

ผลกระทบของระดับความเครียดต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์แบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF STRAIN LEVELS ON SECANT  
UNDRAINED YOUNG'S MODULUS OF BANGKOK CLAY

Mr. Sarun Sunirun



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของระดับความเครียดต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์แบบ ไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ
โดย	นายศรัณย์ สุรินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัด บุญญะฐิติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

ศรัณ สุรินทร์ : ผลกระทบของระดับความเครียดต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์แบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ (EFFECT OF STRAIN LEVELS ON SECANT UNDRAINED YOUNG'S MODULUS OF BANGKOK CLAY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 69 หน้า.

เป็นที่ทราบกันดีว่าการทดสอบแรงอัดสามแกนเป็นหนึ่งใน การทดสอบที่ได้รับความนิยม และมีความสำคัญในทางธรณีวิทยา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบเครื่องมือและรูปแบบในการทดสอบเพิ่มเติมนอกเหนือจากการทดสอบตามมาตรฐานเพื่อทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังในมวลดินจากผลกระทบของความเครียดในระดับต่างๆ โดยมุ่งเน้นไปที่การนำอุปกรณ์การทดสอบที่มีในห้องปฏิบัติการมาปรับปรุงและประกอบให้เป็นเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถใช้ได้จริงและสะดวกมากยิ่งขึ้น เช่น การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของเสาแกนทั้ง 3 เสา ให้เข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดสอบ เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จสิ้นจึงจะครอบกระบอกทดสอบแล้วปิดด้วยส่วนวงแหวนเหล็กป้องกันการสูญเสียความดัน ตัวกระบอกสำหรับประกอบแท่งพิสดันถูกออกแบบให้มีลูกปืนและยางสำหรับปิดกั้นน้ำและแรงดันในขณะการทดสอบ การออกแบบระบบการดูดเพื่อช่วยให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำได้เร็วและมีเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวสูงใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์

ในงานวิจัยนี้เลือกการทดสอบอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำมาใช้ในการทดสอบ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯลึก 10 - 12 เมตร ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 150, 225 และ 300 กิโลปาสคาล หลังจากการอัดตัวคายน้ำ จะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำ ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าโมดูลัสเริ่มต้นได้ ในระหว่างการทดสอบจะทำการถอนและให้หน่วยแรงกระทำตามแนวแกนเป็นระยะเวลาสั้นๆ และทดสอบเปรียบเทียบในกรณีที่อัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งไม่เท่ากันร่วมด้วย จากผลการทดสอบพบว่า การให้และถอนหน่วยแรงไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นอิลาสติกของดินตัวอย่างทดสอบ และค่าความเค้นประสิทธิผลส่งผลกระทบต่อค่าซีแคนท์โมดูลัสที่ได้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5770303721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: EFFECTIVE STRESS / CONSOLIDATION UNDRAINED TRIAXIAL TEST / BANGKOK CLAY / YOUNG'S MODULUS / ความเค้นประสิทธิผล / การทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการอัดตัวคายน้ำแต่ไม่ระบายน้ำ / ดินเหนียวกรุงเทพฯ / ค่าโมดูลัสของยัง

SARUN SUNIRUN: EFFECT OF STRAIN LEVELS ON SECANT UNDRAINED YOUNG'S MODULUS OF BANGKOK CLAY. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN, D.Eng., 69 pp.

Triaxial Test is one of the most popular tests in geotechnical engineering. This research aims to develop models and method to explore the effect of plastic strain levels on Young's modulus of clayey soils. It is focused on using the test devices in laboratory to improve and operate the compression triaxial tests. The device has the three supporting rods installed inside the test cylinder to ensure enhancement of sample preparation. Load piston is designed with leak resistance ball bearings and rubber. The double-suction method is adopted to facilitate the saturation process. It is found that all samples were able to reach 99% of saturation. Tests on consolidation undrained triaxial test using Bangkok soft clay collected from depths of 10 - 12 meters were conducted under the initial confining stresses of 150, 225 and 300 kPa. During undrained shearing, several small unload-reload cycles were applied in order to compute the initial Young's modulus at various plastic strain levels. Comparisons among the medium strain levels Young's modulus obtained at various stages of testing and shearing were given. It was found that medium strain levels Young's modulus was not affected by unload-reload cycles. They were solely affected by initial effective stress

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป .....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Background).....	6
1.2 วัตถุประสงค์ (Objective) .....	7
1.3 ขอบเขตการศึกษา (Scopes)(อภิศึกษา อนงคพิทุ 2549).....	7
1.4 ขั้นตอนกําดำเนินงาน/แผนงาน (Methodology and Schedule).....	8
1.4.1 ศึกษาถึงทฤษฎีของการทดสอบแรงอัดสามแกน, young's modulus.....	8
1.4.2 สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	8
1.4.3 รวบรวมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานคร.....	9
1.4.4 สรุปและวิเคราะห์ผลทดลอง.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected outcomes) .....	9
บทที่ 2 การสำรวจงานวิจัย และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review) .....	11
2.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of soil).....	11
2.1.1 ทฤษฎีการวิบัติของดินโดย มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb).....	11
2.1.1.1 ระนาบการวิบัติ (Failure plane).....	12
2.1.1.2 กฎการวิบัติโดยแรงเฉือนของดินอิมตัวด้วยน้ำ.....	13
2.1.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	14

2.2 การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test).....	15
2.3 Young's Modulus ( $E$ ).....	18
2.4 Shear modulus (Yong, Townsend et al.) .....	18
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	19
2.4.2 ผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในดิน Cohesionless Soil .....	20
2.5 ค่าโมดูลัสซีแคนท์(Secant Modulus).....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3      การดำเนินงานวิจัย .....	31
3.1 ศึกษาถึงทฤษฎีของการทดสอบแรงอัด3แกน และ Young's Modulus .....	32
3.2 ออกแบบเครื่องมือสำหรับการทดสอบ .....	32
3.3 การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test).....	38
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและติดตั้งเครื่องมือ .....	38
3.3.2 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation of Specimen).....	39
3.3.3 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation State).....	41
3.3.4 ขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง (Shearing State).....	42
3.4 ขอบเขตตัวอย่างที่นำมาทดสอบ .....	43
3.5 สมมุติฐานและการทดสอบ.....	43
3.5.1 สมมุติฐาน .....	43
3.5.2 การทดสอบ .....	44
3.6 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง .....	48
บทที่ 4      ผลการวิจัย .....	50
4.1 กราฟความสัมพันธ์ Axial Strain กับ Deviator Stress .....	52



4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ของแต่ละการทดสอบ.....	54
4.3 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ในแต่ละช่วงการทดสอบ .....	58
4.4 กราฟความสัมพันธ์ Axial Strain กับ Deviator Stress ของการทดสอบรูปแบบ Anisotropic.....	63
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ของการทดสอบแบบ Anisotropic แต่ละการทดสอบ.....	65
4.6 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ในแต่ละช่วงการทดสอบแบบ Anisotropic ทั้งหมด .....	67
บทที่ 5      สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	69
รายการอ้างอิง .....	2
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	5

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ขอบเขตความแข็งแรงของมอร์ และ มอร์-คูลอมป์ (B.M. Das and K.Sobhan) .....	12
รูปที่ 2.2 ระบายการวิบัติของดิน (B.M. Das and K.Sobhan) .....	13
รูปที่ 2.3 วงกลมมอร์และขอบเขตความแข็งแรง (B.M. Das and K.Sobhan) .....	13
รูปที่ 2.4 ลักษณะการวิบัติของดิน ,ศ.ดร.สุขสันต์ และผศ.ดร.รุ่งลาวัลย์.....	14
รูปที่ 2.5 แสดงวงกลมมอร์ที่สุดวิบัติสำหรับการทดสอบแบบอัดตัวและแบบขยายตัว .....	16
รูปที่ 2.6 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีเสาอยู่ภายนอกของกระบอกทดสอบ .....	16
รูปที่ 2.7 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีเสาอยู่ภายในของกระบอกทดสอบ .....	17
รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความเค้นประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน โดย (Takeji Kokusho 1980).....	21
รูปที่ 2.9 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า Plasticity สูง ซึ่งมีผลกระทบในช่วง OCR.....	22
รูปที่ 2.10 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า Plasticity ต่ำซึ่งมีอิทธิพลในช่วง OCR.....	23
รูปที่ 2.11 ภาพการหาค่า secant modulus .....	24
รูปที่ 2.12 ภาพการหาค่า secant modulus ในช่วงการไม่ให้หน่วยแรง และภายหลังการให้หน่วยแรงอีกครั้ง .....	25
รูปที่ 2.13 หลักการทดสอบ (Takeji Kokusho 1980).....	27
รูปที่ 2.14 ผลกระทบของความเค้นประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Takeji Kokusho 1980)..	28
รูปที่ 2.15 Normalized Undrained Modulus $E_{u50}$ เปรียบเทียบกับค่า OCR ratio.....	30
รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบเสาอยู่ข้างใน.....	32
รูปที่ 3.2 Bore Bearing.....	33
รูปที่ 3.3 ก Load Cell ข Load Cell อยู่ภายในหลอดแก้วทดสอบ.....	33
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหลอดแก้วทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่ .....	34
รูปที่ 3.5 วงแหวนสแตนเลสตีว .....	35

รูปที่ 3.6 ก แผนความเค้นด้านหน้า ข แผนความเค้นด้านหลัง.....	35
รูปที่ 3.7 Data logger สำหรับเก็บข้อมูลและประมวลผล.....	36
รูปที่ 3.8 Pore pressure transducer ใช้ในการเก็บค่าความดันที่เกิดขึ้น.....	36
รูปที่ 3.9 ก แผ่นเหล็กที่ทราบน้ำหนัก ข แผ่นอะคริลิกที่ทราบความหนา.....	37
รูปที่ 3.10 แสดงแนวโน้มของการทดสอบแรงอัดสามแกนในช่วงทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	39
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการทดสอบช่วงการทำให้ดินตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	39
รูปที่ 3.12 แสดงแนวโน้มของการหาค่า B-value.....	40
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการทดสอบช่วงการเข้าระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	40
รูปที่ 3.14 แนวโน้มของการทดสอบแรงอัดสามแกนในช่วงการอัดตัวคายน้ำ.....	42
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างผลการทดสอบในช่วงการเฉือนตัวอย่างด้วยความเค้นประสิทธิผล 300 kPa.....	42
รูปที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความดันและวาล์วเปิด-ปิด.....	44
รูปที่ 3.17 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความดันและวาล์วเปิด-ปิด.....	45
รูปที่ 3.18 ปุ่มดูดลมและหลอดแก้วกักเก็บน้ำ.....	46
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการอ่านค่าความดันและวาล์วแบบหมุน.....	46
รูปที่ 3.20 แผนผังการขึ้นตอนการ Suction State.....	47
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ.....	48
รูปที่ 4.1 วงกลมเมอร์จากการทดสอบที่ความเค้นประสิทธิผล 150, 225 และ 300 กิโลปาสกาล.....	50
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ Deviator Stress กับ Mean Stress (ทุกการทดสอบ).....	51
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ Deviator Stress กับ Effective Mean Stress (ทุกการทดสอบ).....	51
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 150 kPa).....	52
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 225 kPa).....	53
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 300 kPa).....	53
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ (effective 150 kPa).....	54
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ (effective 225 kPa).....	55

รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ (effective 300 kPa).....	55
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ Cumulative $\epsilon_A$ (effective 150 kPa).....	56
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ Cumulative $\epsilon_A$ (effective 225 kPa).....	57
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ Cumulative $\epsilon_A$ (effective 300 kPa).....	57
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1.....	58
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 1.....	58
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 2.....	59
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 2.....	59
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 3.....	60
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 3.....	60
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 4.....	61
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 4.....	61
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Initial Effective Stress ที่ Axial Strain =0.05 %.....	62
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Initial Effective Stress ที่ Axial Strain =0.07 %.....	62
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (k=0.77).....	63

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain ( $k=0.85$ ) .....	64
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ ( $K=0.77$ ) .....	65
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ ( $K=0.85$ ) .....	65
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ Cumulative $\epsilon_A$ ( $K=0.77$ ) .....	66
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ Cumulative $\epsilon_A$ ( $K=0.85$ ) .....	66
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1 .....	67
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 1 .....	67
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 2 .....	68
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ $E_{sec}$ กับ $\epsilon_A$ เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 2 .....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนงานในการทำงานวิจัย .....	8
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีต่างๆ(คงจีบ 2554) .....	15
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆในวัสดุ Homogenous & Isotropic (Hook's Law).....	19
ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของสมการอิมไพริกัล $G_0 = AF(e)(\sigma_0')^n$ ที่ Small strain (Takeji Kokusho 1980).....	21
ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression test .....	29
ตารางที่ 2.5 ผลจากการทดสอบ Triaxial Compression Test.....	29
ตารางที่ 3.1 สรุปพารามิเตอร์ของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	43

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Background)

การทำการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) นับได้ว่าเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือมากที่สุดสำหรับการหาพารามิเตอร์ เช่น มุมเสียดทานในภาคมวลดิน (Angle of shearing resistance,  $\phi'$ ), แรงดึงดูระหว่างมวลดิน (cohesion  $c'$ ) เป็นผลให้เราสามารถทราบถึงค่า shear stiffness (Yong, Townsend et al.), ค่าการบดอัดของมวลดิน (Compression index,  $C_c$ ) และค่าการระบายน้ำ (permeability) ได้อีกด้วย ซึ่งการทดสอบแรงอัดสามแกนได้รับความนิยมและความเชื่อถือเป็นอย่างมากทั้งในการก่อสร้างและงานวิจัย การทดสอบแรงอัดสามแกนในดินที่ได้รับความนิยมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทการทดสอบ คือ การทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการอัดตัวคายน้ำและมีการระบายน้ำ (Consolidation-drain triaxial test, CD Test) การทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการอัดตัวคายน้ำแต่ไม่มีการระบายน้ำ (Consolidation-drain triaxial test, CU Test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนที่ไม่มีการอัดตัวคายน้ำและไม่มีการระบายน้ำ (Unconsolidation-drain triaxial test, UU Test)

งานวิจัยนี้จึงตั้งใจที่จะพัฒนารูปแบบเครื่องมือและรูปแบบในการทดสอบเพิ่มเติม นอกเหนือจากการทดสอบตามมาตรฐานเพื่อทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังในมวลดิน จากผลกระทบของความเครียดในระดับต่างๆ โดยมุ่งเน้นไปที่การนำอุปกรณ์การทดสอบที่มีในห้องปฏิบัติการมาปรับปรุงและประกอบให้เป็นเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถใช้ได้จริง และสะดวกมากยิ่งขึ้น เช่น การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของเสาแกนทั้ง 3 เสา ให้เข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดสอบ เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จสิ้นจึงจะครอบกระบอกทดสอบแล้วปิดด้วยส่วนวงแหวนเหล็กป้องกันการสูญเสียความดัน ตัวกระบอกประกอบพิสตอนที่ใช้ในการให้หน่วยแรงก็มีการออกแบบให้มีลูกปืนและยางสำหรับปิดกั้นน้ำและแรงดันในขณะการทดสอบ การออกแบบระบบการดูดเพื่อช่วยให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำได้เร็วและมีเปอเซนต์การอิ่มตัวสูงใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์

ทางผู้วิจัยเลือกการทดสอบอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำมาใช้ในการทดสอบ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯลึก 10 - 12 เมตร ค่าแค้นประสิทธิผลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ 150, 225 และ 300 กิโลปาสคาล หลังจากการอัดตัวคายน้ำ จะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำ ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าโมดูลัสเริ่มต้นได้ ในระหว่างการทดสอบจะทำการถอน

และให้หน่วยแรงกระทำตามแนวแกนเป็นระยะเวลาสั้นๆ และทดสอบเปรียบเทียบในกรณีที่อัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งไม่เท่ากันร่วมด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)

นำอุปกรณ์การตรวจวัดค่าและเครื่องมือที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนารูปแบบการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำ

เพื่อปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนให้สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆได้ละเอียดมากขึ้น โดยการลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดสอบและขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของ load cell เข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดลองเพื่อลดอัตราการสูญเสียแรงที่เกิดขึ้นจากการส่งแรงจากเครื่องทดสอบสากล (Universal Testing Machine) ไปยังพิสดอนซึ่งส่งแรงกระทำต่อไปยังส่วนแผ่นรับแรงกดด้านบน (Top Cap) เพื่อเป็นแรงที่กระทำต่อดินตัวอย่างทดสอบ

ปรับเปลี่ยนรูปแบบของกระบอกทดสอบให้เป็นรูปแบบครอบภายหลังจากการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้สะดวกต่อการเตรียมการตัวอย่าง โดยการย้ายตำแหน่งเสาแกน 3 เสา เข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดสอบ เมื่อเตรียมดินตัวอย่างทดสอบเรียบร้อยแล้วจึงครอบกระบอกทดสอบแล้วตามด้วยวงแหวนเหล็กกดทับอีก 1 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความดันและน้ำในขณะการทดสอบ

เพิ่มระบบการดูดเพื่อช่วยให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำเร็วขึ้นและได้เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวเพิ่มขึ้น

วิเคราะห์ค่าโมดูลัสเริ่มต้นจากการทดสอบแรงอัดสามแกนในช่วงที่มีการให้หน่วยแรงและถอนหน่วยแรงที่กระทำต่อดินส่วนทดสอบ พร้อมทั้งมีการทดสอบในรูปแบบของแรงกระทำต่อระนาบแนวตั้งและแนวนอนที่ไม่เท่ากัน (Anisotropic) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{sec}$  และ Axial strain เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา (Scopes)(อลิทคิง อนุวงศ์พุท 2549)

งานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การทำการทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการอัดตัวคายน้ำแต่ไม่มีการระบายน้ำ (CU-Test) ที่ความเค้นประสิทธิผล 150, 225 และ 300 kPa สำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำต่อแนวแกนเท่ากัน (Isotropic) และทดสอบที่ความเค้นประสิทธิผล 300 kPa สำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำต่อแนวแกนไม่เท่ากัน (Anisotropic) ซึ่งทำการทดสอบที่อัตราส่วนแรงกระทำแนวนอนต่อแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.77 และ 0.85



โดยเลือกใช้ดินเหนียวกรุงเทพมหานครความลึก 10-12 เมตร มาใช้เป็นตัวแทนตัวอย่างดินในพื้นที่ กรุงเทพฯ โดยมีการปรับแต่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบให้มีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองลดน้อยลง และภายหลังการอัดตัวคายน้ำ มีการให้และถอนหน่วยแรงที่กระทำกับดินตัวอย่างทดสอบ สลับกันในช่วงขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่าง แล้วนำทฤษฎีค่าโมดูลัสของยังเข้ามาวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีของการทดสอบแรงอัดสามแกน โดยนำการเปรียบเทียบการทดสอบในรูปแบบต่างๆมาใช้ในการวิเคราะห์

#### 1.4 ขั้นตอนกำาดำเนินงาน/แผนงาน (Methodology and Schedule)

รายการ	พ.ศ. 2558							พ.ศ. 2559			
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	เม.ย.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง											
จัดทำอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ											
รวบรวมดินสำหรับการทดสอบและทำการทดสอบ											
วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ											

#### ตารางที่ 1.1 แผนงานในการทำงานวิจัย

##### 1.4.1 ศึกษาถึงทฤษฎีของการทดสอบแรงอัดสามแกน, young's modulus

ก่อนการสร้างเครื่องมือในการทดสอบแรงอัดสามแกนต้องทราบถึงปัจจัยและตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบแบบมาตรฐาน เพื่อให้สามารถดัดแปลงและพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทดสอบคือ เปรอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของดินจัวอย่างทดสอบภายหลังการทำขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated State) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงให้ดินตัวอย่างทดสอบมีเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำที่สูงขึ้น และเพื่อให้ทราบถึงค่า Initial Young's Modulus จึงใช้การให้และถอนหน่วยแรงสลับกันโดยการให้หน่วยแรงติดต่อกัน 1 ชั่วโมงสลับกับถอนหน่วยแรงเป็นระยะเวลาสั้นๆ 2 นาที ทำการทดสอบจนดินตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

##### 1.4.2 สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

โดยสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเครื่องมือสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนขึ้นมาใหม่ สามารถทำการทดสอบได้ทั้ง 3 รูปแบบ คือ การทดสอบแรงอัดสามแกนโดยมีการอัดตัวและไม่มีการ

ระบายน้ำ (CU-Test) การทดสอบแรงอัดสามแกนโดยมีการอัดตัวและมีการระบายน้ำ (CD-Test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยไม่มีการอัดตัวและไม่มีการระบายน้ำ (UU-Test) ในการทดสอบได้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าเป็นระบบอัตโนมัติเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำและเที่ยงตรงกว่า การใช้การอ่านค่าด้วยตา เมื่อทำการทำสอบข้อมูลจะถูกนำเข้าสู่เครื่องประมวลผลข้อมูล (Data logger) โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าที่มีอยู่เดิมมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ อุปกรณ์วัดแรง (Load Cell) อุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure Transducer) และอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน (LVDT) สร้างกระบอกทดสอบและอุปกรณ์ประกอบกระบอกทดสอบขึ้นมาใหม่เพื่อให้การขึ้นตัวอย่างสะดวกมากขึ้น และสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับการดูดอากาศและน้ำส่วนเกิน (Suction) เพื่อช่วยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างให้อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated State) ให้ได้ผลเปอเซนต์การอิ่มตัวด้วยน้ำที่สูงขึ้นในระยะเวลาที่น้อยลง

#### 1.4.3 รวบรวมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ความ

ความลึกของดินตัวอย่างทดสอบเลือกใช้ที่ความลึก 10-12.5 เมตร เขตตลิ่งชัน เมื่อได้ตัวอย่างมาแล้วนำดินตัวอย่างทดสอบมาทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ซีดจำกัดเหลว ซีดจำกัดพลาสติก และ ปริมาณน้ำในดิน เพื่อประกอบการคำนวณและทดสอบต่อไป

#### 1.4.4 สรุปและวิเคราะห์ผลทดลอง

เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าพอใจทั้ง 5 ดินตัวอย่างทดสอบแล้ว (3 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำต่อแนวแกนเท่ากัน และ 2 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำต่อแนวแกนไม่เท่ากัน) สรุปผลการทดลองแรงอัดสามแกนแบบมีการอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำ (CU-Test) ในแต่ละดินตัวอย่างทดสอบ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_{sec}$  กับค่า Axial Strain กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้น และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean Stress กับค่า Deviator Stress เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า Effective Stress และค่าอัตราส่วนแรงกระทำต่อแนวแกนส่งผลมีความสัมพันธ์กันอย่างไรบ้าง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected outcomes)

ได้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถทดสอบได้ทั้ง 3 รูปแบบ ที่ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบที่มีอยู่เดิมผลิตขึ้นใหม่บางส่วน ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบน้อยลง และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทฤษฎีใหม่ๆได้

การย้ายตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัดหน่วยแรงไม่ส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับขั้นตอนต่างๆของการทดลองแบบมาตรฐาน

สามารถตรวจวัดค่าโมดูลัสของยังที่เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยในขั้นตอนการเลื่อนตัวอย่างจะให้  
หน่วยแรงอย่างช้าที่สุดที่สามารถตรวจวัดค่าได้

ผลการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎีค่าโมดูลัสของยังและสามารถสรุปได้ว่าสนับสนุนหรือไม่  
สนับสนุนทฤษฎีใดบ้าง



## บทที่ 2

### การสำรวจงานวิจัย และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

#### 2.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of soil)

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน คือค่าความเสถียรของดินในการต้านทานการวิบัติหรือลื่นไถล ในระนาบใดระนาบหนึ่งได้มากน้อยเพียงใด มีความเกี่ยวข้องโดยตรงต่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมธรณี เช่น กำลังแบกทานของดิน เสถียรภาพของลาดดิน และ แรงดันด้านข้างของโครงสร้างกั้นดิน

##### 2.1.1 ทฤษฎีการวิบัติของดินโดย มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb)

Mohr (1900) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการวิบัติของวัสดุใดๆไว้ว่า การวิบัติเกิดขึ้นได้จากผลของความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนบนระนาบการวิบัติ ไม่ใช่เกิดขึ้นจากค่าที่มากที่สุดของค่าใดค่าหนึ่ง สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากกับความเค้นเฉือนบนระนาบการวิบัติ (Failure plane) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_f = f(\sigma'_n) \quad (2.1)$$

โดย  $\sigma'_n$  คือค่าความเค้นตั้งฉากบนระนาบการวิบัติ

$\tau_f$  คือค่าความเค้นเฉือนบนระนาบการวิบัติ

ขอบเขตความสามารถในการต้านทานการวิบัติ (Failure envelope) ของวัสดุใดๆ มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมธรณีความสัมพันธ์นี้สามารถปรับให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงโดย (Coulomb, 1776) ได้เสนอสมการ Mohr - Coulomb failure criterion ดังนี้

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

โดย  $c$  คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

$\phi$  คือ มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)

ในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ Total normal stress จะประกอบไปด้วยแรง effective stress ( $\sigma'$ ) และแรงดันน้ำ (pore water pressure,  $u$ ) ดังสมการ

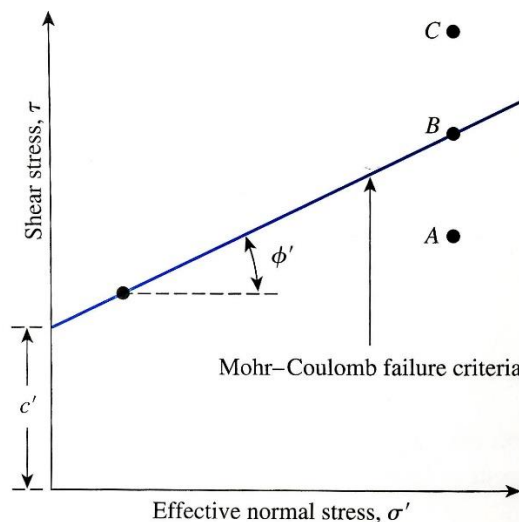
$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนสมการ Mohr - Coulomb failure criterion (2.2) ในรูปของ effective stress จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.4)$$

โดย  $c'$  คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ในรูปของ effective stress

$\phi'$  คือ มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction) ในรูปของ effective stress

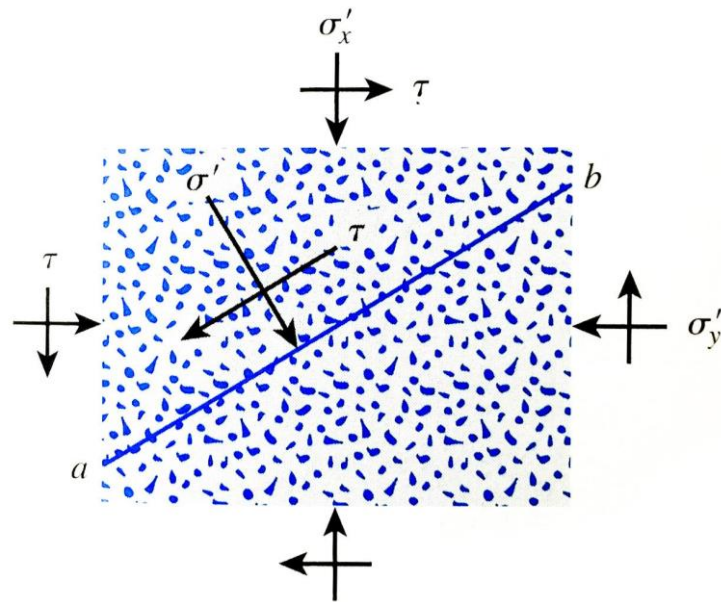


รูปที่ 2.1 ขอบเขตความแข็งแรงของมอร์ และ มอร์-คูลอมป์ (B.M. Das and K.Sobhan)

หากค่าความสัมพันธ์อยู่ในช่วงของโซน A ดินจะไม่เกิดการวิบัติใดๆ การวิบัติจะเกิดขึ้นค่า Shear stress และ Effective normal stress มีค่าถึงโซน B หรือเป็นไปตามสมการ (2.4) การวิบัติของดินก็จะเกิดขึ้น ค่าความสัมพันธ์ไม่สามารถไปถึงที่โซน C ได้ เนื่องจากอยู่นอกเหนือขอบเขตความแข็งแรงของดินและได้วิบัติไปตั้งแต่ค่าความสัมพันธ์ไปถึงโซน B ก่อนแล้ว

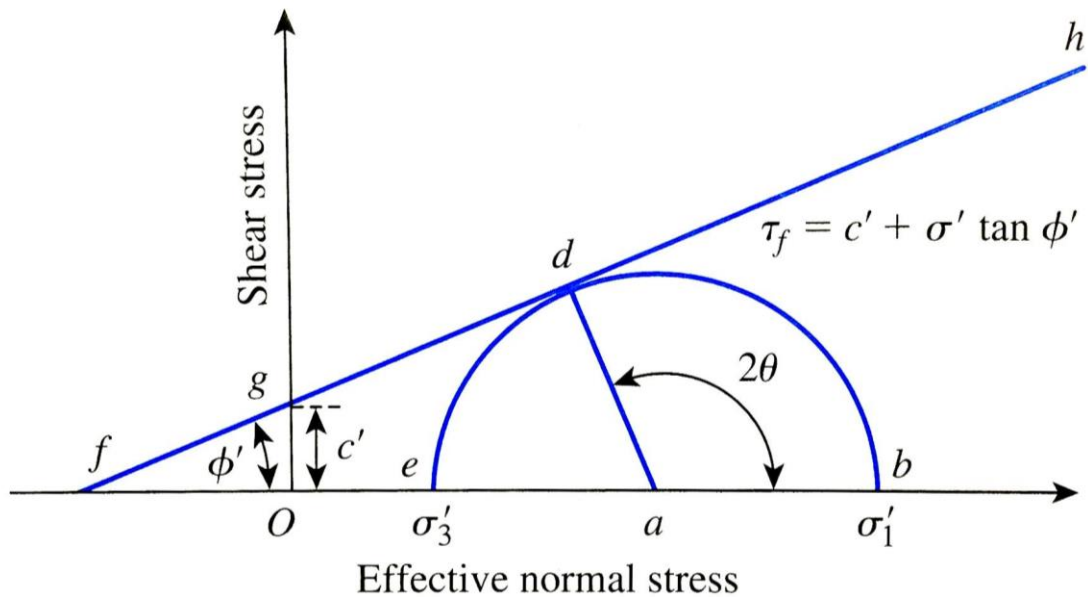
#### 2.1.1.1 ระนาบการวิบัติ (Failure plane)

ระนาบการวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนบนระนาบการวิบัติมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.4) เมื่อพิจารณาบนระนาบหลัก (Principle plan) ซึ่งมีความเค้นตั้งฉากหลัก ( $\sigma_1$ ) และ ความเค้นตั้งฉากรอง ( $\sigma_2$ ) บนระนาบการวิบัติ ab ทำมุม  $\theta$  กับระนาบหลัก (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ระบายการวิบัติของดิน (B.M. Das and K.Sobhan)

เมื่อวิเคราะห์ด้วยวงกลมมอร์ (รูปที่ 2.3) โดยเส้นตรง fgh เป็นเส้นตรงสมการ Mohr - Coulomb failure criterion จะเห็นว่า  $2\theta = 90 + \phi$



รูปที่ 2.3 วงกลมมอร์และขอบเขตความแข็งแรง (B.M. Das and K.Sobhan)

2.1.1.2 กฎการวิบัติโดยแรงเฉือนของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

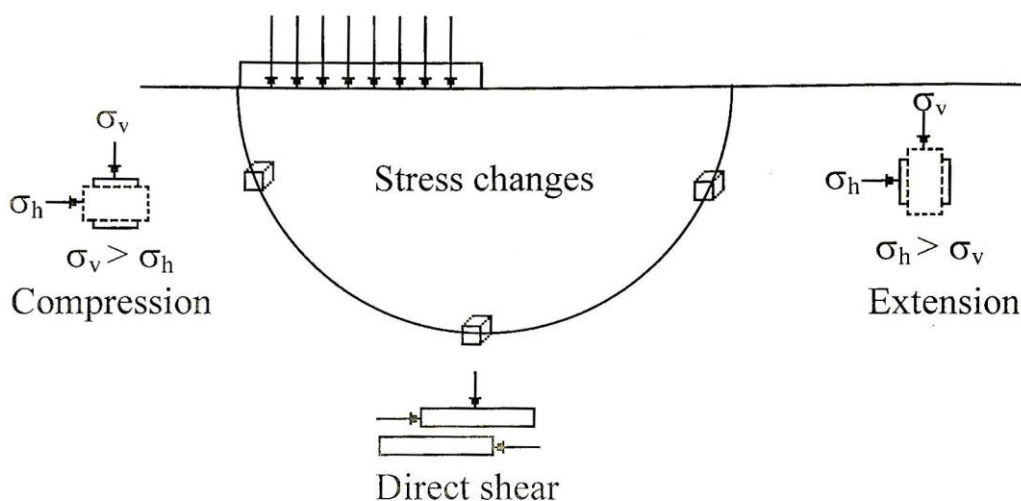
เนื่องจากการวิจัยฉบับนี้ใช้ดินเหนียวกรุงเทพฯมาใช้ในการทดสอบ เมื่อทำการพิจารณาในส่วน ของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจาก

ความเค้นประสิทธิผล ไม่ใช่ผลจากความเค้นรวมหรือความดันน้ำ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีหลักการของความเค้นประสิทธิผล (Terzaghi, 1936) ดังนั้นเมื่อทำการทดลองด้วยดินเหนียวกำลังต้านทานแรงเฉือนจะต้องอยู่ในรูปของความเค้นประสิทธิผล (สมการ 2.4)

### 2.1.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในภาคสนามถือว่ามีความสำคัญในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ที่ต้องการศึกษา อย่างไรก็ตามการทดสอบในภาคสนามยังคงมีปัญหาในเรื่องขอบเขตและสภาพเริ่มต้นของพื้นที่ที่ต้องการศึกษา เป็นผลให้การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้รับความนิยมและความน่าเชื่อถือ เพราะสามารถกำหนดขอบเขตและสภาพเริ่มต้นได้อย่างชัดเจน แม้กระทั่งการให้หน่วยแรงและความเครียดก็สามารถจำลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการทดสอบในภาคสนาม เป็นผลให้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมต่างๆของดินได้น่าเชื่อถือมากกว่า และการทดสอบในห้องปฏิบัติการมักจะมีราคาสูงกว่าการทดสอบในภาคสนามเป็นส่วนใหญ่

รูปแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นการจำลองสภาพการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ถูกแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ การวิบัติแบบอัดตัว (Compression failure), การวิบัติแบบขยายตัว (Extension failure) และการวิบัติแบบเฉือนตรง (Direct shear failure) การวิบัติแบบอัดตัวและการวิบัติแบบขยายตัวเป็นลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำอัดและยึดตามแนวแกน ในขณะที่การวิบัติแบบเฉือนตรงเป็นการวิบัติที่เกิดจากการเคลื่อนในทิศทางตั้งฉากกับความเค้นตั้งฉาก



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวิบัติของดิน, ศ.ดร.สุชสันต์ และผศ.ดร.รุ่งลาวัลย์

จากรูปที่ 2.4 จำลองการวิบัติของดินได้ฐานรากที่ประกอบด้วยรูปแบบการวิบัติทั้ง 3 รูปแบบกำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับการวิบัติแบบอัดตัวมีค่าสูงมากที่สุด และกำลังต้านทานแรงเฉือน

สำหรับการวิบัติแบบขยายตัวมีค่าต่ำที่สุด ในการทำการทดสอบจึงต้องแยกกรณีในการทดสอบ เช่น การวิบัติแบบเฉือนจำลองด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ส่วนการวิบัติแบบอัดตัว และขยายตัวใช้การทดสอบแรงอัดสามแกนมาจำลองการวิบัติ

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญทางธรณีวิทยามีอยู่หลายหลาก วิธีการทดสอบที่เหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ตารางที่ 2.1 ได้สรุปวิธีการทดสอบที่เหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีต่างๆ(คงจีบ 2554)

วิธีการ	พารามิเตอร์ที่วัด	วัดความเครียด	ข้อดี-ข้อจำกัด
สามแกน	โมดูลัสของยัง	>1%	ไม่สามารถวัดความเครียดในระดับต่ำได้
เบนเดอริอิลิเมนต์	โมดูลัสเฉือน	<10 <sup>-3</sup> %	เหมาะสำหรับดินเหนียว
ตัวส่งสัญญาณแผ่นเฉือน	โมดูลัสเฉือน	<10 <sup>-3</sup> %	เหมาะสำหรับดินทราย
เรโซแนนท์คอลัมน์	โมดูลัสเฉือน	<10 <sup>-2</sup> %	ไม่เหมาะสมกับความเครียดระดับกลาง
สามแกนแบบวัฏจักร	โมดูลัสของยัง, อัตราส่วนการหน่วง	>10 <sup>-2</sup> %	จำลองพฤติกรรมแบบพลศาสตร์

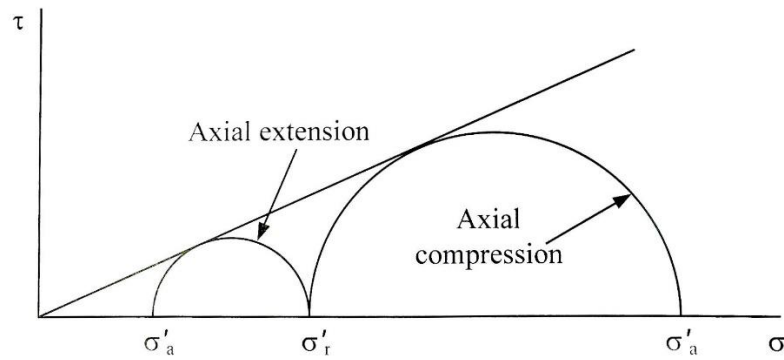
จะเห็นว่าการวัดค่าโมดูลัสของยังมักทดสอบด้วยรูปแบบเครื่องอัดสามแกนแต่ระดับความเครียดที่วัดได้อยู่ในช่วงที่สูง ดังนั้นการนำการทดสอบแรงอัดสามแกนมาวิเคราะห์ความเครียดในระดับต่ำทางผู้วิจัยจึงทำการทดสอบในช่วงการเฉือนดินตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราเร็วที่น้อยมากๆ เพื่อให้สามารถเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งในการทดสอบก็สามารถตรวจวัดระดับความเครียดได้ในระดับปานกลางถึงน้อย

## 2.2 การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)

เป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและความเชื่อถือมากที่สุดในการหาพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength parameters) โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความดันน้ำ และการวิบัติของตัวอย่างดินทดสอบ สามารถจำลองการวิบัติได้ทั้งรูปแบบการวิบัติแบบอัดตัว และการวิบัติแบบขยายตัว หากต้องการจำลองการวิบัติแรงอัดตัวทำได้โดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวตั้งหรือเลือกที่จะลดแรงกระทำด้านข้าง สำหรับการจำลองการวิบัติแบบขยายตัวทำได้โดยลดความดันในแนวตั้ง หรือเพิ่มความดันรอบข้าง แต่ที่เป็นที่นิยมคือการจำลองการวิบัติแบบอัดตัวที่มีการ



อัดตัวคายน้ำด้วยการให้ความดันรอบข้างของตัวอย่างดินทดสอบมีค่าคงที่ แล้วเพิ่มความเค้นแนวตั้ง เพื่อเฉือนตัวดินตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นแนวตั้งที่คงที่

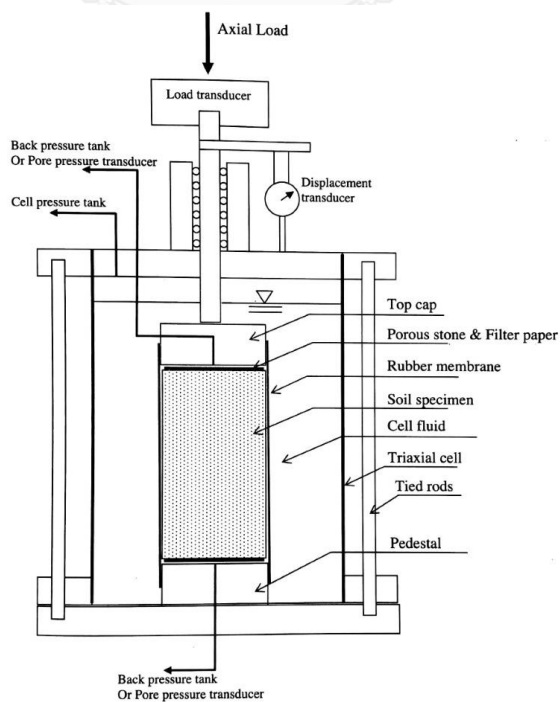


รูปที่ 2.5 แสดงวงกลมมอร์ที่สุตวิบัติสำหรับการทดสอบแบบอัดตัวและแบบขยายตัว

จากรูป 2.5 แสดงการจำลองการวิบัติแบบอัดตัวและการวิบัติแบบขยายตัวด้วยความเค้นประสิทธิผลรอบข้างคงที่ เพียงแต่เพิ่มหรือลดความเค้นในแนวตั้งจนกระทั่งดินทดสอบเกิดการวิบัติ และจากในรูปสรุปได้ว่า เป็นตัวอย่างดินที่มีค่า  $c' = 0$  และ  $\phi'$  เป็นค่าคงที่ซึ่งแตกต่างกันตามลักษณะการวิบัติ

เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบ่งได้ 2 รูปแบบหลักๆ ดังนี้

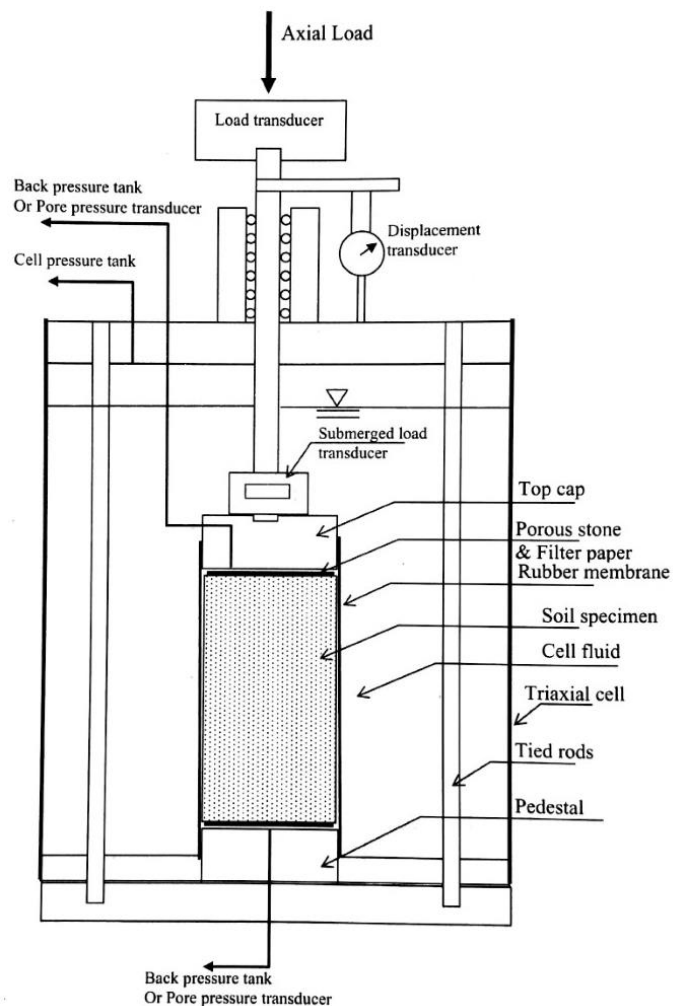
1. แบบที่มีเสาอยู่ภายนอกของกระบอกทดสอบ



รูปที่ 2.6 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีเสาอยู่ภายนอกของกระบอกทดสอบ

เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน แบบที่มีเสาอยู่ภายนอกของกระบอกทดสอบ ได้รับการพัฒนาในประเทศไทย ข้อเสียของเครื่องมือรูปแบบนี้คือ ดินตัวอย่างทดสอบจะต้องตั้งอยู่ได้ด้วยตัวเองโดยไม่มีการค้ำยันหรือประคองใดๆ จนกว่าจะครอบกระบอกทดสอบลงบนเครื่องมือ จึงจะประคองดินตัวอย่างทดสอบด้วยความดันด้านข้างและแรงตามแนวแกน ซึ่งการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบรูปแบบนี้ในดินเหนียวอ่อนจะพบปัญหาการบิดตัวของดินตัวอย่างทดสอบทำให้การให้หน่วยแรงไม่ลงตรงกลางแกนได้ และเนื่องจากตัวพิสตันและแผ่นรับแรงกดด้านบนไม่สามารถยึดติดกันได้ จึงไม่สามารถทดสอบภายใต้การกระทำของแรงแบบวิภูจักรได้

## 2. เครื่องมือทดสอบแบบที่มีเสาอยู่ภายในของกระบอกทดสอบ



รูปที่ 2.7 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีเสาอยู่ภายในของกระบอกทดสอบ

เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีเสาอยู่ภายในของกระบอกทดสอบ ได้พัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นซึ่งในปัจจุบันเครื่องทดสอบในรูปแบบนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการใช้งานและศึกษาค้นคว้า จากการย้ายตำแหน่งเสาเข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดสอบ ทำให้ขั้นตอนการ

เตรียมการทดสอบเปลี่ยนไป ต้องประกอบโครงสร้างของเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ให้เรียบร้อยก่อนจึงควรประกอบทดสอบ ทำให้ดินตัวอย่างทดสอบมีการค้ำยันจากพิสตันและยังสามารถยึดพิสตันกับแผ่นรับแรงกดด้านบนเพื่อทดสอบการวิบัติแบบขยายตัวหรือการทดสอบภายใต้การกระทำของแรงแบบวัฏจักรได้อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ก็ใช้โมเดลนี้เป็นต้นแบบในการทำงานวิจัยด้วย

### 2.3 Young's Modulus ( $E$ )

ค่าโมดูลัสของยัง หรือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ถูกนิยามโดยนักฟิสิกส์ชื่อ โทมัส ยัง ว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดในแนวแกนคือ

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\sigma_a$  และ  $\varepsilon_a$  คือค่าความเค้นในแนวแกน และค่าความเครียดในแนวแกนตามลำดับ

ค่าโมดูลัสของยังนี้มักถูกใช้ในการคำนวณพฤติกรรมในการรับแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากผลของแรงที่มากกระทำ ซึ่งในความจริงแล้วดินไม่ได้มีคุณสมบัติอย่างสมบูรณ์โดยเฉพาะการเสียรูปของดินจะไม่มีรูปร่างเหมือนในโลหะ แต่ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีมักนิยามให้ดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎของฮุก

### 2.4 Shear modulus (Yong, Townsend et al.)

สามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน ซึ่งนิยามเขียนให้อยู่ในรูปของค่าโมดูลัสของยังและอัตราส่วนปัวซองดังนี้

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\nu$  คือค่าอัตราส่วนปัวซอง ซึ่งมีค่า  $\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$

โดยที่  $\varepsilon_r$  คือค่าความเครียดในแนวรัศมี

Elastic modulus for homogenous isotropic materials ค่าค่าพามีเตอร์ที่มี  
ความสัมพันธ์กันในวัสดุที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกแนวแกนประกอบไปด้วย

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆในวัสดุ Homogenous & Isotropic  
(Hook's Law)

Basic pairs → Parameters ↓	$E, \nu$	$\lambda, \mu$	$\mu, \nu$
$E$	$E$	$\mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$	$2\mu(1 + \nu)$
$\nu$	$\nu$	$\lambda/2(\lambda + \mu)$	$\nu$
$B$	$E/3(1 - 2\nu)$	$\lambda + (2/3)\mu$	$2\mu(1 + \nu)/3(1 - 2\nu)$
$\lambda$	$\nu E/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$\lambda$	$2\mu\nu/(1 - 2\nu)$
$\mu$	$E/2(1 + \nu)$	$\mu$	$\mu$
$H_A$	$E(1 - \nu)/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$\lambda + 2\mu$	$2\mu(1 - \nu)/(1 - 2\nu)$

#### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน

พารามิเตอร์ที่มีผลกับค่าโมดูลัสแบบเฉือนจะคล้ายคลึงกับ Young's modulus จะต่างกันในบางพารามิเตอร์ (Hardin and Black 1969) ได้ให้สมการโมดูลัสแบบเฉือนไว้ว่า

$$G = f(\sigma_0', e, C, A, H, t, S, \tau_0, f, \theta, T) \quad (2.7)$$

โดย	$\sigma_0'$	=	หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective normal stress)
	$e$	=	Void ratio
	$C$	=	ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาด, สัดส่วนมวล
	$A$	=	ขนาดของ Strain
	$H$	=	ประวัติของหน่วยแรง (Stress history) และประวัติของการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration history)
	$t$	=	Secondary time effect
	$S$	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation)
	$f$	=	ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency of vibration)
	$\theta$	=	โครงสร้างของดิน (Soil structure)
	$T$	=	อุณหภูมิ

#### 2.4.2 ผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในดิน Cohesionless Soil

ในโมดูลัสแรงเฉือนระดับ Small strain ของดิน Cohesionless soil พบว่าการทดลองด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลที่ต่างกัน ค่า Void ratio ( $e$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือนมากที่สุด ในอดีต (Hardin and Richart Jr 1963) ได้เสนอฟังก์ชันของค่า Void ratio ไว้ดังนี้

$$F(e) = \frac{(217-e)^2}{(1+e)} \quad \text{หรือ} \quad F(e) = \frac{(297-e)^2}{(1+e)} \quad (2.8)$$

สมการ(2.8)ใช้มือใช้ในดินทรายที่มีค่า Void ratio  $\approx 0.5-1.2$  ส่วนดินทรายที่มีค่า Void ratio ที่สูงกว่านั้นจะใช้สมการ(2.8)ทางด้านขวามือในการคำนวณ

แนวความคิดของ Hardin & Richart ได้รับความนิยมและมีการทดลองที่มีผลสนับสนุนตามมา เช่น (Takeji Kokusho 1980)ซึ่งทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ Cyclic test ด้วยตัวอย่างดินทรายที่ Toyoura ซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นดินทรายอิมตัวมีค่า Poisson's ratio ( $\nu$ ) = 0.5 แล้วจึงนำค่าที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟ log-log ความสัมพันธ์ของ  $\frac{G}{F(e)}$  กับ ความเค้นประสิทธิผล

( $\sigma_0'$ ) พบว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อค่าความเค้นประสิทธิผลเพิ่มขึ้น สนับสนุนสมการที่ (2.8) ของ(Hardin and Richart Jr 1963) โดยผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของสมการอิมไพริคัลดังนี้

$$G_0 = AR(e)(\sigma_0')^n \quad (2.9)$$

โดย  $G_0$  = ค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Initial shear modulus)(kPa)

$\sigma_0'$  = ความเค้นประสิทธิผลที่กระทำต่อดิน (kPa)

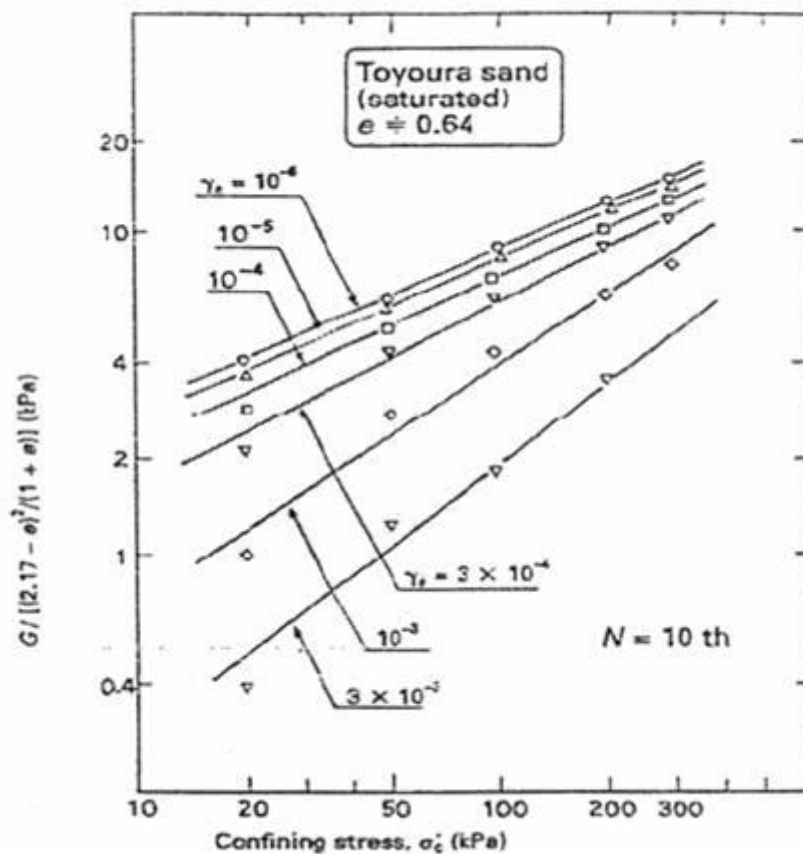
$A, n$  = ค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลจาก Strain level และชนิดของดินที่นำมาทดสอบ

ในสมการที่ 2.9 สามารถนำไปปรับใช้กับดินทรายได้ทุกประเภท โดยการปรับเปลี่ยนค่า  $A$  และ  $n$  ที่เหมาะสม จากการวิจัยของ (Takeji Kokusho 1980) ได้สรุปค่าที่เหมาะสมไว้ดังนี้

References	A	F(e)	n	Soil material	Test method	
Sand	Hardin-Richart (1963)	7000	$(2.17-e)^2(1+e)$	0.5	Round grained Ottawa sand	Resonant Column
		3300	$(2.97-e)^2(1+e)$	0.5	Angular grained crushed quartz	Resonant column
	Slubata-Soelarno (1975)	42000	$(0.67-e)(1+e)$	0.5	Three kinds of clean sand	Ultrasonic pulse
	Iwasaki et al. (1978)	9000	$(2.17-e)^2(1+e)$	0.38	Eleven kinds of clean sand	Resonant column
	Kokusho (1980)	8400	$(2.17-e)^2(1+e)$	0.5	Toyoura sand	Cyclic triaxial
	Yu-Richart (1984)	7000	$(2.17-e)^2(1+e)$	0.5	Three kinds of clean sand	Resonant column
Clay	Hardin-Black (1968)	3300	$(2.97-e)^2(1+e)$	0.5	Kaolinite, etc.	Resonant column
	Marcuson-Wahls (1972)	4500	$(2.97-e)^2(1+e)$	0.5	Kaolinite, $I_p^{**} = 35$	Resonant column
		450	$(4.40-e)^2(1+e)$	0.5	Bentonite, $I_p = 60$	Resonant column
	Zen Umchara (1978)	2000-4000	$(2.97-e)^2(1+e)$	0.5	Remolded clay, $I_p = 0-50$	Resonant column
	Kokusho et al. (1982)	141	$(7.32-e)^2(1+e)$	0.6	Undisturbed clays, $I_p = 40-85$	Cyclic triaxial

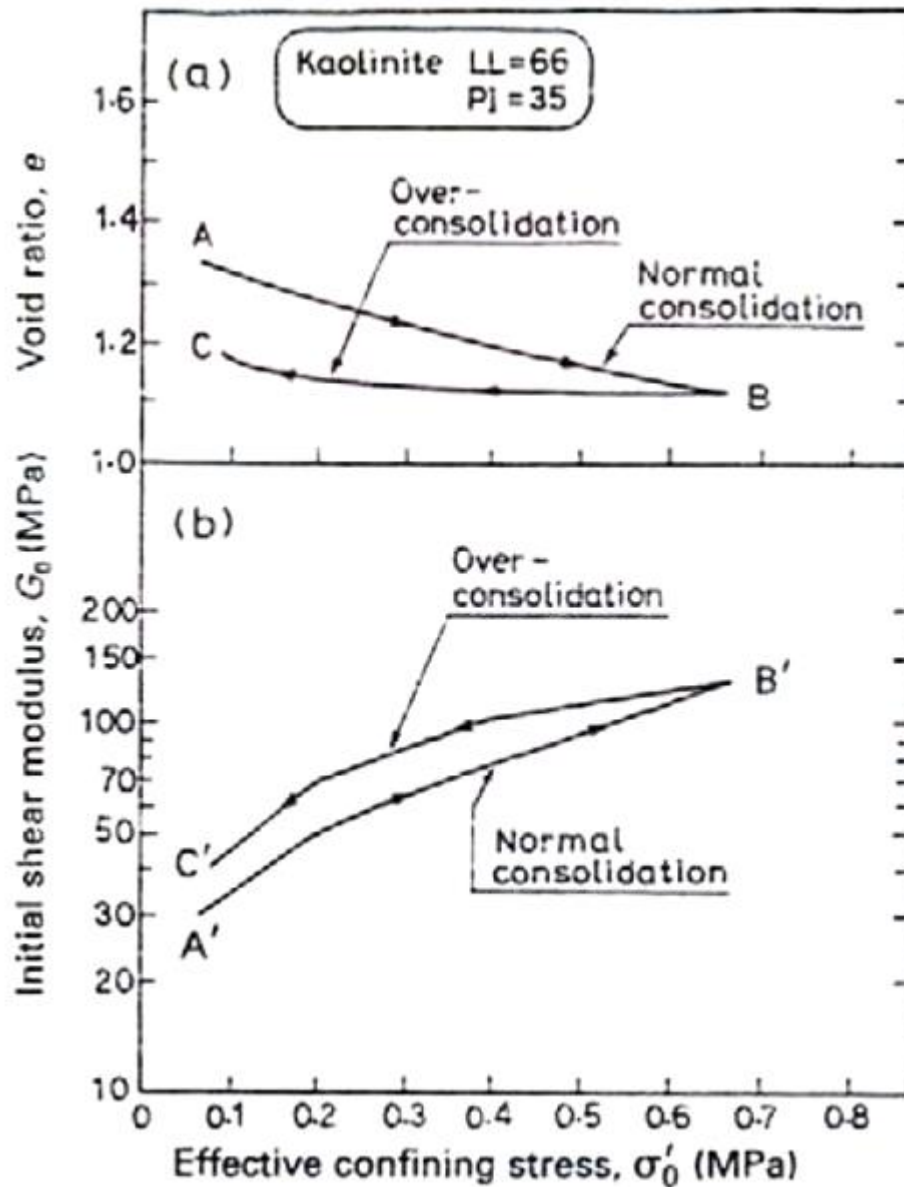
\* $\sigma_0'$  : kPa,  $G_0$  : kPa, \*\*  $I_p$  : Plasticity Index

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของสมการอิมไพริกัล  $G_0 = AF(e)(\sigma_0')^n$  ที่ Small strain (Takeji Kokusho 1980)



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความเค้นประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน โดย (Takeji Kokusho 1980)

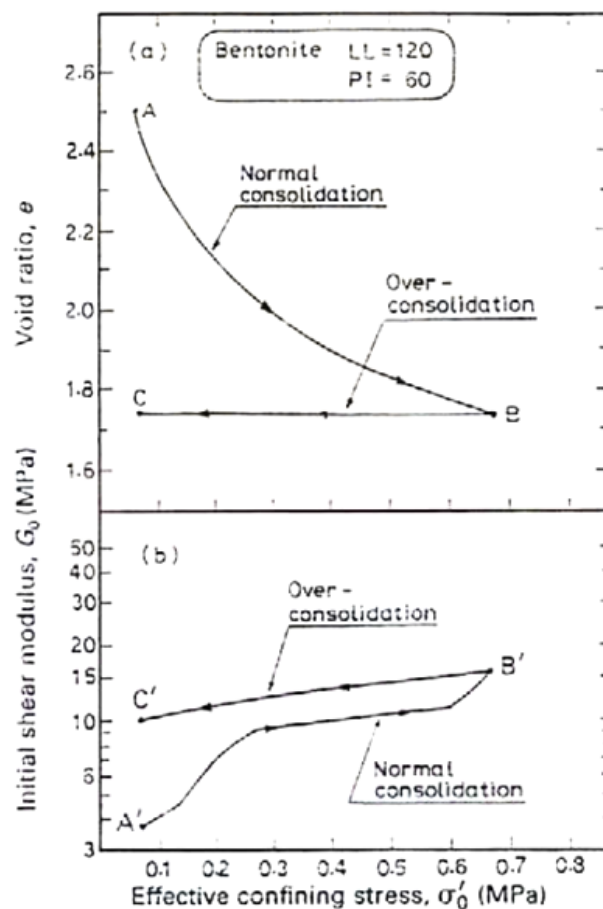
พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อดินประเภท Cohesive soil ก็คือ Plasticity และ Stress history จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับ Plasticity และ Stress history ที่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน เช่น งานวิจัยของ (Humphries and Wahls 1968) ได้ศึกษาผลของ OCR ที่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนในตัวอย่างดินเหนียว Kaolinite ที่มีค่า Plasticity Index ( $I_p$ ) = 35 % ด้วยวิธี Resonant column test ได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า Plasticity สูง ซึ่งมีผลกระทบระหว่าง OCR

งานวิจัยนี้ทดลองโดยทำการ Load ในช่วงของ Normal consolidation (Isotropic) แล้วจึงทำการ Unload ซึ่งขณะการทดลองจะวัดค่าโมดูลัสแบบเฉือนไปด้วย (Humphries and Wahls 1968) พบว่า โมดูลัสแบบเฉือนในช่วงของ Over consolidation จะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสเฉือนในช่วง Normal consolidation ประมาณ 10 – 30 % สรุปได้ว่าเป็นผลมาจากค่า Void ratio ในรูปที่ในช่วง Over consolidation มีค่าต่ำกว่าในช่วง Normal consolidation นั้นเอง

งานวิจัยในลักษณะเดียวกับกับเหนียว Bentonite ซึ่งมีค่า Plasticity Index ( $I_p$ ) = 60 % ผลจากงานวิจัยได้ผลดังรูปที่ 2.8 ผลงานวิจัยที่ได้คล้ายคลึงกับในกรณีการทดสอบในดิน Kaolinite แตกต่างกันที่ค่าโมดูลัสเฉือนที่ได้ของดินเหนียว Bentonite ให้ผลที่ต่ำกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียว Kaolinite และพบว่าการเพิ่มค่าของโมดูลัสแบบเฉือนเมื่อ OCR เพิ่มขึ้น ของดิน Kaolinite ซึ่งมีค่า Plasticity Index ที่น้อยกว่า จะแสดงผลอย่างชัดเจนกว่าในดินเหนียว Bentonite สรุปได้ว่า Plasticity ของดินเหนียวมีผลกระทบในช่วง Over consolidation เป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.10 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า Plasticity ต่ำซึ่งมีอิทธิพลในช่วง OCR

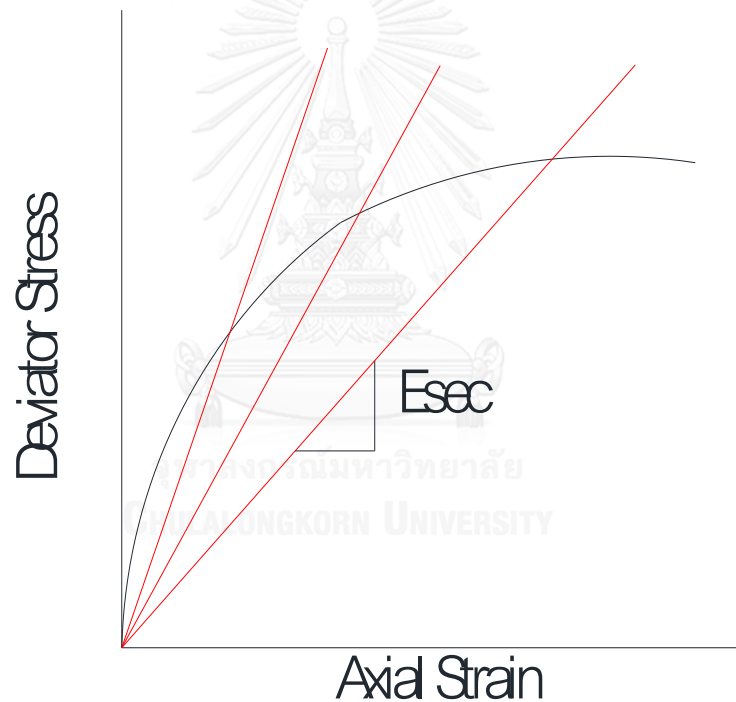


จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตพอสรุปได้ว่าโมดูลัสแบบเฉือนในดิน Cohesive soil ผลกระทบจาก Plasticity ในช่วง Over consolidation แต่จะไม่มีผลในช่วงของ Normal consolidation

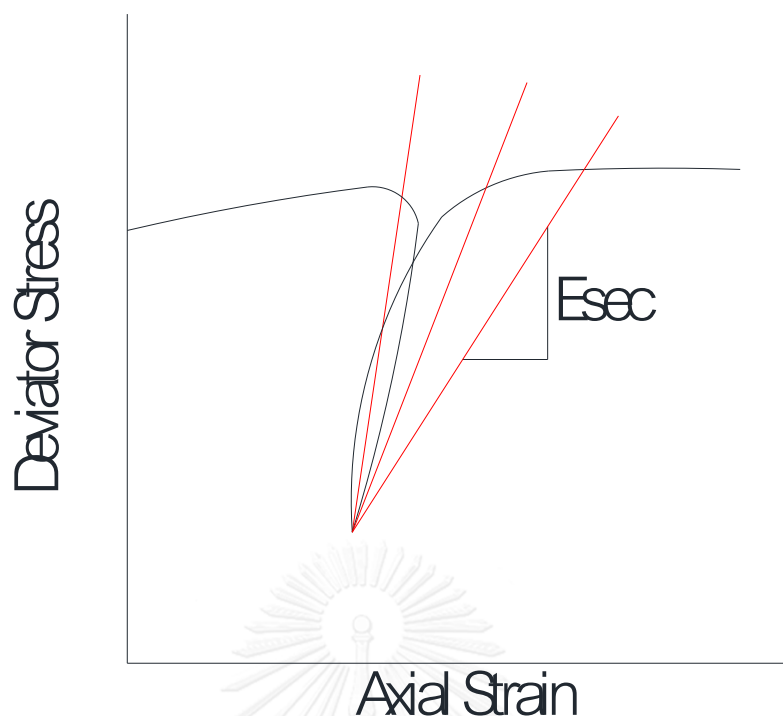
## 2.5 ค่าโมดูลัสซีแคนท์(Secant Modulus)

ค่าโมดูลัสซีแคนท์เป็นรูปแบบหนึ่งของค่าโมดูลัสแรงเฉือนคือสามารถหาค่าได้จากอัตราส่วนของค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่อความเครียดที่เกิดขึ้นตามแนวแกนในแต่ละช่วงขณะที่ทำการทดสอบ ณ จุดที่เราสนใจ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_s = \frac{q}{\varepsilon_A} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.11 ภาพการหาค่า secant modulus



รูปที่ 2.12 ภาพการหาค่า secant modulus ในช่วงการไม่ให้หน่วยแรง และภายหลังการให้หน่วยแรงอีกครั้ง

ในงานวิจัยนี้คำนวณค่า secant modulus 2 รูปแบบ คือ 1. จากจุด (0,0) จริงแสดงในรูปที่ 2.11 คือค่าที่เราวิเคราะห์จากจุด (0,0) ในแกน x และ y (Axial Strain และ Deviator Stress ตามลำดับ) และ 2. แบบมีการขยับจุด (0,0) แสดงในรูปที่ 2.12 คือมีการคำนวณ ณ จุดที่เราสนใจ โดยการกำหนดให้ค่าความเครียดตามแนวแกนกับความเค้นเบี่ยงเบนในขณะนั้นมีค่าเป็น 0 และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถทราบถึงค่า secant modulus ในแต่ละช่วงของการให้หน่วยแรงและไม่ให้หน่วยแรงเพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของในแต่ละช่วงร่วมกับการคำนวณรวมจากจุด (0,0) จริง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1 การทดสอบ Triaxial ในดินเหนียว (สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

เป็นงานวิจัยที่ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างการทดสอบด้วยวิธีการการอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำ (CU-Test) โดยทำการทดลองทั้งแบบยึดและแบบอัดตัวอย่างกับวิธีไม่มีการไม่อัดตัวคายน้ำและไม่มีการระบายน้ำ (UU-Test) ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน ได้สรุปการวิจัยไว้ว่า การทดลองแรงอัดสามแกนแบบมีการอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการระบายน้ำต่างกับการทดสอบแบบไม่มีการอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำที่ การทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำที่ไม่มีการ

ระบายน้ำสามารถปรับความเค้นประสิทธิผลในตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบได้ตามต้องการ การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ด้วย  $\sigma_c$  ทำให้ลดปัญหาจากผลของการรบกวนตัวอย่างโดยการเพิ่มความเค้นประสิทธิผลในตัวอย่าง แต่ทำให้ปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลงจากธรรมชาติ ละเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน

การทดสอบแบบอัดตัวด้วยน้ำแต่ไม่มีการระบายน้ำสามารถดัดแปลงได้หลายรูปแบบมากกว่า เช่น การทดสอบอาจเลือกใช้ค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ( $\sigma_v'$ ) และนารวราบ ( $\sigma_h'$ ) ที่ไม่เท่ากัน เพื่อหาค่า  $S_u$  และ  $E_u$   $\phi$  และค่า  $C$  ได้ดีมากขึ้น และการทดสอบในลักษณะของการยึดและอัดดินตัวอย่าง จะให้ผลของค่า  $\phi$  และ  $c$  ที่ไม่เท่ากันในตัวอย่างเดียวกัน เพราะ คุณสมบัติของดินไม่ได้เท่ากันทุกทิศทางโดยสมบูรณ์

การทดสอบแบบไม่มีการอัดตัวด้วยน้ำและไม่มีการระบายน้ำถ้าตัวอย่างที่เก็บมามีคุณภาพจะให้ค่า undrain shear strength ( $S_u$ ) ที่แม่นยำมากกว่า และปริมาณความชื้นจะใกล้เคียงกับในธรรมชาติมากกว่า

## 2. ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนดินเบนเดอริสเม้นต์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน (ธีรินทร์ อมรวิทย์ ยารักษ์ 2544)

เป็นงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในช่วง Small strain ใช้รูปแบบการตรวจวัดการแพร่กระจายของคลื่นด้วย Bender element ในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบในสนามเพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือน โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษา ความเค้นประสิทธิผล (effective confining stress), Plasticity, Stress history และ Initial shear modulus ที่สภาวะ Strain level ต่างๆ โดยผลที่ได้คือ

เมื่อค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective confining stress) เพิ่มขึ้นแนวโน้มของโมดูลัสแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามเป็นเส้นตรงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ log-log โดยในช่วงของ Normal consolidation ความชันของการเพิ่มขึ้นจะสูงกว่าใน Over consolidation ได้อธิบายไว้ว่าเป็นผลมาจาก Over consolidation ratio และ Plasticity Index จำเพาะของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ

เนื่องจากทำการทดสอบกันดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่า Plasticity Index สูง (>40%) และพบว่า Plasticity มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน ในช่วง Over consolidation และจำเป็นต้องปรับแก้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนอันเนื่องมาจากผลกระทบของ Over consolidation และ Plasticity Index ซึ่งสนับสนุนงานวิจัยของ Hardin & Black, 1969 ได้แนะนำไว้

การทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนด้วย Bender element ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนพบว่า Principle stress มีผลต่อค่า Initial shear modulus โดยเมื่อค่า Principle stress ลดลงจะส่งผลให้ Initial shear modulus จะลดลงและผลของค่าโมดูลัสมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนภายใต้ความเค้นประสิทธิผลต่างๆ แต่กลับพบว่าค่า Deviator stress ส่งผลกระทบทต่อโมดูลัสแรงเฉือนน้อยมากจนกล่าวได้ว่าไม่ส่งผลกระทบทเลย

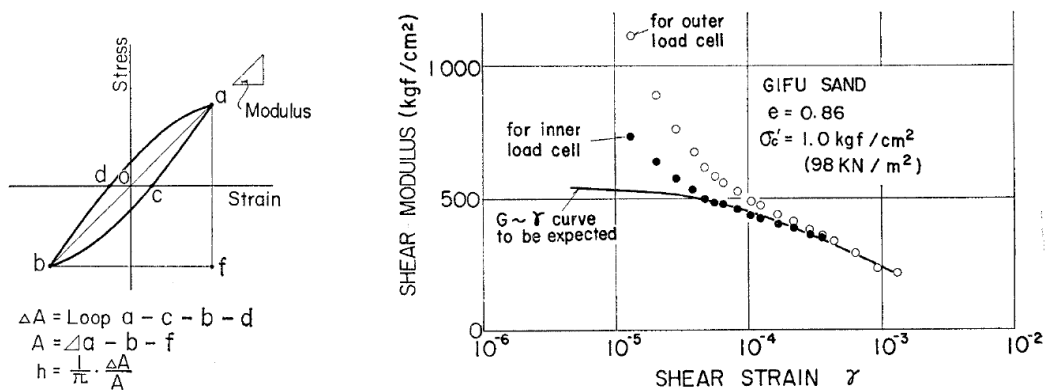
3. ผลกระทบทของหน่วยแรงแบบแอนไอโซโทรปิกต่อค่าโมดูลัสเฉือนที่ความเครียดระดับต่ำของทรายโดยใช้เบนเดอร้อลิเมนต์(อลิทคิง อนุวงศ์พทุ 2549)

เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบทของหน่วยแรงแบบแอนไอโซโทรปิกต่อค่าโมดูลัสเฉือนด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในทราย โดยนำเบนเดอร้อลิเมนต์มาใช้ประกอบการหาค่าความเร็วของคลื่นในดินตัวอย่างทดสอบ

ได้เสนอผลการทดสอบว่าค่าความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนช่องว่างของดินตัวอย่างทดสอบส่งผลกระทบทต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน ซึ่งในการทดสอบแบบแอนไอโซโทรปิกพบว่าค่าโมดูลัสเฉือนที่เกิดขึ้นค่าไม่ต่างกับการทดสอบแบบไอโซโทรปิกมากนัก และความเค้นเฉือนมีผลกระทบทต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือนน้อยมาก

4. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range(Takeji Kokusho 1980)

เป็นงานวิจัยด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยทรายทั้งแบบอัดตัวที่มีระบายน้ำและแบบอัดตัวที่ไม่มีระบายน้ำ จำลองการเกิดแผ่นดินไหวด้วยการทดสอบ Cyclic Test แบบไอโซโทรปิกใช้ Gap Sensor และ Load Transducer ความละเอียดสูงเพื่อตรวจวัดค่าโมดูลัสของยังและโมดูลัสแบบเฉือนในระดับที่ต่ำมากๆ



รูปที่ 2.13 หลักการทดสอบ (Takeji Kokusho 1980)

จากงานวิจัยฉบับนี้ได้สนับสนุน Hardin & Richart, 1963 ในการอธิบายพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแรงเฉือนด้วยฟังก์ชัน  $F(e)$  ที่สภาพความเค้นประสิทธิผลต่างๆ ซึ่งสรุปเป็นสมการอิมไพริกัลดังนี้

$$G_0 = AF(e)(\sigma'_0)^n \tag{2.11}$$

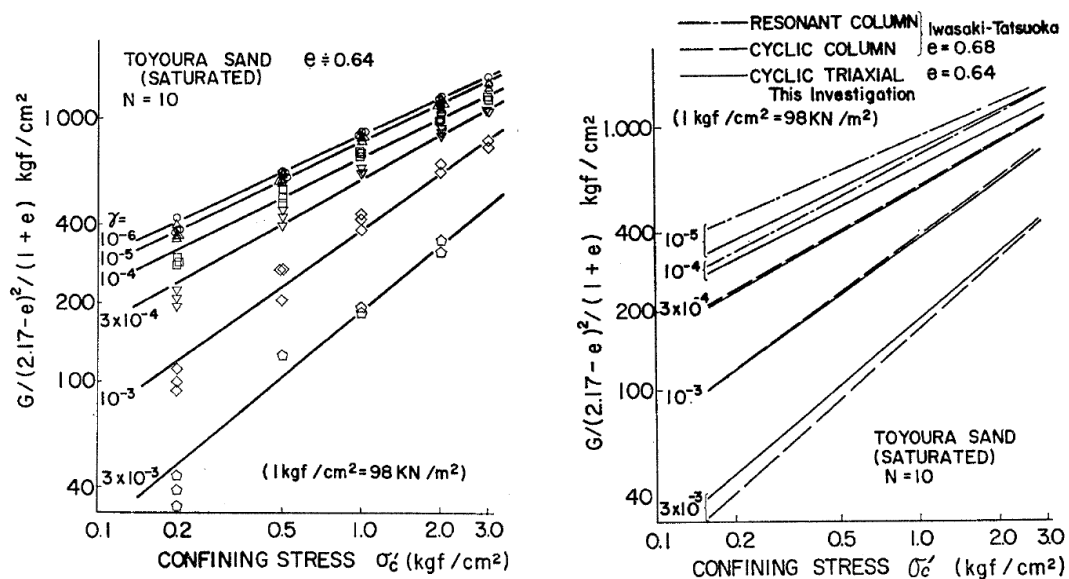
โดย  $G_0$  = ค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Initial shear modulus)(kPa)

$\sigma'_0$  = ความเค้นประสิทธิผลที่กระทำต่อดิน (kPa)

$A, n$  = ค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลจาก Strain level และชนิดของดินที่นำมาทดสอบ

ซึ่ง (Takeji Kokusho 1980) ได้สรุปความสัมพันธ์ของโมดูลัสแรงเฉือนกับค่าความเค้นประสิทธิผลของดินทรายที่ Toyoura ที่ความเครียดแบบเฉือนระดับต่ำ ( $\gamma=10^{-5}$ ) ไว้เป็นสมการดังนี้

$$G_0 = 8400 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} (\sigma'_0)^{0.5} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.14 ผลกระทบของความเค้นประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Takeji Kokusho 1980)

5. THE ELASTIC UNDRAINED MODULUS  $E_{u50}$  FOR STIFF CONSOLIDATED CLAYS RELATED TO THE CONCEPT OF STRESS HISTORY AND NORMALIZED SOIL PROPERTIES (Stróżyk and Tankiewicz 2016)

พบว่าค่าการหาค่า  $E_{u50}$  ในดิน Heavily Consolidation Clay มักพบปัญหาการที่ดินตัวอย่างทดสอบถูกรบกวนในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง จึงได้เสนอผลการทดสอบ Undrained Elastic

Modulus  $E_{u50}$  ของดิน Stiff Heavily Consolidation Clay ที่ระดับความลึก 100 เมตร ผล  $E_{u50}$  ที่ได้มีความหลากหลายมาก จึงนำผล  $E_{u50}$  ที่ได้มา Normalization

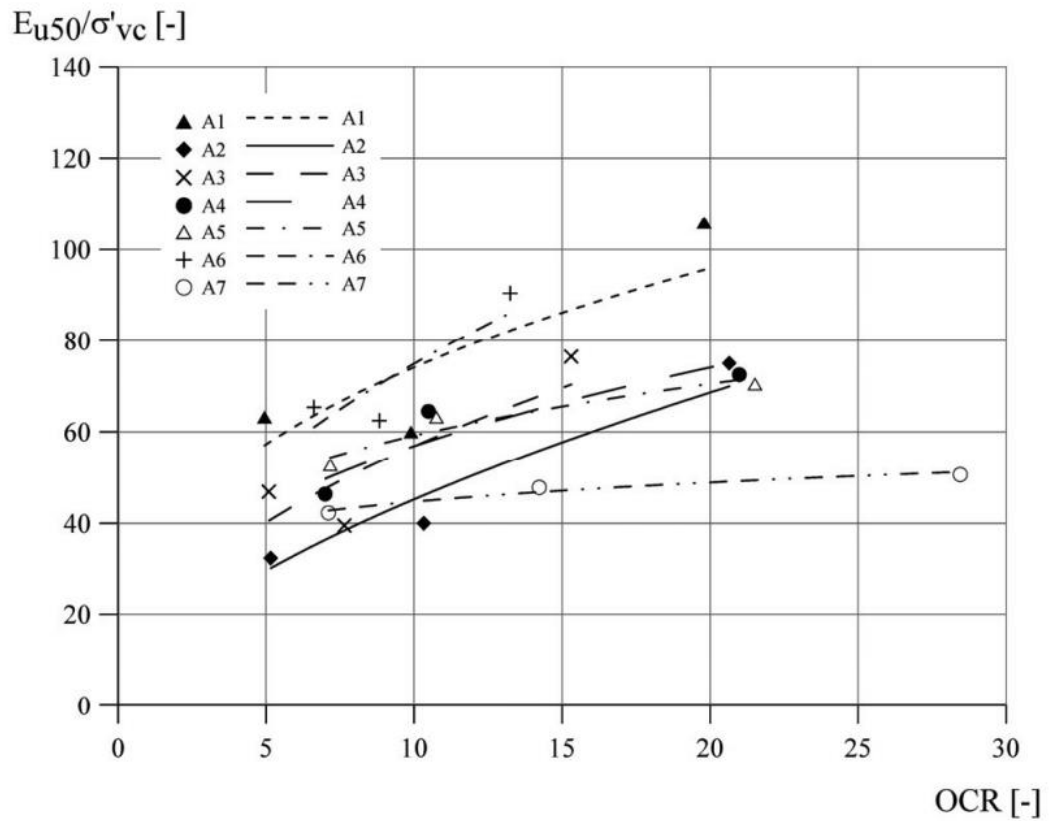
ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression test

Sample	In situ stress $\sigma'_{vo}$ [MPa]	Undrained shear strength $c_u$ [kPa]	Normalized shear strength $c_u/\sigma'_{vo}$ [-]	Undrained modulus $E_{u50}$ [MPa]	Axial strain $\epsilon_{50}$ [%]	Normalized modulus $E_{u50}/\sigma'_{vo}$ [-]
A1	1.98	531.3	0.268	16.7	2.86	8.43
A2	2.08	185.6	0.090	6.6	2.46	3.17
A3	3.06	218.7	0.071	6.0	3.35	1.96
A4	4.20	56.0	0.013	5.7	0.90	1.36
A5	4.30	30.7	0.007	4.0	0.74	0.93
A6	5.31	107.1	0.020	15.2	0.64	2.86
A7	5.66	329.8	0.058	7.4	4.33	1.30

ตารางที่ 2.5 ผลจากการทดสอบ Triaxial Compression Test

Sample	In situ stress $\sigma'_{vo}$ [MPa]	Confining pressure $\sigma'_3$ [kPa]	OCR [-]	Modulus $E_{u50}$ [MPa]	Normalized modulus $(E_{u50}/\sigma')_{KOC}$ [-]
A1	1.98	100	19.8	10.6	106.0
		200	9.9	12.0	60.0
		400	5.0	25.3	63.3
A2	2.08	100	20.8	7.5	75.0
		200	10.4	8.0	40.0
		400	5.2	13.0	32.5
A3	3.06	200	15.3	15.3	76.5
		400	7.7	15.8	39.5
		600	5.1	28.1	46.8
A4	4.20	200	21.0	14.5	72.5
		400	10.5	25.8	64.5
		600	7.0	27.8	46.3
A5	4.30	200	21.5	14.1	70.5
		400	10.7	25.3	63.3
		600	7.2	31.6	52.7
A6	5.31	400	13.3	36.2	90.5
		600	8.8	37.5	62.5
		800	6.6	52.3	65.4
A7	5.68	200	28.4	10.1	50.5
		400	14.2	19.1	47.8
		800	7.2	33.8	42.3

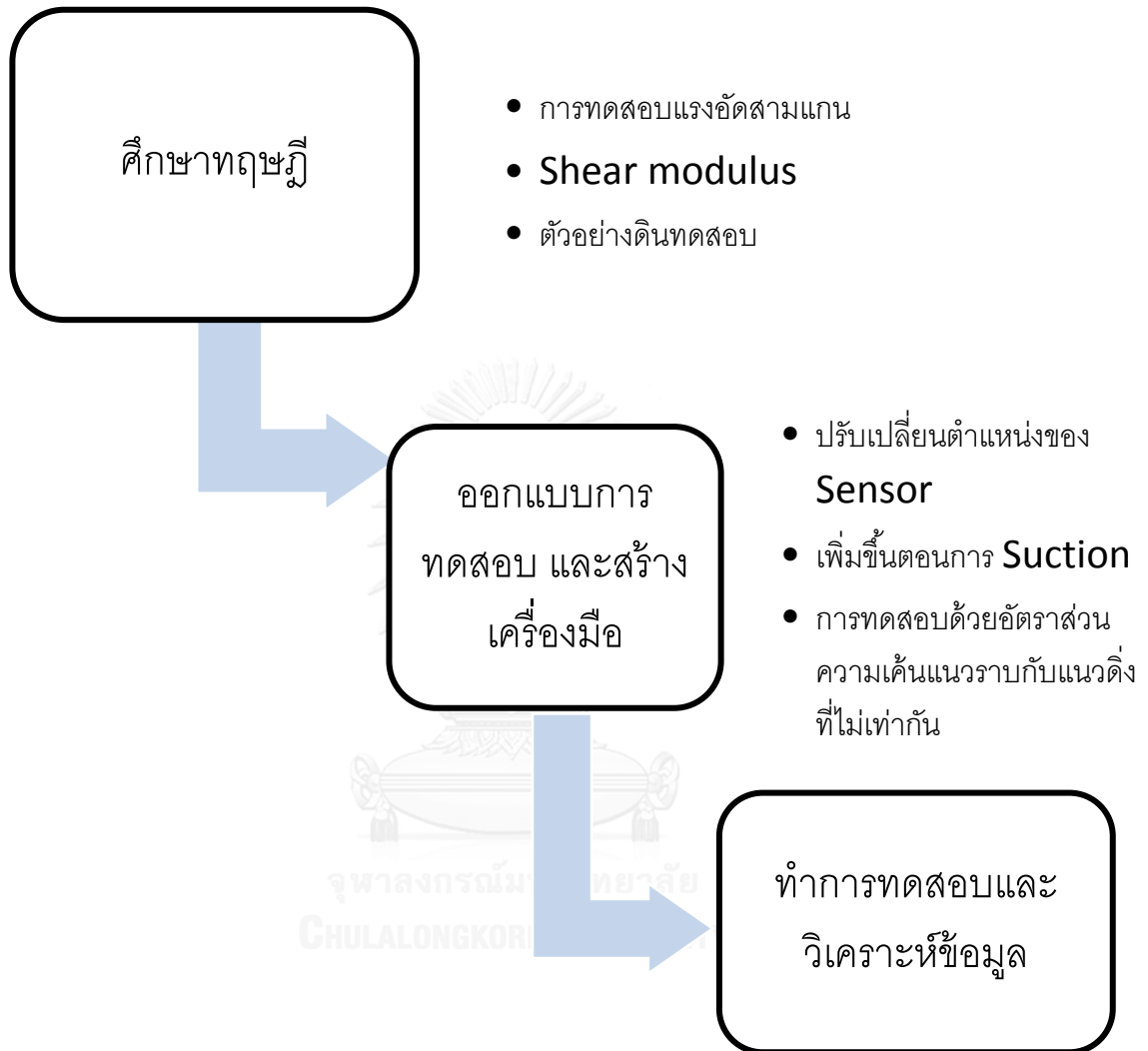
ซึ่งผลที่ได้คือค่า  $E_{u50}$  ที่ผ่านการ Normalize จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับค่า OCR ratio ผลมาจากความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งในอดีตของดินมีค่าสูงขึ้นตัวอย่างทดสอบจึงนิยามว่าเป็นดินที่ผ่านการอัดตัวคายน้ำแล้ว



รูปที่ 2.15 Normalized Undrained Modulus  $E_{u50}$  เปรียบเทียบกับค่า OCR ratio

และจากการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ยังสนับสนุนการใช้การ Normalization ในการวิเคราะห์ผลในดินลักษณะอื่นๆ เพื่อปรับแก้ค่าที่ได้ในห้องปฏิบัติการเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์บางตัวที่ถูกรบกวนในขั้นตอนเก็บดินตัวอย่างทดสอบ

บทที่ 3  
การดำเนินงานวิจัย





### 3.1 ศึกษาถึงทฤษฎีของการทดสอบแรงอัดสามแกน และ Young's Modulus

ศึกษาถึงหลักการและการทำงานของเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนเพื่อหาความรูปร่างการทดสอบที่สามารถระบุถึงค่าโมดูลัสเริ่มต้นของดินตัวอย่าง จากการศึกษาทฤษฎีค่าโมดูลัสของยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนท์เหมาะสมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสเริ่มต้นของดินตัวอย่างทดสอบ จากนั้นเริ่มออกแบบเครื่องมือเพิ่มเติมจากการทดสอบแบบมาตรฐานเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำมากขึ้น และสามารถผลิตเองได้

### 3.2 ออกแบบเครื่องมือสำหรับการทดสอบ

ทางผู้วิจัยเลือกดัดแปลงอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการให้ได้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนในรูปแบบที่เสายู่ข้างในของกระบอทดสอบเพื่อให้ต่างต่อการเตรียมตัวอย่างและลดปัญหาการให้หน่วยแรงไม่ตรงตามแนวแกนของขึ้นดินทดสอบ



รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบเสายู่ข้างใน

ออกแบบ Bore Bearing ให้มีลูกปืนอยู่ภายในช่วยลดความฝืดที่เกิดขึ้นกับพิสตอน และประกบด้วยยางซึ่งช่วยในการป้องกันการรั่วของความดันและน้ำในขณะการทดสอบ



รูปที่ 3.2 Bore Bearing

ย้ายตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดตามทีออกแบบมาใหม่ โดย เครื่องมือตรวจวัดแรงกด ( Load cell) ย้ายเข้าไปอยู่ภายในกระบอกทดสอบเพื่อลดการสูญเสียความเค้นที่เกิดจากการเพิ่มความเค้นตั้งฉากกับตัวอย่างดินทดสอบ



ก

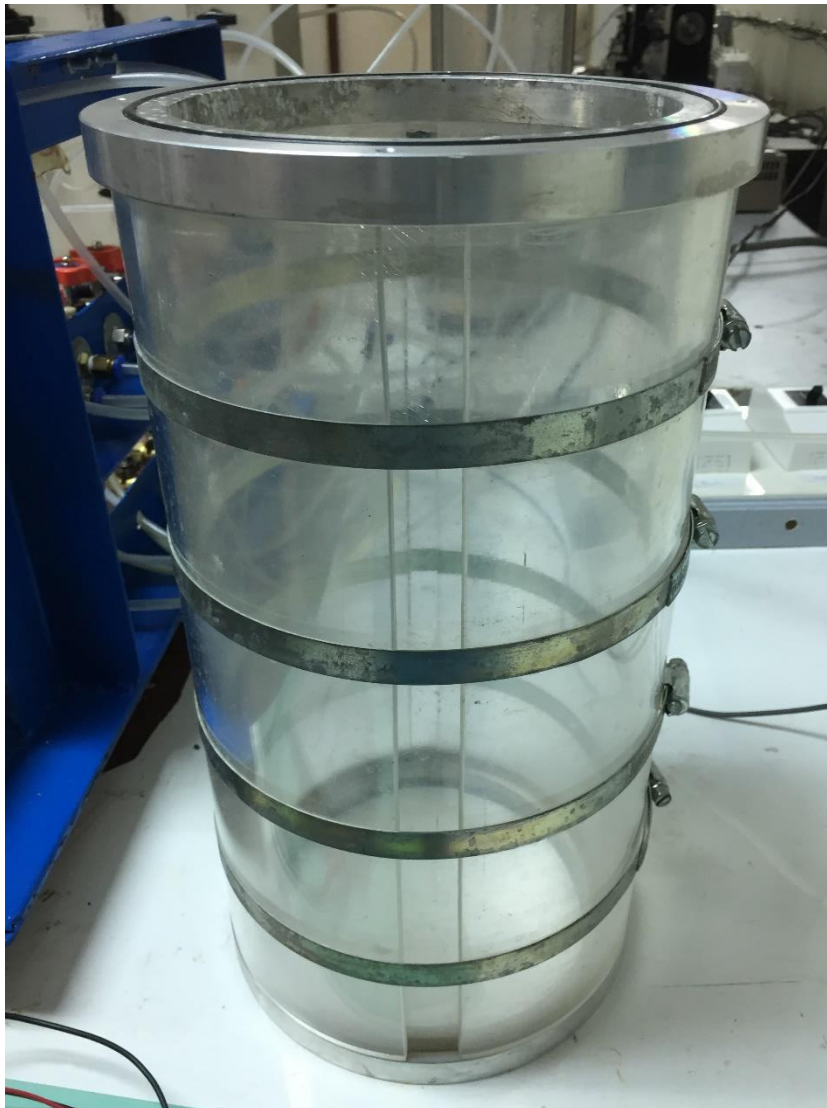


ข

รูปที่ 3.3 ก Load Cell ข Load Cell อยู่ภายในหลอดแก้วทดสอบ

เนื่องงานวิจัยนี้ใช้ดินตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร) ทำให้การหาวัสดุเพื่อมาใช้เป็นกระบอกทดสอบหาได้ค่อนข้างยาก จึงทดสอบใช้กระบอก

แก้วอะคริลิคประกบกัน 2 อันโดยกระบอกภายนอกจะผ่าออกเป็น 4 ชั้น และรัดด้วยวงแหวนเข้ากับ แก้วอะคริลิควงในเพื่อช่วยในการเสริมความแข็งแรงและถ่ายเทความดันที่เกิดขึ้นกับแก้วอะคริลิควงใน



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหลอดแก้วทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่

จากการทดลองใช้ในการทดสอบพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ หลอดแก้วทดสอบจะมีวงแหวน สแตนเลสที่มีโอริงประกบอยู่ช่วยในการป้องกันการสูญเสียความดันและน้ำในขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 3.5 วงแหวนสแตนเลสตีวง

ความดันภายในการทดสอบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแรงดัน(Air Regulator) ซึ่งควบคุมแยกกันระหว่างความดันดันกลับและความดันในกระบอกทดสอบ เนื่องจากมีการใช้วาล์วน้ำและอากาศจำนวนมาก จึงใช้แผงควบคุมเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการจดจำ



ก



ข

รูปที่ 3.6 ก แผงควบคุมแรงดันด้านหน้า ข แผงควบคุมแรงดันด้านหลัง

ใช้ Data logger ในการประมวลผลข้อมูลและเก็บข้อมูล โดย Data logger มีหน้าที่แปลงข้อมูล(analog) ที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดค่าทุกชนิดแล้วแปลงผลที่ได้ให้เป็นข้อมูล(Digital) หากเป็น



การทดสอบตามมาตรฐานตัวเครื่อง Data logger สามารถทำการทดลองและ สรุปผลการทดลองได้ทันที ด้วยโปรแกรม DS 7.2



รูปที่ 3.7 Data logger สำหรับเก็บข้อมูลและประมวลผล



รูปที่ 3.8 Pore pressure transducer ใช้ในการเก็บค่าความดันที่เกิดขึ้น

ตำแหน่งของ Pore pressure transducer ติดตั้งเพื่อเช็คแรงดันที่ตำแหน่ง ความดันกลับ (Back pressure) ที่ตำแหน่ง แผ่นรับแรงกดด้านบน (Top cap) แทนรองรับตัวอย่างดินในการทดสอบ (Bottom plat) และวัดแรงดันภายในกระบอกทดสอบ (Cell pressure)

มีช่องทางในการนำน้ำผ่านเข้าดินส่วนตัวอย่างเพื่อไล่ฟองอากาศและทำให้ดินตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำได้ง่ายขึ้น โดยจะปล่อยน้ำเข้าทางด้านล่างของแทนรองรับตัวอย่างดิน และปล่อยออกทางแผ่นรับแรงกดด้านบน การเสียนไหวของน้ำที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวนำฟองอากาศออกจากดินตัวอย่างทดสอบ

การทำการทดสอบต้องมั่นใจว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดมีความแม่นยำและเที่ยงตรงเพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือและไม่เสียเปล่า เป็นเหตุผลให้จำเป็นต้องมีการ Calibration เครื่องมือตรวจวัดทุกตัวโดยทำงานร่วมกับ Data logger เพื่ออ่านผลการแปลงค่าและแสดงค่าของ Data logger ทำโดยให้เครื่องมือตรวจวัดขนาดพารามิเตอร์ที่เราทราบค่าแน่นอนอยู่แล้ว แล้วประมวลผลผ่าน Data logger เพื่อให้ได้กราฟและสมการความชันที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทั่วไปแล้วกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรงแต่ความชันในแต่ละช่วงจะไม่สม่ำเสมอ เราจึงต้องแยกช่วงความชันออกเป็นช่วงๆเพื่อความแม่นยำในการประมวลผลของ Data logger



ก

ข

รูปที่ 3.9 ก แผ่นเหล็กที่ทราบน้ำหนัก ข แผ่นอะคริลิกที่ทราบความหนา

ในการ Calibrate อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่างๆเลือกใช้วัสดุและวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามพารามิเตอร์ที่เครื่องมือตรวจวัดชนิดนั้นๆสามารถวัดค่าได้ เครื่องมือตรวจวัดแรงอัดหรือขยาย (Load cell) เลือกใช้แผ่นเหล็กที่ทราบน้ำหนักในรูปที่ 3.9 ก เครื่องมือตรวจวัดระยะที่เปลี่ยนไปตามแนวแกน(LVDT) เลือกใช้แผ่นอะคริลิกที่ทราบความหนาในรูปที่3.9 ข เครื่องมือตรวจวัด และสำหรับเครื่องมือวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป(Pore pressure transducer) ใช้แผงควบคุมแรงดันในรูปที่ 3.6 ก และ 3.6 ข ในการ Calibrate ซึ่งตัวแผงควบคุมแรงดันประกอบไปด้วย Regulatorเพื่อควบคุมความดันให้ได้ค่าที่ต้องการและมีค่าสม่ำเสมอและหน้าปัดบอกความดัน การ Calibrate ควรทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อความมั่นใจว่าข้อมูลที่ได้ถูกต้องและแม่นยำ

### 3.3 การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)

หากแบ่งตามลักษณะการทำงานจะสามารถแบ่งเป็นช่วงๆได้ดังนี้



#### ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกน

ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการอัดตัวคายน้ำด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation) ตามมาตรฐานสามารถแบ่งเป็นสี่ขั้นตอนหลักๆ

##### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและติดตั้งเครื่องมือ

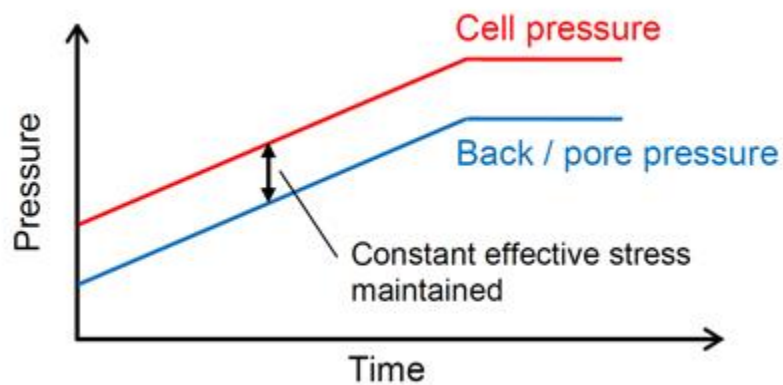
งานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ตัวอย่างที่จะนำมาทดลองเลือกใช้ขนาด 5.0 เซนติเมตร และสูง 10.0 เซนติเมตรตัวอย่างจะต้องถูกหุ้มด้วยปลอกยาง(Rubber membrane) เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงของน้ำระหว่างตัวอย่างกับน้ำภายในกระบอกทดลอง

การเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยการตัดแต่งดินตัวอย่างให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้และวัดขนาดจริงของดินตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์ข้อมูล ประกบหินพรุนและกระดาษกรองทั้งบนและล่างของตัวอย่าง ติดกระดาษกรองที่ด้านข้างของตัวอย่างให้ปลายของกระดาษกรองสัมผัสกับหินพรุนเล็กน้อยเพื่อช่วยให้น้ำสามารถระบายออกได้เร็วยิ่งขึ้น หลังจากนั้นติดตั้งแท่นรับน้ำหนัก(Top cap)ไว้ที่ส่วนบนของหินพรุนด้านบน แล้วจึงนำทั้งหมดไปติดตั้งบนแท่นรองรับดินตัวอย่าง(Bottom

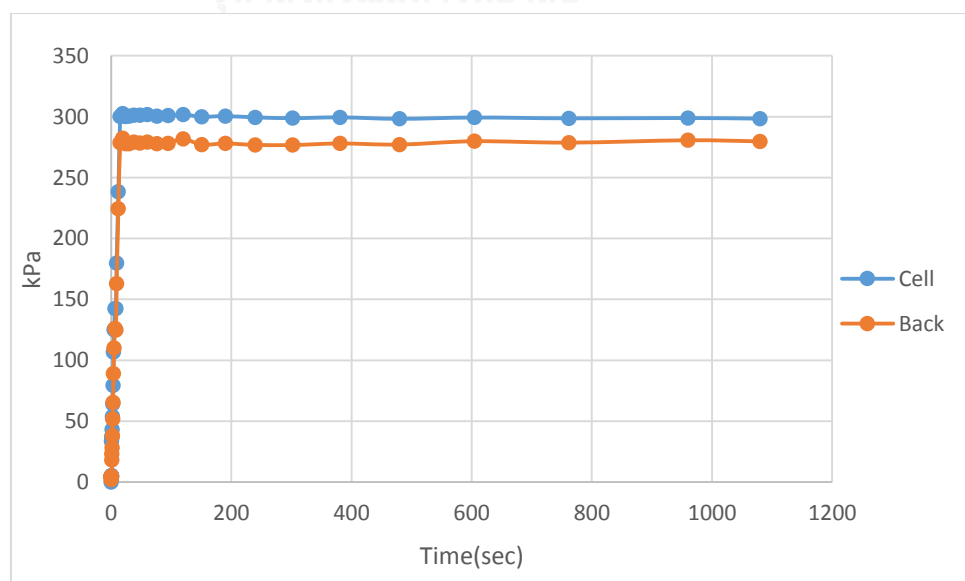
plate) ห่อหุ้มด้วยปลอกยาง รั้ววงแหวนที่แผ่นรับน้ำหนักส่วนบนและแผ่นรองรับดินตัวอย่างด้านล่าง ติดตั้งสายรับแรงดันกลับ(Back pressure)ที่แผ่นรับน้ำหนักด้านบน ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่างๆที่ได้เตรียมเอาไว้ ติดตั้งหลอดแก้วทดลอง เมื่อเตรียมเสร็จแล้วจึงเติมน้ำให้ท่วมดินตัวอย่าง

### 3.3.2 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation of Specimen)

เมื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบเสร็จ เริ่มการทดลองด้วยการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เริ่มจากการเปิดวาล์วระบายน้ำ แล้วจึงค่อยๆเพิ่มความดันกลับและความดันโอบรัดครั้งละ 25 กิโลปาสคาล โดยให้ความดันโอบรัดมีค่าสูงกว่าความดันกลับเสมอ ความต่างของโอบรัดกับค่าความดันกลับควรมีค่าประมาณ 10 – 20 กิโลปาสคาลเพื่อป้องกันการเกิดการวิบัติของดินตัวอย่าง



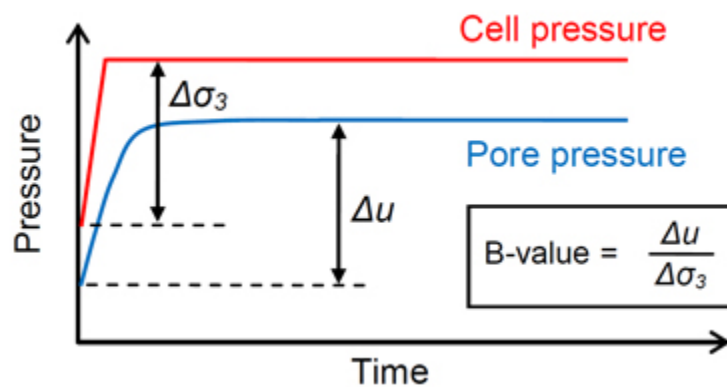
รูปที่ 3.10 แสดงแนวโน้มของการทดสอบแรงอัดสามแกนในช่วงทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ



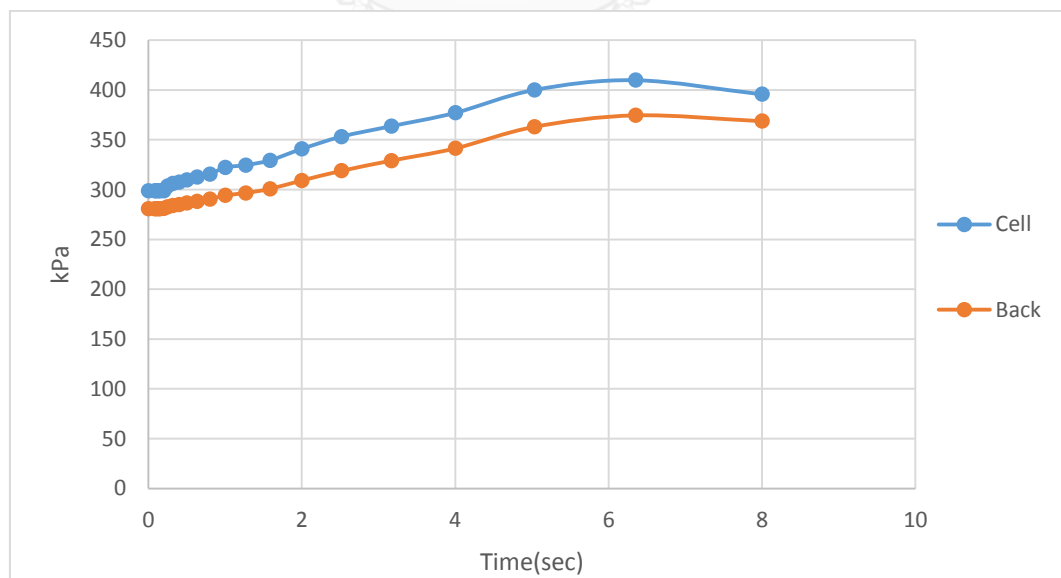
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการทดสอบช่วงการทำให้ดินตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ



เมื่อความดันกลับและความดันในกระบอกทดลองมีค่าประมาณ 280 และ 300 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ปล่อยดินตัวอย่างนี้ไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการสอบหาค่าระดับการอิ่มตัว ด้วยน้ำ (Degree of saturate, B-check) โดยปิดวาล์วระบายน้ำที่ไหลจากตัวอย่างดิน แล้วเพิ่มความดันภายในกระบอกทดลอง บันทึกค่าความดันน้ำส่วนเกิน( $\Delta u_c$ )ภายในระยะเวลา 1 นาที ค่าความดันน้ำส่วนเกินที่ได้ต้องใกล้เคียงกับค่าความดันภายในกระบอกทดลอง โดยเมื่อนำค่าความดันน้ำส่วนเกิน มาหารด้วยความดันภายในกระบอกทดลองที่ค่าได้ควรอยู่ในช่วง 0.95-1.00 เรียกค่านี้ว่า B (Skempton, 1954)



รูปที่ 3.12 แสดงแนวโน้มของการหาค่า B-value



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการทดสอบช่วงการเซ็ระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ

หากค่า B ที่ได้ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดให้ปล่อยตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ความดันกลับเดิมในระยะเวลาที่นานขึ้น หรือเพิ่มความดันกลับ แล้วใช้ค่า B อีกครั้งจนกระทั่งได้ค่า B 0.95-1.00 จึงจะถือว่าตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว

### 3.3.3 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation State)

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้มีภาระวิเคราะห์ทั้งในรูปแบบความเค้นประสิทธิผลแนวราบและแนวตั้งเท่ากัน (Isotopic) และในรูปแบบที่ความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งที่ไม่เท่ากัน (Anisotropic) จึงขออธิบายแยกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

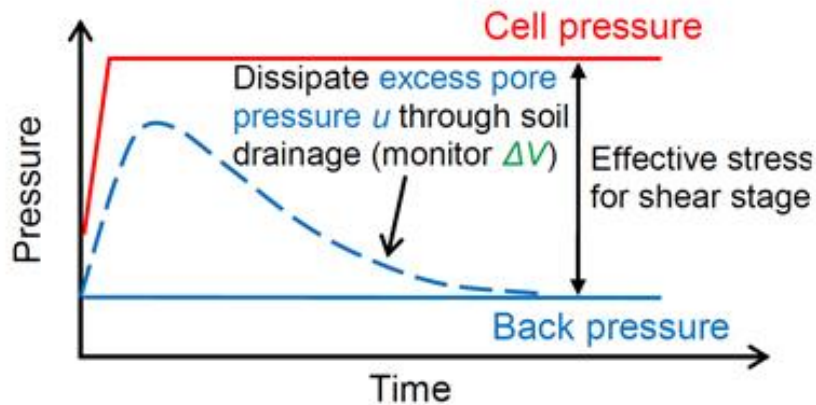
- ความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งเท่ากัน

เมื่อจบขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว บันทึกการเปลี่ยนแปลงของปริมาณในดินตัวอย่าง และการทรุดตัวในแนวตั้ง ทำการปิดวาล์วน้ำ แล้วจึงใส่พิสตัน (Piston) บนแทนรับน้ำหนัก

ทำการเพิ่มความดันโอบรัดจนได้ความเค้นประสิทธิผลที่ต้องการ ( ความเค้นประสิทธิผล = ความดันภายในกระบอกทดลอง- ความดันกลับ) แล้วจึงเปิดวาล์วน้ำ ทำการบันทึกค่าการทรุดตัวในแนวตั้งและปริมาตรของน้ำในดินตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปกับระยะเวลา ตรวจสอบการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดโดยการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปกับค่าล็อกกาลิทึมของเวลา

- ความเค้นประสิทธิผลแนวราบและแนวตั้งไม่เท่ากัน

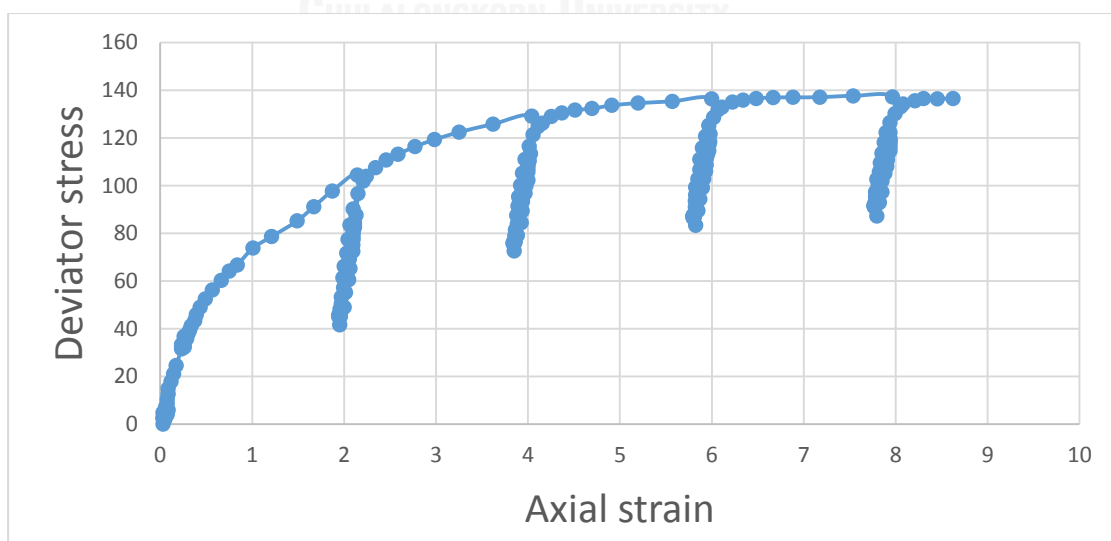
จะแตกต่างจากการทดสอบที่ความเค้นประสิทธิผลราบและแนวตั้งเท่ากัน โดยต้องให้น้ำหนักกดบนดินตัวอย่างทดสอบในแนวตั้งเพิ่ม ซึ่งได้เลือกการให้หน่วยน้ำหนักด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal) ซึ่งค่าน้ำหนักที่กระทำต่อดินตัวอย่างทดสอบจะสามารถอ่านค่าด้วยเครื่องมือตรวจวัดแรงกด (Load Cell) โดยในการให้หน่วยแรงนั้นต้องคำนวณหน่วยแรงที่ต้องให้แก่ดินตัวอย่างทดสอบก่อน โดยคำนึงถึงอัตราส่วนของความเค้นประสิทธิผลในแนวราบและแนวตั้ง และต้องไม่ลืมว่าความดันโอบรัดกระทำต่อดินตัวอย่างทดสอบในทุกทิศทางซึ่งเป็นความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งด้วย จึงต้องคำนวณความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นจากความดันโอบรัดก่อน แล้วหักจากหน่วยน้ำหนักที่เราต้องการจะเพิ่มเข้าไป



รูปที่ 3.14 แนวโน้มของการทดสอบแรงอัดสามแกนในช่วงการอัดตัวคายน้ำ

### 3.3.4 ขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง (Shearing State)

เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ ทำการเฉือนดินตัวอย่างโดยการกำหนดอัตราการเคลื่อนที่ต่อระยะเวลาด้วยเครื่องทดสอบสากล(Universal testing machine) ด้วยอัตราการอัดคงที่ มีการให้และถอนหน่วยแรงสลับกันโดยเริ่มจากให้หน่วยแรงติดต่อกันเป็นระยะเวลาครึ่งชั่วโมงแล้วจึงถอนหน่วยแรงติดต่อกันเป็นระยะเวลา 2 นาทีด้วยอัตราเร็วเช่นเดียวกันขณะการให้หน่วยแรง หลังจากนั้นทำการสลับการให้หน่วยแรงและถอนหน่วยแรงเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 นาที ตามลำดับ จนกระทั่งดินตัวอย่างเกิดการวิบัติ สังเกตได้จากค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือตรวจวัดแรงกด (Load cell) มีค่าลดลงติดต่อกันเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง บันทึกค่าความสูงของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ ค่าความเค้นแนวตั้ง ณ จุดการวิบัติ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอย่างดินทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างผลการทดสอบในช่วงการเฉือนตัวอย่างด้วยความเค้นประสิทธิผล 300 kPa

### 3.4 ขอบเขตตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ใช้ดินเหนียวกรุงเทพในบริเวณ แขวงฉิมพลี เขตตลิ่งชัน ความลึก 10 เมตร เป็นตัวแทน ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ จากการทดสอบหาค่าตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบของดินทดสอบได้ผล ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปพารามิเตอร์ของดินเหนียวกรุงเทพ

Soil Properties	Bangkok Clay
$\gamma_t$ , t/m <sup>3</sup>	1.55
LL, %	85
PL, %	29
$W_c$ , %	55-65

### 3.5 สมมุติฐานและการทดสอบ

#### 3.5.1 สมมุติฐาน

การกระทำของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงของดิน อาจทำให้กำลังรับแรงของดินมีค่าแตกต่างจากการได้รับหน่วยแรงอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดดินที่มีการถูกบีบอัดให้ชิดกันและการถอนหน่วยแรงทำให้เกิดการพองตัว

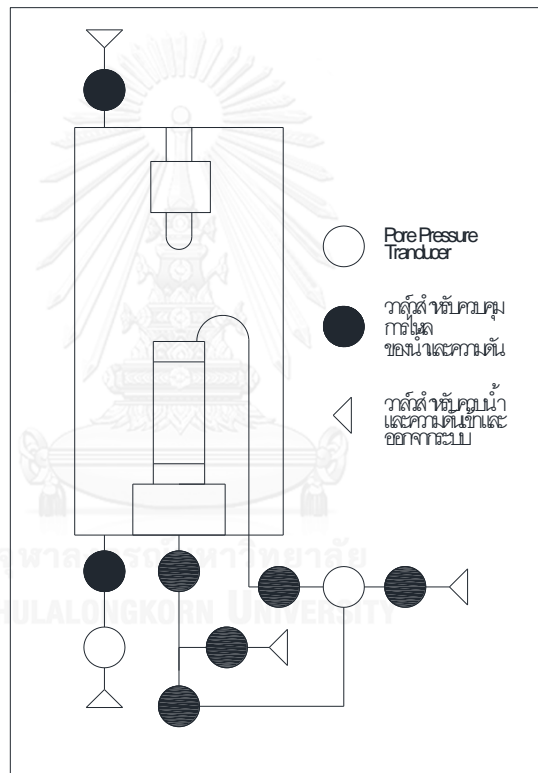
จากการศึกษาคาดว่าค่าโมดูลัสเริ่มต้นของดินในช่วงแรกมีแนวโน้มที่จะสูงที่สุดและลดลงเรื่อยๆตามระดับความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น และในช่วงเริ่มต้นของการให้และถอนหน่วยแรงใดๆจะเป็นช่วงที่ระดับโมดูลัสเริ่มต้นในขั้นต่อนั้นๆมีค่ามากที่สุด

จากการศึกษาพบว่าการตรวจวัดค่าโมดูลัสแรงเฉือนมักตรวจวัดด้วย Bender Element ซึ่งมีความละเอียดสูงกว่า ทางผู้วิจัยคาดหวังว่าการตรวจวัดด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนจะสามารถตรวจวัดโมดูลัสแรงเฉือนได้เช่นกัน

### 3.5.2 การทดสอบ

การออกแบบการทดสอบเพิ่มเติมจากการทดสอบแบบมาตรฐาน เช่น

- ออกแบบการควบคุมความดันและน้ำเข้า-ออกจากระบบ เนื่องจากการทดสอบแรงอัดสามแกนต้องมีการควบคุมและตรวจวัดความดันโอบรัดและความดันกลับอย่างแม่นยำและต่อเนื่อง เนื่องจากในแต่ละช่วงของการทดสอบจำเป็นต้องมีการบังคับทางเดินของน้ำและแรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละขั้นตอน การกำหนดจุดที่จะเป็นวาล์วเปิดปิด จุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน และจุดที่จะใช้ในการนำน้ำและความดันเข้า-ออกจากระบบจึงเป็นเรื่องที่ต้องถูกคำนึงถึง ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้ดังนี้



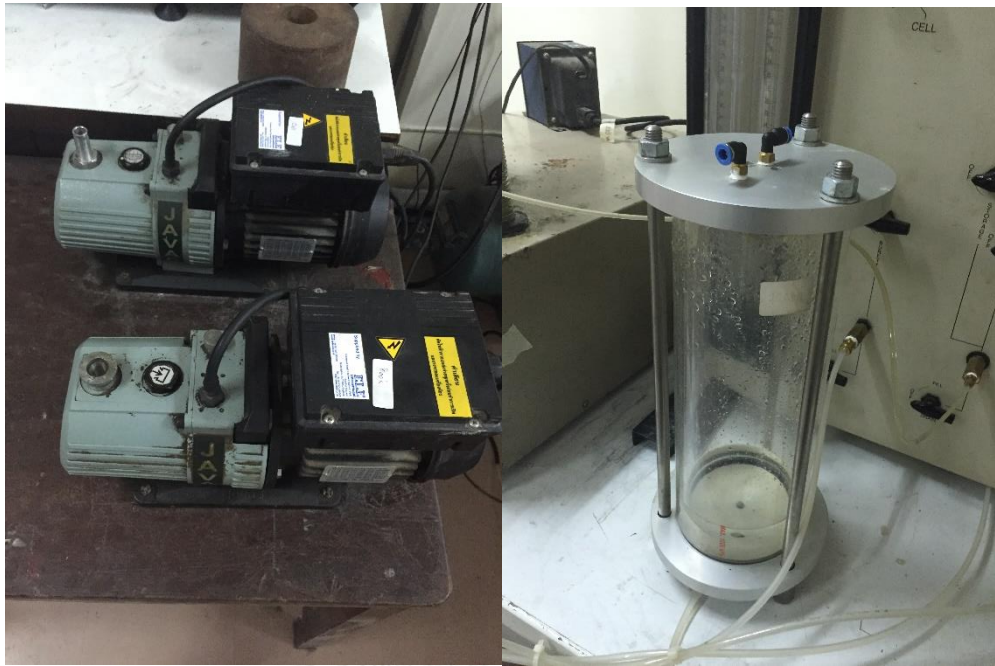
รูปที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความดันและวาล์วเปิด-ปิด



รูปที่ 3.17 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและวาล์วเปิด-ปิด

ก่อนจะเริ่มขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องปั๊มดูดลม (Suction Pump) เพื่อดูดอากาศภายในดินตัวอย่างทดสอบและแทนที่ด้วยน้ำก่อนที่จะทำการทดสอบเพื่อลดระยะเวลาในการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการต่อเครื่องปั๊มดูดลมเข้ากับตัวอ่านค่าความชื้นและวาล์วแบบหมุนเพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันที่ใช้ในการดูดดินตัวอย่างทดสอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น เนื่องจากปั๊มดูดลมไม่สามารถปรับอัตราการดูดได้ ต้องดูดลมที่ควบคุมความดันกลับผ่านหลอดแก้วกักเก็บน้ำ ซึ่งต่อสายเข้าด้านบนของหลอดแก้วทำให้เมื่อน้ำส่วนเกินจากดินตัวอย่างทดสอบถูกดูดออกมาจะอยู่ที่ก้นหลอดแก้วไม่ถูกดูดเข้าปั๊มดูดลมซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อปั๊มดูดลมได้ ส่วนปั๊มดูดลมที่ควบคุมความดันโอบอร์ดสามารถต่อด้านบนของหลอดแก้วทดสอบได้เลยเนื่องจากออกแบบให้เป็นการทดสอบสามแกนที่มีน้ำและอากาศอยู่ภายในหลอดแก้วทดสอบอยู่แล้วจึงไม่มีปัญหาเรื่องน้ำไหลเข้าปั๊มดูดลม





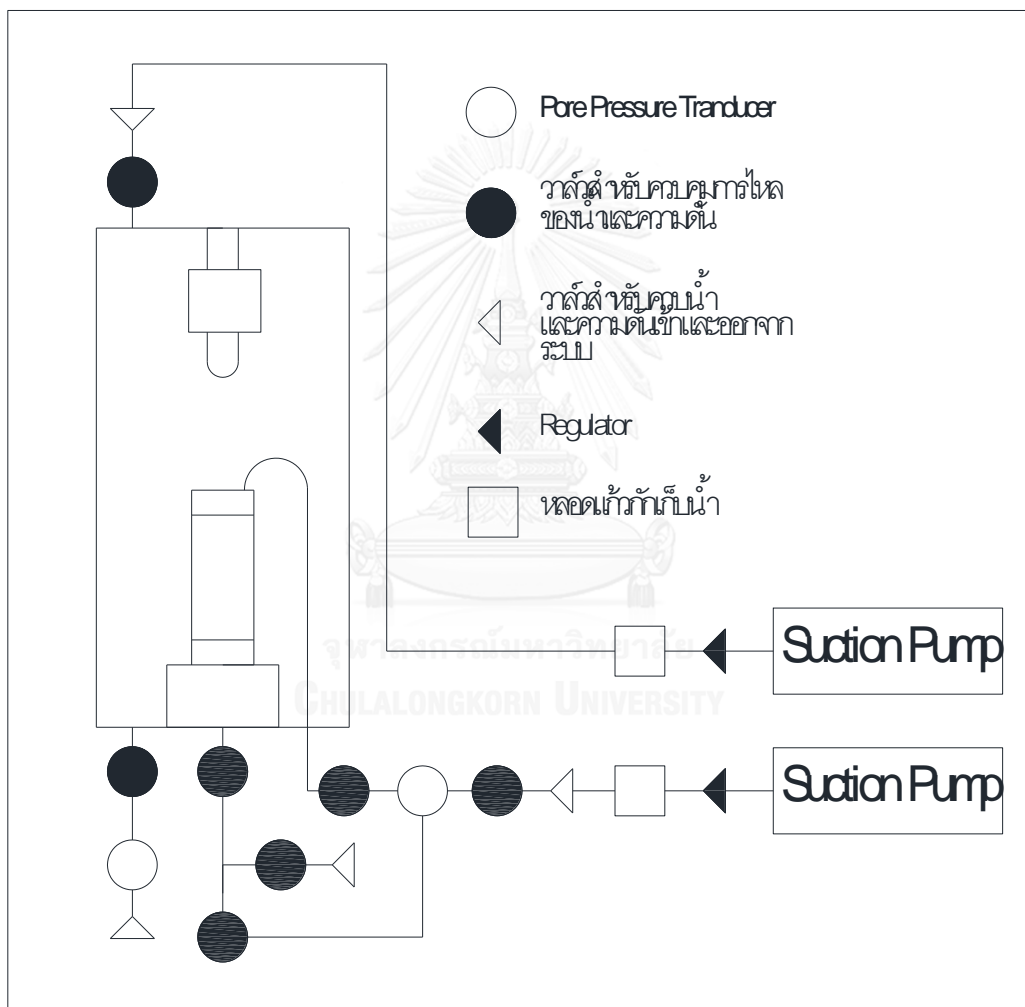
รูปที่ 3.18 ปั๊มดูดลมและหลอดแก้วกักเก็บน้ำ



รูปที่ 3.19 ตัวอ่านค่าความดันและวาล์วแบบหมุน

การดูดดินตัวอย่างทดสอบนั้นต้องดูตกระบอบทดสอบควบคู่ไปด้วยเพื่อควบคุมผลต่างของความดันไอบริดและความดันกลับไม่ให้ต่างกันมากเกินไป 25-30 กิโลปาสกาล ในช่วงการดูดอากาศและน้ำส่วนเกินนี้ใช้หลักการเดียวกับการเพิ่มปริมาณความดันในช่วงการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ คือ

ดูดความดันกลับก่อนเพื่อให้ความดันโอบอร์ดมีค่ามากกว่าแล้วจึงดูดความดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนสังเกตเห็นการไหลของน้ำส่วนเกินและฟองอากาศจึงค้างเครื่องดูดความดันไว้ทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมง เมื่อปริมาณอากาศที่ออกจากดินตัวอย่างทดสอบเริ่มลดน้อยลงหรือหมดไป จึงค่อยๆลดการดูดลง โดยยังคงให้ความดันโอบอร์ดมีค่ามากกว่าความดันกลับเสมอ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการดูดอากาศและน้ำส่วนเกินแล้วจะทำการนำน้ำผ่านดินตัวอย่างทดสอบโดยการผ่านเข้าทางด้านล่างของดินตัวอย่างทดสอบและออกทางด้านบนของดินตัวอย่างทดสอบเพื่อเป็นการไล่อากาศเพิ่มเติมอีกครั้ง การทำน้ำเข้าและปล่อยออกทำต่อเนื่องประมาณ 1 ชั่วโมง จึงเริ่มขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 3.20 แผนผังการขั้นตอนการ Suction State

- ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ ด้วยอัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งเท่ากัน และแบบไม่เท่ากัน โดยในรูปแบบความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งไม่เท่ากันทำการทดสอบที่อัตราส่วน 0.85 และ 0.77 เนื่องจากแผ่นรับแรงกดด้านบนไม่ถูกทำให้ติดกับพิสตอนจึงไม่มีความจำเป็นในการหักปริมาณหน่วยแรงที่หายไปจากหน้าตัดของพิสตอน



ขั้นตอนการอัดตัวคายนํ้าต้องคอยสังเกตให้ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดมีค่าใกล้เคียงกับในตารางตลอดกระบวนการ เนื่องจากดินตัวอย่างทดสอบมีการยุบตัวตลอดเวลาจากความเค้นที่เกิดขึ้นด้วยทำให้ต้องควบคุมอัตราการให้หน่วยแรงจากเครื่องทดสอบสากลตลอดขั้นตอนการทดสอบอัดตามคายนํ้า

- ทำการทดลองในช่วงขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง มีการให้และถอนหน่วยแรงสลับกันไปมาเป็นช่วงเวลาสั้นๆด้วยอัตราการให้และถอนหน่วยแรงจากเครื่องทดสอบสากลคงที่ โดยเริ่มจากการให้หน่วยแรง 20 นาที่ ถอนหน่วยแรง 2 นาที่ แล้วจึงให้หน่วยหน่วยแรง 1 ชั่วโมงสลับกับการถอนหน่วยแรง 2 นาที่ จนกระทั่งผ่านการวิบัติของดินส่วนทดสอบไปแล้วอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาว่าการให้และถอนหน่วยแรงสลับกันไปมาส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสของยัง กำลังรับแรงเฉือนและมีความสัมพันธ์ต่อพารามิเตอร์อื่นๆอย่างไรบ้าง



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ

### 3.6 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

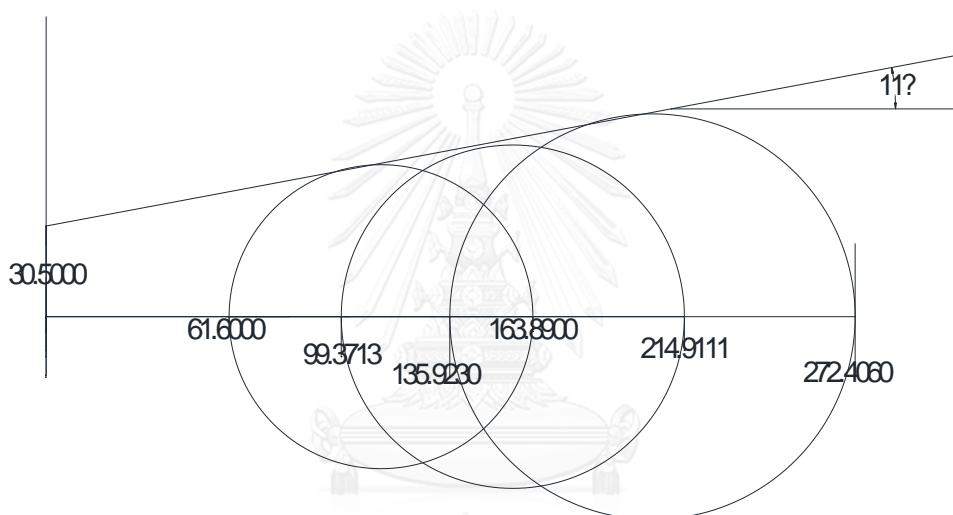
ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยการวาดวงกลมมอร์ ตามกฎของมอร์-คูลอมบ์ วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Mean Stress และ Effective Mean Stress เมื่อได้ผลทางทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้ว นำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนตามการทดสอบแบบมาตรฐาน จากนั้นทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในช่วงของการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งมีการให้และถอนหน่วยแรง ใช้ทฤษฎีของค่าโมดูลัสซีแคนท์ในการวิเคราะห์ แล้วจัดทำกราฟแสดง

ความสัมพันธ์เพื่อแสดงผลการทดลองที่เกิดขึ้น เช่น ผลกระทบต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์จากการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้น ผลกระทบต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์และความเป็นอิลาสติกของดินตัวอย่างทดสอบจากการให้และถอนหน่วยแรงในแต่ละรอบการทดสอบ ผลกระทบต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบต่อแนวตั้ง



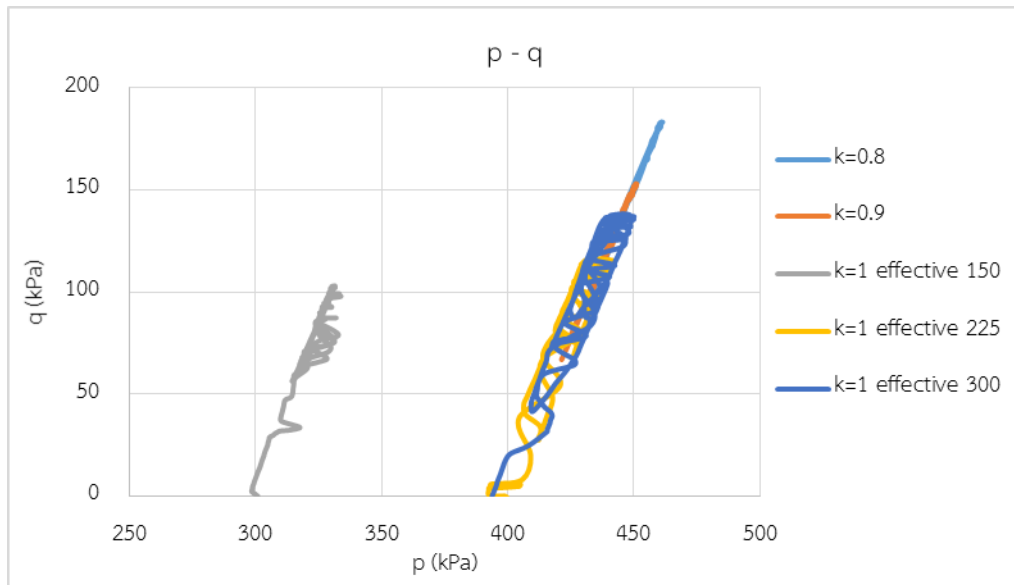
## บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากการทดลองและนำค่าที่ได้จาก Data logger มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดสอบแรงอัดสามแกนตามมาตรฐานร่วมกับการทดลองให้และลดหน่วยแรงสลับกันเป็นระยะเวลาสั้นๆในช่วงการเหน็ดตัวอย่างทดสอบ แล้วจึงตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยวงกลมของมอร์และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deviator Stress กับ Mean Stress เมื่อได้ผลเป็นที่น่าพอใจแล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain กับ Deviator stress กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลี้กกาลิทึมของความเครียดตามแนวแกนกับโมดูลัสซีแคนท์



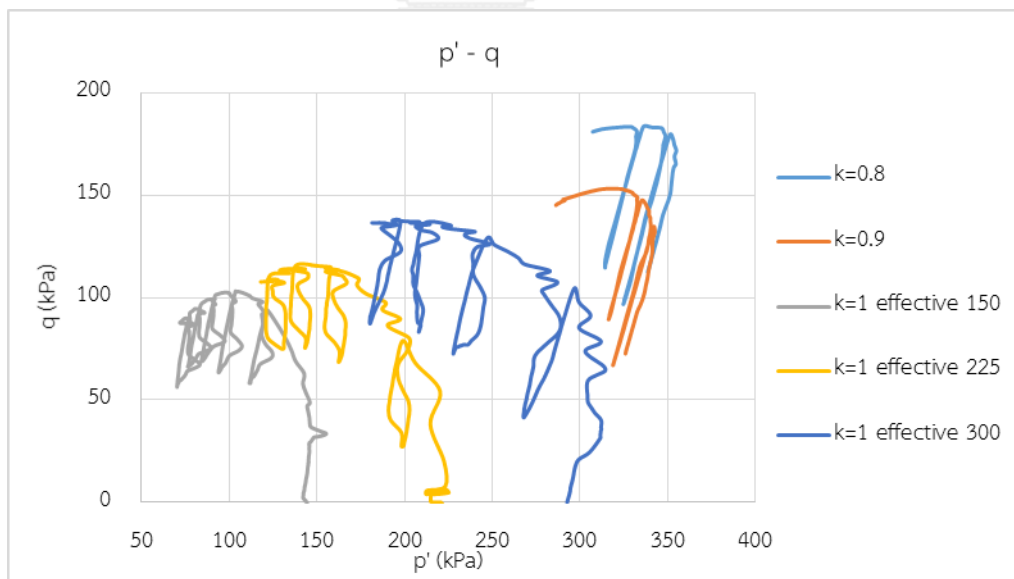
รูปที่ 4.1 วงกลมมอร์จากการทดสอบที่ความเค้นประสิทธิผล 150, 225 และ 300 กิโลปาสคาล

จากการทดสอบในรูปแบบของความเค้นแนวราบและแนวตั้งเท่ากันที่ค่าความเค้นประสิทธิผล 150, 225 และ 300 กิโลปาสคาล นำค่าความเค้นหลักประสิทธิผลและความเค้นรองประสิทธิผลของแต่ละการทดสอบในช่วงที่เกิดการพังของดินตัวอย่างทดสอบมาเขียนวงกลมมอร์ได้ดังรูป 4.1 ซึ่งได้ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าประมาณ 30.5 กิโลปาสคาล ดินตัวอย่างทดสอบมีมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 11 องศา



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ Deviator Stress กับ Mean Stress (ทุกการทดสอบ)

จากรูปสาเหตุที่ผลการทดสอบของตัวอย่างที่อัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 1 และมีค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 150 กิโลปาสคาล มีค่าเริ่มต้นที่ 300 กิโลปาสคาล เนื่องมาจากการทดสอบเดียวที่ใช้ความดันโอบรัด 300 กิโลปาสคาล ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบอื่นๆที่ทดสอบที่ความดันโอบรัด 400 กิโลปาสคาล



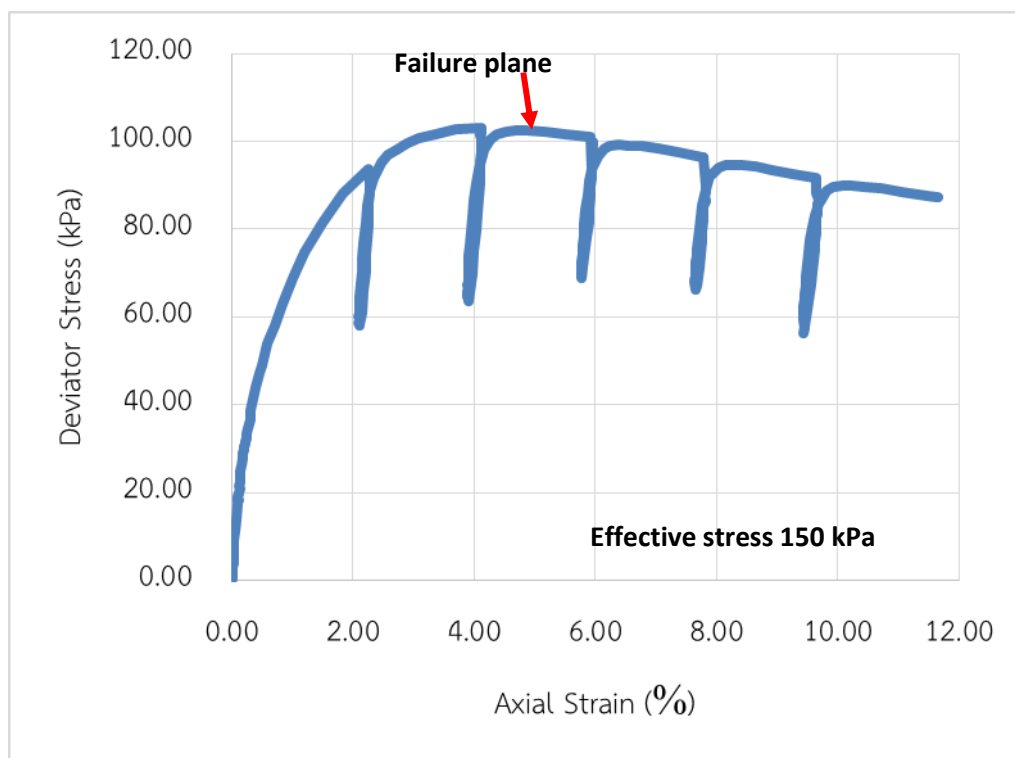
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ Deviator Stress กับ Effective Mean Stress (ทุกการทดสอบ)

จากการทดสอบผลที่ได้ในการทดสอบด้วยอัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 1 เส้นเส้นกราฟที่ได้มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลค่อนข้างสูง ทางผู้จัดทำจึงทำการเปลี่ยนตัว

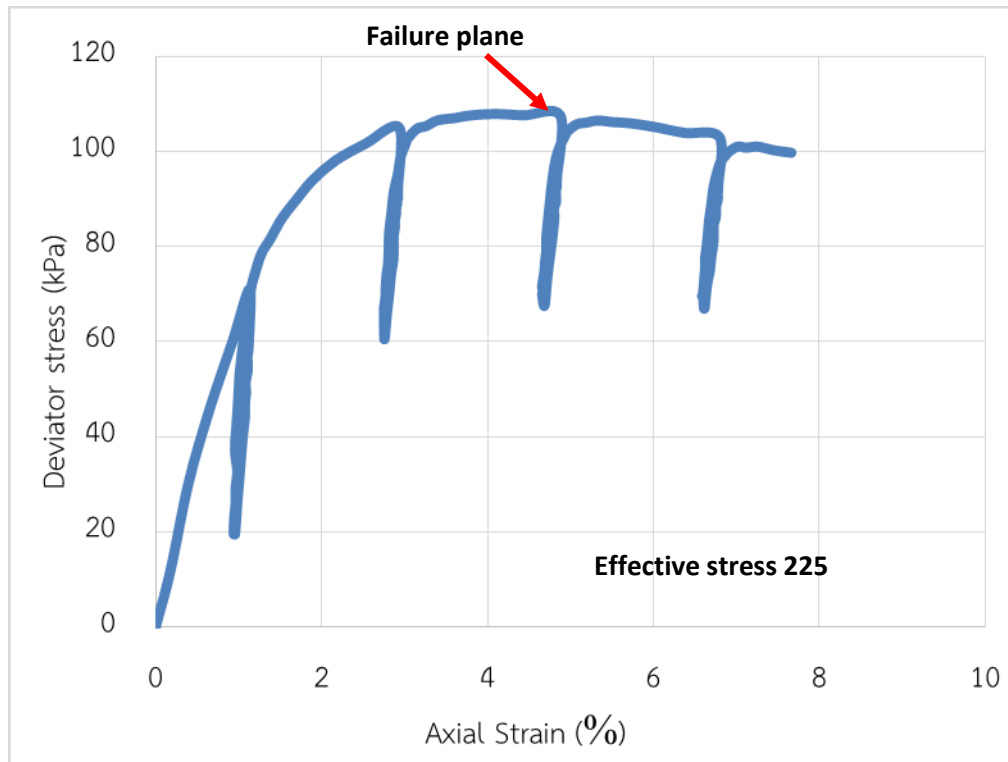
ควบคุมแรงดัน ผลที่ได้คือผลการทดสอบของการทดสอบด้วยอัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบกับแนวตั้งไม่เท่ากันได้เส้นที่เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น

#### 4.1 กราฟความสัมพันธ์ Axial Strain กับ Deviator Stress

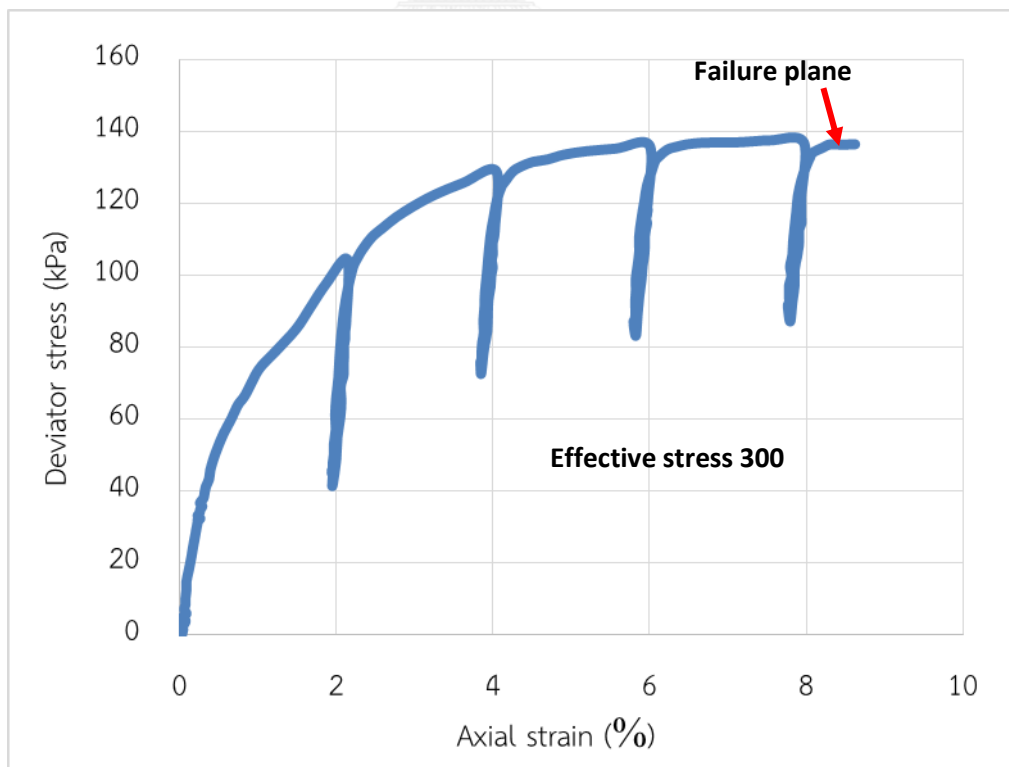
การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain กับ Deviator Stress เพื่อศึกษาผลกระทบจากการให้และลดหน่วยแรงกระทำต่อดินส่วนตัวอย่าง ปัจจัยที่สนใจได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งยืดหยุ่นภายหลังการเพิ่มและลดหน่วยแรงทั้งก่อนและหลังการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 150 kPa)



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 225 kPa)

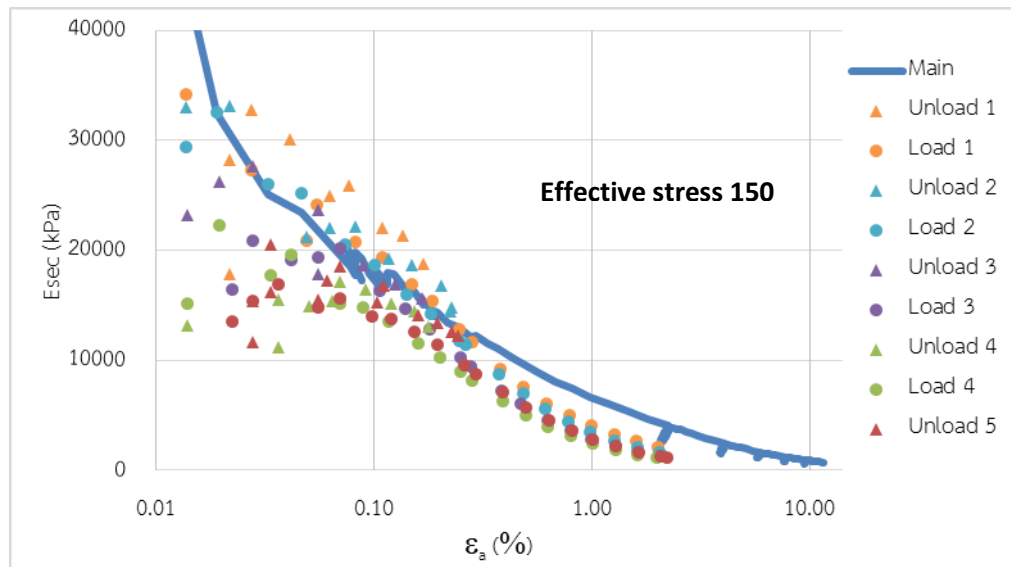


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain (effective 300 kPa)

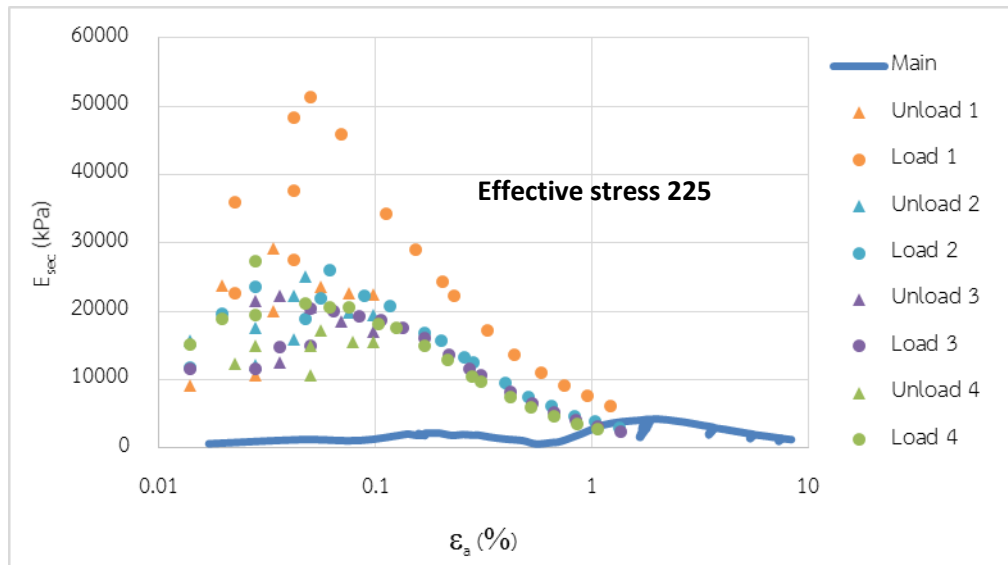
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain แสดงให้เห็นว่ากราฟ Elastic modulus มีการคืนค่ากลับไปอยู่บนเส้นโค้งเดิมทุกครั้งเมื่อมีการถอนหน่วยแรงแล้วกลับไปให้หน่วยแรงต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังช่วงการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ จึงสรุปได้ว่าดินตัวอย่างทดสอบยังคงคุณสมบัติพลาสติกแม้ผ่านการให้หน่วยแรงและถอนหน่วยแรงตลอดการทดสอบ

#### 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ของแต่ละการทดสอบ

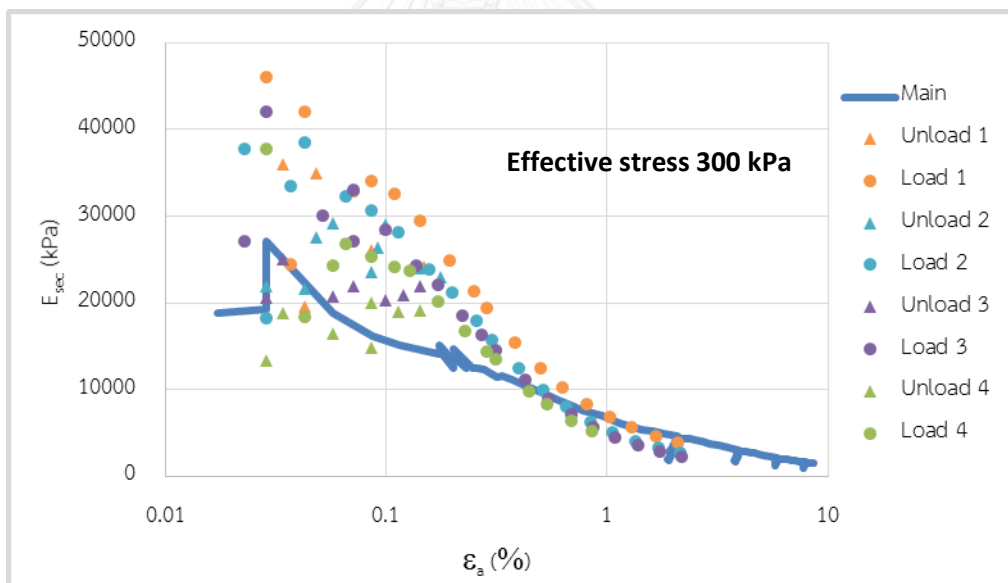
การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain เพื่อศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสซีแคนท์จากการให้หน่วยแรงและถอนหน่วยแรงในแต่ละการทดสอบ



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  (effective 150 kPa)



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  (effective 225 kPa)



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  (effective 300 kPa)

การทดสอบในรูปแบบอัตราส่วนความเค้นแนวราบแต่แนวตั้งเท่ากับ 1 โดยทำการทดสอบที่ค่าความเค้นประสิทธิผลที่ต่างกัน 3 ค่า โดยค่า Axial Strain วิเคราะห์จากแต่ละช่วงของการให้และถอนหน่วยแรง เมื่อพิจารณาในช่วงความเครียดตามแนวแกน(Axial strain)ที่ 0.01- 0.2 พบว่า

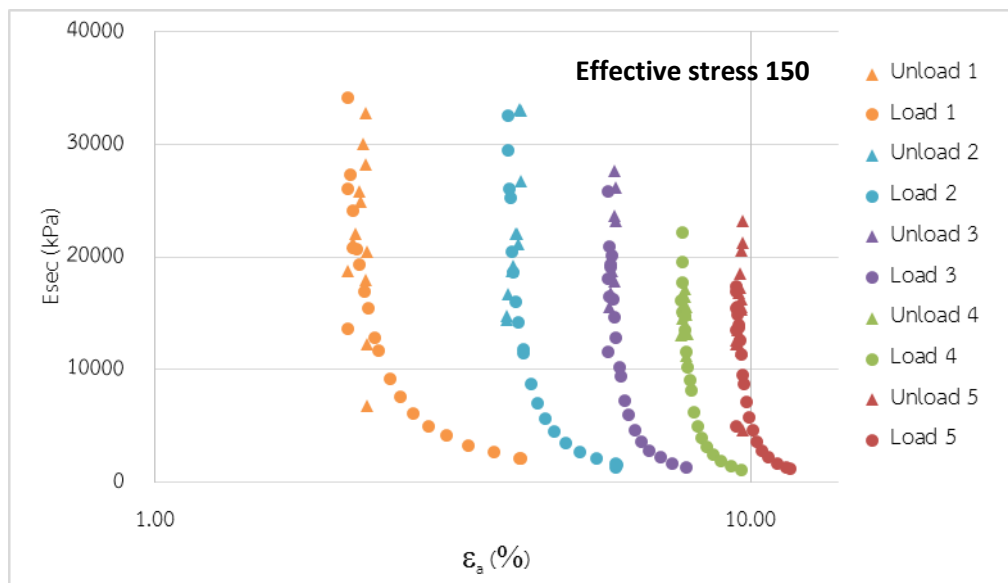


ความเค้นประสิทธิผล 150 กิโลปาสคาล มีค่าโมดูลัสซีแคนท์อยู่ที่ประมาณ 15000-30000 กิโลปาสคาล

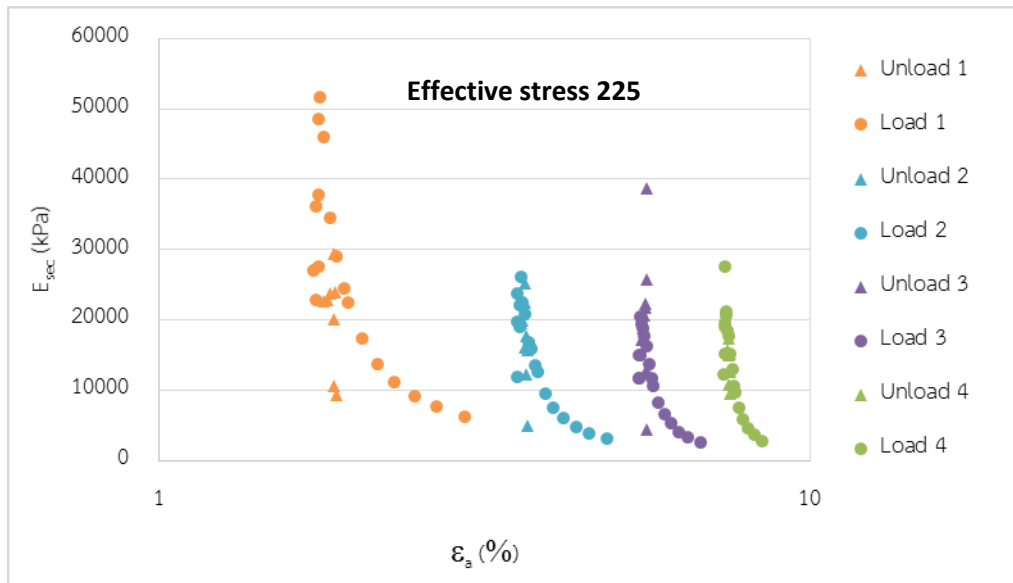
ความเค้นประสิทธิผล 225 กิโลปาสคาล มีค่าโมดูลัสซีแคนท์อยู่ที่ประมาณ 15000-30000 กิโลปาสคาล

ความเค้นประสิทธิผล 300 กิโลปาสคาล มีค่าโมดูลัสซีแคนท์อยู่ที่ประมาณ 20000-40000 กิโลปาสคาล

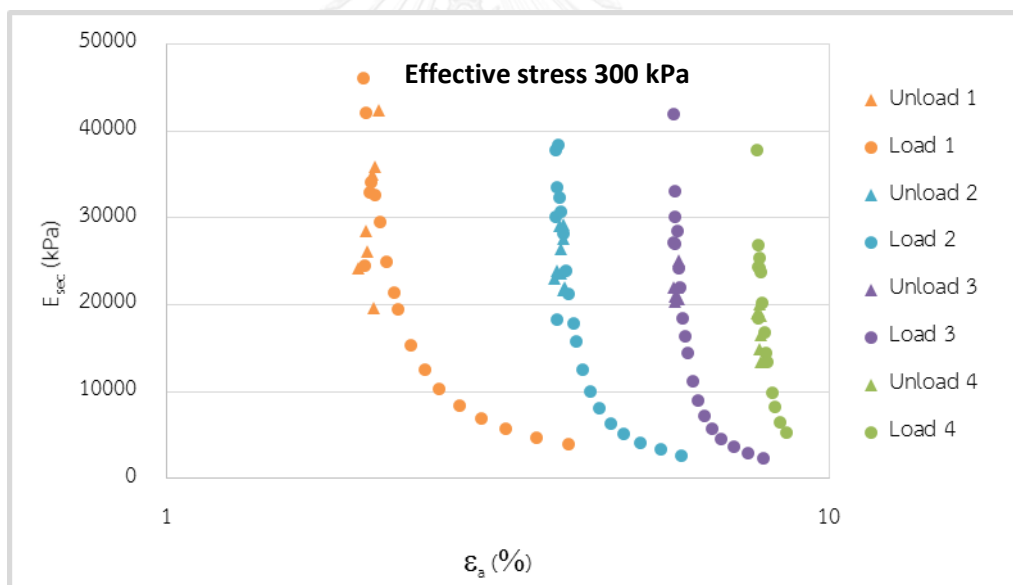
เมื่อทำการวิเคราะห์ในรูปแบบความเครียดสะสมได้ผลการทดสอบดังรูป 4.10-4.12



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ Cumulative  $\epsilon_A$  (effective 150 kPa)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ Cumulative  $\epsilon_A$  (effective 225 kPa)

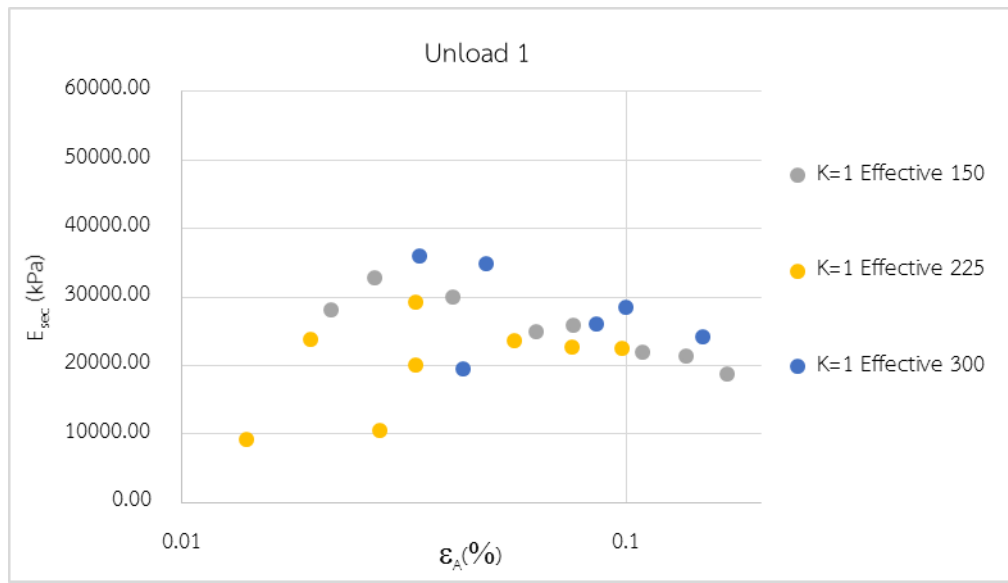


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ Cumulative  $\epsilon_A$  (effective 300 kPa)

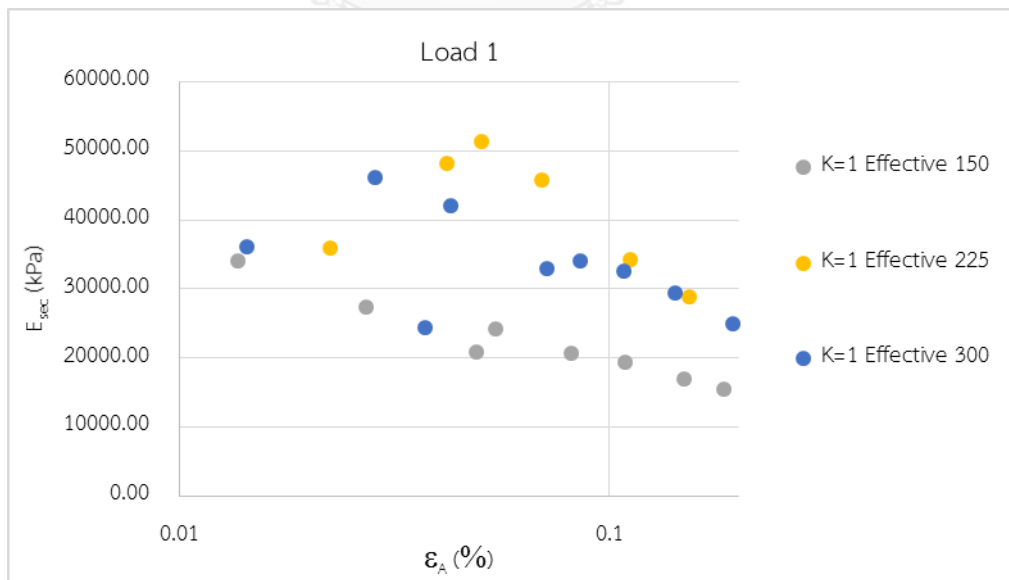
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสซีแคนท์กับค่าความเครียดตามแนวแกนแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่สูงที่สุดจะอยู่ในการให้และไม่ให้หน่วยแรงครั้งแรก และจะมีค่าลดลงในรอบการให้หน่วยแรงและไม่ให้หน่วยแรงในครั้งต่อมา

#### 4.3 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ในแต่ละช่วงการทดสอบ

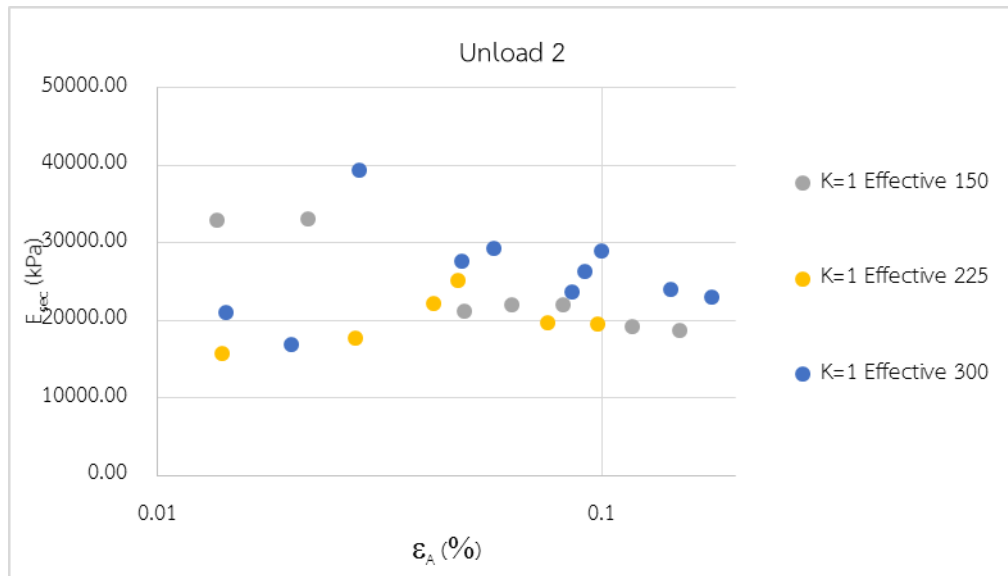
เมื่อนำผลการทดสอบในแต่ละช่วงมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงของการให้และถอนหน่วยแรงได้ผลดังรูป 4.13-4.20



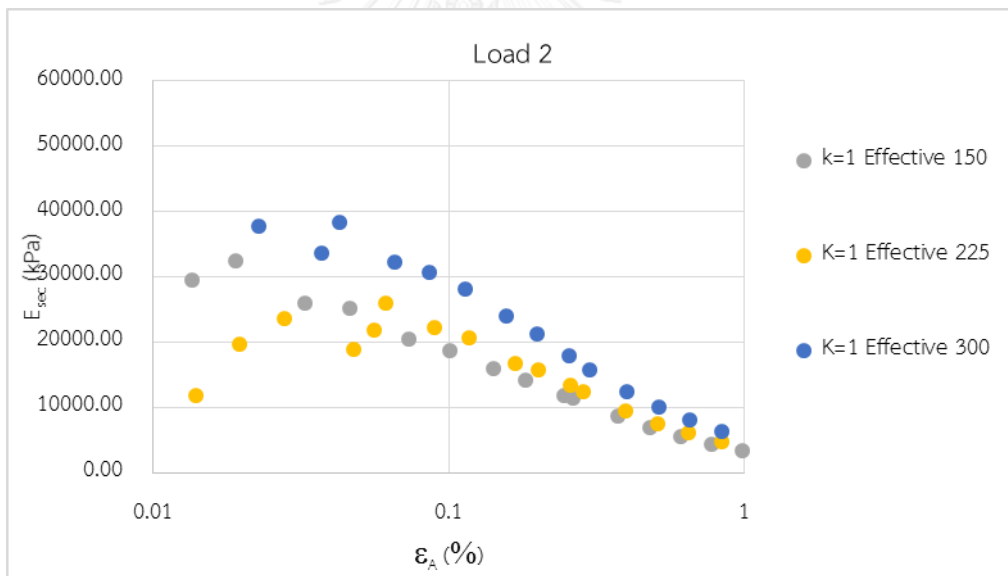
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1



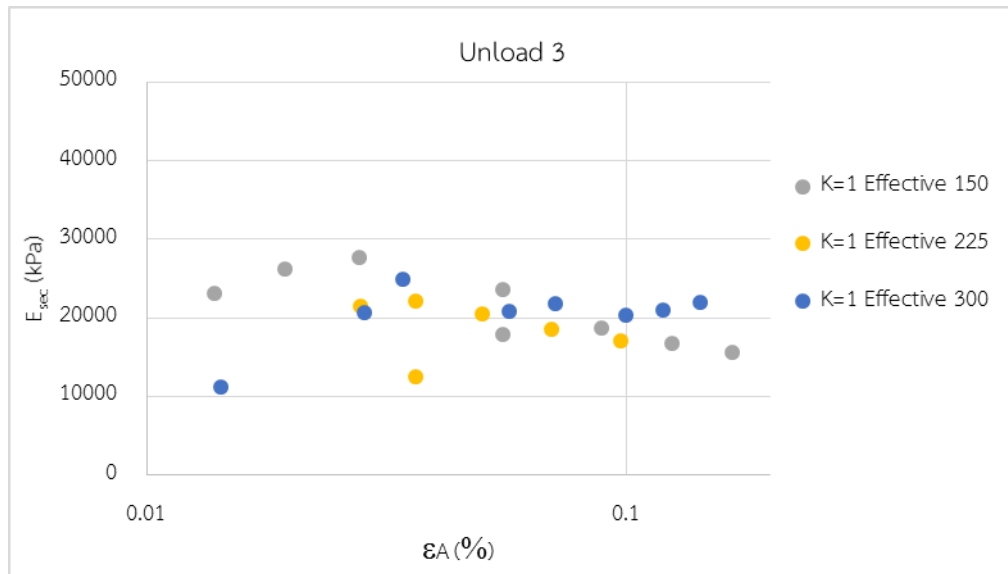
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 1



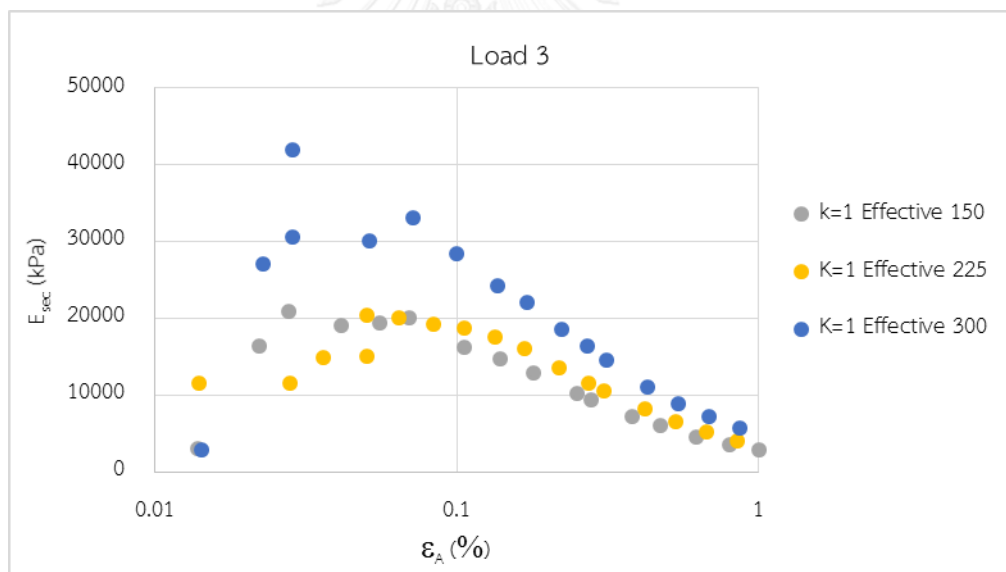
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 2



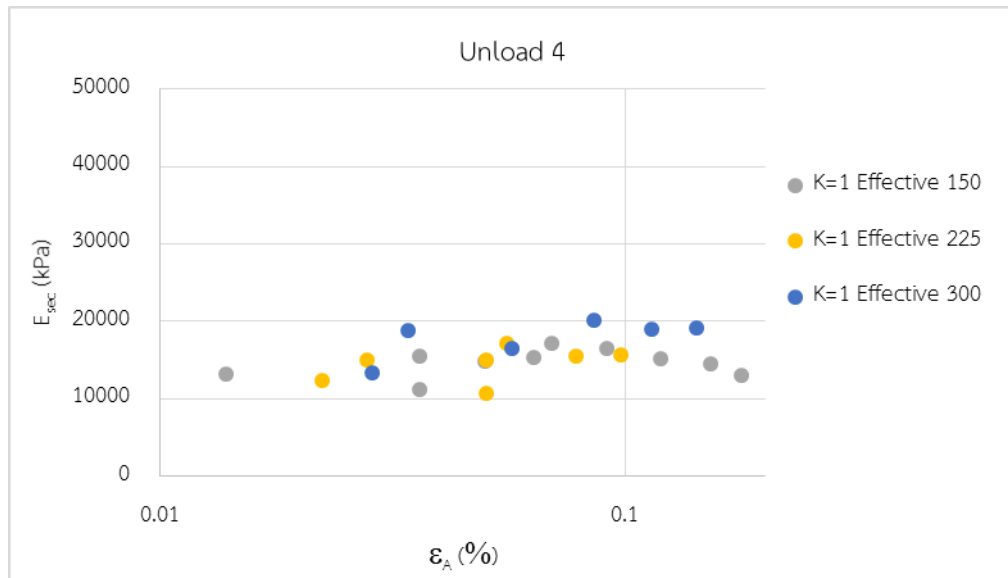
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 2



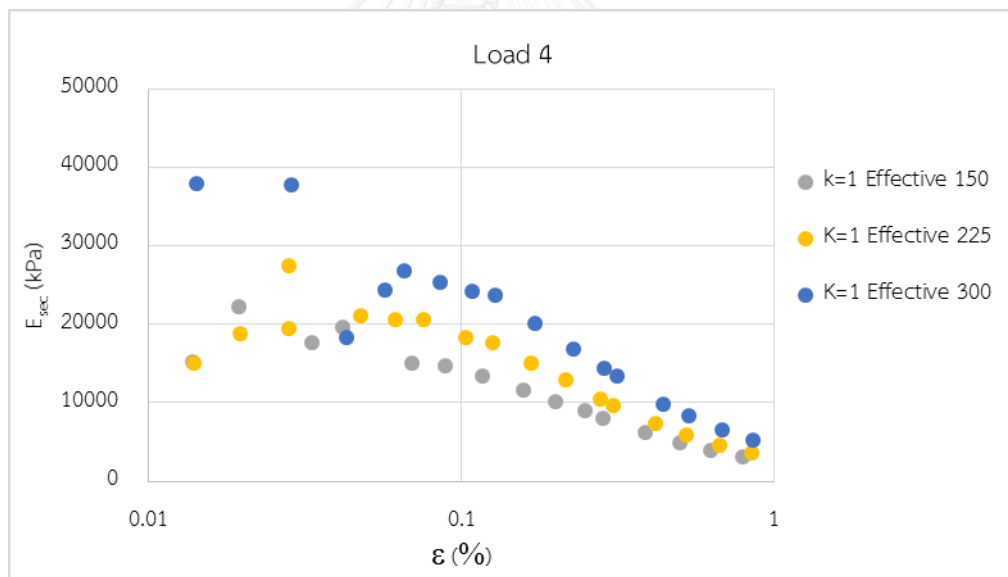
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 3



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 3

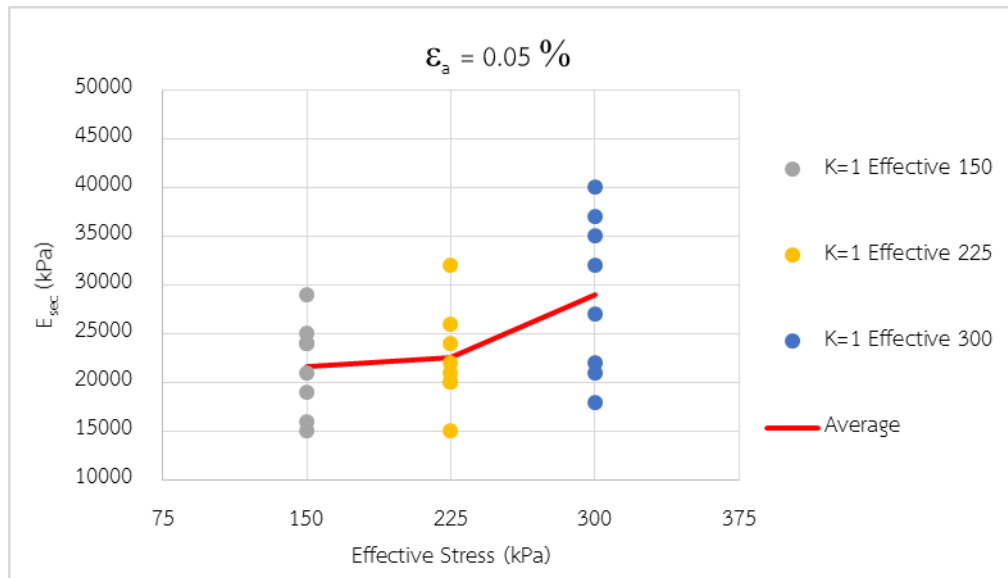


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 4

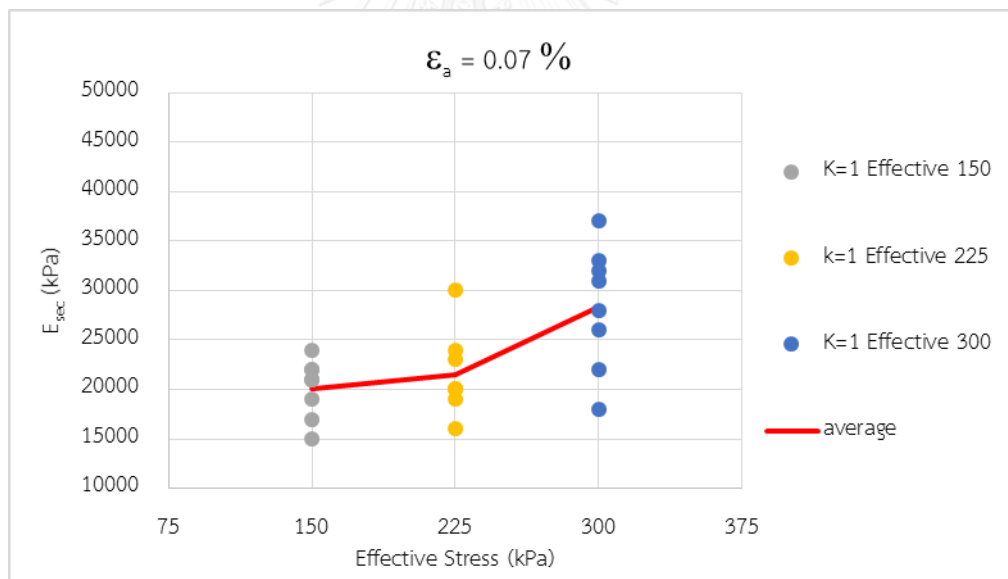


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 4

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสซีแคนท์กับค่าความเครียดตามแนวแกนแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่สูงที่สุดจะอยู่ในการให้และไม่ให้หน่วยแรงครั้งแรก และจะมีค่าลดลงในรอบการให้หน่วยแรงและไม่ให้หน่วยแรงในครั้งต่อมา ซึ่งหมายความว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆตามระดับความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความเค้นประสิทธิผลที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Initial Effective Stress ที่ Axial Strain = 0.05 %



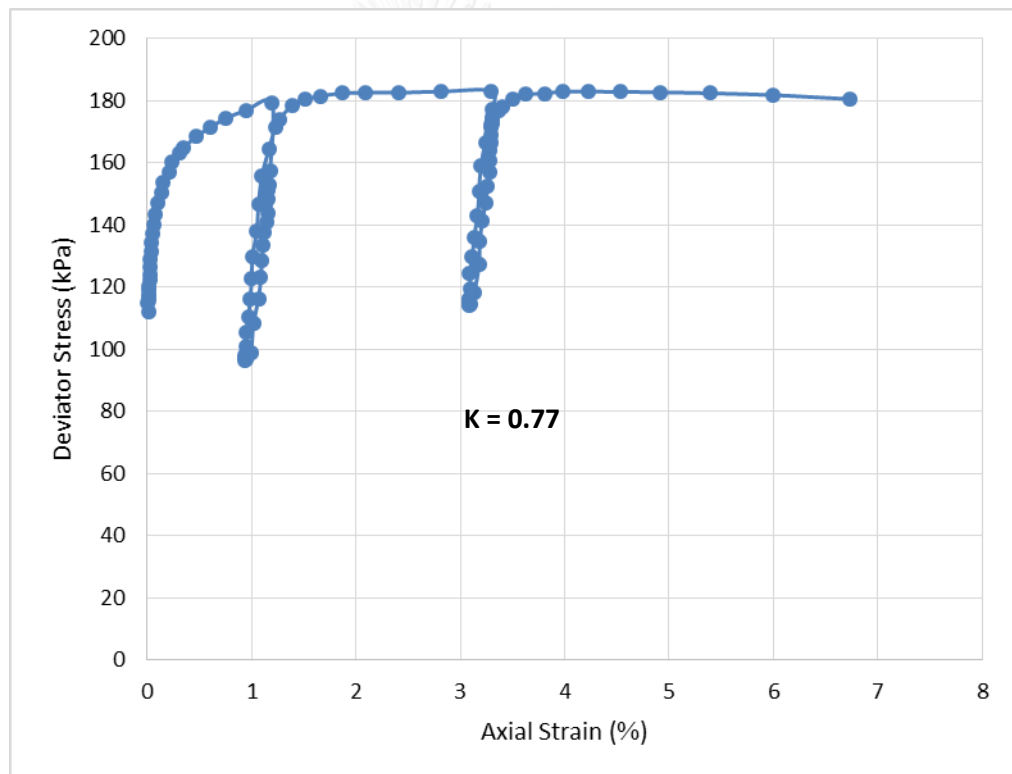
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Initial Effective Stress ที่ Axial Strain = 0.07 %

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นการวิเคราะห์ที่ในขอบเขตช่วง Axial Strain 0.05 และ 0.07 ตามลำดับ โดยการนำค่าโมดูลัสซีแคนท์ในช่วงนั้นมาเขียนกราฟแยกตามความเค้นประสิทธิผลแล้วจึงหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลการทดสอบในค่าความเค้นประสิทธิผลนั้นๆ กราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่า

ความเค้นประสิทธิผลมีผลต่อค่าโมดูลัสซีแคนท์เฉลี่ยโดยค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มมากขึ้น

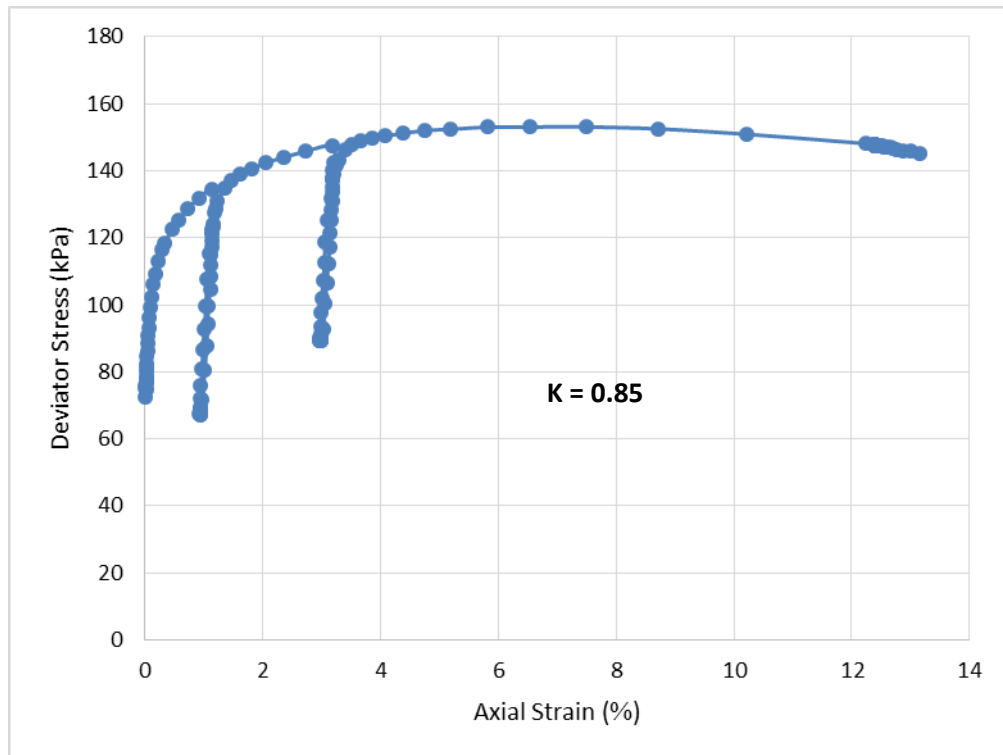
#### 4.4 กราฟความสัมพันธ์ Axial Strain กับ Deviator Stress ของการทดสอบรูปแบบ Anisotropic

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain กับ Deviator Stress ในช่วงการเฉือนดิน ตัวอย่างของการทดสอบรูปแบบ Anisotropic เพื่อศึกษาผลกระทบจากการให้และลดหน่วยแรงกระทำต่อดินส่วนตัวอย่างที่อัตราส่วนความเค้นประสิทธิผลแนวราบต่อแนวตั้งไม่เท่ากับ 1 ปัจจัยที่สนใจได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งยืดหยุ่นภายหลังการเพิ่มและลดหน่วยแรงทั้งก่อนและหลังการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ ปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้ง



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain ( $k=0.77$ )

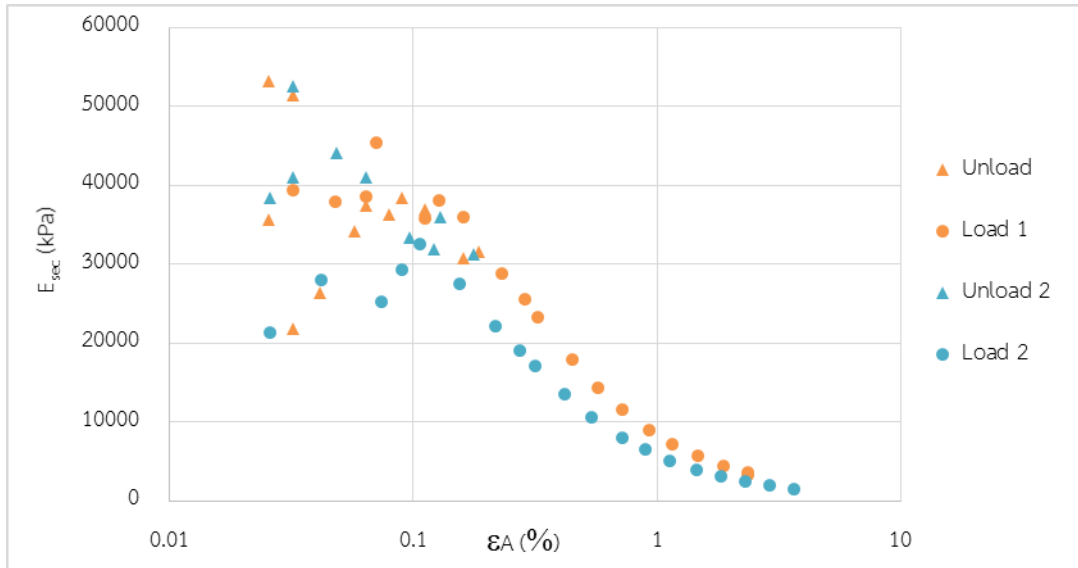




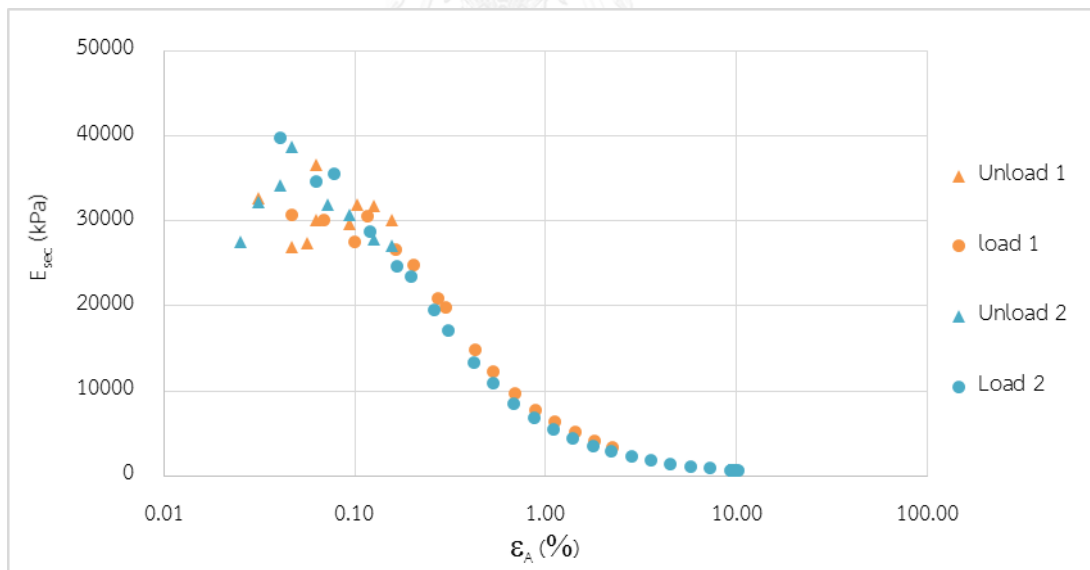
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain ( $k=0.85$ )

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain แสดงให้เห็นว่ากราฟ Elastic modulus มีการคืนค่ากลับไปอยู่บนเส้นโค้งเดิมทุกครั้งเมื่อมีการถอนหน่วยแรงแล้วกลับไปให้หน่วยแรงต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังช่วงการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ จึงสรุปได้ว่าระดับของความเครียดไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นอิลาสติกของดินตัวอย่างทดสอบ และอัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งที่ลดลงส่งผลกระทบต่อค่า Stress ที่ได้เพิ่มมากขึ้น

4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ของการทดสอบแบบ Anisotropic แต่ละการทดสอบ

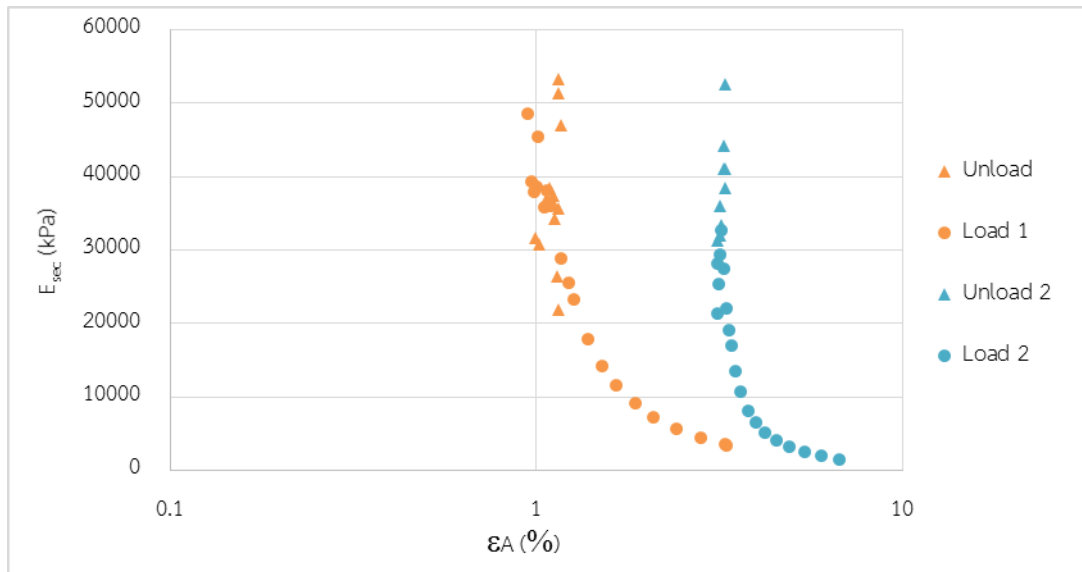


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  ( $K=0.77$ )

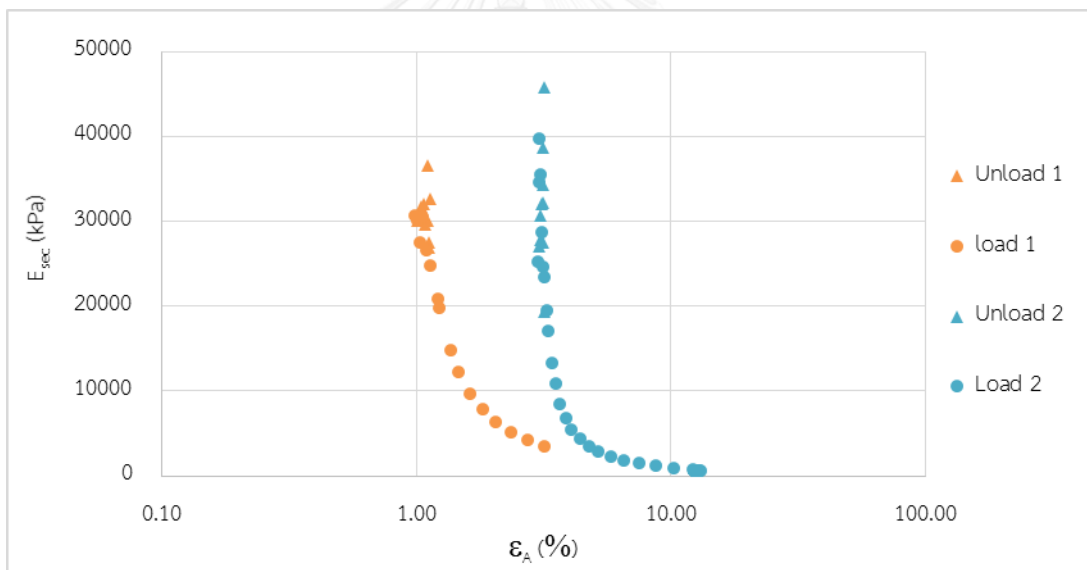


รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  ( $K=0.85$ )

การทดสอบในรูปแบบที่อัตราส่วนค้ำแนวราบต่อแนวตั้งที่ไม่เท่ากัน ที่อัตรา 0.77 และ 0.85 ที่ค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากันที่ 300 กิโลปาสคาล มีค่าโมดูลัสซีแคนท์อยู่ที่ประมาณ 30000-40000 และ 25000-35000 กิโลปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ Cumulative  $\epsilon_A$  ( $K=0.77$ )

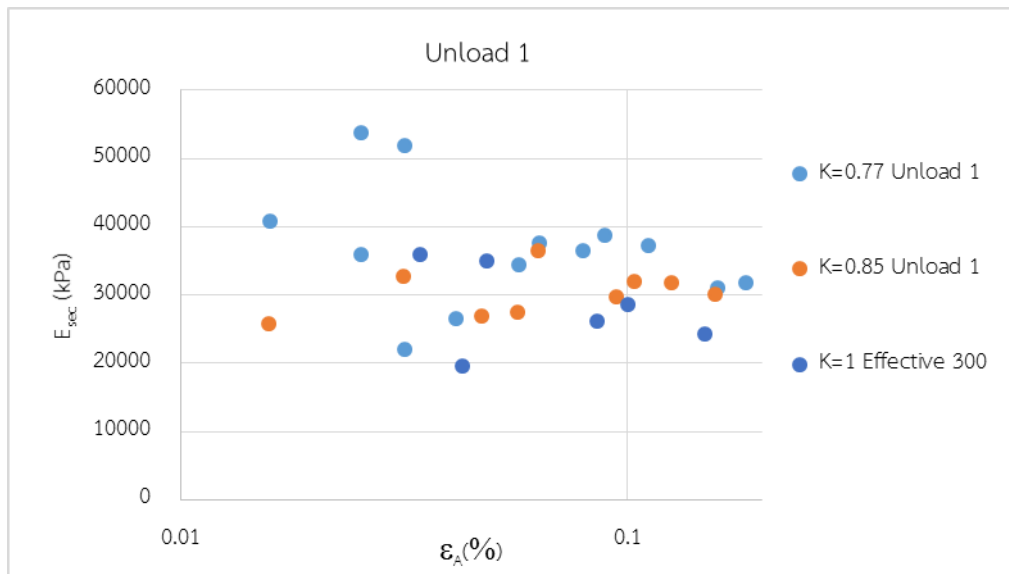


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ Cumulative  $\epsilon_A$  ( $K=0.85$ )

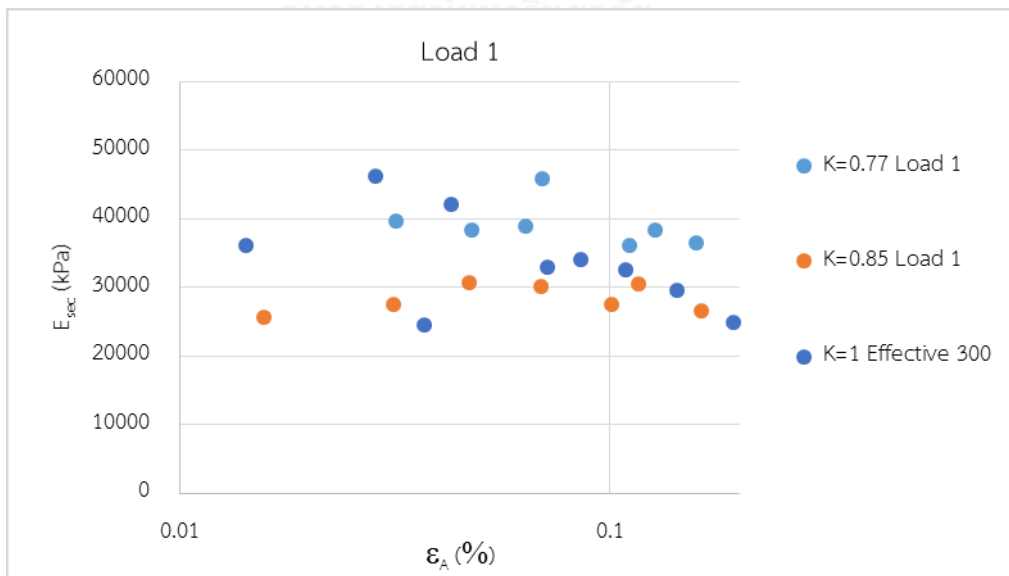
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสซีแคนท์กับค่าความเครียดตามแนวแกนแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่สูงที่สุดจะอยู่ในการให้และไม่ให้หน่วยแรงครั้งแรก และจะมีค่าลดลงในรอบการให้หน่วยแรงและไม่ให้หน่วยแรงในครั้งต่อมา แต่ช่วงของการถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงไม่สามารถสรุปข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบในกลุ่มนี้ได้

4.6 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Secant Modulus กับค่า Axial Strain ในแต่ละช่วง การทดสอบแบบ Anisotropic ทั้งหมด

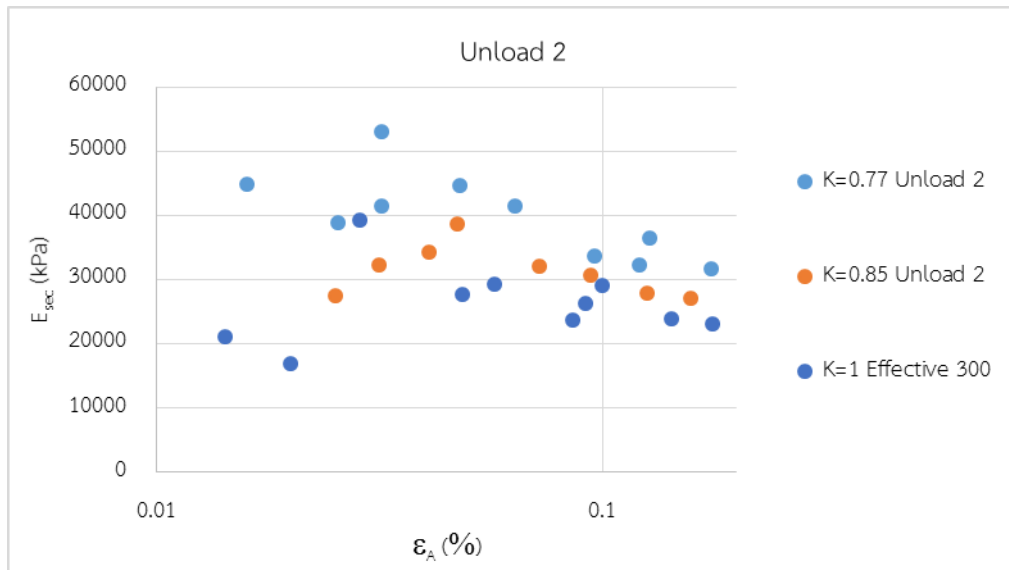
เมื่อนำผลการทดสอบแบบ Anisotropic มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงของการให้และ ถอนหน่วยแรงได้ผลดังรูป 4.29-4.32



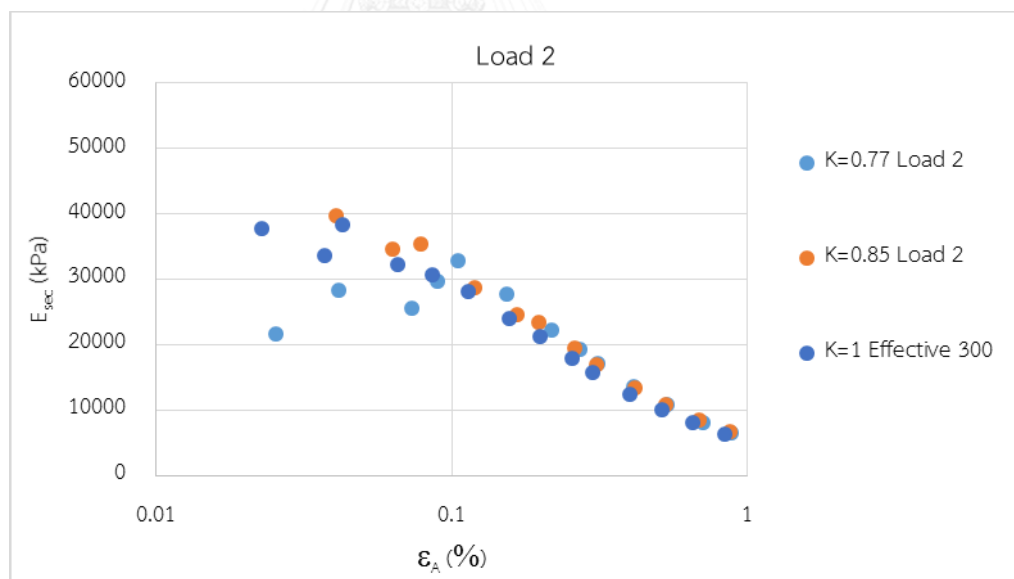
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 1



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงถอนหน่วยแรงครั้งที่ 2



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์  $E_{sec}$  กับ  $\epsilon_A$  เปรียบเทียบในทุกการทดสอบแบบ Anisotropic ช่วงให้หน่วยแรงครั้งที่ 2

จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ในรูปแบบของอัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งที่ไม่เท่ากันจะมีค่ามากกว่าในรูปแบบที่อัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งที่เท่ากัน ยิ่งอัตราส่วนที่น้อยลงหมายความว่าค่าความเค้นแนวตั้งจะเพิ่มมากขึ้น ค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่ได้ยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- ผลการทดสอบสามารถตรวจวัดค่าโมดูลัสแรงเฉือนได้ แต่ช่วงที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างน้อย 0.01-0.2 % ของความสูงของดินตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบสามารถนำมาวาดวงกลมมอร์รี่ได้ ทำให้ทราบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ 30.5 กิโลปาสคาล และค่ามุมเสียดทานภายใน 11 องศา

- กราฟ Elastic modulus มีการคืนค่ากลับไปอยู่บนเส้นโค้งเดิมทุกครั้งเมื่อมีการไม่ให้หน่วยแรงแล้วกลับไปให้หน่วยแรงต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังช่วงการวิบัติของดินตัวอย่างทดสอบ จึงสนับสนุนว่าระดับของความเครียดไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ Elastic Modulus ของดินตัวอย่างทดสอบ

- จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus กับ Axial Strain แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ในช่วงการถอนหน่วยแรงครั้งแรกและให้หน่วยแรงครั้งแรก เป็นค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่มากที่สุดของแต่ละการทดสอบ และมีค่าลดลงในรอบการให้หน่วยแรงและไม่ให้หน่วยแรงในครั้งต่อๆมา จึงสนับสนุนว่าค่าความเครียดที่มากขึ้นส่งผลให้ระดับโมดูลัสซีแคนท์ลดน้อยลง

- การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความเค้นประสิทธิผลแตกต่างกันพบว่าค่าความเค้นประสิทธิผลที่มากขึ้นทำให้ได้ค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่มากขึ้นตามไปด้วย

- จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus กับค่า Axial Strain ของการทดสอบรูปแบบอัตราส่วนความเค้นแนวราบกับแนวนอนที่ไม่เท่ากัน เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราส่วน 0.77 และ 0.85 ในช่วงการให้หน่วยแรงครั้งที่ 1 ยังคงมีค่าสูงที่สุดและลดลงในการให้แรงครั้งต่อๆมา แต่ในช่วงการถอนหน่วยแรงครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้ไม่สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงของระดับซีแคนท์โมดูลัสต่อระดับความเครียดที่เพิ่มขึ้นได้ แต่พอจะสรุปได้ว่าอัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวดิ่งที่ลดลงจะทำให้ค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- การไล่ฟองอากาศออกจากดินตัวอย่างทดสอบก่อนทำการทดสอบส่งผลอย่างมากต่อค่าเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยจะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในช่วงการทำให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำลดน้อยลง

- ในการทดสอบที่อัตราส่วนความเค้นแนวราบต่อแนวตั้งไม่เท่ากันในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำต้องให้ความสำคัญกับหน่วยแรงที่ให้ในแนวตั้งต้องไม่สูงหรือเร็วจนเกินไป เพื่อคินตัวอย่างทดสอบจะวิบัติเนื่องจากความเค้นในแนวตั้งที่มากเกินไปซึ่งเป็นไปตามกฎของมอส์-คูลอมบ์
- หากต้องการให้เห็นผลชัดเจนควรทำการทดลองด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลที่ต่างกันมากขึ้น จะทำให้ได้ค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่แตกต่างกันมากขึ้น
- การทำงานของปัมลมและควบคุมลม(regulator)เป็นปัจจัยหนึ่งของความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบ หากมีการเพิ่มตัวควบคุมลมจะทำให้ค่าความดันในการทดสอบนิ่งมากขึ้น
- ในการทดสอบที่ต้องการวัดความเร็วคลื่นการทดสอบด้วยเบนเดอร์อีลีเมนต์จะให้ผลที่ละเอียดมากกว่าและถูกต้องมากกว่า







## รายการอ้างอิง

B.M. Das and K.Sobhan Principles of Geotechnical Engineering.

Hardin, B. and F. Richart Jr (1963). "Elastic wave velocities in granular soils." Journal of Soil Mechanics & Foundations Div **89**(Proc. Paper 3407).

Hardin, B. O. and W. L. Black (1969). "Closure on vibration modulus of normally consolidated clay." Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.

Humphries, W. K. and H. Wahls (1968). "Stress history effects on dynamic modulus of clay." Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.

Stróżyk, J. and M. Tankiewicz (2016). "The elastic undrained modulus  $E_{u50}$  for stiff consolidated clays related to the concept of stress history and normalized soil properties." Studia Geotechnica et Mechanica **38**(3): 67-72.

Takeji Kokusho (1980). "Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range." Soil and Foundations **20**(2).

Yong, R. N., et al. (1981). Laboratory shear strength of soil : a symposium.

Philadelphia, Pa. (1916 Race St., Philadelphia 19103), American Society for Testing and Materials.

คงจีบ, ฉ. (2554). พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับการประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมแผ่นดินไหว. วิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. มหาบัณฑิต.

ธีรินทร์ อมรวิทย์อารักษ์ (2544). ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนโตนเบนเดอร์อัสิเมนตร์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน.

สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ "การทดสอบ Triaxial ในดินเหนียว."

อลิทคิง อนงค์พุก (2549). ผลกระทบของหน่วยแรงแบบแอนไอโซโทรปิกต่อค่าโมดูลัสเฉือนที่ความเครียดระดับต่ำ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศรัณ สุรินทร์นทร์ เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมปลายตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2557

