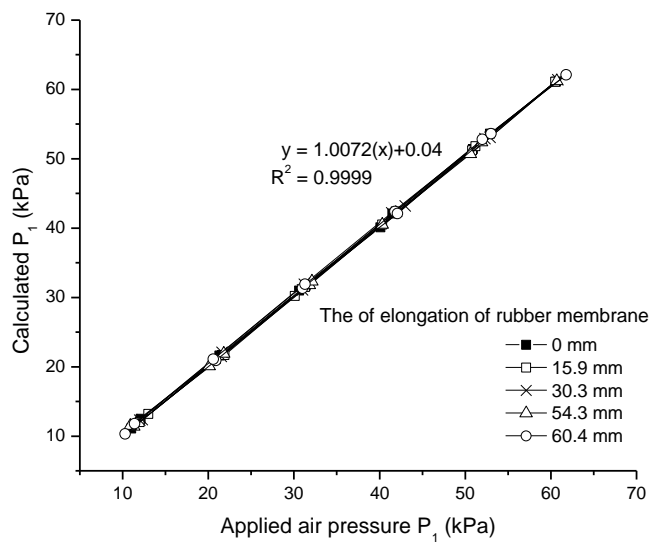
$$P_{1(cal)} = P_2 + a[\Delta V - b(\Delta V_T)] \quad (3.2)$$

โดยที่  $b$  = ค่าคงที่ (ดูรายละเอียดในหัวข้อการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงและการสอบเทียบผลของอุณหภูมิ)  
 $\Delta V_T$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดัน P1 และค่าแรงดันที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์กับเวลา

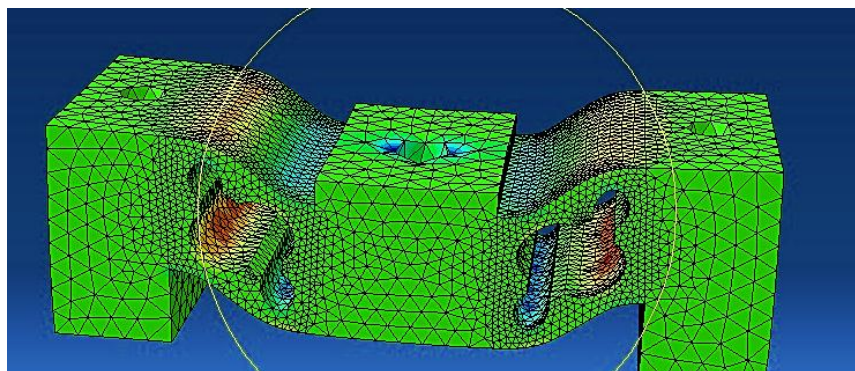
นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาผลกระทบของระยะยืดของถุงยางที่มีผลต่อการวัดค่าแรงดันด้านข้างของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้าและการเนียนดินตัวอย่างถุงยางจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะยืด วิธีการทดสอบทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดันด้านข้างที่มากกระทำกับค่าที่คำนวณได้โดยใช้ระยะตั้งถุงยางที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าระยะยืดของถุงยางไม่มีผลต่อการวัดค่าแรงดันด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลม P1 และ P2 กับระยะของการตั้งถุงยาง

### 3.3.5 โหลดเซลล์

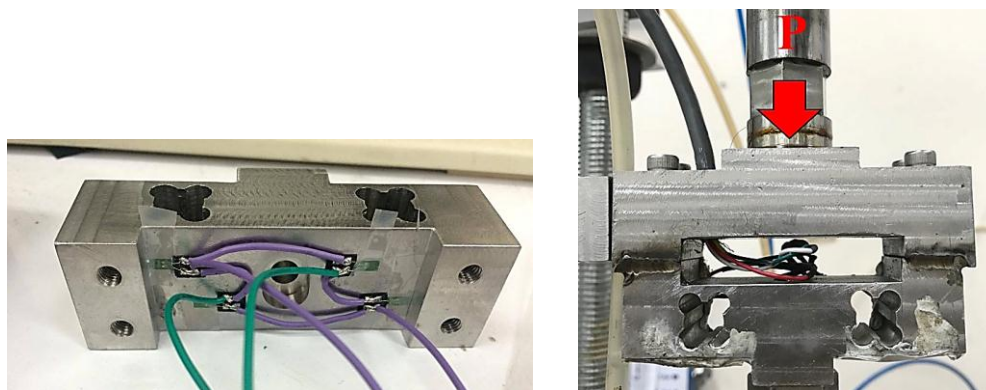
ในการออกแบบรูปแบบของโหลดเซลล์ (Load cell) นั้น ได้ประยุกต์มาจากแนวคิดของ Dr. Hirakawa จากมหาวิทยาลัยโตเกียว (Tokyo university of technology) ท่านได้มีแนวคิดริเริ่มการออกแบบโหลดเซลล์ที่มีความเสถียรและง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยหลักการออกแบบ คือ เมื่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดได้รับน้ำหนักที่มากระทำ อุปกรณ์จะเกิดการเสียรูปและ อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดจะสามารถตรวจจับการเสียรูปนั้นออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่มากระทำกับสัญญาณที่ส่งออกมา โดยโหลดเซลล์ที่ถูกประดิษฐ์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพาจะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด ดังรูปที่ 3.12 แล้วใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) รวมไปถึงได้ทำการปรับปรุงให้อุปกรณ์โหลดเซลล์มีรูปแบบที่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ซึ่งเราสามารถขึ้นรูปเองได้โดยเครื่องมิลลิ่ง (Milling) ที่อยู่ภายในห้องปฏิบัติการซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการประดิษฐ์เป็นอย่างมาก การออกแบบโหลดเซลล์จะออกแบบให้มีความสามารถในการรับแรงที่ 5 kN



**รูปที่ 3.12** ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด

เมื่อขึ้นรูปโหลดเซลล์และทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ดังภาพที่ 3.13 (ก) เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะนำโหลดเซลล์ทั้งสองชิ้นมาประกอบเข้าด้วยกันดังภาพที่ 3.13 (ข) แล้วจึงทำการสอบเทียบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์ จากการสอบเทียบอุปกรณ์ดังกล่าวได้ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงมีค่า  $R^2=0.9998$





รูปที่ 3.13 (ก) ติดตั้งชุดสเตรนเกจตามตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุด (ข) โหลดเซลล์หลังจากประกอบส่วนบนและล่าง

### 3.3.6 ชุด Load Frame

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

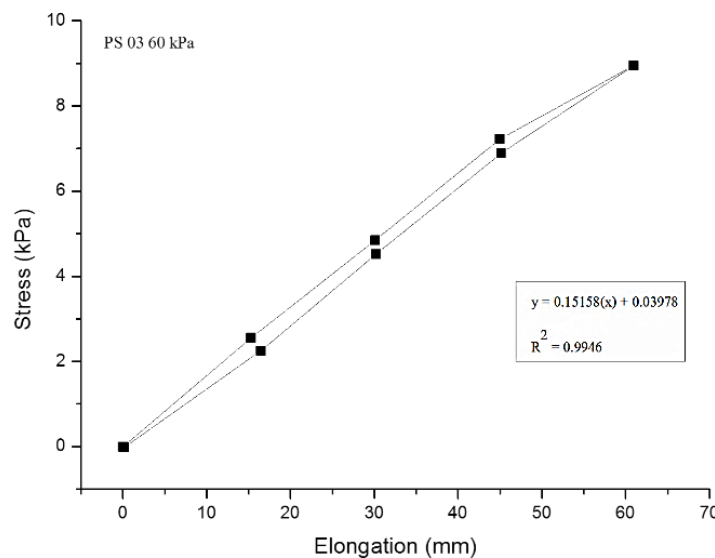
ระบบที่ 1 การอัดตัวคายน้ํา ในการให้แรงเค้นในแนวตั้งจะอาศัยการให้แรงลมผ่านอุปกรณ์จ่ายลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-Pneumatic regulator) โดยการส่งคำสั่งจากชุดคอมพิวเตอร์ โดยแรงดันลมดังกล่าวจะส่งให้กับกระบอกลมนิวเมติก ทำหน้าที่สร้างแรงกระทำกับตัวอย่างแบบ Stress control ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งดินตัวอย่างนั้นจะต้องผ่านกระบวนการทรุดตัวคายน้ํา (Consolidation) เพื่อสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ โดยแรงดันที่ให้มาดังกล่าวจะถูกกระทำต่อด้านบนของตัวอย่างดินโดยผ่านคานบังคับไปยังโหลดเซลล์ (Load cell) คานบังคับทำหน้าที่บังคับให้แกนส่งกำลังมีความมั่นคงและสามารถส่งแรงไปที่จุดกึ่งกลางของดินตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ โดยจะต้องอาศัยลูกปืนสไลด์เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแกนส่งกำลังกับคานบังคับ เมื่อแรงส่งผ่านโหลดเซลล์ลงสู่ตัวอย่างแล้ว ตัวโหลดเซลล์จะวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นและส่งกลับไปยังชุดควบคุมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าแรงกระทำที่ส่ง เมื่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นผิดเพี้ยนจากแรงกระทำที่ส่งไป ระบบจะทำการส่งงานผ่านชุดคำสั่งอีกครั้งเพื่อปรับแก้ค่า ระบบจะทำการตรวจสอบแบบนี้ทุก ๆ 4 วินาที เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด และระบบดังกล่าวสามารถควบคุมให้มีความละเอียดได้ถึง  $\pm 1$  kPa

ระบบที่ 2 การปรับแก้ค่าเนื่องจากแรงดึงของถุงยาง ในกระบวนการอัดตัวคายน้ําในหนึ่งมิติในขั้นแรกถุงยางจะถูกดึงให้ยืดออกเพื่อที่จะรองรับตัวอย่างดินเหลวที่จะถูกบรรจุเข้าสู่เซลล์ทดสอบ เมื่อดึงถุงยางยิ่งมากก็จะใช้แรงที่มากขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้แรงที่กดด้านบนของตัวอย่างมากกว่าปกติที่ตั้งไว้ หลังจากทีกระบวนการอัดตัวคายน้ําได้เริ่มขึ้นดินก็จะเริ่มเกิดการทรุดตัว ส่งผลให้ถุงยางที่ยืดออกหดกลับสู่สภาวะปกติ

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าแรงเนื่องจากแรงดึงของถุงยางโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการสอบเทียบระหว่างระยะของการดึงถุงกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่อ่านได้จากโพลดเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 3.14 เข้ามาปรับแก้ ในการปรับแก้แรงดึงของถุงยางนี้ เมื่อทำการเปิดระบบ ระบบจะทำการปรับแก้อัตโนมัติ โดยค่าของการปรับแก้จะขึ้นอยู่กับการยืดหดตัวของถุงยางอย่างกล่าวอีกอย่าง คือ จะขึ้นอยู่กับระยะการหดตัวของตัวอย่างดินน้ำมันเอง เมื่อกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงการหดตัวก็จะสิ้นสุดตามไปด้วย ดังนั้นค่าของการปรับแก้เนื่องจากแรงดึงของถุงยางจะเป็นศูนย์ตามไปด้วย ดังนั้นค่าของความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างจะสามารถอธิบายตามสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_v = \sigma_{v(PAC)} + \sigma_{v(Rubber)} = c(\Delta V_{Load\ cell}) + d(r_e) \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $\sigma_v$  = ความเค้นรวมในแนวตั้ง (kPa)  
 $\sigma_{v(PAC)}$  = ความเค้นรวมในแนวตั้งที่เกิดจากกระบอกกลมนิวเมติก (kPa)  
 $\sigma_{v(Rubber)}$  = ความเค้นรวมในแนวตั้งที่เกิดจากแรงดึงของถุงยาง (kPa)  
 $c$  และ  $d$  = ค่าคงที่  
 $r_e$  = ระยะยืดของถุงยาง (มม.)



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของยืดของถุงยางกับค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่อ่านได้จากโพลดเซลล์

ระบบที่ 3 การอัดตัวคายน้ำครั้งที่สอง ระบบนี้จะใช้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างมาเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ซึ่งระบบจะประสานการทำงานระหว่างเซนเซอร์วัดระยะที่ติดตั้งไว้ด้านข้างของตัวอย่าง

กับเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อระบบตรวจจับได้ว่าดินมีการหดตัวด้านข้างก็จะสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานเพื่อกดดิน เพื่อให้ตัวอย่างดินนั้นขยายตัวกลับมาที่จุดเดิมเพื่อรักษาสภาวะการหดตัวแบบหนึ่งมิติ

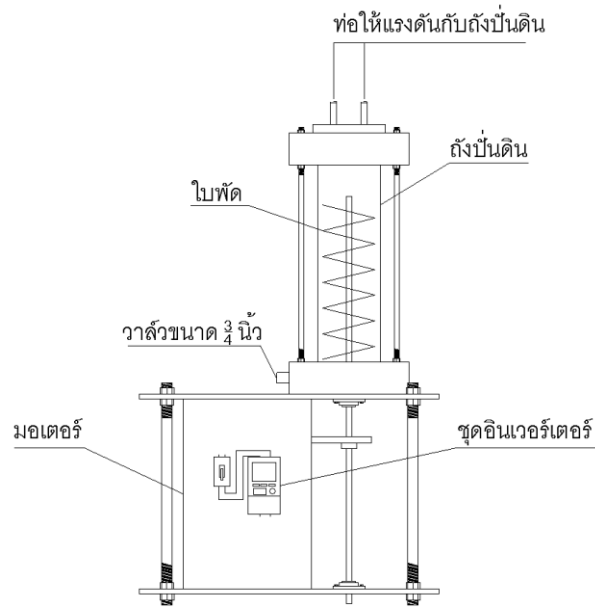
ระบบที่ 4 การให้แรงกดแบบ Strain control การให้แรงแบบนี้จะแตกต่างจากแบบแรกคือ แรงจะถูกขับเคลื่อนจากเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) โดยมอเตอร์แบบนี้มีลักษณะที่พิเศษแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไป คือ มีความสามารถในการปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่รอบที่ต่ำไปจนถึงสูงสุด แต่ยังคงรักษาแรงบิดได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถหมุนกลับทิศทางได้ทั้งทวนและตามเข็มนาฬิกา มอเตอร์ที่ติดตั้งแก่ชุด Load frame ชุดนี้ มีขนาด 750 วัตต์ และส่งกำลังผ่านสายพานให้กับชุดวอมเกียร์ ชุดเกียร์ของเครื่องมือนี้สามารถรองรับแรงสูงสุดในการทดสอบได้ถึง 50 kN ในการให้แรงในลักษณะนี้สามารถครอบคลุมตั้งแต่การยุบตัวคายน้ำไปจนถึงการเฉือนตัวอย่าง โดยชุดโปรแกรมยังสามารถกำหนดค่าของอัตราเร็วในการเฉือน ความสูงของตัวอย่าง โดยโปรแกรมจะทำการเฉือนตัวอย่างและหยุดเองเมื่อทำการเฉือนเสร็จสิ้นลง

### 3.3.7 ระบบควบคุมแรงดันน้ำอัตโนมัติ

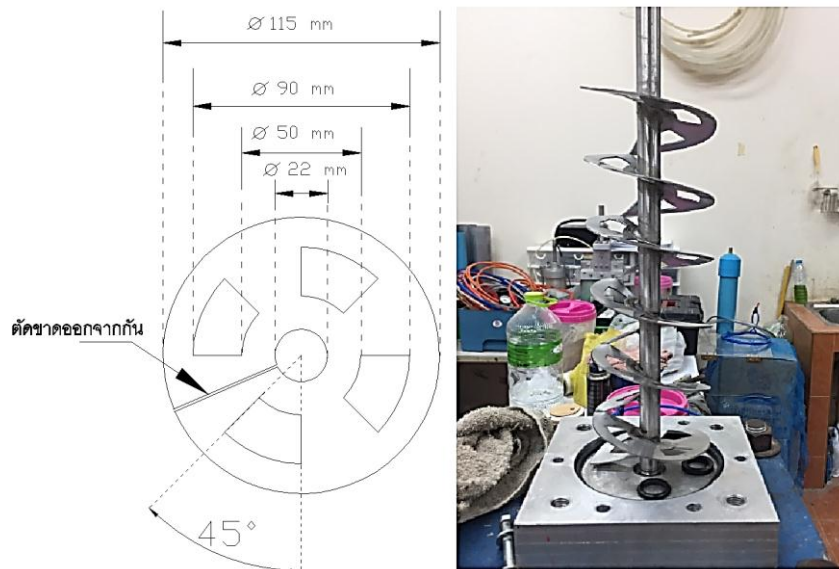
ในขั้นตอนการยุบตัวคายน้ำของตัวอย่างนั้น เนื่องจากดินมีปริมาณน้ำที่สูงดังนั้นน้ำที่ถูกขับออกมาจากตัวอย่างจึงมากตามไปด้วย เมื่อน้ำถูกขับออกมาจึงเข้าสู่ถังแยกน้ำแยกอากาศ เมื่อความสูงของน้ำในถังสูงขึ้นจะทำให้แรงดันที่ใช้ในระบบจะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ค่าแรงดันน้ำอยู่ตลอดเวลาโดยการทำงานระหว่างอุปกรณ์จ่ายลมด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Electro-Pneumatic regulator) แบบแรงดันลบและอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (Negative & Positive pressure transducer) จะทำงานร่วมกันแบบวนลูบและตรวจสอบตัวเองอยู่ทุก ๆ 4 วินาที มีความแม่นยำอยู่ที่  $\pm 0.5$  kPa

### 3.3.8 เครื่องปั้นดินพิเศษ

เครื่องปั้นดินที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างนี้มีส่วนประกอบ คือ มอเตอร์ ถังปั้นดิน ใบพัด ชุดควบคุมความเร็วรอบและทิศทางของการหมุนดังภาพที่ 3.15 โดยมีหลักการในการออกแบบคือ มอเตอร์สามารถหมุนด้วยความเร็วตั้งแต่ 5-60 รอบ/ นาที ตัวใบพัดได้ทำการออกแบบขึ้นในลักษณะเกลียวลำเลียงและยังสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านบนลงสู่ด้านล่างและหมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อนำดินจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเพื่อให้ตัวอย่างมีความสม่ำเสมอและสามารถกำจัดฟองอากาศได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจากการออกแบบใบพัดให้มีช่องว่าง 4 ช่องโดยแต่ละเกลียวห่างกันประมาณ 7.5 ซม. และทำมุมกับแนวระดับประมาณ  $30^\circ$  ดังภาพที่ 3.16 เมื่อทำการเปิดเครื่องให้ใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกาดินเหลวก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างของถังปั้นและดินเหลวจะถูกรีดออกมาจากช่องของใบพัดออกมาเป็นเส้นดินเหลวด้วยแรงดันของใบพัดซึ่งทำให้อากาศที่อยู่ภายในดินระเบิดออกและสัมผัสกับแรงดันลบภายในถังปั้น ช่วยทำให้การกำจัดอากาศออกจากตัวอย่างดินเหลวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลักษณะการแตกตัวของอากาศ ดังภาพที่ 3.17



รูปที่ 3.15 การออกแบบเครื่องป่นดิน



รูปที่ 3.16 ใบพัดของเครื่องป่นดิน



รูปที่ 3.17 ฟองอากาศที่ระเบิดออกมาจากดินเหลว

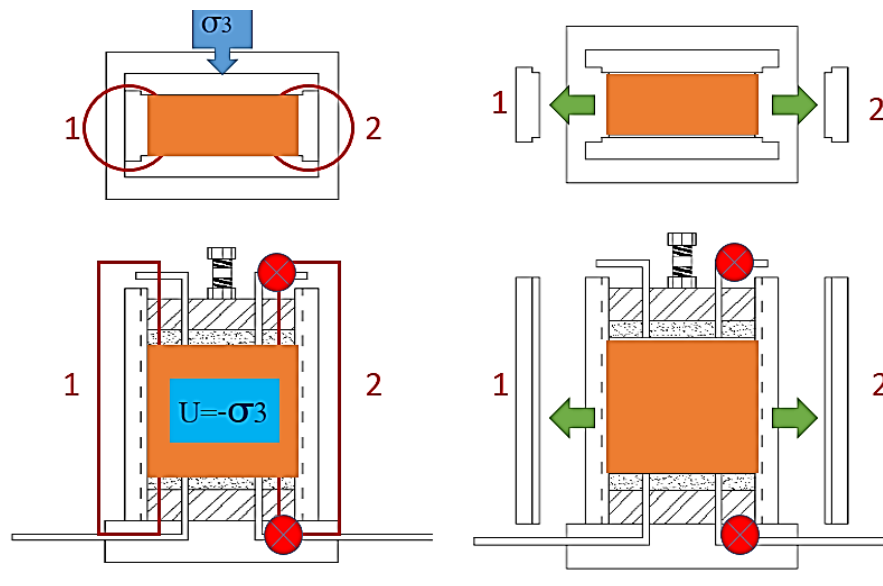
### 3.4 การทดสอบตัวอย่าง

วิธีการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

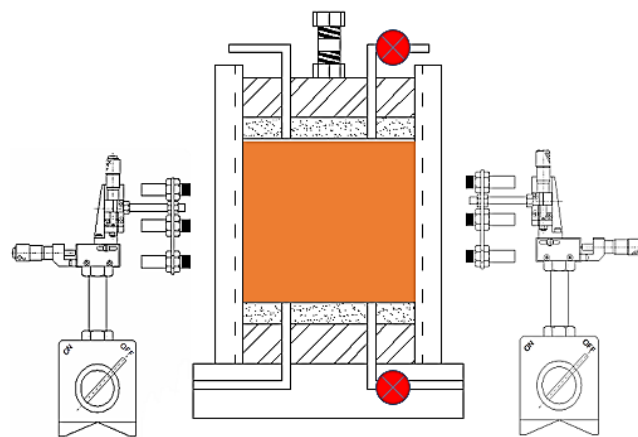
1. ทำการประกอบชุดเครื่องมือและตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบสำรองไฟและระบบเตือนไฟฟ้  
ดับ
2. ทำการสอบเทียบอุปกรณ์วัดค่าหน่วยแรงต่างๆรวมทั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่
3. เตรียมดินเหลวโดยใช้เครื่องผสมดินชนิดพิเศษ
4. ฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบที่ทำการติดตั้งถุงยางไว้แล้วและตรวจสอบระดับความอิมตัวด้วย  
น้ำ
5. ทำการสร้างโครงสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้้ำครั้งที่ 1 โดยเปิดใช้งาน  
ระบบที่ 1 และ 2 ของ Load frame รอจนการอัดตัวคายน้้ำสิ้นสุดลง
6. ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของอุปกรณ์ทดสอบให้เป็นแบบความเครียดในระนาบ  
โดยมีขั้นตอนคือ Appile neccative pore water pressure ( $\Delta u$ ) ให้มีค่าเท่ากับแรงดันด้านข้าง  
( $\sigma_2$ ) ซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างหลังจากนั้นทำการปลดแผ่นอะคิลิคหมายเลข 1 และ 2 ออก ดัง  
ภาพที่ 3.18 เพื่อให้เสียรูปด้านข้างได้อย่างอิสระตรงตามสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ
7. ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะให้แก่ตัวอย่าง เพื่อวัดการเสียรูปด้านข้าง ภาพที่ 3.19 แล้วทำการ  
สร้างโครงสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้้ำครั้งที่ 2 โดยเปิดใช้งานระบบที่ 3 ของ Load  
frame รอจนการอัดตัวคายน้้ำครั้งที่ 2 สิ้นสุดลง

8. ทำการฉีกตัวอย่าง โดยจะทำการล๊อคแกนกระบอกนิวมेटริกด้านบนไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ แล้วใช้คอมพิวเตอร์สั่งงานผ่านโปรแกรมและชุดควบคุมไปยังเซอร์โวมอเตอร์ (ระบบที่ 4 ของ load frame) ทำให้แกนของชุดอุปกรณ์เคลื่อนที่ขึ้นไปจะเรียกการฉีกแบบนี้ว่า “Strain control” หลังจากนั้น อุปกรณ์วัดคุม (Tranducer) ทั้งหมดที่ได้ติดตั้งเอาไว้ ก็จะส่งค่าที่วัดได้กลับมายังชุดควบคุมเพื่อทำการเก็บข้อมูลตามเวลาที่กำหนด โดยการฉีกนี้จะฉีกแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain condition) ใช้อัตราการฉีกเท่ากับ 0.5 %Strain/min ทำการฉีกจนตัวอย่างเสียหายที่ 12% Strain

9. ทำการถ่ายภาพระหว่างทำการฉีกเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะแถบแรงฉีกที่เกิดขึ้นในระหว่างการฉีกด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลด้วยภาพ



รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนสถานะแวดล้อมจากการเสียรูปในหนึ่งมิติเป็นแบบสภาวะความเครียดในระนาบ

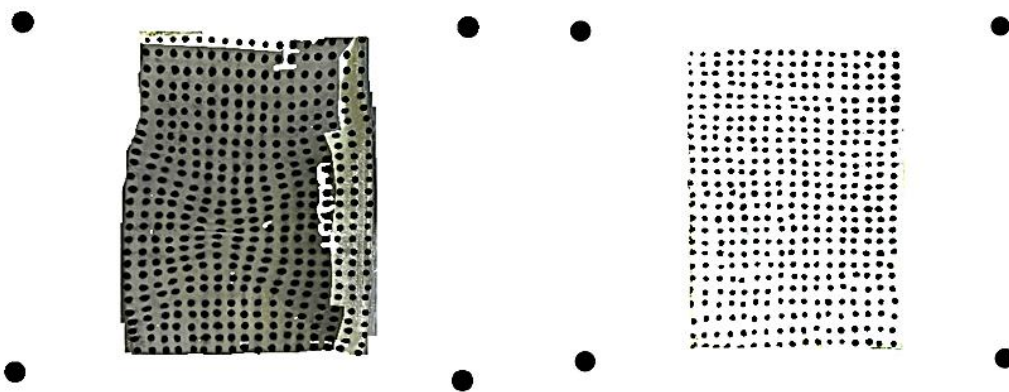


รูปที่ 3.19 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างให้แก่ตัวอย่าง

### 3.5 การหาแถบแรงเฉือนด้วยวิธีประมวลผลภาพ

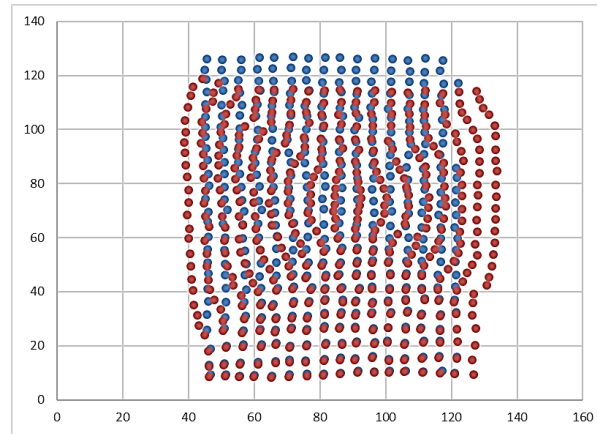
ในช่วงก่อนเริ่มการเฉือนตัวอย่าง ทำการตั้งกล้องเพื่อใช้ในการถ่ายภาพระหว่างการเฉือน โดยกล้องที่ใช้มีความละเอียด 24 ล้านพิกเซล ในการถ่ายภาพ ซึ่งตลอดการทดสอบนั้นจะไม่ขยับตัวกล้องโดยเด็ดขาด ในช่วงแรกของการเกิด hardening จะทำการถ่ายทุก 1 วินาที และเมื่อแรงเค้นในแนวตั้งลดลง จึงเปลี่ยนมาถ่ายทุก ๆ 2 วินาที และมีแรงเค้นแนวตั้งคงที่ จะถ่ายทุก ๆ 5 วินาที จากนั้นจึงค่อยภาพมาหาแถบแรงเฉือนในขั้นตอนต่อไปนี้

1. หลังจากทำเฉือนตัวอย่างดิน ทำการเลือกภาพถ่ายทั้งหมด 4-5 ช่วง ดังนี้ ช่วงก่อนเริ่มการเฉือน ช่วงก่อน peak ช่วงหลัง peak และช่วง residual โดยที่รูปช่วงก่อนการเฉือนนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับในแต่ละช่วงคือ ก่อนและหลัง peak และช่วง
2. นำรูปทั้งหมดมากำหนดจุดอ้างอิง ในที่นี้จะจุดที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างการเฉือนซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ทั้งหมด 4 จุด ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ครอบคลุมพื้นที่ตัวอย่าง
3. นำภาพถ่ายมาเติมแต่งและตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก แล้วจึงนำเข้าโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายที่เขียนขึ้นเพื่อหาพิกัดจุดบนรูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.20
4. หลังจากรันโปรแกรมทุกภาพแล้ว ให้นำจุดจากภาพช่วงก่อนการเฉือนมาเทียบกับจุดที่เหลือ หากจุดนั้นไม่ซ้อนกัน ทำการปรับสเกลให้ตรงกันให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.21
6. นำพิกัดที่ได้มาคำนวณหาค่า strain field ดังแสดงในรูปที่ 3.22

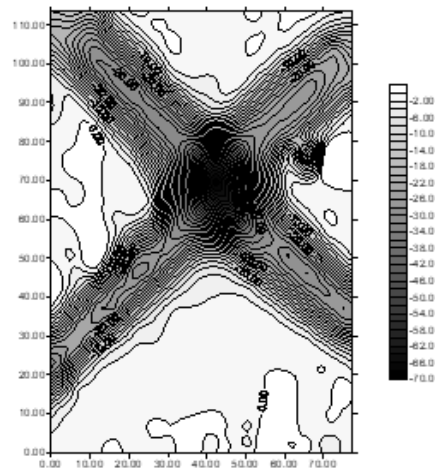


รูปที่ 3.20 การหาพิกัดจุดบนรูปร่างโดยการวิเคราะห์ภาพถ่าย





รูปที่ 3.21 ภาพซ้อนจุดบนถ่วงอย่างด้วยภาพก่อนและหลังการเฉือน



รูปที่ 3.22 แสดงการทำคอนทัวร์ Strain field

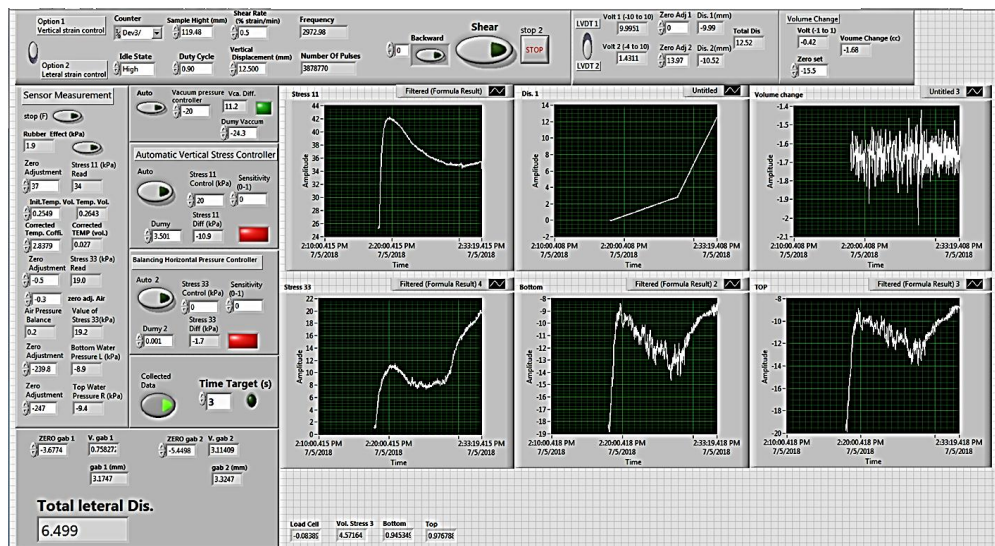
### 3.6 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือทดสอบแบบความเครียดในระนาบ

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมามักจะนำดินเหลวที่ปริมาณน้ำสูงไปทำการอัดตัวคายจากอุปกรณ์ภายนอก โดยใช้แรงเค้นค่อนข้างสูงเพื่อให้ดินแข็งพอที่จะนำมาใช้ตัดแต่งขนาดตัวอย่างได้ จากนั้นจึงค่อยนำตัวอย่างที่ตัดได้ตามขนาดไปหุ้มด้วยถ่วงยางแล้วจึงบรรจุเข้าเครื่องมือทดสอบเพื่อทำการเฉือนต่อไป ซึ่งขั้นตอนของการตัดแต่งตัวอย่างรวมถึงการสวมถ่วงยางนั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนดินได้ อีกทั้งการตัดแต่งตัวอย่างให้พอดีกับเซลล์ทดสอบนั้นเป็นเรื่องยากซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการถ่ายแรงเค้นระหว่างผิวดินกับอุปกรณ์วัดแรง ดังนั้นวิจัยนี้ต้องที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่ไม่มีการรบกวนใดๆ ก่อนทำการเฉือน ซึ่งทำได้โดยการใช้เซลล์ทดสอบตัวเดียวกันทั้งในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำเพื่อสร้างโครงสร้างดินประกอบตัวใหม่รวมถึงถึงขณะเฉือนตัวอย่าง ซึ่งทั้งสองขั้นตอนนี้จะมีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ด้วยเหตุนี้ทำให้งานวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีการที่ซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าวิจัยในอดีตปกติ



มาก ในหลายขั้นตอนจะเป็นงานทำซ้ำๆ ดังนั้นเป็นเป็นการสะดวกหากทำการพัฒนาโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ ขึ้นมาใช้ควบคุมเครื่องมือทดสอบทั้งหมดซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 3.23 ตัวโปรแกรมควบคุมนั้นสามารถแยกการทำงานได้ดังต่อไปนี้

1. ส่วนเก็บข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าความถี่ของเวลาที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ เข้าไปเก็บในคอมพิวเตอร์ได้อย่างสะดวกและแม่นยำ
2. ส่วนควบคุมความเค้นในแนวตั้ง เป็นโปรแกรมควบคุมระบบการทำงานที่ 1 ของ load frame ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำครั้งที่ 1 โดยระบบจะทำงานประสานกันระหว่าง load cell กับกระบอกลมนิวเมตริกซึ่งติดตั้งไว้ที่ด้านบนของ load frame
3. ส่วนปรับแก้แรงดึงดูยง เนื่องจากต้องมีการติดตั้งดูยงก่อนการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบและจะต้องดึงดูยงตามค่าการทรุดตัวที่กำหนด ดังนั้นจะเกิดแรงดึงกลับเนื่องจากดูยงหดตัวซึ่งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อดินทรุดตัวมากขึ้น ส่วนปรับแก้แรงดึงดูยงจะทำหน้าที่ปรับแก้แรงเค้นในแนวตั้งให้มีค่าคงที่เมื่อดูยงมีการหดตัวกลับ
4. ส่วนควบคุมแรงดันลมและวัดค่าแรงดันด้านข้างของดินตัวอย่าง โปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นส่วนควบคุมการทำงานของระบบสมดุลของแรงดันลมสำหรับอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง (ดูหัวข้อที่ 3.2.3) โดยจะทำงานร่วมกับส่วนปรับแก้อุณหภูมิ
5. ส่วนควบคุมการของ Load frame โปรแกรมส่วนนี้จะควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์โดยตรงซึ่งทำให้สามารถควบคุมอัตราการกดและระยะการกดได้
6. ส่วนแสดงผล ส่วนนี้เป็นส่วนใช้แสดงค่าที่วัดจากอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งสามารถแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.23 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือทดสอบแบบความเครียดในระนาบ

## บทที่ 4

### การทดลองและการผลทดลอง

#### 4.1 บทนำ

สำหรับการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นภายในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา โดยจะนำตัวอย่างดินมาทำลายโครงสร้างโดยใช้ปริมาณน้ำสูง จากนั้นจึงค่อยสร้างโครงสร้างใหม่ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำก่อนจะทำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการเสียรูปรวมไปถึงแถบแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นในแต่ละระยะของการเฉือน

#### 4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างตั้งแต่การทำลายโครงสร้างดินเดิม การเตรียมตุ้งยาง การติดตั้งตุ้งยาง การสอบเทียบอุปกรณ์ และการดันดินเข้าเครื่องทดสอบจนถึงกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ด้วยการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งจะสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินเหลวก่อนดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างดินเหลวที่มีเนื้อสม่ำเสมอและมีความอึดตัวด้วยน้ำนั้นจะต้องมีวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

1. นำดินที่ได้จากสนามมาชูดให้เป็นชิ้นย่อย ๆ จากนั้นนำดินที่ชูดเรียบร้อยแล้วมาปั่นกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การชูดดินเป็นชิ้นและการผสมดินกับน้ำ



รูปที่ 4.2 การกรองดินและตากดิน

2. กรองดินผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดประมาณ 1 มม. แล้วจึงค่อยนำดินเหนียวเหลวที่ได้มาตากในที่ร่มดังแสดงในรูปที่ 4.2
3. เมื่อดินแห้งแล้ว นำมาทุบให้เป็นเกร็ดด้วยค้อนยางดังรูปที่ 4.3 หลังจากนั้นนำมาผสมกับน้ำให้มีค่ามากกว่า Liquid limit 1.2 เท่า โดยจะใช้เครื่องปั้นดินพิเศษ ทำการปั้นดินด้วยความเร็ว 15 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในช่วงระหว่างการปั้นจะใช้แรงดันลบที่ -80 KPa เพื่อให้ดินมีสภาพอิมมัตว์ที่มากกว่า 98% จากนั้นหยุดการปั้นแต่ยังคงให้แรงดันลบต่อไปเป็นเวลา 12 ชม. เพื่อตรวจสอบว่าดินยังมีอากาศเหลืออยู่อีกไหม ถ้ายังมีอากาศ ดินจะเกิดรอยแตกดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การทุบดินให้มีขนาดเล็กกลงด้วยค้อนยาง



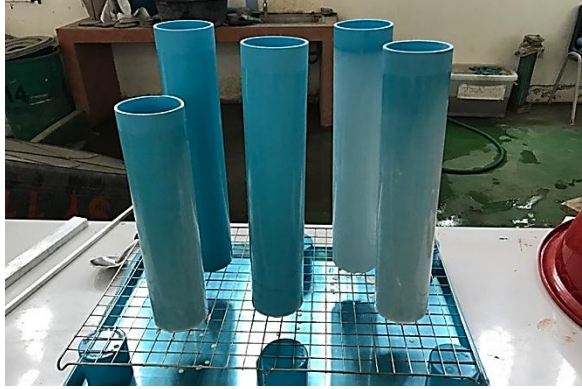


รูปที่ 4.4 ลักษณะรอบแตกร้าวเมื่อดินเหลวยังมีอากาศอยู่ในมวลดิน

#### 4.2.2 การเตรียมถุงยางและการติดตั้ง

เนื่องจากตัวอย่างทำสอบบมีขนาดใหญ่ทำให้ถุงยางที่สามารถนำมาใช้ในการทดสอบมีราคาแพง อีกทั้งขั้นตอนการประกอบถุงยางมีความยุ่งยากและมีความเสี่ยงสูงที่จะติดตั้งไม่สำเร็จ ซึ่งการเปลี่ยนถุงยางใหม่นั้นเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอย่างมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ผลิตถุงยางด้วยวิธีการจุ่มขึ้นมาใช้เองเพื่อลดค่าใช้จ่าย โดยขั้นตอนการผลิตและการติดตั้งมีดังต่อไปนี้

1. นำแบบท่อ PVC ที่มีขนาด 88 มิลลิเมตรมาชุบกับน้ำยางทั้งหมด 5 รอบ โดยแต่ละรอบต้องรอให้แห้งเสียก่อนจึงจะสามารถชุบครั้งต่อไปได้ ดังรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นพักทิ้งไว้อีกครั้ง ก่อนนำไปอบเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 4.6 แล้วจึงค่อยแกะถุงยางออกจากแบบ ในการแกะถุงยางจะต้องทำแบ่งให้ทั่วถุงยางก่อนเพื่อป้องกันการติดกันระหว่างถุงยางซึ่งอาจทำให้ถุงยางฉีกขาดได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 การพักยางเปียก

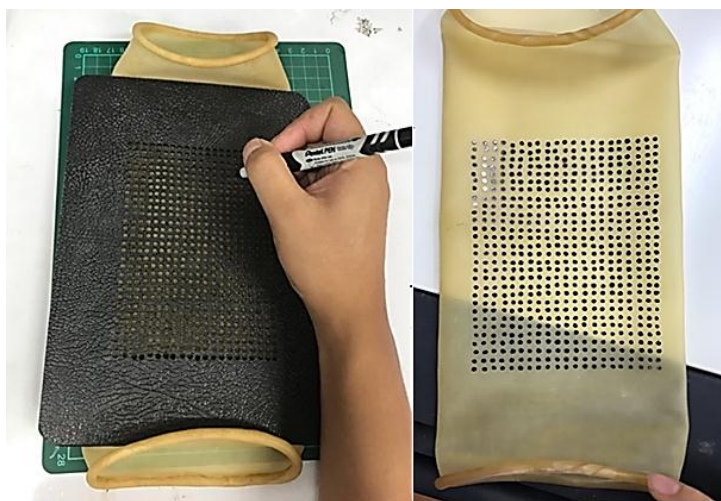


รูปที่ 4.6 การอบถุงยาง



รูปที่ 4.7 การโรยแป้งก่อนแกะถุงยาง

2. การจุดถุงยาง นำถุงยางที่มีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้มาทำการวาดจุดลงถุงยาง เพื่อดูลักษณะแถบแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นโดยการนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างดินด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย การวาดจุดของถุงยางจะทำการวาดจุดแบบกริด (Grid) ซึ่งจุดที่ถูกวาดขึ้นนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มม. ระยะห่างระหว่างจุดประมาณ 5 มม. และตำแหน่งของจุดที่ถูกวาดขึ้นจะมีขนาดเท่ากับด้านกว้างและสูงของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบที่ 95 x 132 มม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8

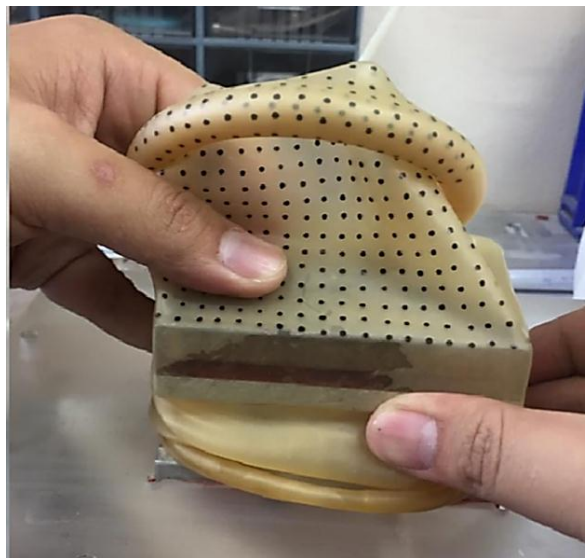


รูปที่ 4.8 การวางแผ่นเพื่อทำการจุดถุงยาง

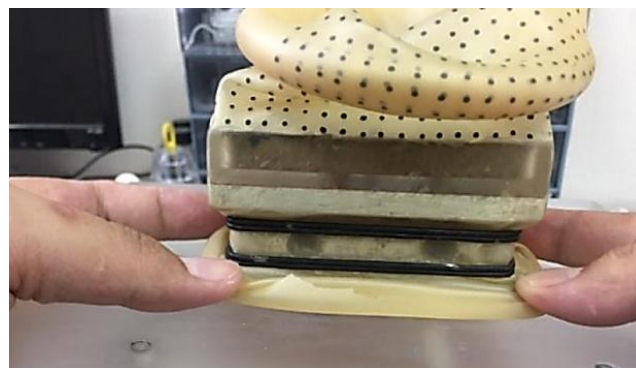
3. การติดตั้งถุงยาง สำหรับการติดตั้งถุงยางกับเครื่องมือโดยสวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่างก่อน ดังรูปที่ 4.9 โดยจะใช้ความร้อนในการติดตั้งถุงยางกับแท่นกด ดังรูปที่ 4.10 เพื่อไม่ให้ถุงยางที่อยู่ส่วนนอกเหนือจากตัวอย่างเกิดการหดตัว หลังจากนั้นทำการสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นกดดังรูปที่ 4.11 แล้วทำการเจาะรูถุงยางเพื่อให้เป็นรูเพื่อใช้ร้อยสกรู (Screw) ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างแรงกดให้กับโอริง (O-Ring) โดยใช้หัวแร้งในการเจาะดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.9 การสวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านล่าง

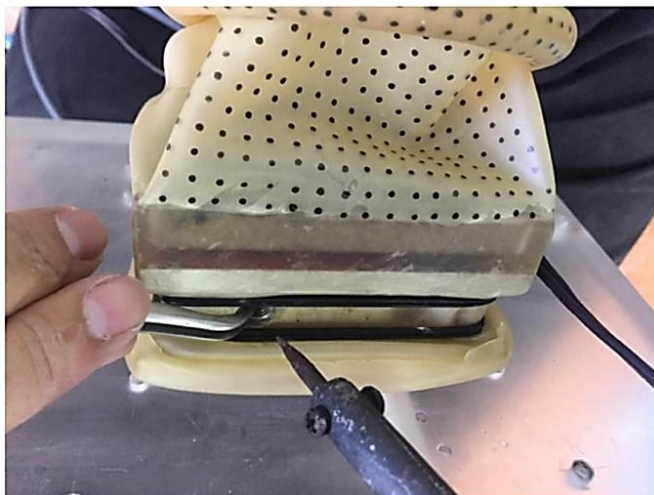


รูปที่ 4.10 การติดตั้งถุงยางกับแท่นกดด้านล่าง



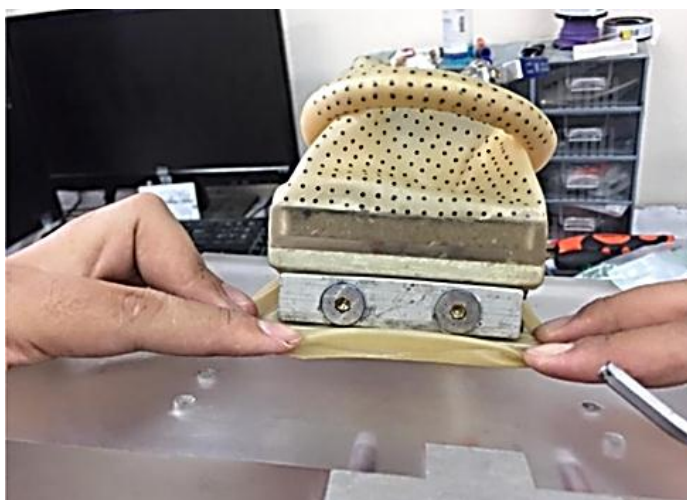
รูปที่ 4.11 การสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นด้านล่าง





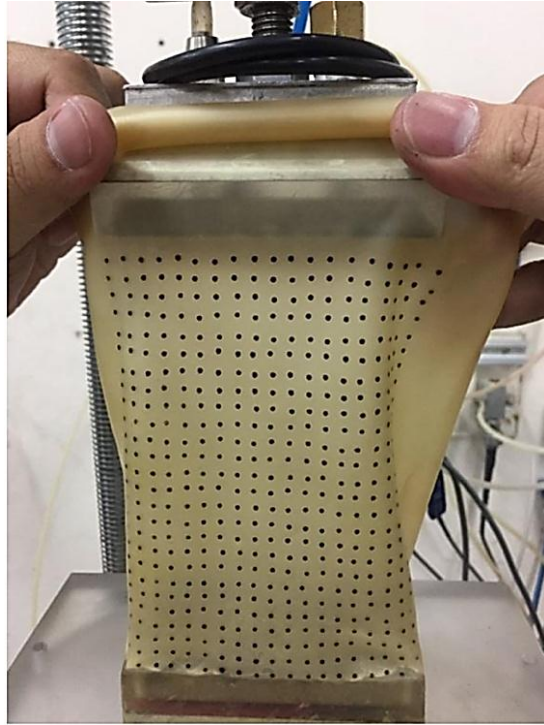
รูปที่ 4.12 การเจาะรูลงทางด้านล่าง

4. ประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านล่างแล้วใช้สกรู (Screw) เป็นตัวกดผ่านแผ่นอลูมิเนียมเพื่อซีล (Seal) ระบบไม่ให้เกิดการรั่วซึมดังรูปที่ 4.13 จากนั้นจึงค่อยทำซ้ำแบบเดิมกับแท่นกดด้านบนดังรูปที่ 4.14 ถึง รูปที่ 4.18

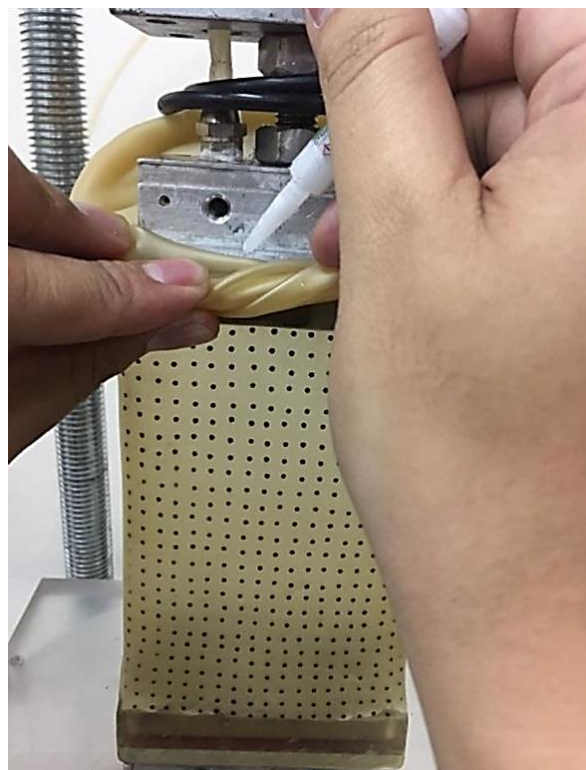


รูปที่ 4.13 การประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดแล้วใช้สกรู (Screw)





รูปที่ 4.14 สวมถุงยางเข้ากับแท่นกดด้านบน



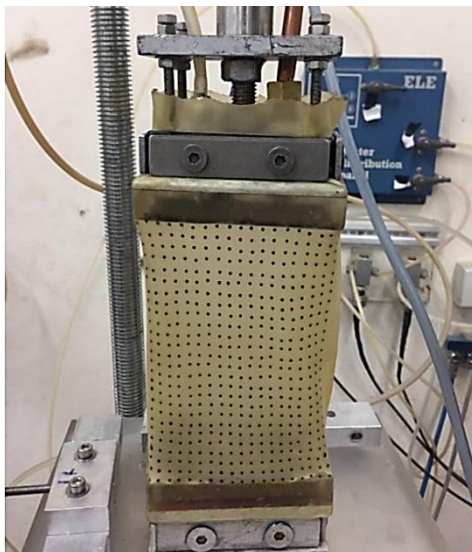
รูปที่ 4.15 การติดตั้งถุงยางกับแท่นกดด้านบน



รูปที่ 4.16 การสวมโอริง (O-Ring) เข้ากับแท่นด้านบน

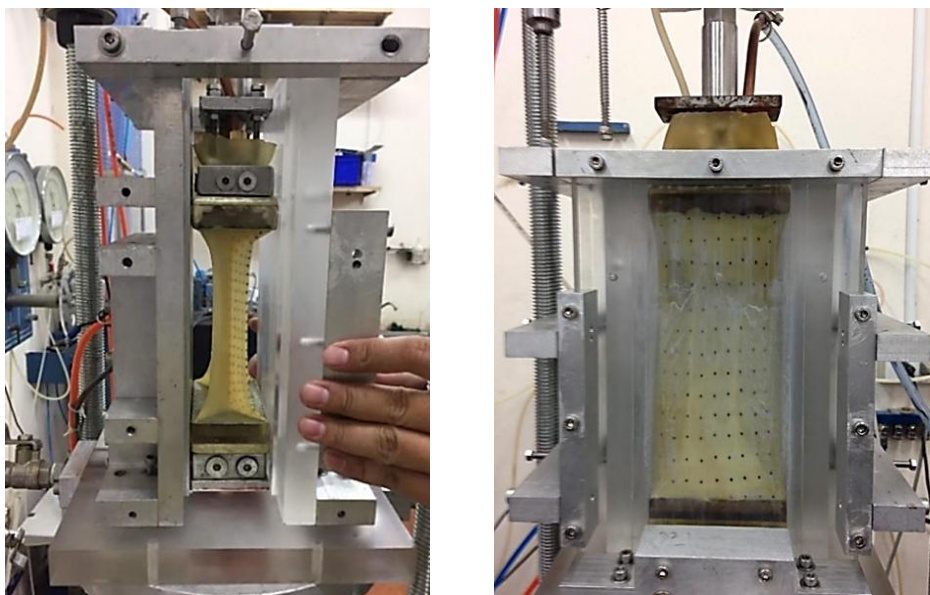


รูปที่ 4.17 การเจาะรูถุงยางด้านบน



รูปที่ 4.18 ประกอบแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับแท่นกดด้านบน

5. ติดตั้งแผ่นประกบทั้งสี่ด้านของตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือทดสอบ เนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายนํ้าทำให้เกิดการทรุดซึ่งที่ผิวสัมผัสระหว่างถุงยางกับแผ่นประกบจะเกิดแรงเสียดทาน ดังนั้นจึงทำการทาซิลิโคนกรีส (Silicone grease) ที่แผ่นประกบทั้งสี่ด้านและที่ผิวถุงยางด้านนอกที่สัมผัสกับอุปกรณ์ทดสอบด้วย จากนั้นดึงถุงยางให้ได้ระยะตามที่ได้คำนวณค่าการทรุดตัวคายนํ้าเอาไว้ ซึ่งดังกล่าวจะแปรผันตามค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างดินรวมไปถึงค่าปริมาณนํ้าเริ่มต้นของดินเหลวก่อนฉีดเข้าเซลล์ทดสอบของแต่ละตัวอย่างดังในรูปที่ 4.19



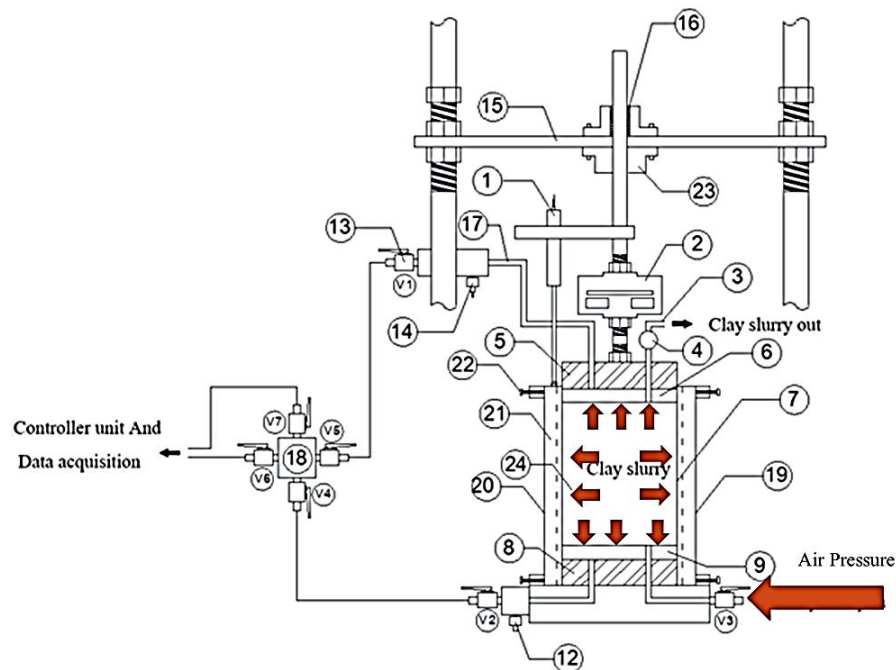
รูปที่ 4.19 การติดตั้งแผ่นประกบทั้งสี่ด้านและการดึงถุงยาง

### 4.3 การสอบเทียบอุปกรณ์

สำหรับการสอบเทียบอุปกรณ์ก่อนทำการดันดินเข้าเครื่องทดสอบในแนวระนาบ ซึ่งจะหลังการติดตั้ง ถูกลงในเครื่องทดสอบให้เรียบร้อย โดยจะต้องทำการสอบอุปกรณ์วัดค่าความเค้น แรงดันน้ำ การหลุดตัวและ อุณหภูมิเซลล์ทดสอบ

#### 4.3.1 อุปกรณ์วัดค่าความเค้น

โดยวิธีการสอบเทียบจะเริ่มจากปล่อยแรงดันลมที่ทราบค่าโดยวัดจากอุปกรณ์วัดแรงดันลมที่มีความ น้ำเชื่อถือและแม่นยำสูงเข้าถูกลงที่ติดตั้งไว้กับเซลล์ทดสอบ แรงดันลมที่ถูกปล่อยจะสร้างแรงเค้นรอบทิศทาง ซึ่งจะไปกระทำกับอุปกรณ์วัดค่าความเค้นต่างๆ เท่าๆ กันโดยไม่ต้องพิจารณาน้ำหนักของอากาศดังแสดงในรูป ที่ 4.20 จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์วัดความเค้นกับค่าแรงดันลมที่ ใส่เข้าไป ซึ่งอุปกรณ์วัดความเค้นจะประกอบด้วย



รูปที่ 4.20 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความเค้นแบบต่างๆ

1. โหลดเซลล์ ( Load cell ) เราสามารถทราบค่าแรงเค้นในแนวตั้งได้จากการการใช้ load cell ในการวัด ในการสอบเทียบอุปกรณ์ดังกล่าวจะให้แรงดันตั้งแต่ 0-70 kPa ซึ่งจะทำทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของ ค่าหน่วยแรง มีความเปลี่ยนแปลงครั้งละประมาณ 10 kPa ให้ทำการเก็บบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แล้วนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์กับค่าแรงดันลมที่ปล่อยเข้าไปในถูกลง จากผลการสอบเทียบพบว่า กราฟมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า  $R^2 = 0.99983$  และมีค่าความละเอียดในการวัดที่ 0.8 kPa

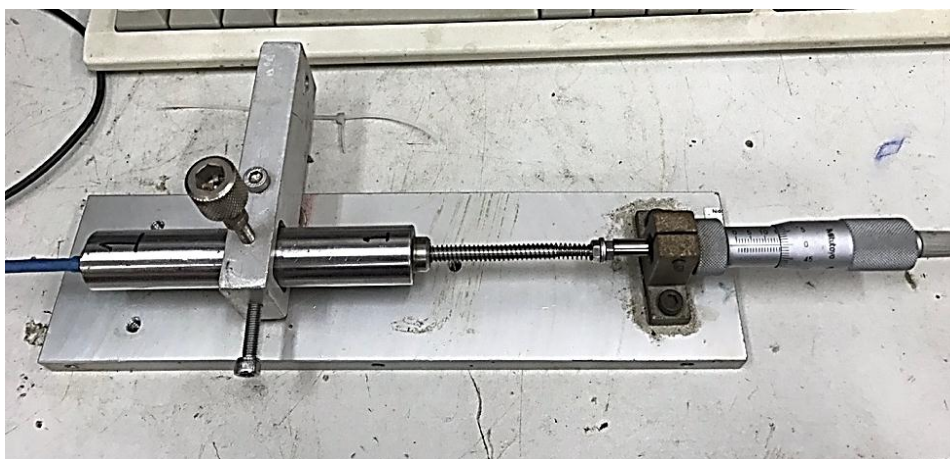


2. อุปกรณ์วัดแรงดันดินด้านข้าง การสอบเทียบนี้จะทำไปพร้อมกับโพลดเซลล์ จากนั้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าแรงดันลม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและแรงดันลมพบว่าอุปกรณ์มีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า  $R^2 = 0.9999$  และมีค่าความละเอียดในการวัดที่ 0.7 kPa

3. อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (pressure transducer) เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้วิธีการอัดตัวคายน้ำแบบหน่วยแรงกดทับประกอบกับแรงดันน้ำที่เป็นค่าลบเพื่อเร่งการทรุดตัว ดังนั้นค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเป็นได้ทั้งค่าบวก (compression) และค่าลบ (Vacuum) ซึ่งจะต้องทำการสอบเทียบทั้งสองกรณี การสอบเทียบค่าแรงดันที่เป็นค่าบวกจะทำไปพร้อมกับการสอบเทียบโพลดเซลล์ ส่วนค่าแรงดันลบจะกระทำแยกต่างหากโดยใช้ค่าแรงดันต่ำสุดที่ประมาณ -60 kPa จากนั้นจึงนำผลการสอบเทียบทั้งสองส่วนมารวมกันและพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าแรงดันลมทั้งค่าบวกและลบ จากผลการสอบเทียบพบว่าอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า  $R^2 = 0.9999$  และมีค่าความละเอียดในการวัดที่ 0.95 kPa

#### 4.3.2 อุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว (LVDT)

ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัวเข้ากับเครื่องมือทดสอบนั้นจะต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์เทียบกับ Micrometer มาตรฐานดังรูปที่ 4.21 ทำการเก็บข้อมูลระยะหดกับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ จากผลการสอบเทียบพบว่าอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัวมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยมีค่า  $R^2 = 1.00$



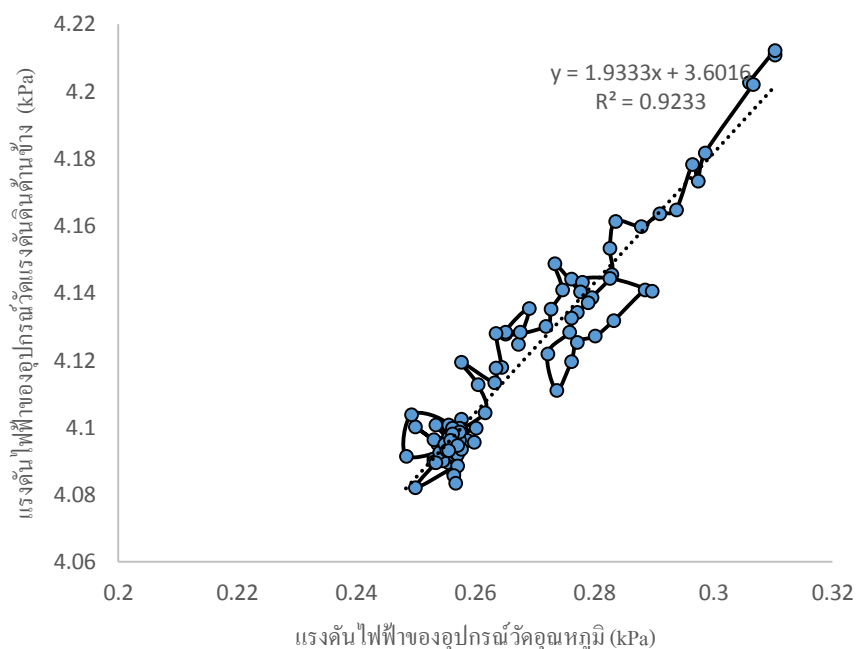
รูปที่ 4.21 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว

#### 4.3.3 การสอบเทียบผลของอุณหภูมิแผ่นประกบด้านข้างต่อการวัดแรงดันดินด้านข้าง

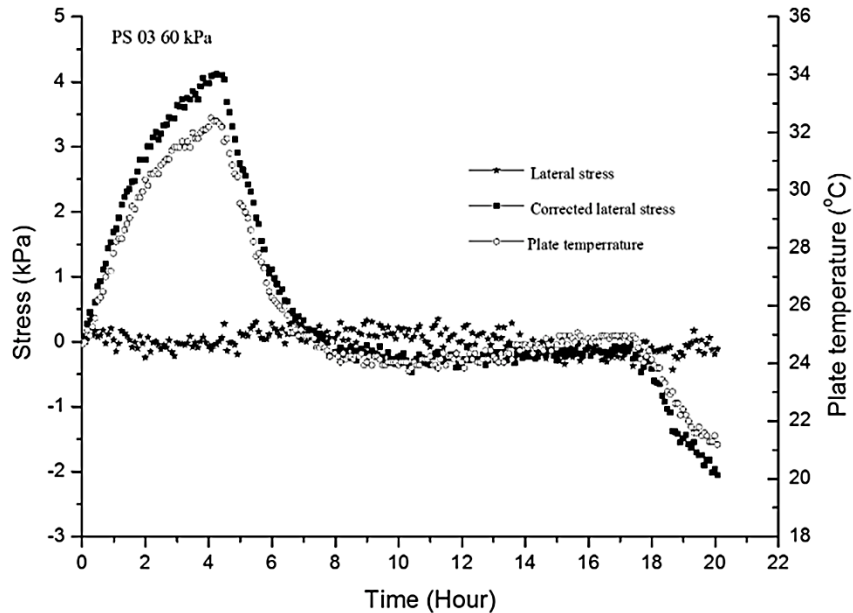
เนื่องจากการทดสอบกินเวลานานจึงมีความเสี่ยงสูงที่อาจเกิดเหตุกระแสไฟฟ้าดับระหว่างการทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในทดสอบได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องตรวจสอบ

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแม่นยำในการวัดค่าต่างๆ ของอุปกรณ์ จากการตรวจสอบเครื่องมือวัดต่างๆ พบว่ามีเพียงอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างมีผลกระทบอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นการปรับแก้ผลกระทบของอุณหภูมิจะทำเฉพาะอุปกรณ์นี้เท่านั้น จากการศึกษาพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างนั้นจะแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิผ่านประกบด้านข้างทั้งที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดันข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งกราฟนี้ได้จากการเปิดเครื่องปรับอากาศไว้ในตอนกลางคืนและปิดเครื่องปรับอากาศในตอนกลางวันซึ่งจะมีสภาพอากาศร้อนมากที่สุด โดยการทดสอบนี้ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงแล้วเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้างและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

การปรับแก้ผลกระทบของอุณหภูมินั้นแสดงอยู่ในสมการที่ 3.2 โดยค่าของพารามิเตอร์  $b$  คือค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.22 และผลทั้งก่อนและหลังการปรับแก้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.23 จากรูปจะพบว่าค่าแรงดันด้านข้างที่คำนวณได้หลังการปรับแก้ผลของอุณหภูมิจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิผ่านประกบด้านข้างเปลี่ยนแปลงไป



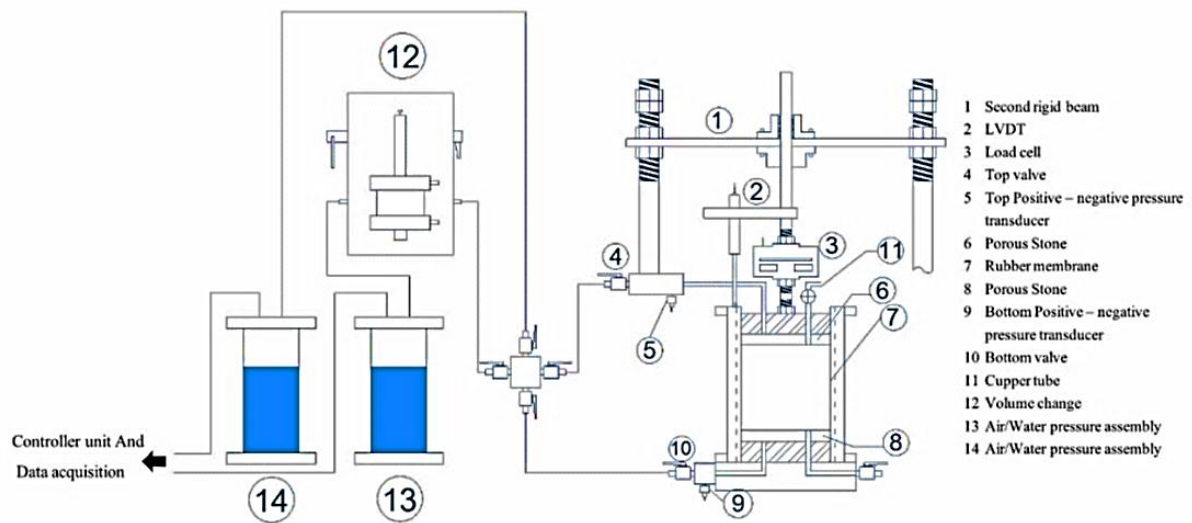
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของอุณหภูมิกับชุดสเตรนเกจ



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นก่อนและหลังปรับแก้ เนื่องจากผลอุณหภูมิของอุปกรณ์ วัดแรงดันดินด้านข้าง

#### 4.4 การทำให้ระบบทดสอบอิมมิตัวด้วยน้ำ

การทำให้ระบบทั้งหมดของเครื่องมือทดสอบอิมมิตัวด้วยน้ำนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งในเรื่องของการทำให้ดินที่ถูกทดสอบอยู่ในสถานะอิมมิตัวด้วยน้ำและในเรื่องของความถูกต้องในการวัดค่าแรงดันน้ำในตัวอย่างดิน ขั้นตอนนี้เริ่มจากนำน้ำที่ถูกกำจัดฟองอากาศ (De-airing water) ไหลเข้าไปในระบบด้วยการใช้แรงดันลบแบบสองทาง (Double Vacuum) ซึ่งน้ำจะไหลจากถังแยกอากาศ (Air /Water pressure assembly) (หมายเลข 13) ดังรูปที่ 4.24 ผ่าน Volume change (หมายเลข 12) จากนั้นน้ำจะเข้าสู่ด้านล่างผ่านชิ้นด้านบนของเซลล์ทดสอบโดยผ่านวาล์ว (หมายเลข 10 และ 4 ตามลำดับ) น้ำที่ถูกนำเข้าไปในระบบจะเอาอากาศและน้ำที่ปนกันอยู่ให้ไหลออกมารวมกันในถังหมายเลข 14 เพื่อแยกอากาศและน้ำออกมาจากกัน ทำการไล่อากาศออกจากระบบประมาณ 3 ถึง 4 รอบหรือจนกว่าฟองอากาศในระบบจะหมดไป จากนั้นปล่อยให้ระบบให้อยู่ในสถานะสุญญากาศที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ -80 kPa เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการไล่ น้ำเข้าสู่ระบบโดยใช้แรงดันลบแบบสองทาง (Double vacuum) อีก 1-2 ครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าฟองอากาศจะไม่ตกค้างในระบบ



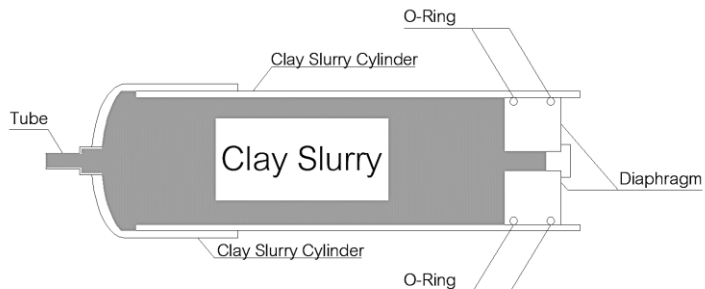
รูปที่ 4.24 แสดงส่วนต่าง ๆ ของระบบการไล่อากาศ

#### 4.5 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบ

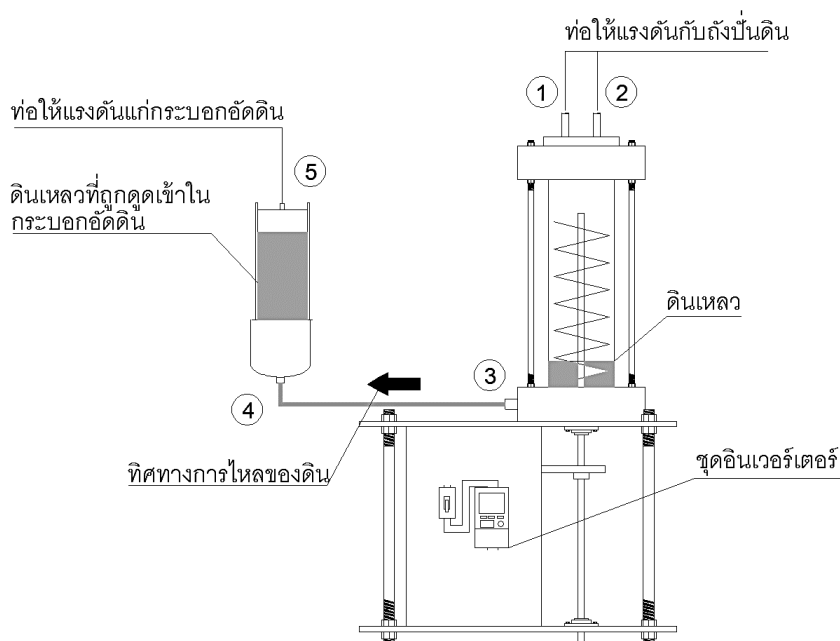
ก่อนทำการดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องทดสอบจะต้องทำการบรรจุดินเหลวเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็มฉีดยาขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 4.25 และต้องทำการตรวจสอบสภาพความอึดตัวของดินเหลว ก่อนทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินเพื่อให้มั่นใจได้ว่าดินอยู่ในสภาพอึดตัวด้วยน้ำ

เมื่อดินมีความอึดตัวมากกว่าร้อยละ 98 ก็ทำการบรรจุดินเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินโดยใช้ท่อไปที่ต่อด้านล่างของกระบอกอัดฉีดดินเหลว (หมายเลข 4) ดังรูปที่ 4.26 เข้ากับด้านล่างของเครื่องปั่นดิน (หมายเลข 4) แล้วปล่อยแรงดูดในถังปั่นดินให้เป็นค่าแรงดันบรรยากาศโดยทำการเปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 หลังจากนั้นทำการเปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อให้ดินไหลเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินและให้แรงดันลบกับกระบอกอัดฉีดดินเหลวที่ตำแหน่งหมายเลข 5 แรงความเร็วรอบของใบพัดเครื่องปั่นดินไปที่ 60 รอบ/นาที ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อช่วยผลักดันดินเหลวให้ไหลเข้าสู่กระบอกอัดฉีดดินโดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะถ่ายดิน เมื่อดินเต็มกระบอกแล้วจะนำแผ่นไดอะแฟรมอลูมิเนียมซึ่งซีล (Seal) ด้วยโอริง (O-Ring) ทำการเปิดวาล์วด้านบนแล้วกดลงไปที่ด้านบนของกระบอกอัดฉีดดินเพื่อไล่อากาศออกจากนั้นทำการปิดวาล์ว



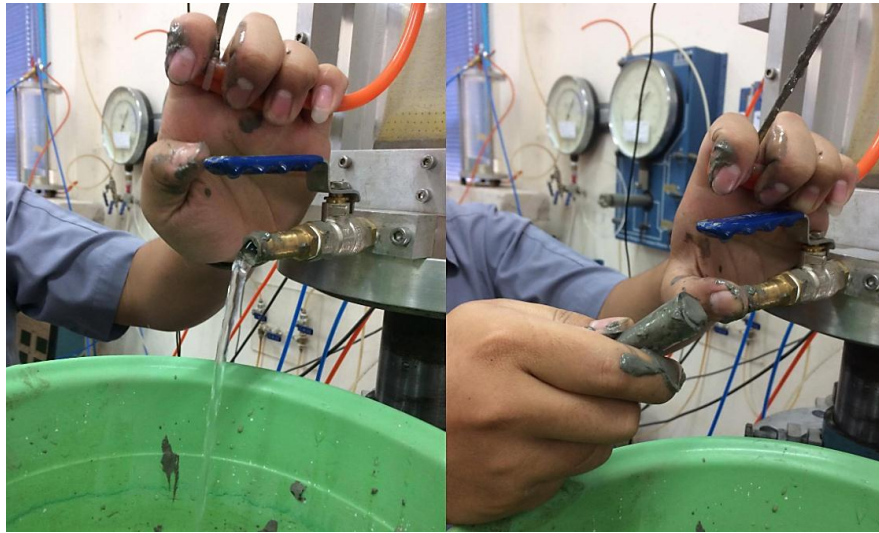


รูปที่ 4.25 ภาพตัดของกระบอกอัดฉีดดินเหลว

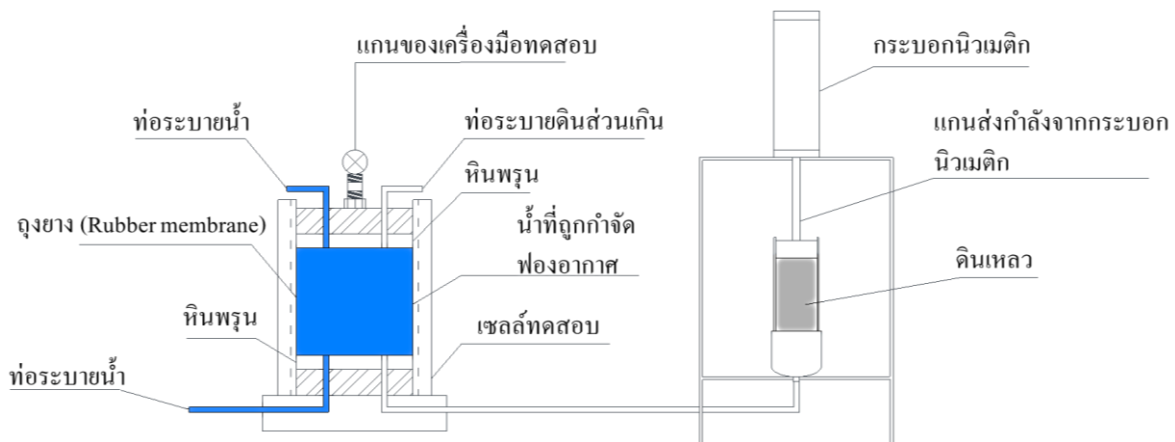


รูปที่ 4.26 บรรจุดินเข้าสู่กระบอกดินจากเครื่องปั่นดิน

ในการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบนั้นจะใช้แรงกดจากกระบอกนิวเมติกกดผ่านแผ่นไดอะแฟรมอลูมิเนียมเพื่อดันดินออกจากกระบอกให้ไหลเข้าเครื่องทดสอบโดยการต่อท่อจากกระบอกอัดฉีดดินเหลวเข้ากับเครื่องทดสอบก่อน ในขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเนื่องจากการเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกันมีอากาศตกค้างอยู่จะส่งผลทำให้ระบบไม่อิมตัวด้วยน้ำ โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการปล่อยน้ำที่อยู่ในระบบออกมาทางวาล์วด้านล่างของเซลล์ทดสอบเพื่อไล่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบออกมา จากนั้นนำท่อที่ต่อจากกระบอกอัดฉีดดินมาต่อเข้ากับวาล์วโดยจะทำการดันดินออกมาให้ फैนปลายท่อเพื่อให้ดินเหลวดันอากาศที่ตกค้างภายในสายออกมดั่งภาพที่ 4.27 แล้วจึงต่อท่อเข้าที่ด้านล่างของเซลล์ทดสอบ โดยมีแผนผังการทำงาน ดั่งภาพที่ 4.28 และภาพที่ 4.29 แสดงภาพการทำงานจริงในห้องปฏิบัติการ



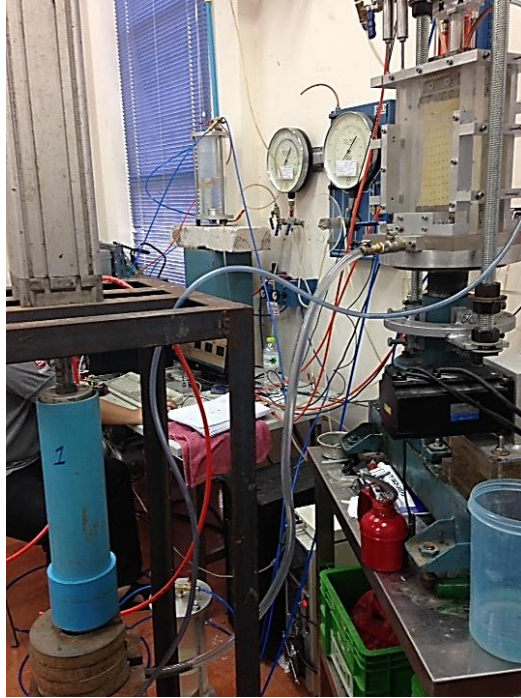
รูปที่ 4.27 การปล่อยน้ำในระบบและการต่อท่อลำเลียงดินเหลวเข้าเครื่องมือทดสอบ



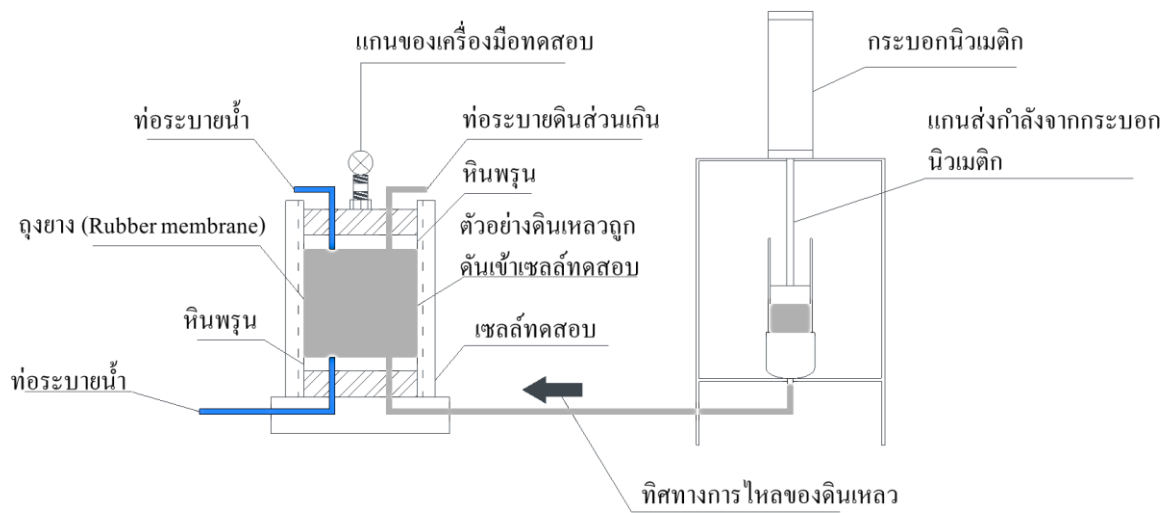
รูปที่ 4.28 การติดตั้งกระบอกดินดินเข้าสู่เครื่องดันดินเพื่อทำการดันดินเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ

ทำการดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกกำหนดความสูงของตัวอย่างไว้ล่วงหน้า ในการดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือทดสอบจะทำการดันดินจากด้านล่างของอุปกรณ์เพื่อให้ดินเหลวเข้าไปใต้น้ำที่อยู่ภายในถุงยางโดยดินเหลวจะไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนจนมีดินและน้ำส่วนเกินออกมาจากท่อระบายที่ได้เตรียมเอาไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 จากนั้นทำการซีล (Seal) ท่อที่ดินและน้ำส่วนเกินระบายออกมาดังแสดงในรูปที่ 4.32 เมื่อดินเหลวถูกดันเข้าสู่เครื่องทดสอบจนเต็ม (รูปที่ 4.33) จะมีการวัดระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturate) ของตัวอย่างดินด้วยการใช้สมการที่ 4.1 เมื่อพบว่าดินมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่า 98% จึงค่อยทำการ Consolidation ตัวอย่างเพื่อสร้างโครงสร้างดินต่อไป

$$Sr\% = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \times 100 = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_h} \times 100 = \frac{\Delta \sigma_h}{\Delta \sigma_v} \times 100 \quad (4.1)$$



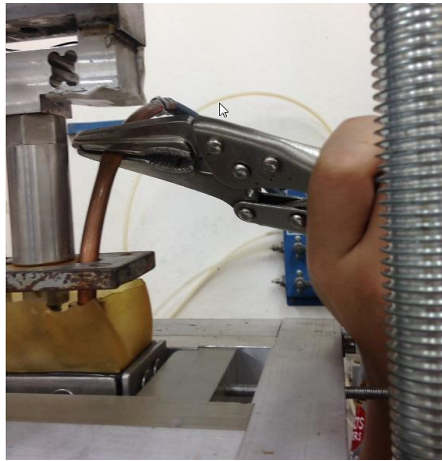
รูปที่ 4.29 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องมือการทดสอบ



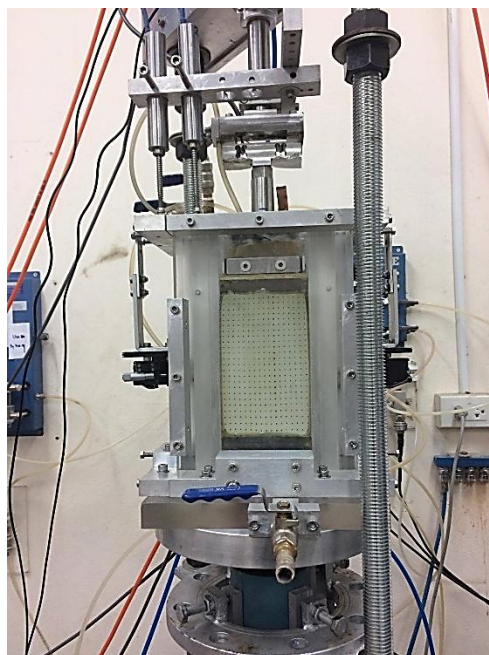
รูปที่ 4.30 การดันดินเข้าสู่เครื่องทดสอบที่ถูกกำหนดความสูงของตัวอย่างไว้



รูปที่ 4.31 การดันดินเหลวเข้าสู่เครื่องทดสอบจมน้ำดินและน้ำส่วนเกินออกมา



รูปที่ 4.32 การซีลท่อทองแดงเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึม



รูปที่ 4.33 ตัวอย่างดินเหลวหลังถูกฉีดเข้าไปในเครื่องทดสอบ

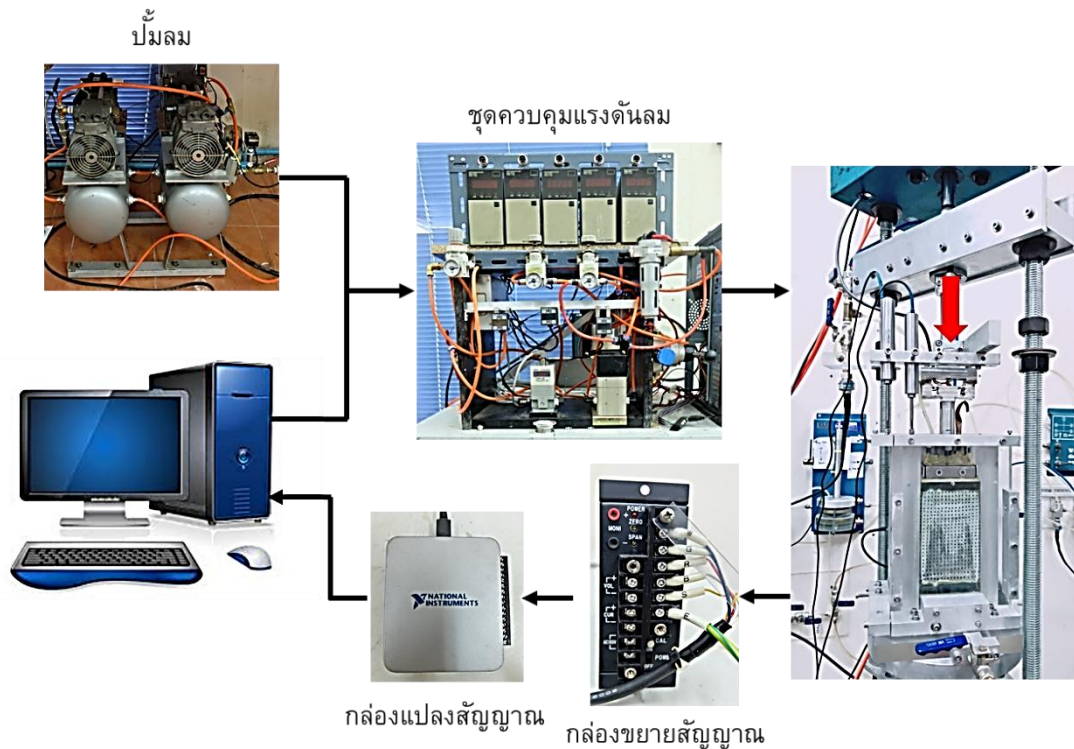
#### 4.6 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

หลังจากการฉีดดินเหลวเข้าไปในอุปกรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินโดยกระบวนการอัดตัวคายน้ำเพื่อสร้างโครงสร้างดินใหม่จะเริ่มต้นขึ้นโดยแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ดังต่อไปนี้

##### 4.6.1 การสร้างโครงสร้างใหม่ให้แก่ดิน (Reconstitute)

ก่อนดำเนินการในขั้นตอนนี้จะต้องปล่อยให้แรงดันน้ำส่วนเกินภายในตัวอย่างดินที่เกิดจากการฉีดดินเหลวเข้าไปในเซลล์ทดสอบลดลงจนเท่ากับศูนย์เสียก่อน เนื่องมาจากในการอัดดินเข้าสู่เครื่องทดสอบดินที่ถูกอัดเข้าไปจะมีแรงดันน้ำส่วนเกินอยู่ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 60-80 kPa หลังจากการฉีดดินเหลวเสร็จโดยแรงดันนี้ทำให้ดินเหลวตันลงยวบยาดูดเข้ากับมุมของเครื่องทดสอบและดินเอาดินและน้ำส่วนเกินออกมา การระบายแรงดันน้ำส่วนเกินทำได้โดยเปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 10 ในภาพที่ 4.24 แล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นจะทำการปลดปล่อยแกนกดด้านบนตัวอย่างให้เป็นอิสระแล้วเริ่มต้นกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ แต่เนื่องจากตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบนี้มีปริมาณน้ำและความสูงค่อนข้างมากอีกทั้งยังเป็นดินเหนียวที่มีความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ จึงต้องทำการเร่งการทรุดตัวโดยการใช้แรงดันน้ำเป็นลบ (Negative pore water pressure) ร่วมกับความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress) เข้าไปในตัวอย่างดิน โดยในขั้นตอนนี้จะใช้ค่าแรงดันลบประมาณร้อยละ 30 ของความเค้นทั้งหมดในแนวตั้ง (total vertical stress) และต้องไม่เกิน 80% ของแรงดันบรรยากาศ ภาพที่ 4.34 ได้แสดงกระบวนการทำงานทำงานระหว่างทำการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน



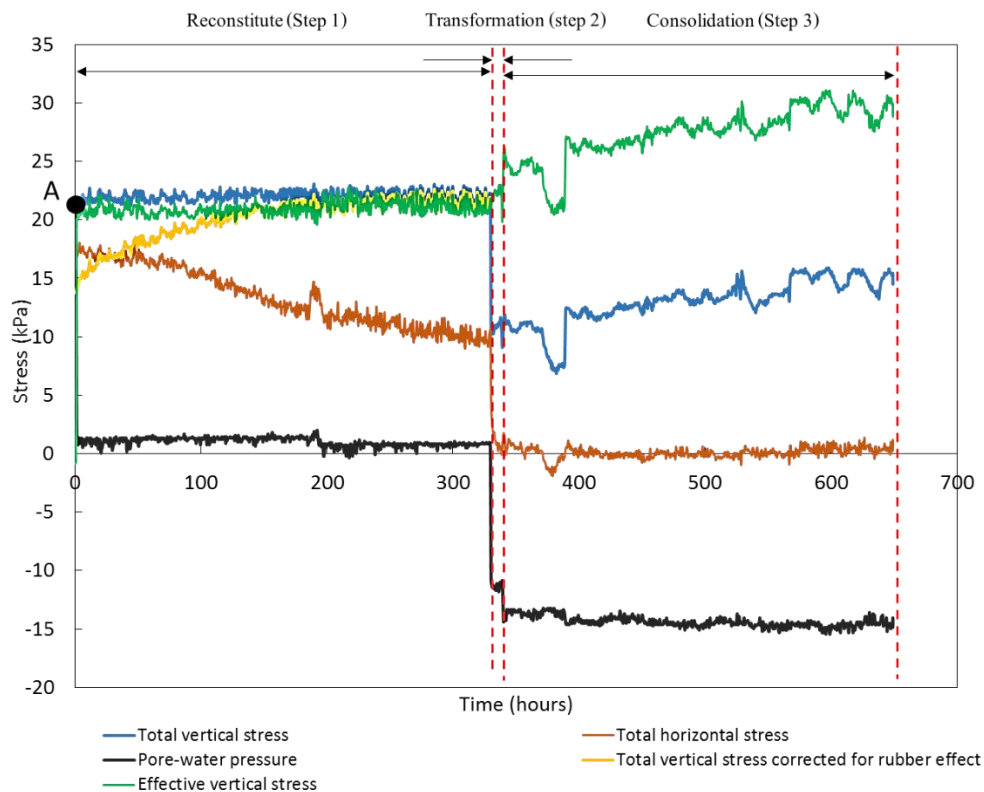


ภาพที่ 4.34 กระบวนการทำงานในการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดิน

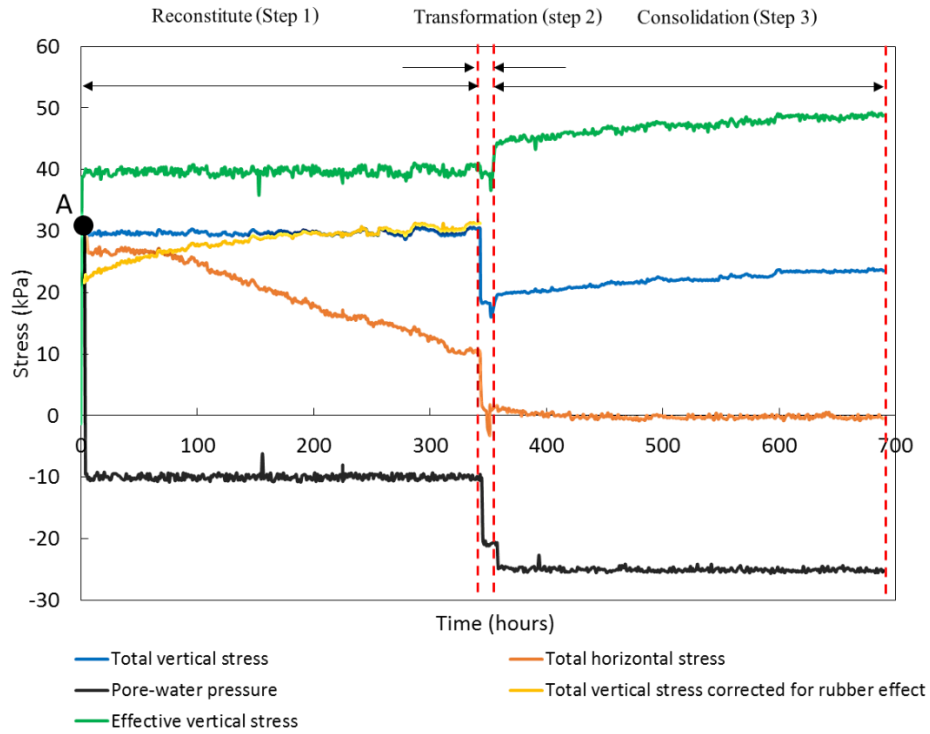
ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างใหม่ค่าของระยะการทรุดตัวจะถูกวัดด้วย LVDT คู่ ซึ่งสามารถสลับการใช้งานได้เมื่อตัวใดตัวหนึ่งทำงานจนใกล้จะสุดระยะทางของการวัด ในการสร้างค่า Vertical stress จะใช้กระบอกกลมนิวเมติกที่มีการปรับแก้แรงดันลมให้เหมาะสมกับ total vertical stress อัตโนมัติ เนื่องจากกระบอกกลมนิวเมติกมีค่าแรงเสียดทานภายในกระบอกไม่คงที่ ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมค่า total vertical stress ให้สม่ำเสมอขึ้นโดยทำการเปิดระบบที่ 1 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.5) เนื่องจากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่นำเสนอจะต้องทำการการตั้งสูงยางตามค่าการทรุดตัวของดินที่คำนวณเอาไว้ ซึ่งแรงดึงกลับของสูงยางจะส่งผลต่อค่าความเค้นรวมในแนวตั้ง ดังนั้นจะต้องทำการเปิดระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.5) เพื่อปรับแก้ค่าความเค้นในแนวตั้งให้คงที่ตลอดเวลาที่สูงยางหดตัวลงเนื่องจากการทรุดตัวของดิน รูปที่ 4.35 ในช่วง reconstitute แสดงค่าความเค้นทั้งในแนวตั้งและด้านข้างรวมไปถึงค่าแรงดันน้ำที่ใช้ระหว่างกระบวนการสร้างโครงสร้างดินพบว่าค่า total vertical stress (ความเค้นที่เกิดจากกระบอกกลมนิวเมติกรวมกับแรงดึงของสูงยาง) จะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.8$  kPa นั้นหมายความว่าระบบควบคุมแรงกดอัตโนมัติทำงานได้เป็นอย่างดี โดยที่ค่า total vertical stress corrected for rubber effect (แรงเค้นในแนวตั้งที่สร้างโดยกระบอกกลมนิวเมติกเพียงอย่างเดียว) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะการหดตัวของสูงยางเนื่อง

จากอิทธิพลของแรงหดตัวกลับของถุงยางจะลดลงตามระยะการทรุดตัวของดินและจะกลับมามีค่าคงที่เมื่อถุงยางกลับสู่ระยะเดิมที่ไม่มีการยืดตัวซึ่งจะต้องทำการปิดระบบที่ 2 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด ดังนั้นค่าความเค้นในแนวตั้งที่ใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่นี้ จะมีค่าคงที่ตลอดการทรุดตัวของดินตัวอย่างซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างดินมีความสม่ำเสมอและสามารถมั่นใจได้ว่าดินตัวอย่างนี้ยังคงเป็นดินเหนียวแบบอัดตัวปกติ (normally-consolidation) ตลอดความสูงตัวอย่าง นอกจากนี้ยังทำการวัดแรงดันดินด้านข้างโดยเปิดระบบการวัดแรงดันดินด้านข้างด้วยการสมดุลแรงลมอัตโนมัติ (รายละเอียดในหัวข้อ 3.2.3) โดยจะมีค่าเท่ากับ total vertical stress เมื่อเวลาเท่ากับ 0 และเมื่อเกิดการอัดตัวคายน้ำจะพบว่าค่าแรงดันด้านข้างจะลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ จากรูปจะพบว่าที่จุดเริ่มต้น (time=0) ที่จุด A ค่า total vertical stress = total horizontal stress = pore-water pressure แสดงว่าดินที่ถูกฉีดเข้าไปก่อนการอัดตัวคายน้ำอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และเมื่อคำนวณค่าระดับความอิ่มตัวโดยใช้สมการที่ 4.1 พบว่าหูดตัวอย่างดินมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่า 98 %

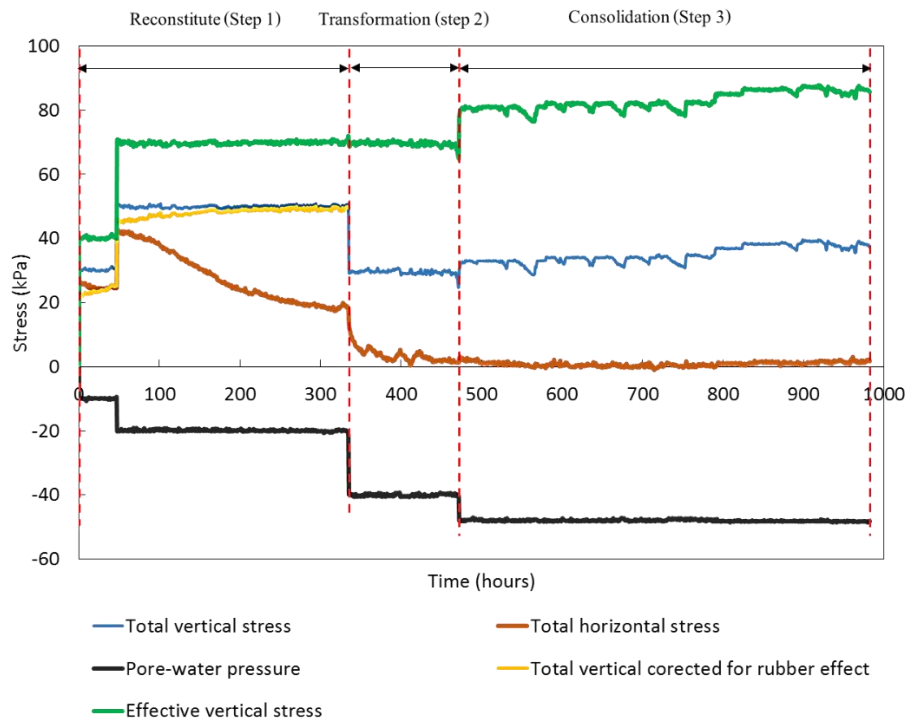
ในการตรวจสอบการสิ้นสุดของกระบวนการสร้างโครงสร้างใหม่ของตัวอย่างดินจะใช้วิธีของ Asaoka, 1978 ดังรูปที่ 4.36 และสามารถคำนวณค่าสำหรับประสิทธิภาพแรงดันด้านข้างในสภาวะอยู่หนึ่งครั้งที่ 1 ได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.47, 0.50 และ 0.55 สำหรับตัวอย่าง PS 01-30 kPa, PS 02-50 kPa และ PS 03-90 kPa ตามลำดับเมื่อกระบวนการสร้างโครงสร้างดินสิ้นสุดลง



(ก)



(ข)

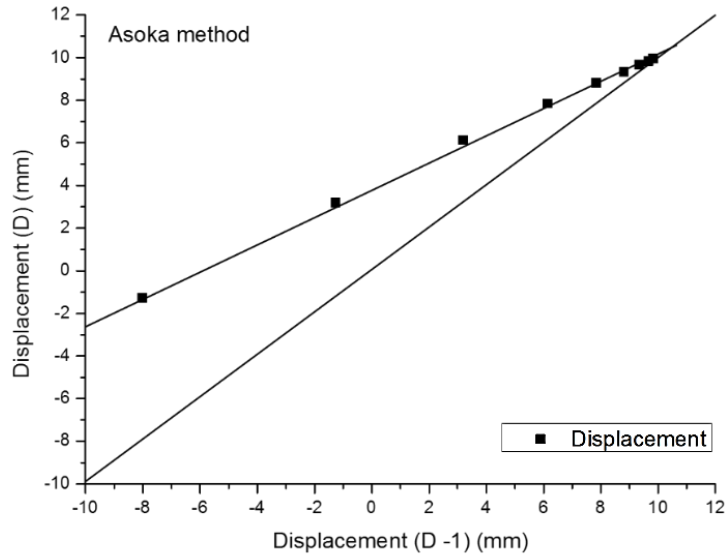


(ค)

รูปที่ 4.35 ค่าความเค้นในแนวตั้งและด้านข้างรวมทั้งค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำที่เวลาต่างๆ

(ก) PS 01-30 kPa (ข) PS 02-50 kPa และ (ค) PS 03-90 kPa

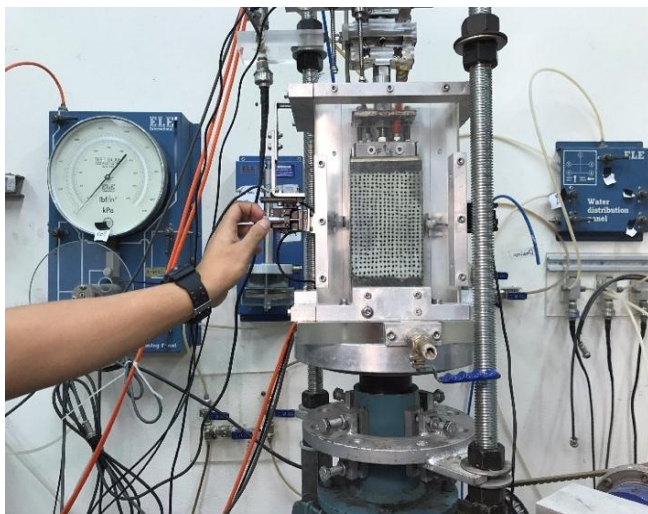




รูปที่ 4.36 การตรวจสอบหาจุดสิ้นสุดการอัดตัวคาน้ำด้วยวิธี Asoka (1978)

#### 4.6.2 ช่วงการเปลี่ยนเงื่อนไขสถานะแวดล้อม (Transformation)

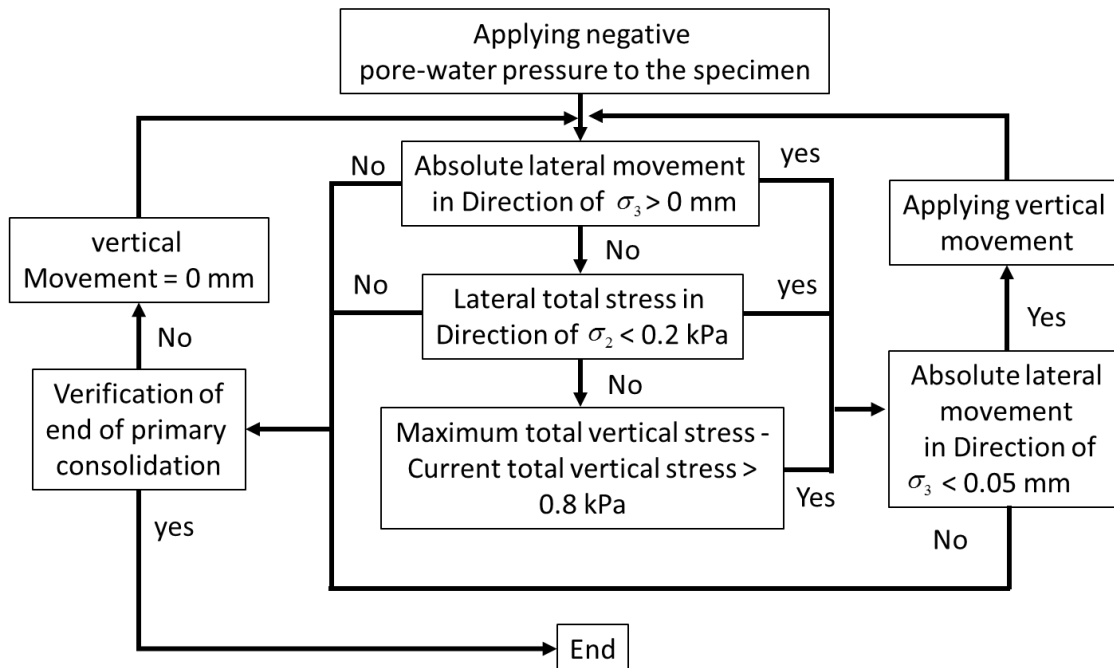
เมื่อสิ้นสุดการสร้างโครงสร้างใหม่ให้กับดินตัวอย่าง ขั้นตอนต่อไปคือการเปลี่ยนเงื่อนไขสถานะแวดล้อมให้เป็นแบบความเครียดในระนาบซึ่งจะต้องถอดแผ่นประกบที่ 1 และ 2 ออกดังแสดงในรูปที่ 3.17 แต่ขั้นตอนนี้จะไม่สามารถทำได้หากค่าแรงเค้นในแนวราบไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะต้องทำการลดค่า total vertical stress และ pore-water pressure เท่ากับ total horizontal stress ซึ่งจะทำให้ค่า effective vertical stress ยังคงมีค่าคงที่และเมื่อค่า total horizontal stress เข้าสู่ค่าศูนย์จึงสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขสถานะแวดล้อมให้เป็นแบบความเครียดในระนาบได้ จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง (gab sensor) และทำการสอบเทียบอุปกรณ์ หลังจากถอดแผ่นประกบที่ 1 และ 2 โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) รูปที่ 4.37 แสดงภาพหลังการติดตั้ง gab sensor ที่ด้านข้างของตัวอย่างดิน หลังจากแผ่นประกบถูกถอดออกพบว่าค่าแรงเค้นในแนวตั้งมีค่าลดลงซึ่งเกิดการกระบวนกรถอดแผ่นประกบนั้นไปรบกวนดินดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างดินใหม่ที่ปราศจากการรบกวนโดยสมบูรณ์ด้วยการอัดตัวคาน้ำ



รูปที่ 4.37 การติดตั้ง gab sensor ที่ด้านข้างของตัวอย่างดิน

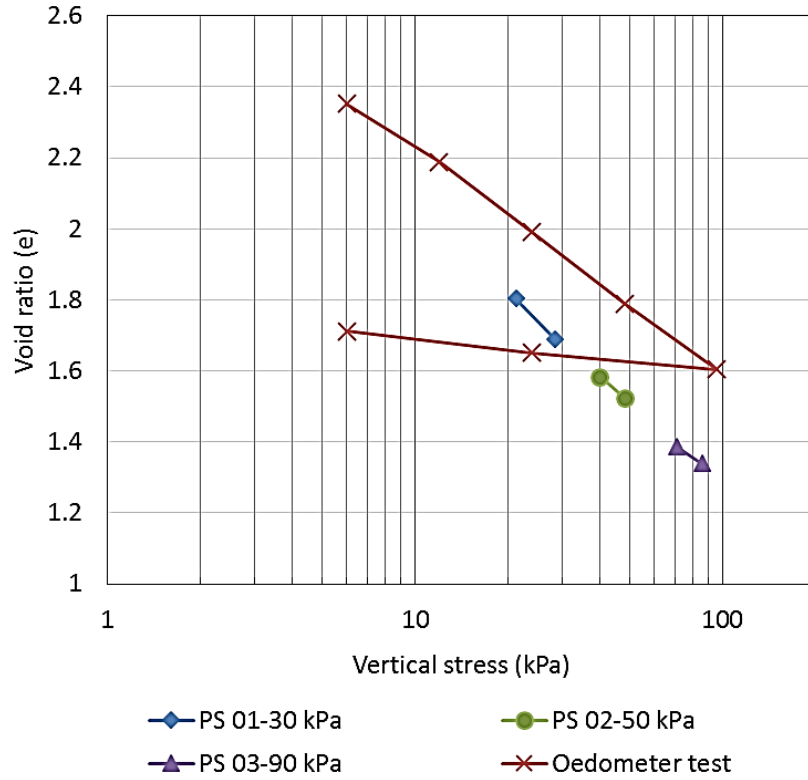
#### 4.6.3 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

เนื่องจากเปลี่ยนเงื่อนไขสถานะแวดล้อมให้เป็นแบบความเครียดในระนาบทำให้ไม่สามารถเพิ่มแรงกดในแนวตั้งเพื่อเป็นการกระตุ้นให้ดินคายน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการกระตุ้นให้ดินคายน้ำโดยการลดแรงดันน้ำลงอีก 5-10 kPa เพื่อเพิ่มค่าความเค้นประสิทธิผลและกระตุ้นดินให้คายน้ำโดยไม่ต้องเพิ่มค่า total vertical stress แต่เนื่องจากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะส่งผลต่อค่าเค้นประสิทธิผลในทุกแกน นั้นหมายความว่าดินจะเกิดการหดตัวด้านข้างด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างโดยใช้โปรแกรมอัตโนมัติซึ่งก็คือระบบที่ 3 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.5) และมีหลักการทำงานดังรูปที่ 4.38 การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินจะพิจารณาได้จากอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง (gab sensor) ที่ติดตั้งไว้แล้วก่อนหน้านี้และค่าของแรงเค้นด้านข้างซึ่งอ่านได้จากอุปกรณ์วัดแรงดันด้านข้าง การตรวจสอบการสิ้นสุดของกระบวนการอัดตัวคายน้ำยังคงใช้วิธีของ Asaoka (1978) และสามารถคำนวณค่าสำหรับประสิทธิผลแรงดันด้านข้างในสถานะอยู่หนึ่งครั้งที่ 2 ได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.5, 0.52 และ 0.56 สำหรับตัวอย่าง PS 01-30 kPa, PS 02-50 kPa และ PS 03-90 kPa ตามลำดับเมื่อกระบวนการสร้างโครงสร้างดินสิ้นสุดลง

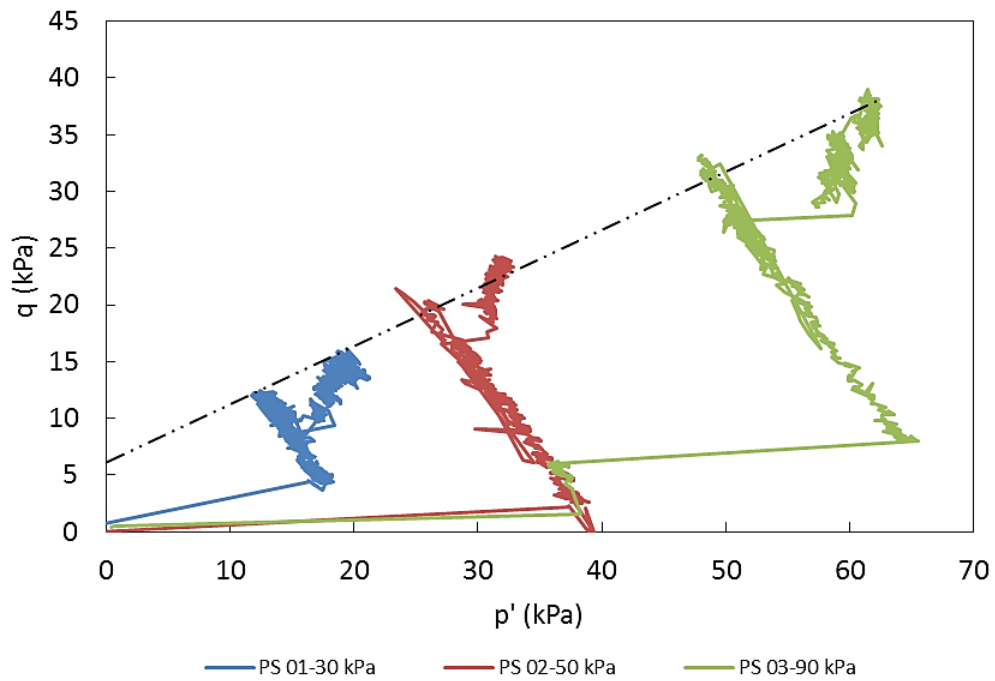


รูปที่ 4.38 หลักการทำงานของกระบวนการอัดตัวคายน้ำ

ผลจากการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินที่ทำในเซลล์ทดสอบแบบความเครียดในระนาบสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง Oedometer test โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวประกอบตัวใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จากภาพพบว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในเซลล์ทดสอบแบบความเครียดในระนาบนั้นมีค่ามากกว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในเครื่อง Oedometer test เนื่องจากมีค่าอัตราการทรุดตัวที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลมาจากตัวอย่างดินในเซลล์ทดสอบแบบความเครียดในระนาบนั้นมีความสูงเริ่มต้นมากกว่า 180 มิลลิเมตร แต่ตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเครื่อง Oedometer test มีความสูงเริ่มต้นเพียง 20 มิลลิเมตร ทำให้อัตราการทรุดที่เกิดขึ้นในเครื่อง Oedometer test นั้นมีความเร็วกว่ามากนั้นเป็นเพราะระยะทางการระบายน้ำสั้นกว่า และพิจารณาลักษณะเส้นทางเดินของความเค้นประสิทธิผล (effective stress path) ในแกน  $p'$  (mean stress) และ  $q$  (deviator stress) ของทั้ง 3 ตัวอย่างจะพบว่า มีเส้นทางเดินที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดขึ้นระหว่าง Oedometer test กับ Plane strain test



รูปที่ 4.40 เส้นทางดินของความเค้นในแกน  $p'$  และ  $q$  ในขั้นตอนการสร้างดินเหนียวประกอบตัวใหม่

## 4.7 การเฉือนตัวอย่าง (Shearing)

ในการทดสอบการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ โดยการนำดินที่เก็บได้จากภาคสนามมาทำลายโครงสร้างเหลว แล้วจึงทำการสร้างโครงสร้างของดินด้วยปริมาณน้ำประมาณร้อยละ 1.2-1.4 เท่าของขีดจำกัดเหลว เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำจึงทำการเฉือนตัวอย่างภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ โดยมีขั้นตอน คือ ทำการเปิดระบบที่ 4 ของโปรแกรมควบคุมเฟรมกด (รายละเอียดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.5) แล้วทำการยึดแกนส่งกำลังอยู่เหนือลูกปืนสไลด์ที่ติดอยู่กับคานด้านบน ทำการปิดวาล์วทั้งบนและล่างของตัวอย่างเพื่อให้ไม่สามารถไหลออกได้ในระหว่างการเฉือน ซึ่งสภาวะแวดล้อมของเครื่องมือทดสอบจะเป็นแบบความเครียดในระนาบดังแสดงในรูปที่ 4.37

ทำการตั้งกล้องถ่ายรูปบนขาตั้งกล้องที่มีความมั่นคง การถ่ายรูปจะใช้รีโมทคอนโทรลเป็นตัวสั่งการเพื่อไปให้กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวระหว่างถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.41

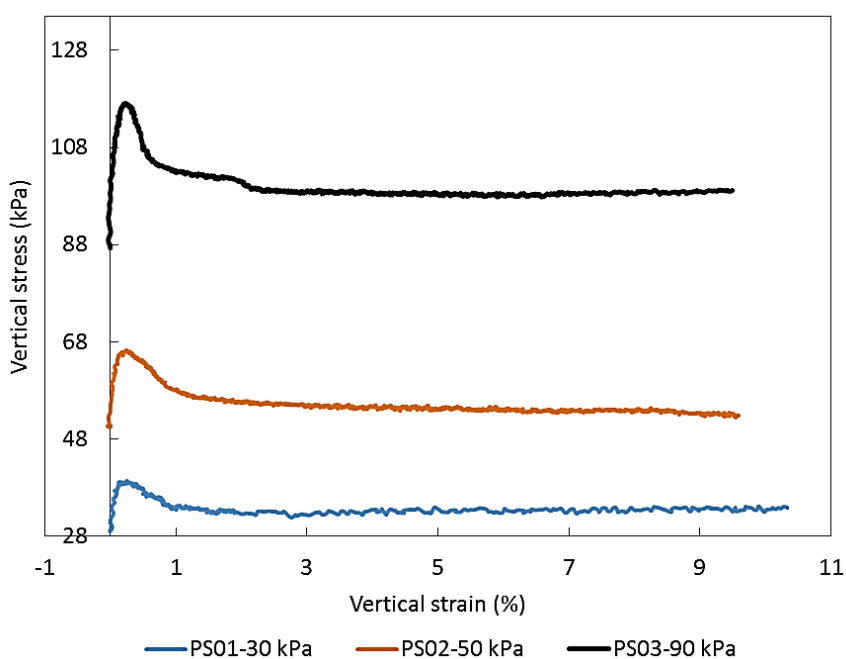


รูปที่ 4.41 การตั้งกล้องถ่ายรูป

จากนั้นจะทำการเฉือนดินแบบไม่ระบายน้ำโดยใช้อัตราการเฉือนอยู่ที่ 0.5% Strain/min และเฉือนตัวอย่างไปจนถึง 10% Strain ของความสูงของตัวอย่าง ในการเก็บข้อมูลของการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 0.5 วินาที จนกว่าค่าความเค้นอัดในแนวตั้งจะลดลงก็จะเปลี่ยนระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 วินาที ไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ การถ่ายภาพจะถ่ายขณะก่อนทำการเฉือนเพื่อใช้เป็นภาพอ้างอิงสำหรับทุกรูปและจะถ่ายทุก 1 วินาที และเปลี่ยนเป็นทุกๆ 5 วินาที เมื่อความเค้นอัดในแนวตั้งจะลดลง

งานวิจัยนี้จะทำการเฉือนตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่างคือ PS01-30 kPa PS02-50 kPa และ PS03-90 kPa ซึ่งใช้ค่าความเค้นอัดในแนวตั้งในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำที่ 29.21 kPa, 50.77 kPa และ 87.33 kPa

ตามลำดับซึ่ง รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งกับค่าความเครียดพบว่าทั้งสามตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ Softening ซึ่งปรากฏให้เห็นจุด peak ที่ประมาณ 0.3 %strain อย่างชัดเจนและจะเข้าสู่ช่วง residual state เมื่อสิ้นสุดช่วง softening ที่ประมาณ 1 %strain โดยตัวอย่าง PS03-90kPa นั้นจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างคือจะเกิดการ softening ทั้งหมด 2 ระดับ คือที่ประมาณ 1 %strain และที่ 2 %strain ตามลำดับ จากเส้นกราฟจะพบว่าลักษณะเส้นกราฟที่ค่า vertical strain เท่ากับ 0 นั้นจะเกิดการพุ่งขึ้นทันทีเมื่อเดือนตัวอย่างดิน นั้นแสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับอุปกรณ์วัดความเค้นในแนวตั้งนั้นสัมผัสกันโดยสมบูรณ์ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้เซลล์ทดสอบตัวเดียวกันทั้งในขั้นตอนการเตรียมดินและการเดือนดิน

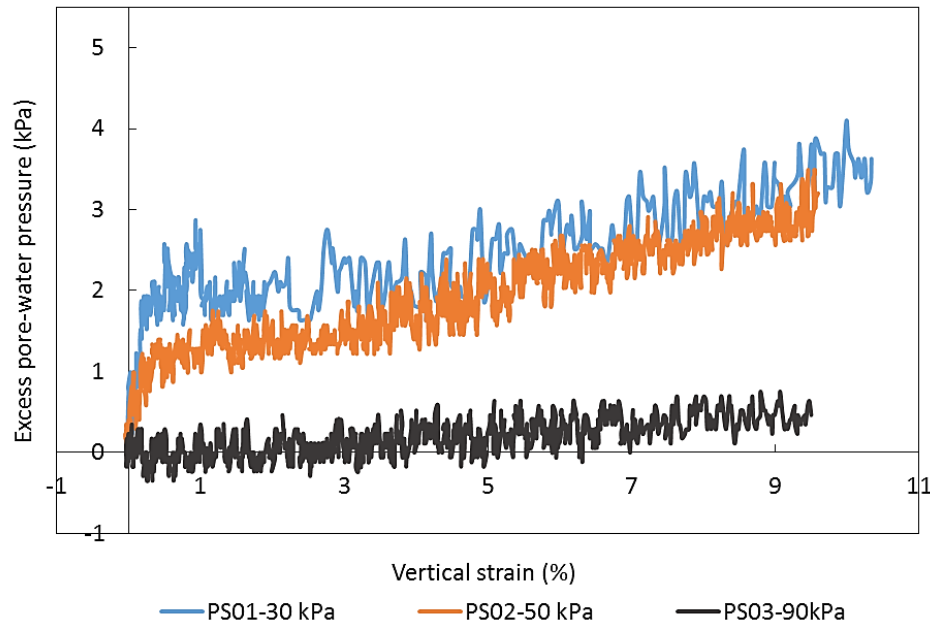


รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลและความเครียดในแนวตั้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore-water pressure) กับค่าความเครียดในแนวตั้งแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าทุกตัวอย่างเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นค่าบวก (แรงอัด) และตัวอย่างที่ใช้ค่าความเค้นต่ำในกระบวนการอัดตัวคายน้ำจะมีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุด

ถึงแม้ว่าตัวอย่างทั้งสามตัวอย่างจะเป็นดินเหนียวที่อยู่ในสภาวะอัดตัวปกติ (Normally consolidated clay, NC clay) แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.42 และ 4.43 พบว่าพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการเดือนดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Over-consolidated clay, OC clay) ในการทดสอบการรับกำลังแรงเดือนด้วยเครื่อง Triaxial compression tests แต่ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่วัดได้กลับมีค่าเป็นบวกและมากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดใน

แนวตั้ง ซึ่งหมายถึงมีการบีบตัวของเม็ดดินระหว่างทำการเฉือนและเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของดินเหนียวชนิดอัดตัวปกติ สำหรับการทดสอบด้วยเครื่อง Triaxial compression tests ดังนั้นการทดสอบแบบ Triaxial compression tests ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมดินที่ถูกเฉือนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบได้



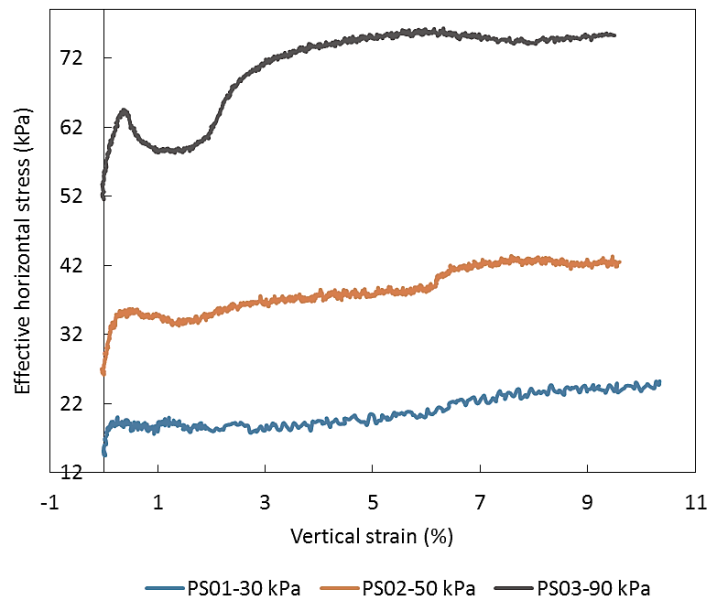
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

นอกจากค่าความเค้นในแนวตั้งแล้ว เครื่องมือทดสอบนี้ยังสามารถวัดค่าความเค้นด้านข้างของตัวอย่างระหว่างการเฉือนได้อีกด้วย รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบกับค่าความเครียดในแนวตั้ง จากรูปพบว่าพฤติกรรมคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งกับค่าความเครียดในรูปที่ 4.42 แตกต่างที่เมื่อเฉือนเกินจุดสิ้นสุดของการ softening แล้วค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเครียดในแนวตั้งซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบ hardening ซึ่งจะมี ความรุนแรงขึ้นเมื่อดินแข็งขึ้น จากงานวิจัยของ Khalid และ Iblahim ในปี 2007 ซึ่งเปรียบเทียบพฤติกรรมของดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่เฉือนด้วยเครื่องทดสอบแบบ Triaxial compression tests กับ plane strain compression tests ในแกน  $p$  และ  $q$  โดยได้ประมาณค่าแรงดันประสิทธิผลด้านข้างในทิศทางที่ไม่เกิดการเสียรูป ( $\sigma'_2$ ) จากสมการที่เสนอโดย Chang และคณะในปี 1999 ซึ่งหากนำสมการดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริงจากการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.45 จะพบว่าสมการใช้ได้เพียงช่วงต้นๆ ของการเฉือนเท่านั้น

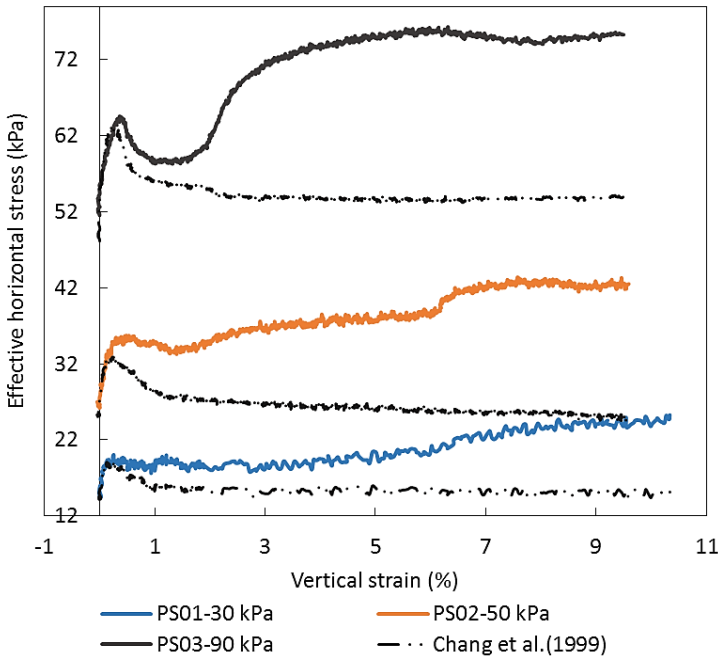
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.46 อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบต่อแนวตั้งจะพบว่ามีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 0.5-0.6 และจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเฉือนดินจนมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 0.8



หลังจากทำการเฉือนดินแล้ว ทุกตัวอย่างจะถูกนำไปอบหาปริมาณน้ำในมวลดินเพื่อหาค่าระดับความอึมตัวด้วยน้ำซึ่งเป็นตัวยืนยันว่าการคำนวณหาค่าความเค้นประสิทธิผลนั้นสามารถใช้สมการที่นำเสนอโดย Terzaghi (1925) ได้ จากผลการคำนวณพบว่าทุกตัวอย่างมีค่าระดับความอึมตัวด้วยน้ำมากกว่า 98%

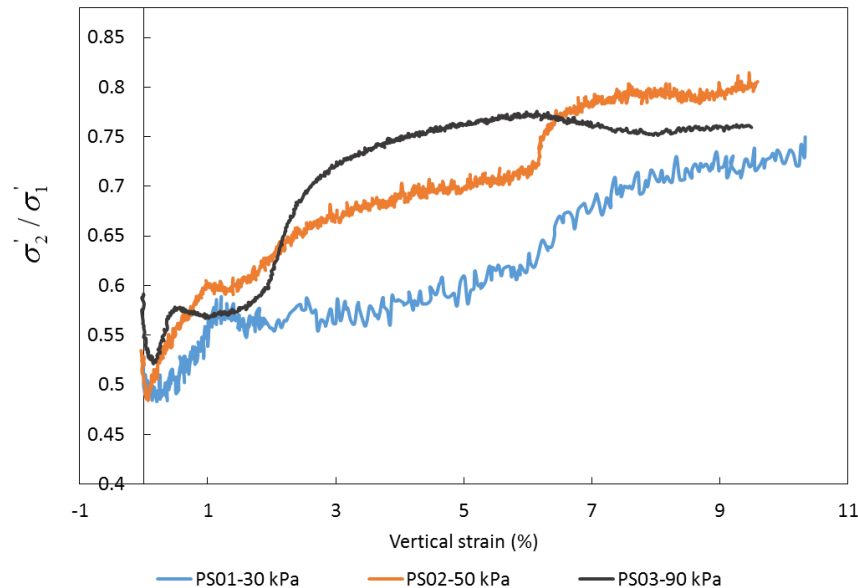


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ ( $\sigma'_2$ ) กับค่าความเครียดในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ ( $\sigma'_2$ ) กับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Chang และคณะในปี 1999



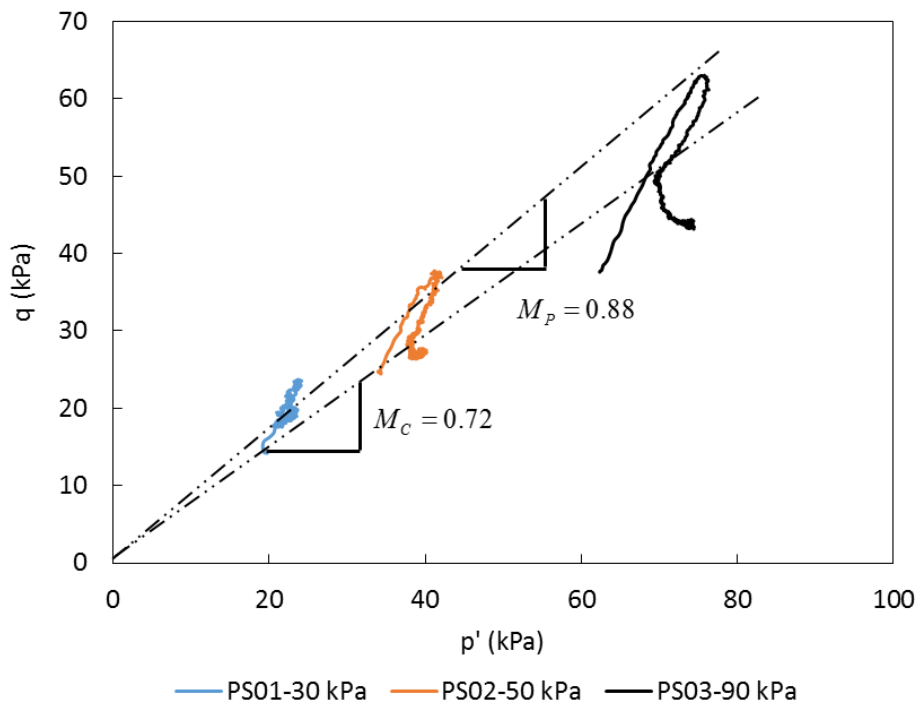


รูปที่ 4.46 อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบต่อแนวตั้ง

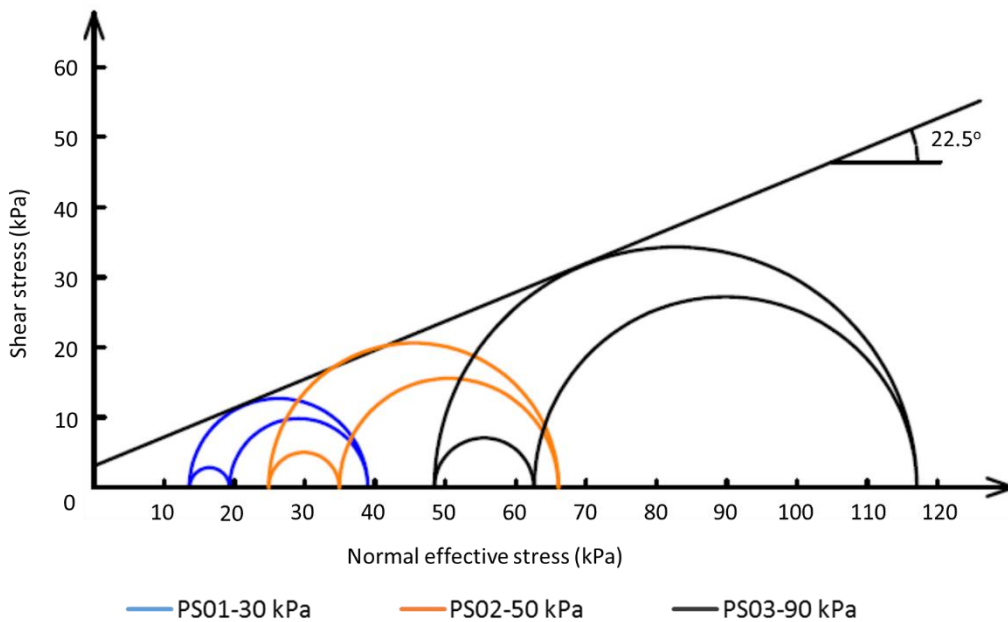
ข้อดีที่สำคัญอีกข้อหนึ่งซึ่งชุดเครื่องมือนี้สามารถวัดค่าแรงดันด้านข้างในทิศทางที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ได้ก็คือ สามารถวิเคราะห์ทางเดินของแรงเค้น (stress path) ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างทำการเฉือนในแกน  $p'$  และ  $q$  ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อต้องการเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างการเฉือนแบบสมมาตรในแนวแกนกับความเค้นในระนาบในอนาคต รูปที่ 4.47 แสดงเส้นทางเดินของแรงเค้นในแกน  $p'$  และ  $q$  ซึ่งคำนวณจากค่าที่วัดจริงในการทดสอบทั้งสามตัวอย่าง จากรูป 4.48 และ 4.49 สามารถหาค่าคุณสมบัติการรับกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯประกอบด้วยใหม่ซึ่งถูกเฉือนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบแบบไม่ระบายน้ำจะได้ค่ามุมเสียดทานภายใน (angle of internal friction,  $\phi'$ ) ที่จุด peak ( $\phi'_p$ ) เท่ากับ  $22.5^\circ$  และมีค่า cohesion ( $c'_p$ ) เท่ากับ 3.0 kPa และที่จุด critical state ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'_c$ ) เท่ากับ  $16.7^\circ$  และมีค่า cohesion ( $c'_c$ ) เท่ากับ 4.5 kPa และเมื่อนำค่าค่ามุมเสียดทานภายในที่จุด peak ไปเปรียบเทียบกับค่ามุมเสียดทานภายในที่ทดสอบโดย Seah & Lai ในปี 2003 ซึ่งได้ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯแบบคงสภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบสมมาตรรอบแกนนั้นมีค่าเท่ากับ  $20.5^\circ$  จะพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบความเครียดในระนาบที่จุด peak นั้นมีค่ามากกว่าถึง 9.75 % ทั้งนี้ผู้วิจัยของตั้งข้อสังเกตคือความแตกต่างระหว่างมุมเสียดทานภายในของทั้งสองการทดสอบอาจมีโอกาสมากกว่านี้หาดินที่นำเอามาใช้ในการทดสอบแบบสมมาตรรอบแกนเป็นดินเหนียวประกอบด้วยใหม่ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่ค่ามุมเสียดทานภายในจะน้อยกว่า  $20.5^\circ$

เมื่อสิ้นสุดการทดสอบการหาแรงเฉือนของตัวอย่างทั้ง 3 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของจุดบนลูจยางจะมีลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นแบบกากบาท (Type X) ดังแสดงในรูปที่ 4.50 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำเสนอ

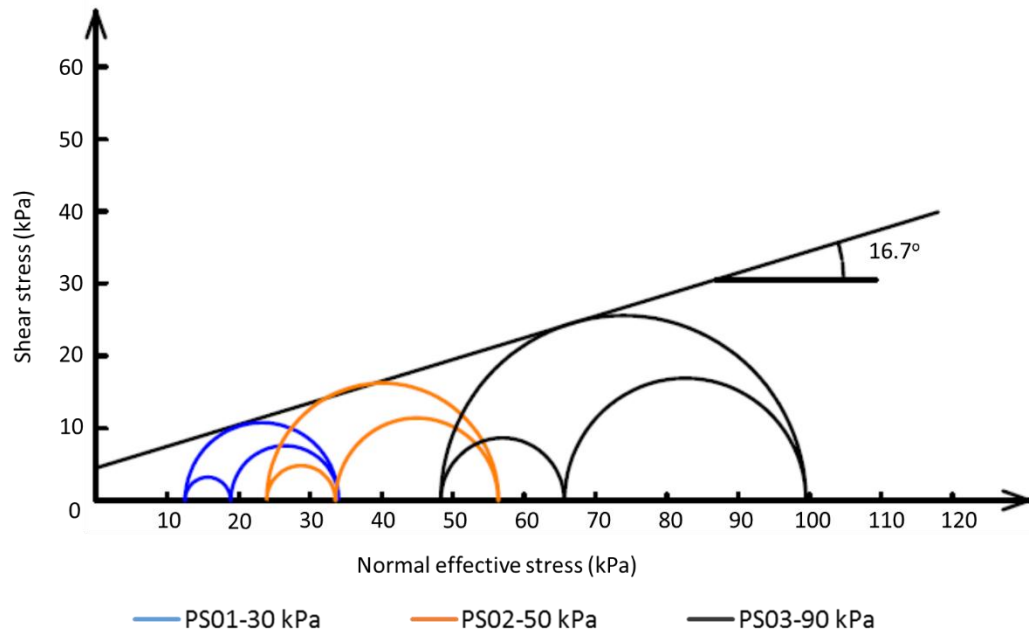
โดย Juyun et al. (2012) โดยตำแหน่งจุดต่าง ๆ บนถ้อยางจะสามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคภาพถ่ายซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



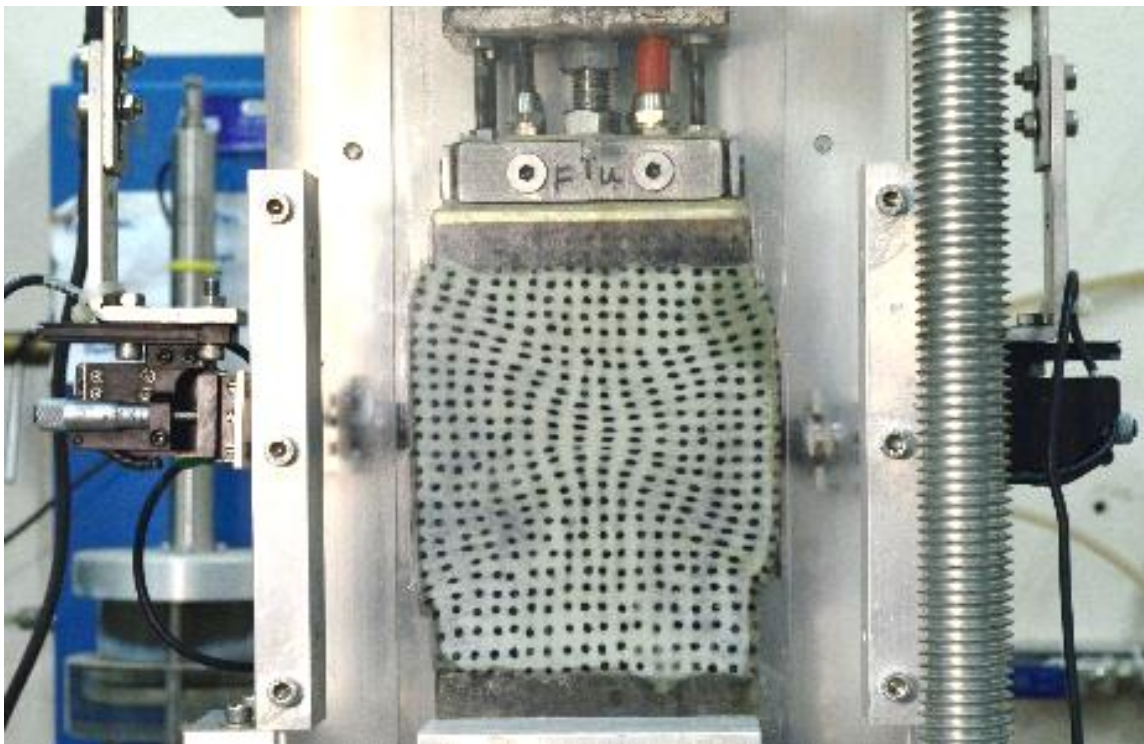
รูปที่ 4.47 เส้นทางเดินของแรงเค้นในแกน p' และ q



รูปที่ 4.48 Mohr's circle ที่จุด peak



รูปที่ 4.49 Mohr's circle ที่จุด critical state



รูปที่ 4.50 ลักษณะการวิบัติของดินเหนียวประกอบตัวใหม่ที่ทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียด  
ในระนาบ

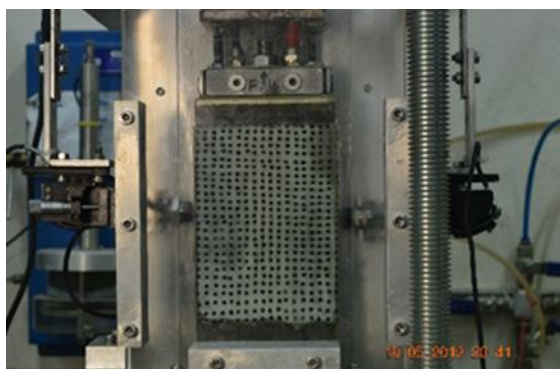
## 4.8 การประมวลผลด้วยภาพถ่าย

ในงานวิจัยนี้ นอกจากต้องการค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ ปรกอบตัวใหม่ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบแล้ว ยังมีการวิเคราะห์แถบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเฉือนตัวอย่างดิน (progressive failure) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย (image processing) ข้อมูลแถบแรงเฉือนที่ได้ นั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการหาระนาบการวิบัติและยังสามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องในการจำลองพฤติกรรมการวิบัติด้วยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนการพัฒนาหรือสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) เพื่อนำไปสู่การจำลองพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพีได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์แถบแรงเฉือนด้วยภาพถ่ายนั้นสามารถแบบออกเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

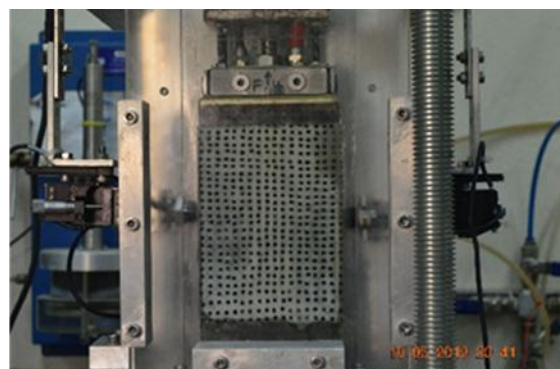
**4.8.1 เลือกภาพถ่ายในตำแหน่งที่สนใจ** หลังจากนำข้อมูลการเฉือนมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดก็จะทำการเลือกภาพถ่ายในช่วงสำคัญทั้งหมด 5 ช่วงดังนี้คือ ช่วงก่อนเริ่มการเฉือน ช่วงก่อน peak ช่วงหลัง peak ช่วงสิ้นสุดการ softening และช่วงท้ายของ residual state โดยที่รูปก่อนการเฉือนนี้จะนำมาใช้เป็นพิกัดอ้างอิงสำหรับรูปอื่นๆ เพื่อใช้หาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในหน้าตัดดินตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.51

**4.8.2 กำหนดจุดอ้างอิงและแตงภาพ** นำภาพทั้งหมดมากำหนดจุดอ้างอิงซึ่งต้องเป็นจุดที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างกันและยังต้องเป็นจุดเดียวกันสำหรับภาพถ่ายทุกภาพ จากนั้นทำการตัดส่วนที่ไม่สำคัญและพื้นที่ๆ มีเขตสีเข้มในภาพออก ตรวจสอบจุดสีดำบนถ่วงยางที่ไม่มีความชัดเจนจากนั้นทำการแก้ไขให้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.52

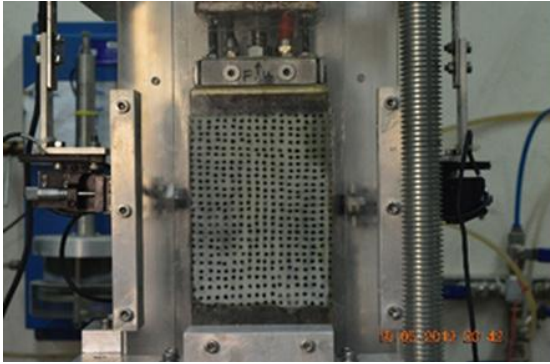
**4.8.3 ทำการหาพิกัดจุด** หลังจากได้รูปในขั้นตอนที่ 4.52 ให้นำรูปดังกล่าวไปเข้าโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายที่เขียนโค้ดคำสั่งไว้แล้ว ทำการตัวเช็คจำนวนและตำแหน่งของจุดสีดำ หากมีจำนวนไม่เท่ากับจำนวนจุดที่เขียนไว้บนถ่วงยางให้กลับไปแก้ไขในขั้นตอนที่ 4.8.2



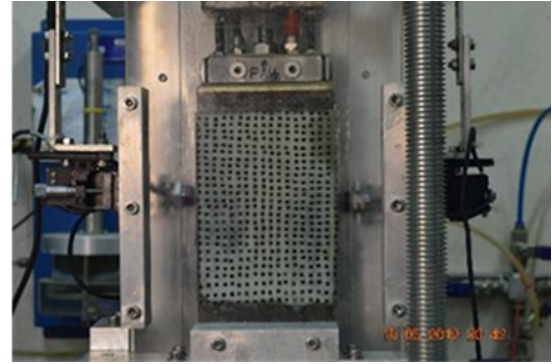
(ก) ภาพก่อนการเฉือน



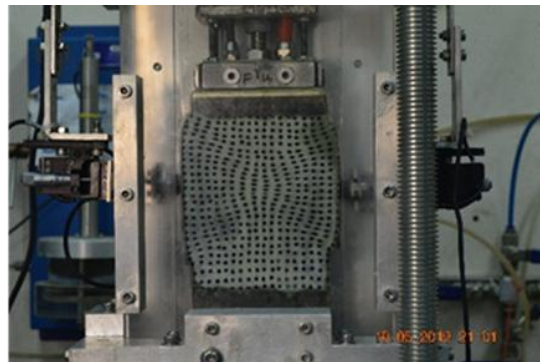
(ข) ภาพก่อนจุด peak



(ค) ภาพหลังจุด peak



(ง) ภาพจุดสิ้นสุดการ softening



(จ) ภาพช่วงท้ายจุด residual

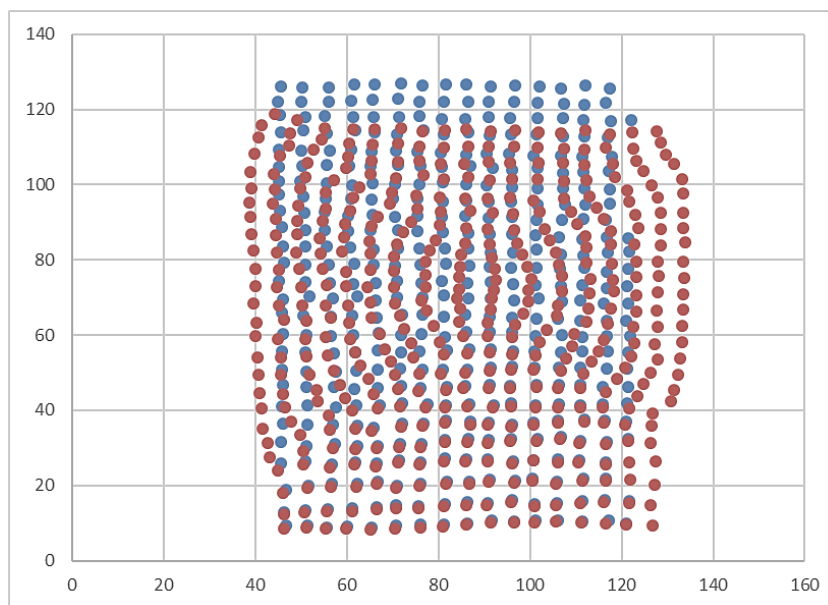
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายช่วงต่างๆ ของการเค้น



รูปที่ 4.52 ภาพที่ถูกตัดส่วนที่ไม่จำเป็นออกและปรับปรุงจุดพบพร้อม

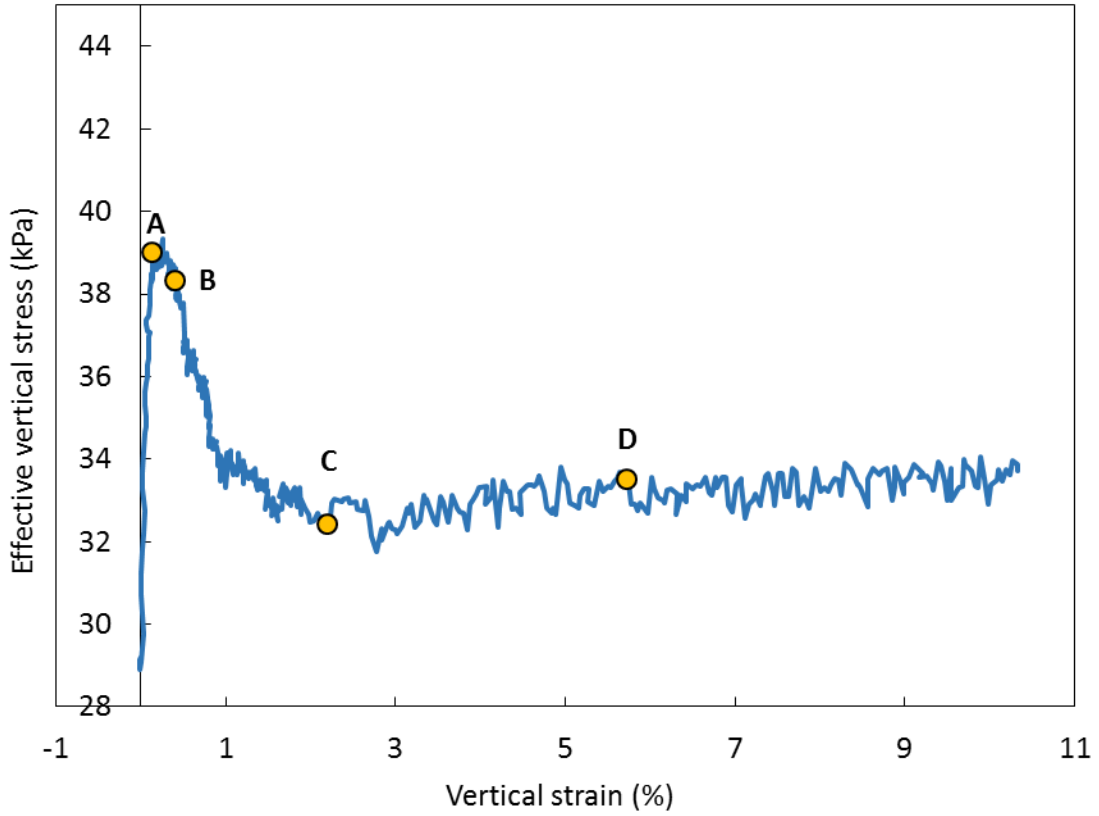


**4.8.4 จัดเรียงข้อมูล** เมื่อได้พิกัดจุดบนถุงยางครบถ้วนแล้ว ให้นำพิกัดมาเรียงจากซ้ายไปขวาและจากล่างขึ้นบน จากนั้นนำพิกัดของภาพก่อนเดือนมาเปรียบเทียบกับภาพหลังการเดือนเพื่อประเมินลักษณะแถบแรงเดือนเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 4.53 จากนั้น

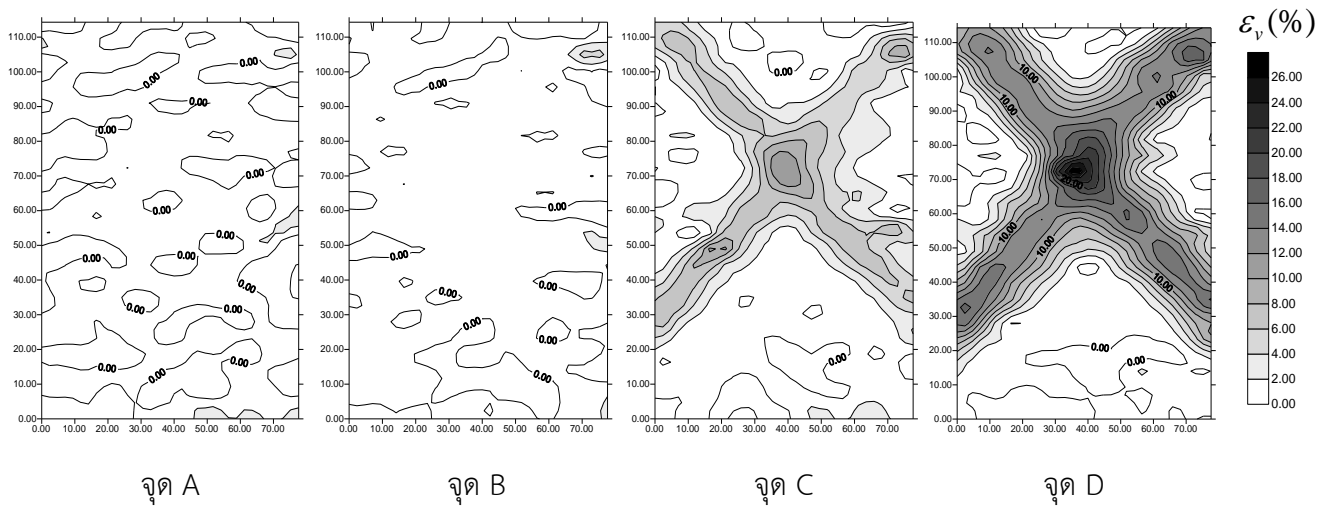


**รูปที่ 4.53** ภาพซ้อนจุดบนถุงยางทั้งก่อนและหลังการเดือน

**4.8.5 การทำคอนทัวร์ของค่า Strain field** นำพิกัดที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.8.4 เข้าโปรแกรมคำนวณค่า local strain ที่ถูกเขียนขึ้นโดย Kongkitkul ในปี 2004 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตคอนทัวร์ Strain field จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นประสิทธิผลและความเครียดในแนวตั้งสำหรับตัวอย่าง PS01-30 kPa สามารถแบ่งจุดที่สนใจได้เป็น 4 จุด คือ A, B, C, D ดังรูปที่ 4.54 ในแต่ละจุดจะมีการพล็อตคอนทัวร์ของค่า Strain field ทั้งในส่วนของ Vertical strain ดังรูปที่ 4.55 และ Horizontal strain ดังรูปที่ 4.56 สำหรับตัวอย่าง PS02-50 kPa สามารถแบ่งจุดที่สนใจได้เป็น 4 จุด คือ A, B, C, D ดังรูปที่ 4.57 ในแต่ละจุดจะมีการพล็อตคอนทัวร์ของค่า Strain field ทั้งในส่วนของ Vertical strain ดังรูปที่ 4.58 และ Horizontal strain ดังรูปที่ 4.59 สำหรับตัวอย่าง PS03-90 kPa สามารถแบ่งจุดที่สนใจได้เป็น 5 จุด คือ A, B, C, D และ E ดังรูปที่ 4.60 ในแต่ละจุดจะมีการพล็อตคอนทัวร์ของค่า Strain field ทั้งในส่วนของ Vertical strain ดังรูปที่ 4.61 และ 4.62 สำหรับ Strain field ของ Horizontal strain นั้นแสดงดังรูปที่ 4.63 และ 4.65

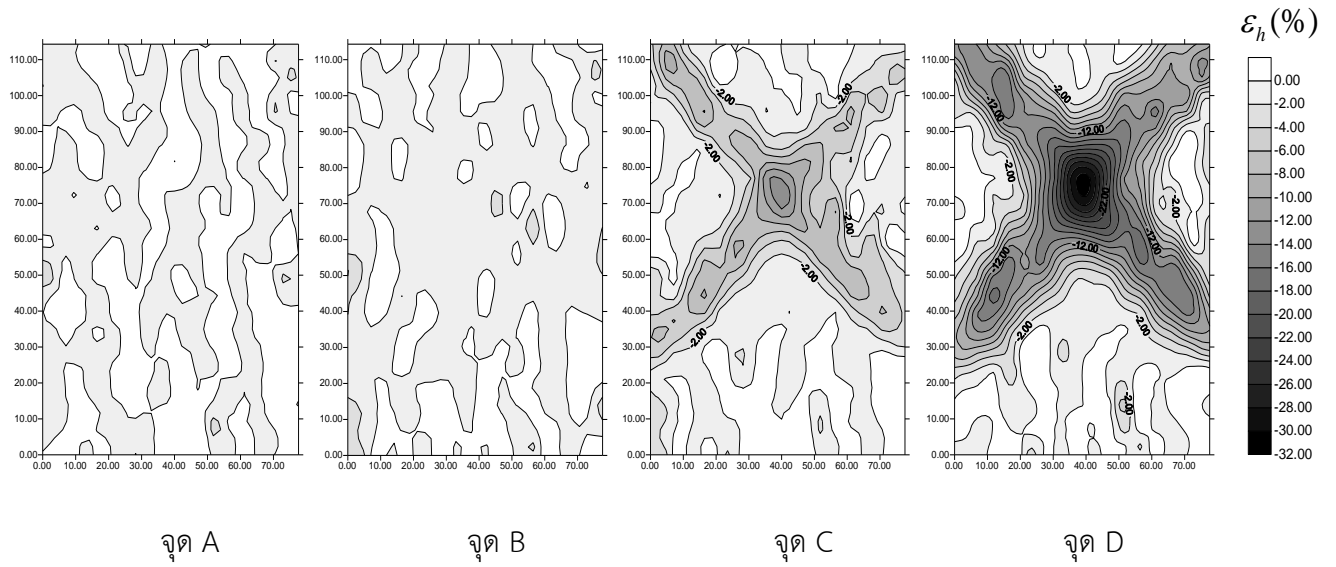


รูปที่ 4.54 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS01-30 kPa

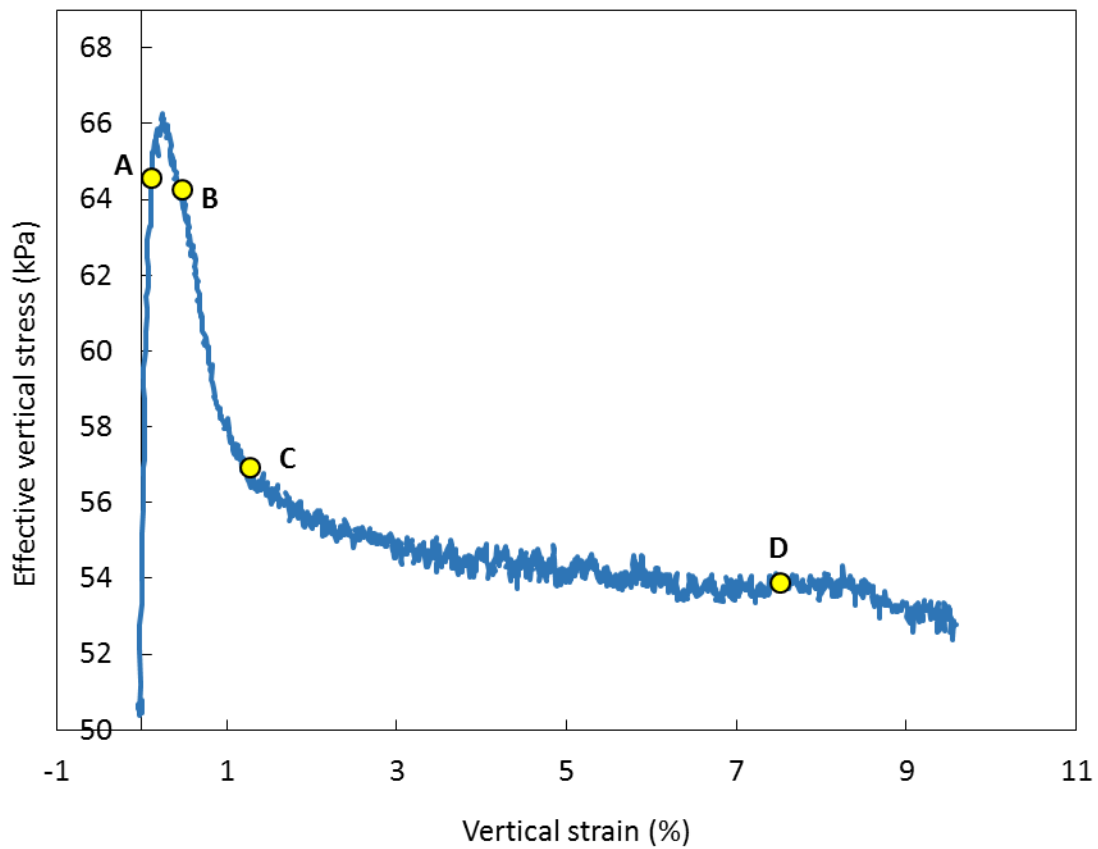


รูปที่ 4.55 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS01-30 kPa

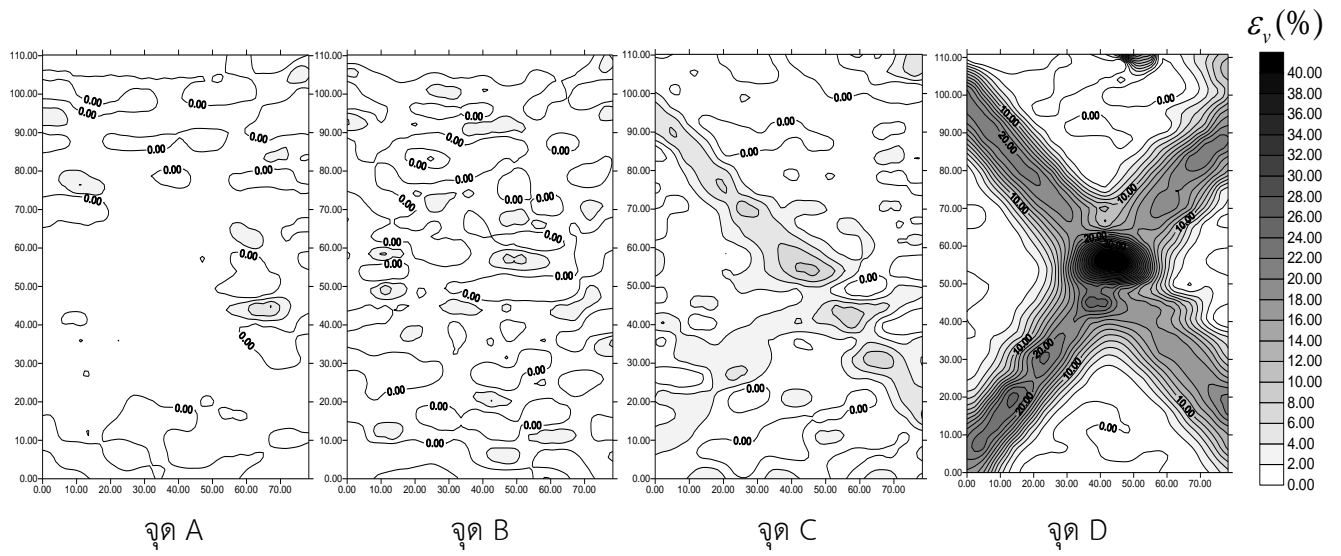




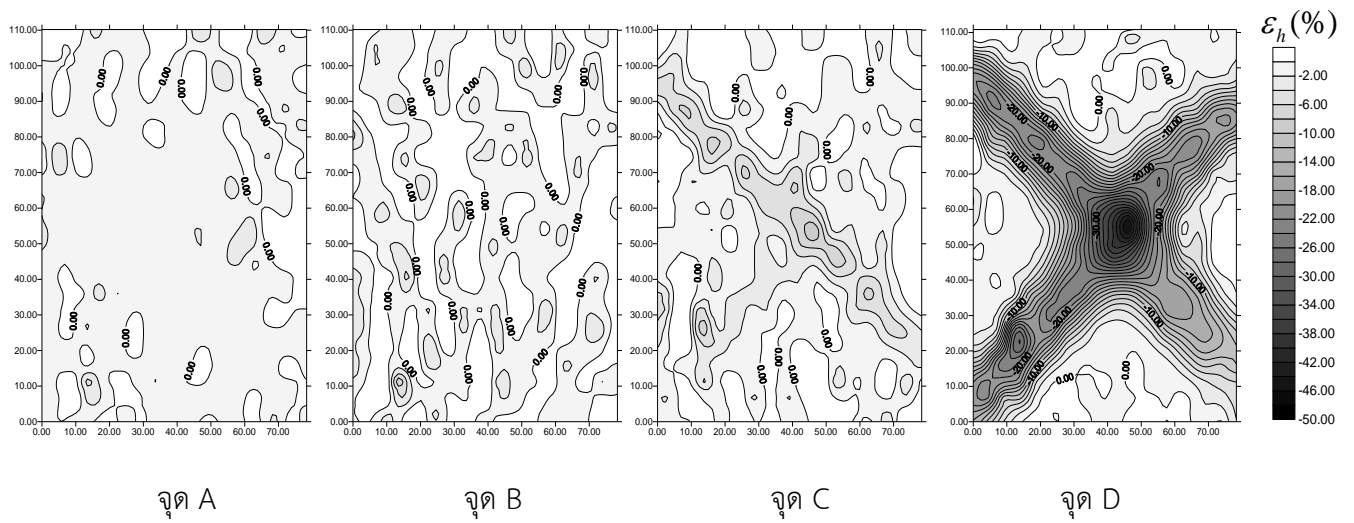
รูปที่ 4.56 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS01-30 kPa



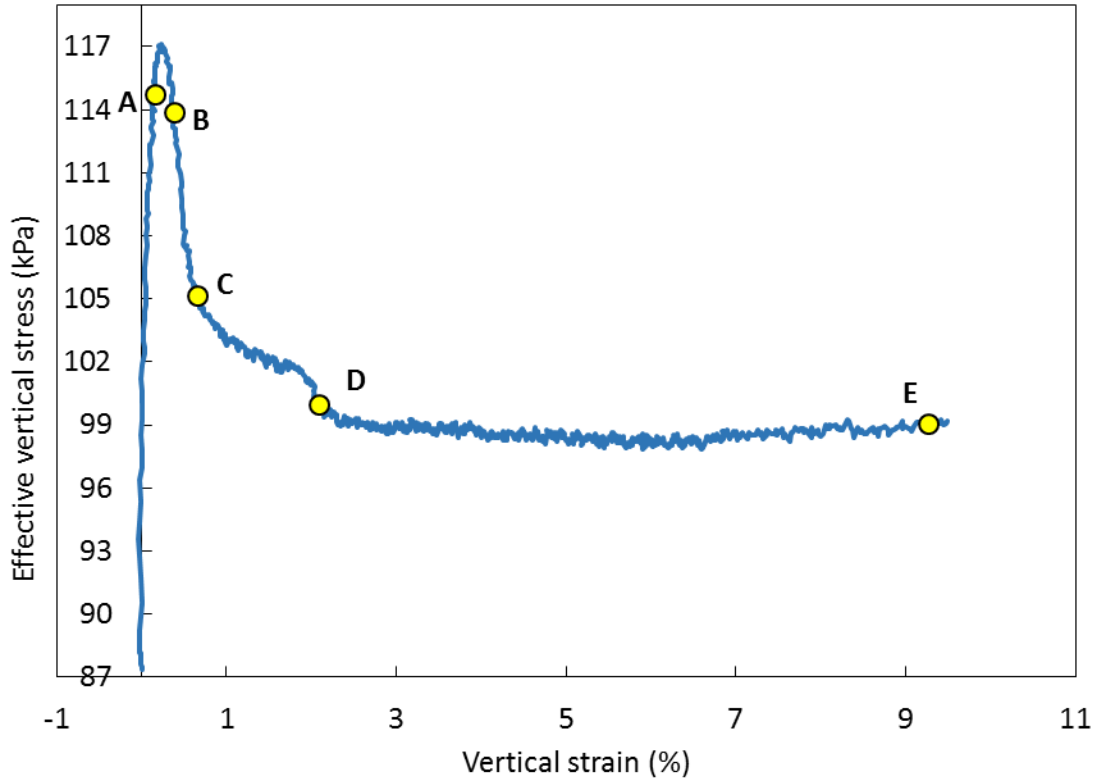
รูปที่ 4.57 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS02-50 kPa



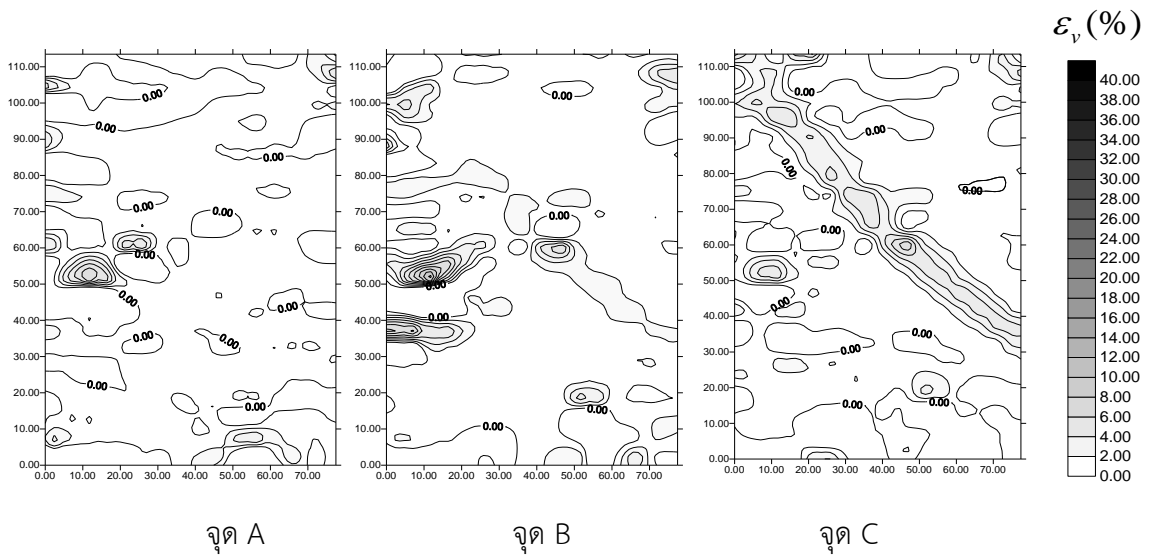
รูปที่ 4.58 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS02-50 kPa



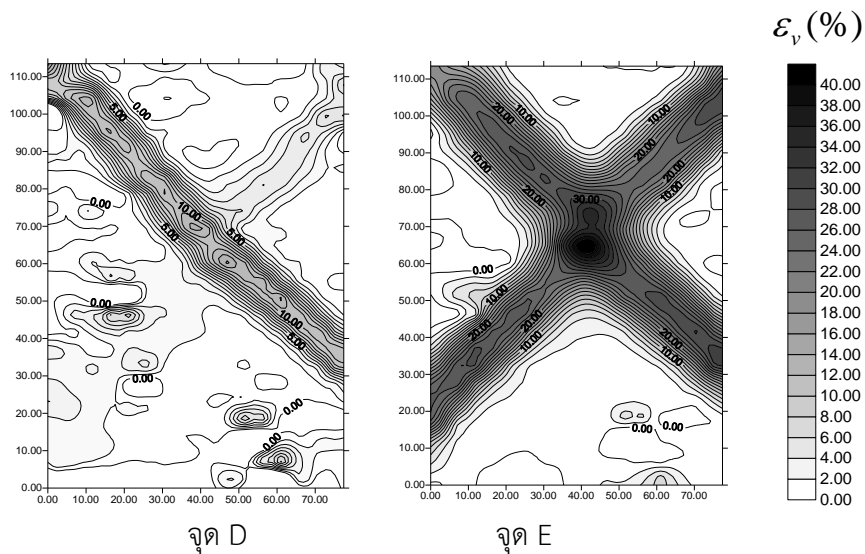
รูปที่ 4.59 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS02-50 kPa



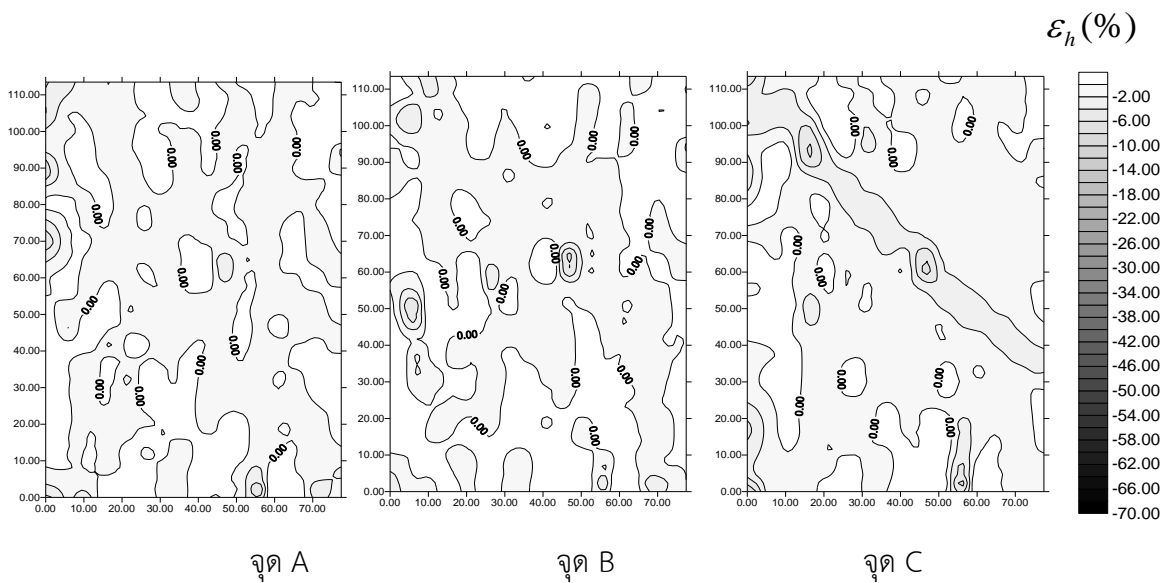
รูปที่ 4.60 จุดที่นำมาวิเคราะห์ strain field สำหรับตัวอย่าง PS03-90 kPa



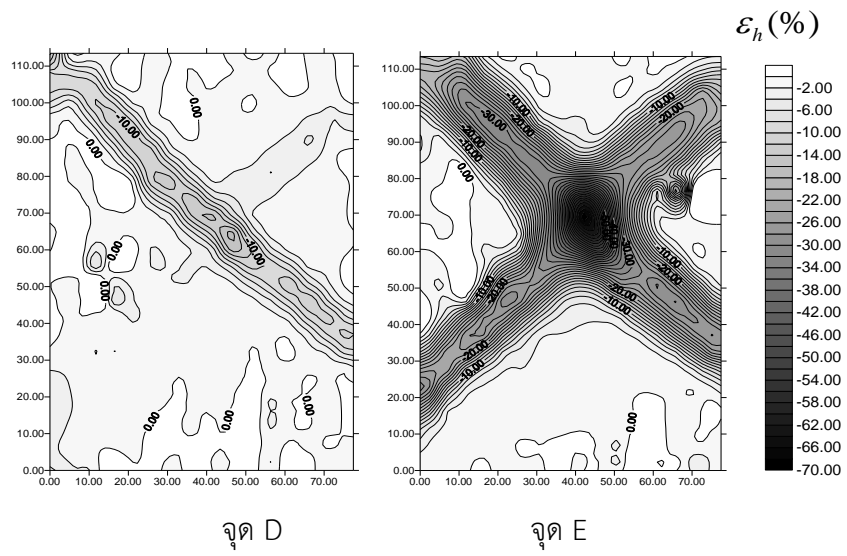
รูปที่ 4.61 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด A, B และ C



รูปที่ 4.62 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวตั้งของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด D และ E



รูปที่ 4.63 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด A, B และ C



รูปที่ 4.64 คอนทัวร์ค่าความเครียดในแนวราบของตัวอย่าง PS03-90 kPa สำหรับจุด D และ E

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาผลของแรงเค้นในอดีตที่มีผลต่อพฤติกรรมมารับกำลังและการเสียรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครใหม่ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลของแรงเค้นอดีตในอดีตที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำนั้นมีผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยหากใช้ค่าความเค้นที่สูงขึ้นก็จะทำให้ดินสามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้นอันเนื่องมาจากค่าอัตราส่วนช่องว่างที่ต่ำลง

2. ค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ถูกทดสอบด้วยสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบนั้นมีค่าสูงกว่าการทดสอบแบบสมมาตรรอบแนวแกน

3. การทดสอบดินเหนียวแบบอัดตัวปรกติภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบแบบไม่ระบายน้ำนั้นจะเกิดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่มีค่าเป็นบวกระหว่างการเฉือน ซึ่งเป็นพฤติกรรมปรกติของดินเหนียวแบบอัดตัวปรกติที่ทดสอบแบบสมมาตรรอบแนวแกน แต่จะแตกต่างกันอย่างมากที่ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียด พบว่าเมื่อทดสอบดินเหนียวภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ พฤติกรรมดินจะมีลักษณะแบบ softening อย่างรุนแรงเมื่อถึงจุดวิบัติ ซึ่งจะเป็นพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปรกติที่มีค่า OCR สูงในการทดสอบเหนียวแบบสมมาตรรอบแนวแกน

4. เครื่องมือและระบบควบคุมการทำงานที่ประดิษฐ์ขึ้นมาโดยเฉพาะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูง

5. การใช้เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวและทำการเฉือนโดยใช้เครื่องมือตัวเดียวกันนั้นทำให้การถ่ายแรงระหว่างดินกับอุปกรณ์วัดแรงดันดินเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบและเชื่อมั่นได้ว่าตัวอย่างดินนั้นจะไม่ถูกรบกวนใดๆ ก่อนทำการเฉือน อีกทั้งยังสามารถใช้ทดสอบกับดินเหนียวที่มีความอ่อนนิ่มมาก ซึ่งวิธีดั้งเดิมนั้นจะต้องทำการตัดแต่งดินให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมแล้วจึงค่อยสวมถุงยางภายหลังนั้นไม่สามารถทำได้

6. การทดสอบนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่งของดินได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างในสภาวะอยู่นิ่งของดินเหนียวอัดตัวปรกตินั้นมีค่าไม่คงที่ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเค้นอัดสูงสุดในอดีต

7. จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายพบว่า ดินเหนียวจะเกิดแถบแรงเฉือนเมื่อสถานะของการเฉือนเข้าสู่ช่วง softening ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบแนวทแยงเดี่ยวหรือรูปกากบาท แต่อย่างไรก็ตาม ที่จุดสิ้นสุดการเฉือนของทุกตัวอย่างจะเกิดแถบแรงเฉือนเป็นรูปกากบาท โดยมีมุมของแถบแรงเฉือนคือ  $45^{\circ}$  ถึง  $50^{\circ}$

8. สมการที่นำเสนอโดย Chang และคณะในปี 1999 เพื่อใช้คำนวณค่าแรงเค้นอัดด้านข้างของ ตัวอย่างดินบนระนาบที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างทำการเฉือนดินภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดใน ระนาบนั้นมีความแม่นยำเฉพาะในช่วงก่อนจุดสูงสุดของการเฉือนเท่านั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มในเรื่องความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ถูกทดสอบด้วย สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบกับแบบสมมาตรรอบแนวแกนโดยการใช้เทคนิคการเตรียมตัวอย่าง แบบเดียวกัน ถึงแม้ว่า Khalid & Ibrahim, 2007 จะเคยทำการวิจัยมาแล้ว แต่การทดสอบของ Khalid และ Ibrahim ในปี 2007 ไม่สามารถวัดแรงดันด้านข้างบนระนาบที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งค่าดังกล่าวได้ใช้ สมการที่นำเสนอโดย Chang และคณะในปี 1999 มาคำนวณ แต่จากผลการทดสอบพบว่าสมการดังกล่าวมีความถูกต้องเพียงช่วงก่อนจุดสูงสุดของการเฉือนเท่านั้น ดังนั้นการเปรียบเทียบการเฉือนทั้งสองสภาวะ แวดล้อมดังที่กล่าวมาโดยใช้แกน  $p'$  และ  $q$  ที่ต้องใช้แรงทั้งสามมิติมาคำนวณนั้นยังถือว่าไม่สมบูรณ์มากนัก

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างในสภาวะอยู่หนึ่งของดินเหนียวอัดตัวปรกติ นั้น มีค่าไม่คงที่ โดยมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามความเค้นอัดในอดีต ประกอบกับการสร้างระบบทดสอบในงานวิจัยนี้ ที่สามารถปรับให้เป็นเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัตโนมัติได้ อีกทั้งยังสามารถวัดแรงดันด้านข้าง ของตัวอย่างดินได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างในสภาวะอยู่หนึ่งของดิน เหนียวอัดตัวปรกติและดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปรกติเพิ่มเติม

จากผลการทดสอบพบว่าเวลาส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ดังนั้นจึงต้องใช้ เวลานานมากในการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการเฉือน ดังนั้นควรมีการศึกษาวิธีการเร่งการหดตัวคายน้ำเพื่อทำ ให้การทดสอบมีความสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือน

## 5.3 ผลผลิต (Output)

1. จากความต้องการทราบเส้นทางเดินของความเค้นที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและค่าแรงดัน ดินด้านข้างเมื่อขั้นตอนการสร้างโครงสร้างดินสิ้นสุดลงเพื่อที่จะสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมให้เป็น แบบความเครียดในระนาบได้ รวมไปถึงสามารถหาเส้นทางของแรงเค้นที่ใช้หน่วยแรงทั้งสามแกนมาพิจารณา เมื่อตัวอย่างดินถูกเฉือนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ที่ สามารถวัดแรงเค้นด้านข้างด้วยหลักการสมดุลของแรงดันลม ซึ่งยังไม่มีการวิจัยใดเคยใช้มาก่อน จึงถือได้ว่าเป็น อุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถเอาไปประยุกต์ใช้ งานกับงานวิจัยอื่นๆ ได้อีกในอนาคต



2. งานวิจัยนี้สร้างต้นแบบอุปกรณ์ วิธีการทดสอบและโปรแกรมควบคุมที่สามารถทดสอบดินเหนียวอ่อนมากภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบโดยมั่นใจได้ว่าตัวอย่างดินจะไม่ถูกรบกวนใดๆ ก่อนทำการเฉือน อีกทั้งมีการถ่ายค่าแรงเค้นอย่างสมบูรณ์ระหว่างผิวดินกับอุปกรณ์วัดความเค้นซึ่งทำให้ผลการทดสอบในช่วงต้นๆ ของการเฉือนมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3. เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาทั้งเครื่องมือและโปรแกรมควบคุมการทดสอบด้วยตัวเอง จึงสามารถลดต้นทุนในการจัดซื้อเครื่องมือจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง และที่สำคัญที่สุดคือความรู้ที่ได้นั้นสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเครื่องทดสอบแบบอื่นๆ ที่ยังไม่มีขายในท้องตลาดหรือยังไม่มีงานวิจัยไหนเคยทำมาก่อน ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาอย่างยั่งยืนทั้งในด้านการพึ่งพาตนเองและเป็นแนวทางทำให้งานวิจัยของไทยสามารถแข่งขันในเรื่องความก้าวหน้าด้านงานวิจัยกับประเทศที่พัฒนาแล้วได้อย่างเหมาะสม

4. จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินที่ทดสอบด้วยสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบให้ค่ามากกว่าการทดสอบแบบสมมาตรรอบแกน นั้นหมายความว่า หากสามารถผลักดันการทดสอบนี้ให้เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย จะสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีที่มีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบได้ ซึ่งโครงสร้างในลักษณะนี้จะเป็นงานที่พบได้มากที่สุดในงานวิศวกรรมปฐพี

5. ผลการทดสอบนี้สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของพฤติกรรมระหว่างดินที่ถูกเฉือนโดยสภาวะแวดล้อมแบบความเครียดในระนาบกับแบบสมมาตรรอบแกนได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และยังสามารถนำไปพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงตามสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในสนามได้ต่อไปในอนาคต

6. รายงานฉบับสมบูรณ์

7. บทความวิจัย (อยู่ระหว่างการเขียน)

## เอกสารอ้างอิง

- 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, AM(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 Smeared 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-physikalischen 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