

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

คุณสมบัติของดินทางด้านกำลังรับน้ำหนักแบบเฉือนมีสภาวะภายใต้การรับน้ำหนักสองแบบคือแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์ ซึ่งมีพฤติกรรมในการรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน เนื่องจากการรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์จะมีน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่น น้ำหนักของอาคารที่ลงสู่ฐานรากแล้วถ่ายน้ำหนักให้กับดินได้ฐานรากแต่การรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์น้ำหนักบรรทุกจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอาทิเช่น ดินได้ฐานรากที่รองรับเครื่องจักรที่มีการสั่นสะเทือนซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นมักอยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์ ในประเทศไทยส่วนใหญ่ทำการศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบสถิตยศาสตร์ ส่วนการศึกษาแบบพลศาสตร์ดินมีค่อนข้างน้อยซึ่งในความเป็นจริงแล้วในงานวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมฐาน-รากมีน้ำหนักบรรทุกอยู่ในรูปพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ด้วยเช่น น้ำหนักจรบนโครงสร้างแต่ เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมด้านพลศาสตร์ต้องใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบที่ซับซ้อนทำให้มีการศึกษาข้อมูลคุณสมบัติกำลังรับน้ำหนักแบบเฉือนของดินแบบพลศาสตร์ค่อนข้างน้อยจนบางครั้งการนำค่าคุณสมบัติกำลังรับน้ำหนักแบบเฉือนของดินแบบพลศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีเช่น งานวิศวกรรมการทาง งานวิศวกรรมฐานรากของเครื่องจักร สะพาน งานวิศวกรรมฐานรากสำหรับการออกแบบเพื่อรองรับแผ่นดินไหว มักใช้ค่าคุณสมบัติกำลังรับน้ำหนักแบบเฉือนของดินแบบสถิตยศาสตร์แทนซึ่งไม่ถูกต้องในพฤติกรรมของการรับน้ำหนักตามความเป็นจริงเนื่องจากดินในสภาวะความเป็นจริงอยู่ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์โดยเฉพาะในประเทศไทยที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มประเทศที่มีความเสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหวการศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของดินจึงน้อยมาก

หลังจากที่อาคารสูงในกรุงเทพฯได้รับคลื่นแผ่นดินไหวจากประเทศไต้หวัน (สุมาลี ประจวบ และบุรินทร์ เวชบรรเทิง, 1992) ทำให้เริ่มมีการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ น้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์ ตัวแปร (parameter) ที่สำคัญสำหรับคุณสมบัติของดินที่นำมาศึกษาและนำไปใช้กับกำลังรับแรงเฉือนแบบพลศาสตร์คือค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแดมปีง

การหาค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแดมปีงในปัจจุบันมีการทดสอบด้วยวิธี seismic test แบบ up hole และ down hole โดยทำการวัดความเร็วคลื่นแบบเฉือน (Shear wave velocity) (Ashford et al., 1997) ซึ่งการวัดความเร็วของคลื่นหน่วยแรงนี้จะได้ค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำๆ (น้อยกว่า 10^{-3} ของความเครียด) เท่านั้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสที่ระดับความเครียดสูง (มากกว่า 1%) ขึ้นไปนั้นจะไม่สามารถประมาณได้จากวิธีการวัดดังกล่าว นอกจากนี้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่าอัตราส่วนแดมปีงของดินก็ไม่สามารถศึกษาได้ด้วย seismic test

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสต่อระดับความเครียดจึงต้องดำเนินการโดยอาศัยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการทางปฐพีกลศาสตร์อีกวิธีหนึ่งคือ เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร (cyclic triaxial) เป็นเครื่องมือหลักในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทั้งสอง (ค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแอมป์) ของดิน

ประวัติหน่วยแรง (Stress History) คือประวัติของการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งซึ่งแสดงออกโดยค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Ratio, OCR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Maximum Past Effective Pressure) กับหน่วยแรงประสิทธิผลในปัจจุบัน (Present Effective Pressure) ดินจะอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated) เมื่อค่า OCR มากกว่า 1 และดินอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ (Normally Consolidated) เมื่อค่า OCR น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีผลทำให้พฤติกรรมของดินเหนียวเปลี่ยนแปลงไปตามประวัติหน่วยแรงของดินเช่น การรับแรงเฉือน การทรุดตัว เนื่องจากหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีตเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่ดินเคยได้รับสภาพอัดแน่นเกินตัวซึ่งอาจเกิดจากผลของการสึกกร่อนของดินตามธรรมชาติ (erosion) ผลของการมีอายุแก่ขึ้นของดินเหนียวที่มีพลาสติกซิตีสูง (aging) ผลของปฏิกิริยาเคมีทำให้สารเชื่อมแน่น (cementation) และการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ตัวประกอบเหล่านี้ทำให้ดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลในอดีตมากกว่าในปัจจุบัน ดินเป็น apparently over consolidated เกิดจากผลของอายุและสารเชื่อมแน่น (สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์, 2540)

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) มีการศึกษาพฤติกรรมและค่าโมดูลัสเฉือน ค่าอัตราส่วนแอมป์ภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงและค่าอัตราส่วนแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้น้ำหนัก (rate of loading) ของน้ำหนักแบบวัฏจักร (cyclic loading) เพิ่มขึ้น (Teachavorasinskun et.al., 2002) และเมื่อ Normalized ผลของขนาด (amplitude) หน่วยแรงของน้ำหนักแบบวัฏจักร (cyclic) อันเนื่องมาจากประวัติของดิน (cyclic stress history) ที่ได้มาจากค่า prestraining ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแอมป์ (Teachavorasinskun et.al., 2001)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์และกำลังรับน้ำหนักเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร โดยจะศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวต่างๆที่มีต่อค่า parameter ในด้านกำลังรับแรงเฉือนซึ่งได้แก่ โมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแอมป์ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียว โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างตลอดชั้นดินเหนียว (soft clay และ medium clay) จนถึงชั้นทรายด้วยเครื่องทดสอบแบบ Cyclic Triaxial Test โดยการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรเลือกใช้ความถี่ (frequency) อยู่ในช่วงที่สามารถศึกษาพฤติกรรมของดินได้

(ประมาณ 10^{-3} - 10^{-4} เฮิร์ต (Teachavorasinskun et.al., 2002)) และให้ขนาด (amplitude) ของน้ำหนักแรงเฉือน โดยจะเพิ่มขนาดแบบ Stage cycle amplitude เนื่องจากให้ผลในการศึกษาพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ได้ดีกว่าแบบ continuous cycle amplitude (Techavorasinskul et.al., 2001) โดยจะเพิ่มขนาดจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ ผลที่ได้จากการทดสอบจะทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากอิทธิพลของสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวซึ่งได้แก่ดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติและดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำมากกว่าปกติในการรับแรงเฉือนภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่มีต่อพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ของดินอาทิเช่น การสะสมของแรงดันโพรง (pore water pressure) การเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล (effective strength) การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแดมปีง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนทางด้านพลศาสตร์ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (cyclic loading) ได้แก่ การสะสมของแรงดันโพรง (pore water pressure) การเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล (effective strength) การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือน (shear modulus, G) อัตราส่วนแดมปีง (damping ratio, D)
2. ศึกษาถึงอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Ratio, OCR) ที่มีต่อค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนแดมปีง และพฤติกรรมอื่นๆ
3. ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ (frequency) ที่มีต่อค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนแดมปีง และพฤติกรรมอื่นๆ
4. ศึกษาผลของอิทธิพลค่า Plasticity Index ที่มีต่อพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนทางด้านพลศาสตร์ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้ตัวอย่างทดสอบตลอดความลึกของชั้นดินเหนียว (soft clay และ medium clay) ที่เก็บตัวอย่างจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Cyclic Triaxial Apparatus ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained) ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (cyclic) ในรูปแบบคลื่นไซน์ (sine wave) โดยในการทดสอบจะแปรเปลี่ยน (vary) ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (overconsolidated ratio, OCR) ที่ OCR ต่างๆ

1. ใช้ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2 และ 6
2. การเพิ่มขนาดของหน่วยแรง (amplitude) แบบ stage cycle amplitude จำนวน 15 รอบต่อขั้น (stage)
3. ไม่ระบายน้ำ (undrained) ในแต่ละขั้นของการเพิ่มขนาดหน่วยแรงจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ (fully excess pore water pressure)
4. ใช้ความถี่ (frequency) ที่ 0.1 หรือ 0.01 รอบต่อวินาที

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cyclic Loading of an Ottawa Area Champlain Sea Clay (R.J. Mitchell, 1976)
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดิน Ottawa Champlain Sea Clay เป็นดินที่มีความชื้นสูงและมีค่าความชื้นมีค่าใกล้เคียงกับค่า Liquid Limits ค่า Void Ratio ค่าแรงดันในอดีต และค่า Sensivity สูง ซึ่งเกิดจากการทับถมของดินในสภาวะแวดล้อมภายใต้ท้องทะเล

โดยการทดสอบนี้ใช้ดิน Ottawa Champlain Sea Clay ที่อยู่ลึกจากผิวดินห้าเมตร มีค่า Liquid Limit 34-41%, Plasticity Index 18%, Void Ratio 0.98, G_s 2.75, Sensitivity 15-25 และ Preconsolidated Pressure 170-180 kPa เป็นดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ (Normalconsolidated Clay) ให้น้ำหนักแบบวัฏจักร ใช้อัตราการให้น้ำหนักที่ความถี่ 0.25-1 Hz และน้ำหนักตาม Stress Ratio ต่างๆ จนกระทั่งวิบัติ

ผลการวิจัยเมื่อทำการทดสอบดิน Ottawa Champlain Sea Clay ในการรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรต่อเนื่องจนดินวิบัติเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ พบว่าดินจะเกิดการวิบัติที่ความเครียดแบบ distortional strain ตั้งแต่ 1% โดยเมื่อใช้ effective confining 50 kPa เกิดการวิบัติที่หน่วยแรงมีค่า 50% ของการรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ ถ้าให้หน่วยแรงมีค่าน้อยกว่า 50 kPa ดินจะมีพฤติกรรมรับน้ำหนักแล้วจะเข้าสู่สภาวะสมดุลรับน้ำหนัก (equilibrium condition) โดยที่ distortional strain น้อยกว่า 1% ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักคือ effective confining pressure โดยเมื่อค่า effective confining pressure เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ excess pore pressure เพิ่มขึ้นด้วย อีกปัจจัยคือ deviatoric stress โดยเมื่อค่า deviatoric stress เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดของ cyclic stress เพิ่มขึ้นด้วยและทำให้รอบของการให้น้ำหนักลดลง โดยการวิบัติจะเกิดวิบัติตั้งแต่รอบของการให้น้ำหนักตั้งแต่ 100-2000 รอบ

ในการทดสอบแบบสั้น (เกิดวิบัติที่รอบการให้น้ำหนักน้อยกว่า 100 รอบ) ไม่ชัดเจนว่าการวิบัติเกิดจากการเสียรูป (deformation) อันเนื่องมาจาก sensitivity โดยกำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่าแบบสถิตยศาสตร์ ในกรณีที่ไม่มีภาระระบายน้ำทำให้เกิดแรงดันโพรงส่วนเกินที่สมบูรณ์ (Fully Excess Pore Pressure) ส่วนสภาวะความเป็นจริงในสนามนั้นน้ำสามารถกระจาย (dissipate) ไปในดินรอบๆได้ทำให้แรงดันโพรงส่วนเกินหายไปได้ ในงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor Safety) อย่างน้อยเท่ากับสอง สำหรับค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ใช้กับดิน Sensitivity Soil ในฐานรากที่ต้องได้รับแรงแบบซ้ำๆ

Cyclic Stress-Strain History and Shear Characteristics of Clay (T. Matsui, M. ASCE, H. Ohara and T. Ito, 1980) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวด้วยน้ำภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรซึ่งได้ผลของพฤติกรรมของ Stress-Strain History ของดินเหนียวที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ (NC) และแบบมากกว่าปกติ (OC) ทำการทดสอบกับดิน Senri Clay ที่มีค่า Liquid Limit 93%, Plasticity Index 38%, G_s 2.75 และมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าสองไมโครเมตร 43% เตรียมตัวอย่างทดสอบแบบ remold โดยให้ขนาดของหน่วยแรงต่างๆ กันตามค่า Stress Ratio ให้น้ำหนักแบบวัฏจักร 1000 รอบ แล้วหยุดระบายน้ำออกเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ residual stress ใช้อัตราการให้น้ำหนักที่ความถี่ในช่วง 0.01-10 Hz จาก การทดสอบพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักคือ ค่าความถี่ ขนาดของหน่วยแรง (amplitude ในงานวิจัยคือ Stress Ratio) ค่า effective confining และประวัติการอัดตัวคายน้ำ โดยเมื่อค่า effective confining และประวัติการอัดตัวคายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลให้กำลังรับ น้ำหนักเพิ่มขึ้น ด้วยแต่ถ้าขนาดของหน่วยแรง (load amplitude) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับน้ำหนักลดลง ผล ของกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลหลังจากรับน้ำหนัก (กรณี residual stress) พบว่า Excess Pore Pressure จะเกิดจนถึงค่าสูงสุดซึ่งค่า Excess Pore Pressure จะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า ประวัติการอัดตัวคายน้ำ หลังจากนั้นดินจะสูญเสียกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล ชั่วคราวและ หลังจากระบายน้ำออกจะทำให้ค่า Excess Pore Pressure ลดลงและทำให้ดินมีกำลังรับน้ำหนัก ประสิทธิผลสูงกว่าในตอนแรก ซึ่งในดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน ที่เรียกว่า “aged” ผลดังกล่าวทำให้ดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติกลายเป็นดินประวัติการอัด ตัวคายน้ำมากกว่าปกติเล็กน้อย (Lightly Overconsolidated Clay)

Mechanical Behaviour of Clays Under Cyclic Loading (by Y. Meimon and P.Y. Hicher, 1980) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร พบว่า ประวัติการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวมีผลต่อรูปแบบการวิบัติ (failure mode) คือทำให้ กำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล (effective stress) ของดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติมีค่าลดลง และเพิ่มแรงดันน้ำในโพรงแต่ไม่มีผลกระทบสำหรับดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำมากกว่าปกติ ที่มีค่า OCR เท่ากับ 4 การแข็งตัวขึ้นจากความเครียด (strain hardening) มีส่วนสำคัญต่อการ วิบัติโดยพบว่า ค่าขนาดของน้ำหนักทำให้เกิดการแข็งตัวจากความเครียด ซึ่งเป็นผลของหน่วยแรง (deviatoric strain hardening) ที่เพิ่มขึ้นและปริมาตรที่ทำให้แข็งขึ้น (volumetric strain hardening) ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุสามารถคำนวณ ด้วย finite element โดยการ integrate ความสัมพันธ์แบบ unique relationship โดยไม่ต้อง คำนึงถึงผลของการแข็งตัวขึ้นของความเครียด

Cyclic Strengths of Undisturbed Cohesive Soils of Western Tokyo (by H. Ishihara and S. Yasuda 1980) การทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้การให้น้ำหนักแบบวัฏจักร โดยทดสอบกับตัวอย่างแบบไม่กระทบกระเทือนของดินที่มีความเชื่อมแน่น 2 ชนิด คือ alluvial clay และ loam ซึ่งได้มาจากดินทางด้านฝั่งตะวันตกของกรุงโตเกียว โดยการทดสอบแบบ Isotropically Consolidated ภายใต้หน่วยแรงสถิตยศาสตร์ (static stress) แล้วระบายน้ำ (drained) จากนั้นให้ Cyclic load จำนวน 30 รอบ (น้ำหนักและขนาดคงที่) จนกระทั่งเปลี่ยนรูป (deformed) เพื่อหาความเครียดก่อนวิบัติและทดสอบการรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เพื่อหากำลังรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (Cyclic Strength) โดยหาได้จากหน่วยแรงเฉือนแบบสถิตยศาสตร์เริ่มต้นร่วมกับขนาดของ Cyclic Shear Stress ที่จุดวิบัติ ผลของการทดสอบนี้ใช้ความแตกต่างของหน่วยแรงเฉือนเริ่มต้นของแบบสถิตยศาสตร์และแบบวัฏจักร เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนของดินซึ่งพบว่าการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ Cyclic Loading จะมีผลกับดินที่มีค่า Plasticity Index ต่ำ มากกว่าดินที่มีค่า Plasticity Index สูง

Peak Strength of Clay Soils after A repeated Loading History (Dwight A. Sangrey, and John W. France, 1980) ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในการศึกษากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินหลังจากถูกน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร เช่น ในกรณีการเปลี่ยนแปลงของความสามารถรับน้ำหนักสูงสุดของเข็มตอกเนื่องจากระยะเวลาระหว่างการกระทำของน้ำหนักแบบวัฏจักรทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนักทันทีซึ่งสามารถพบได้ในทรายหรือในกรณีพฤติกรรมการรับน้ำหนักของฐานรากภายหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือน

โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาดินเหนียวในรูปแบบกำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำ ภายใต้การรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรโดยใช้ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล ผลจากการวิจัยโดยใช้ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผลและผลจาก empirical สามารถนำมาใช้ทำนายกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายของดินเหนียวภายใต้การกระทำของน้ำหนักแบบวัฏจักรพบว่า กำลังรับน้ำหนักสูงสุด (peak strength) ลดลงเมื่อจำนวนรอบของน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น ค่าความดันโพรงที่เปลี่ยนแปลงมีผลจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกระทำโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับค่าน้ำหนักกระทำที่จุดวิบัติและมีค่าต่ำสุดเท่ากับศูนย์ เมื่อแรงดันโพรงส่วนเกินเกิดขึ้นจากการกระทำของน้ำหนักแบบซ้ำๆ แล้วทำการระบายน้ำเพื่อให้แรงดันโพรงส่วนเกินหายไป พบว่าดิน Overconsolidated Clay มีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวสูงๆ จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดสูงขึ้นมากกว่าเดิม (ก่อนน้ำหนักกระทำซ้ำ) ค่าแรงดันโพรงสูงสุด (ค่าพารามิเตอร์ A) ที่ได้จาก

empirical จะมีค่าสูงสุดที่จุดวิบัติและมีค่าต่ำสุดมีค่าประมาณหนึ่งในสามของค่าสูงสุดเมื่อทดสอบโดยไม่ระบายน้ำและหน่วยแรงโดยรอบเท่ากัน ($\sigma_2 = \sigma_3$)

Effective Stress Change Observed During Undrained Cyclic Triaxial Test on Clay (M. Takahashi, D.W. Hight and P.R. Vaughan, 1980) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับน้ำหนักเฉือนของดิน low plasticity sandy clay จาก Hoppisburgh (Norfolk) ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบ monotonic และแบบวัฏจักร ซึ่งใช้ในงานก่อสร้างในบริเวณชายฝั่ง ซึ่งรับน้ำหนักที่เกิดจากคลื่นทะเลในบริเวณชายฝั่งทะเลตอนเหนือ โดยการทำทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทดสอบแบบ Slurry Remold ทำการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropically Consolidated และ Anisotropically Consolidated ที่หน่วยแรงประสิทธิผล 300 kPa ทำการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ด้วยการให้น้ำหนักแบบ

1. อัดตัวและคายตัวแบบวัฏจักร (two-way cyclic) ให้น้ำหนักในรูปไซน์ (Sinusoidal)
2. อัดตัวแบบวัฏจักร (one-way cyclic) ให้น้ำหนักในรูป Triangular Waveform
3. ขยายตัวแบบซ้ำๆ (monotonic-extension) ให้น้ำหนักด้วยการควบคุม strain controlled ที่อัตรา 0.006 มม./นาที

และให้อัตราการให้น้ำหนัก ด้วยความถี่ที่แตกต่างกันควบคุมการทดสอบการให้น้ำหนักแบบ stress control ให้น้ำหนัก stress ratio ที่ 0.5-0.8 แต่ถ้า stress ratio ดังกล่าวเข้าสภาวะสมดุลก็จะเพิ่มขนาดเพื่อให้สูงสุดวิบัติและทำการวัดแรงดันโพรงที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ จากการวิจัยดิน low plasticity sandy clay ที่ทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำ ด้วยการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรพบว่า

1. จำนวนรอบ (cycle) เพิ่มขึ้น จะทำให้เพิ่ม Hysteresis และ Damping ขึ้นแต่จะทำให้ Stiffness ลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับการอัดตัวคายน้ำ และ ความถี่ของการให้น้ำหนัก
2. ความเครียดตามแนวแกนประมาณ 1% ทำให้ทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลเข้าใกล้ขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ในการทดสอบแบบขยายตัวแบบซ้ำๆ ในอัตราให้น้ำหนักที่ช้า ซึ่งในช่วงนี้ดินมีพฤติกรรมแบบ Dilation ซึ่งขึ้นอยู่กับการอัดตัวคายน้ำ
3. ที่ความเครียดตามแนวแกนมากๆ (large strain) ภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร ทั้งสองทิศทาง ในช่วงนี้พฤติกรรมของดินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดิน ซึ่งเหมาะสมในการนำมาใช้ในการทำ Numerical Modeling (V. Eekelen และ Pott, 1978)

Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range (Tekifi Kokusho, Yasuo Yoshida and Yasuyuki Esashi, 1982) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบแรงกระทำแบบวัฏจักรของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบไม่กระทบกระเทือน ซึ่งจากการทดสอบพบว่า

1. อัตราของเวลา (rate of time dependent) ในการเพิ่มของ shear modulus สามารถประมาณได้โดยใช้ค่า plastic index.
2. Damping Ratio มีค่าลดลงตามเวลาที่ให้น้ำหนักของตัวอย่าง เช่น ค่า Damping Ratio ในสนามจะมีค่ามากกว่าในห้องปฏิบัติการ
3. ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงของ shear modulus ratio มีผลอย่างยิ่งจากค่า plasticity index ของดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น คือที่ค่าความเครียดมากๆ ถ้าค่า plasticity index สูงจะทำให้ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงของ shear modulus ratio มากและถ้า plasticity index ต่ำจะทำให้ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงของ shear modulus ratio ต่ำด้วย
4. ผลของความต่างของประวัติการอัดตัวคายน้ำ ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจากการทดสอบในสนามด้วยวิธี in situ seismic survey เปรียบเทียบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่ค่า strain modulus น้อย โดยเปรียบเทียบค่าในรูป G/G_0 กับ $\log r$ พบว่าไม่สามารถนำมาประมาณค่าโมดูลัสที่ความเครียดมากได้เนื่องจากที่ความเครียดมากมีพฤติกรรมที่เกินจุด yield ทำให้ได้ค่าโมดูลัสเฉือนที่ต่ำมากและไม่มีเสถียรภาพและพบว่าผลของการทดสอบทางพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนภายใต้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรไม่มีความแตกต่างทั้งประวัติการอัดตัวคายน้ำที่ต่างกันและค่า plasticity index ที่ต่างกัน เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวอ่อนแต่อาจจะมีผลกับดินเหนียวแน่นแข็ง (Stiff Clays)

Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties with Strain Range (Tabeji Kokusho, 1989) การวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์เนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวต้องทำการวิเคราะห์แบบ nonlinear ส่วนใหญ่มักจะทำการทดสอบ Torsion column shear แต่ในการวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรโดยทำการทดสอบด้วยเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถวัดค่าได้อย่างละเอียดเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบ Torsion column shear โดยทำการทดสอบตัวอย่างดินทรายอิมิตัว (Toyoura sand) ทำการแปรเปลี่ยน

ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) และ confining pressure พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนที่ช่วงความเครียดกว้าง (10^{-6} ถึง 10^{-3}) ให้ค่าโมดูลัสเฉือนใกล้เคียงกับการหาความเร็วของ คลื่นเฉือน (shear wave velocity) ในสนาม ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้การรับ น้ำหนักแบบวัฏจักรเทียบกับผลของการทดสอบ Torsion column shear test ให้ผลที่น่าเชื่อถือและการเปลี่ยนแปลง confining pressure ไม่มีอิทธิพลกับค่า modulus การทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า damping ratio กับความเครียดได้ผลที่น่าเชื่อถือซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่มักจะหาค่า damping ratio ได้ยาก

Behaviour of Clayey Sand Under Undrained Cyclic Triaxial Loading (V. N. Geogianou, D. W. Hight and J. B. Burland, 1991) งานวิจัยนี้อธิบายผลของประวัติของหน่วยแรงและหน่วยแรงวัฏจักร (cyclic stress) ที่ค่าต่างๆ ในดินทรายปนดินเหนียว (clayey sand) โดยทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำในการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้สภาวะการรับแรงเฉือนแบบวัฏจักร (Cyclic Triaxial Test) พบว่าเมื่อทำการทดสอบดินทรายปนดินเหนียว (clayey sand) เป็นดิน Normally Consolidated สามารถหาเส้นขีดจำกัด (Bounding Envelope) ทั้งทางด้านการอัดและการคาย โดยในช่วงความเครียดเริ่มต้นภายใต้เส้นขีดจำกัดดินยังมีเสถียรภาพ (stable) และเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นจะเกิดการสะสมของแรงดันโพรง โดยเมื่อเพิ่มอัตรา การให้น้ำหนักวัฏจักรจะทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นและจะเข้าสู่เส้นขีดจำกัดทาง ด้านอัด ส่วนทางด้านขยายจะทำให้เกิดสภาวะ Liquefaction

Cyclic Shear Strength and Pore water Pressure Generation Model under Irregular Loading (C. J. Lee and S. F. Sheu, 1995) จากผลของการทดสอบความคงที่ของความเครียดแบบวัฏจักร (uniform cyclic strain test) และจำนวนรอบของวัฏจักรสมมูล (equivalent number of cycle) ซึ่งใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดแรงดันน้ำ (pore water pressure) ในการศึกษาพฤติกรรมของดิน silty clay ในประเทศไต้หวันพบว่า การเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักร (cyclic shear strength) เป็นผลของความแตกต่างของผลรวมระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบสถิตยศาสตร์และกำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักร

3D Cyclic Behavior of Saturated Clay (P. Y. Hicher and A. Taghzouti, 1995) งานวิจัยนี้นำเสนอการทดสอบของดินเหนียวอิ่มตัว (saturated clay) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบสามมิติภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรแบบไม่ระบาย โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงทิศทางของหน่วยแรงหลักและหน่วยแรงรอง (major and minor principle

stress) รวมถึงค่าแรงดันโพรงโดยแสดงค่าโมดูลัสเฉือนและแรงดันโพรงกับจำนวนรอบ (cycle) ของน้ำหนักซึ่งแสดงให้เห็นในทางเดินของหน่วยแรงพบว่า การหมุนทิศทางของหน่วยแรงหลักมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนของโครงสร้างของดินเหนียวได้เร็วกว่า

Effect of Cyclic Loading Period on the Behavior of Clay Under Undrained Torsional Simple Shear (TB. S. Pradhan, Loan T. K. Dam and G. Imai, 1995) ความถี่ของการให้น้ำหนักเพื่อรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียว การศึกษาผลกระทบของความถี่ของการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรต่อการเกิดของแรงดันโพรงและความเครียดเฉือนในระหว่างการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรซึ่งมีผลทำให้เกิดพฤติกรรมทั้งหมดของดินเหนียวรวมไปถึงการหลุดตัวภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร จากการทดสอบแบบ undrained cyclic torsion simple shear test บนตัวอย่างทดสอบแบบ hollow cylindrical เป็นดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติและดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำมากกว่าปกติในการรับแรงเฉือนภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรพบว่า ผลกระทบของความถี่ของการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรมีผลทำให้พฤติกรรมของแรงดันโพรงส่วนเกินมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวของดินเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นและได้สมการในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโพรงและความเครียดเฉือน (shear strain) ที่ความถี่ต่างๆ

Stress Strain Behavior of Clay Undrain Cyclic Loading and Its Modeling (T. Nakai, T. Hoshikawa and E. Q. Chowdhung, 1995) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบใหม่สำหรับจลนศาสตร์ของดินเหนียวถูกนำเสนอด้วยพฤติกรรมของหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับน้ำหนักแบบซ้ำๆ (monotonic) และแบบวัฏจักร โดยการเปลี่ยนแปลงประวัติหน่วยแรงซึ่งนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายผลทางด้านการแข็งตัว (hardening) และการอ่อนตัว (softening) จนกระทั่งถึงสภาวะวิกฤติ (critical state) ซึ่งในจุดนี้จะเกิดเฉพาะตัวแปรด้านการแข็งตัวเท่านั้น โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักวัฏจักร (drained triaxial cyclic) ของดินเหนียวที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำปกติเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบจลนศาสตร์และทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในตัวอย่างทดสอบแบบอัดตัวและการทดสอบในตัวอย่างแบบขยายตัวของดินที่มีประวัติการอัดตัวคายน้ำมากกว่าปกติที่มีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่แตกต่างกันพบว่า ภายใต้สภาวะของการรับน้ำหนักจะมีทั้งการแข็งตัวและการอ่อนตัวแต่ที่สภาวะวิกฤติหรือใกล้การวิบัติจะมีเฉพาะการแข็งตัวเพียง

อย่างเดียวซึ่งการแข็งตัวและการอ่อนตัวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจลน์ศาสตร์ (Kinetic-Clay Model)

Shear Modulus and Damping Ratio of a Clay During Undrained Cyclic Loading (S. Teachavorasinskun, P. Tongchim and P. Lukkunapakit, 2001) ในงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (the undrained cyclic shear strength) ผลที่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์และเชื่อมโยงถึงกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรและตัวแปรทางกายภาพ (physical parameter) อาทิเช่น ขนาด (amplitude) จำนวนรอบของการให้น้ำหนัก (the number of cyclic load) ระดับความเครียด (strain level) และอัตราการให้น้ำหนัก (rate of loading) โดยให้น้ำหนักเพิ่มแบบ stage cycle amplitude (การเพิ่มขนาดหน่วยแรงทีละขั้น โดยแต่ละขั้นจะระบายน้ำออกก่อนที่จะเพิ่มขนาดหน่วยแรง) และแบบ continuous cycle amplitude (การเพิ่มขนาดหน่วยแรงต่อเนื่องกันโดยตลอดจนกระทั่งดินวิบัติ) ผลของการทดสอบมีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแดมปีงซึ่งพบว่า การให้น้ำหนักเพิ่มแบบ Stage cycle amplitude และแบบ continuous cycle amplitude จะให้ผลที่คล้ายกันขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแดมปีง ผลของการอัดตัวคายน้ำเริ่มต้น (initial consolidated) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแดมปีงมากที่สุด ผลของการเพิ่มน้ำหนักแบบ Stage cycle amplitude ค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแดมปีงจะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในทางปฏิบัติ (เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีในสนาม, seismic test) มากกว่าวิธีการเพิ่มน้ำหนักแบบ continuous cycle amplitude

Shear Modulus and Damping Ratio of Soft Bangkok Clay (S. Teachavorasinskun, P. Tongchim and P. Lukkunapakit, 2002) การหาค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแดมปีงของดินตัวอย่างแบบไม่กระทบกระเทือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร แม้ว่าจะมีการศึกษาทางด้าน seismic analysis แล้วแปรผลเป็น parameter ทางพลศาสตร์ด้วยวิธี empirical แต่ก็ไม่สามารถอธิบายค่าที่ได้จากสนามได้เช่น ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดที่มีต่อค่า damping ratio และ shear modulus ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค่า parameter ทางพลศาสตร์ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนจากการศึกษาพบว่า การลดลงของกราฟโมดูลัสเฉือนสำหรับดินเหนียวที่ได้มีค่าคล้ายกับการทดลองของ Vucetic (1991) เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงค่า plasticity ในช่วงเดียวกัน ค่าอัตราส่วนแดมปีงมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 4-5 % ที่ค่าความเครียดน้อยๆ และเปลี่ยนแปลง

ประมาณ 20-30 % ที่ค่าความเครียดมากๆ (ประมาณ 10% เป็นต้นไป) การเพิ่มความถี่จาก 0.1-1.0 เฮิร์ต ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนแต่จะมีผลทำให้อัตราส่วนแอมป์มิงมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อ ทำ การ Normalized ผลของขนาดหน่วยแรงของน้ำหนักแบบวัฏจักรอันเนื่องมาจากประวัติของดิน (cyclic stress history) ที่ได้มาจากค่า prestraining ต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแอมป์มิงพบว่า ผลของขนาดหน่วยแรงของน้ำหนักแบบวัฏจักรอันเนื่องมาจากประวัติของดินที่ได้มาจากค่า prestraining ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนแอมป์มิง

Stress Rate effect on the Stiffness of Soft Clay from Cyclic , Compression and Extension Triaxial Tests.(S. Teachavorasinsun , P. Thongchim and P. Lukkunaprasit, 2002) อัตราการใช้หน่วยแรงหรือความเครียดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลกับพฤติกรรมของดินทางด้านพลศาสตร์ ผลอัตราการให้น้ำหนักที่มีผลต่อ Secant Young' s Modulus ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นการเปรียบเทียบผล Secant Young's Modulus ที่ได้จากการทดสอบอัดตัวสามแกนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้การให้น้ำหนัก 3 แบบคือ

1. การให้น้ำหนักแบบอัดตัว (Compression)
2. การให้น้ำหนักแบบยืดตัว (Extension)
3. การให้น้ำหนักแบบวัฏจักร (Cyclic Loading)

พบว่า ที่ความเครียดในช่วงกลาง ๆ ประมาณ 0.02-0.2 % การให้ความถี่ (อัตราการให้หน่วยแรง) ที่เร็วกว่าจะทำให้ค่า Secant Young's Modulus มากกว่าเมื่อดินทดสอบมีค่า effective stress เท่ากัน และถ้า effective stress (preconsolidated pressure) ที่จุดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงมีผลทำให้ค่า Young's Modulus มากขึ้นและน้อยลงด้วย ที่ช่วงความเครียดมากๆ ประมาณ 0.2-10% ผลของ loading Rate (อัตราการให้น้ำหนัก) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ secant Young' s Modulus การเปลี่ยนแปลงของ Young's Modulus ที่ช่วงความเครียดนี้ขึ้นอยู่กับผลของอัตราการอัดตัวคายน้ำ (Consolidated Stress) ในตอนเริ่มต้น

พฤติกรรมด้านกำลังรับแรงและการเสีรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบแรงอัดสามทิศทางแบบวัฏจักร (เอนกพงศ์ ธรรมาธิวัฒน์, 2003) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและการเสีรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการใช้เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามทิศทางแบบวัฏจักรภายใต้เงื่อนไขไม่ระบายน้ำและนำผลที่ได้จากการทดสอบไปศึกษาพฤติกรรมการหลุดตัวของถนนบนดินเหนียวอ่อนภายใต้แรงกระทำในลักษณะที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักการจราจร โดยเก็บตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพจากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและการเสีรูปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

โดยใช้แรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่าในการทดสอบทุกกรณีค่าหน่วยการยืดหดตัวและแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของแรงที่กระทำแต่ค่าโมดูลัสแบบเฉือนจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของแรงที่กระทำและค่าอัตราส่วนความหน่วงจะลดลงน้อยมากเมื่อจำนวนรอบของแรงที่กระทำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดสอบโดยใช้ค่าความถี่ของแรงที่กระทำ เท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1 Hz ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความถี่ของแรงที่กระทำมากขึ้นภายใต้อัตราส่วนหน่วยแรงที่กระทำเดียวกันตัวอย่างดินจะสามารถรับแรงได้มากขึ้นแต่ค่าแรงดันน้ำจะ ลดลง ในขณะเดียวกันความถี่ของแรงที่กระทำมีผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนน้อยมาก ส่วนในกรณีอัตราส่วนความหน่วงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การเคลื่อนตัวของมวลดิน (Ground Motion)

Wood (1908) ได้สรุปรายงานเกี่ยวกับการเกิดแผ่นดินไหวใน San Francisco เมื่อปี ค.ศ.1906 ดังนี้ “ขนาดของความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ อันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในซานฟรานซิสโก เมื่อวันที่ 10 เมษายน 1906 นั้นขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาของบริเวณนั้นเป็นหลัก” อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวข้างต้นนั้นเกิดขึ้นจากการสังเกตเป็นหลักเนื่องจากข้อมูลทางธรณีวิทยาและข้อมูลแผ่นดินไหวในขณะนั้นยังมีค่อนข้างน้อย ปี ค.ศ.1957 ข้อมูลที่สำคัญที่บ่งชี้ถึงความสำคัญของสภาพทางธรณีวิทยาต่อระดับความเสียหายอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวได้ถูกเปิดเผยออกมา โดยข้อมูลดังกล่าวได้จากการตรวจวัดอัตราเร็วและความเร่งของการเคลื่อนตัวของชั้นดินในระดับต่าง ๆ กัน ณ จุด ต่าง ๆ รอบ ๆ เมือง San Francisco เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับสภาพทางธรณีวิทยาแล้วทำให้สามารถสรุประดับความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างหรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ได้ดังนี้ (Seed et al.1991, Hisada et al. 1965 and Athanassopoulos and tikou 1990)

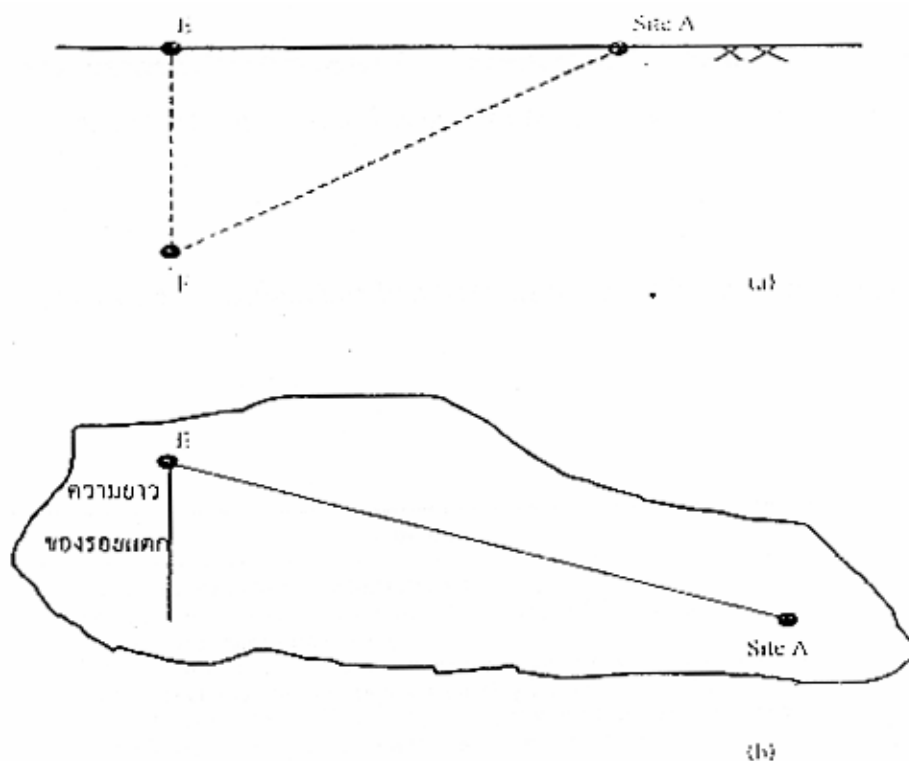
1. ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการตรวจวัดมีระยะที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน
2. ชั้นดินอ่อน(Clay หรือ Sand) มีคุณลักษณะที่รองรับเอาคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูงออก และขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำ ส่งผ่านขึ้นสู่ผิวดิน

ดินอ่อนประเภทต่าง ๆ ก็ยังก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวและระดับความเสียหายต่อโครงสร้างแต่ละประเภท ต่างกันออกไป โดยแนวโน้มที่สำคัญคือ ชั้นดินที่อ่อนกว่าจะมี pre-dominant period ที่สูงกว่าจึงมี potential ที่จะก่อความเสียหายแก่อาคารที่มี pre-dominant period ยาว ๆ (เช่นอาคารสูง) มากกว่า โครงสร้างที่มี natural period สั้น ๆ (เช่น อาคาร บ้านพักอาศัย)

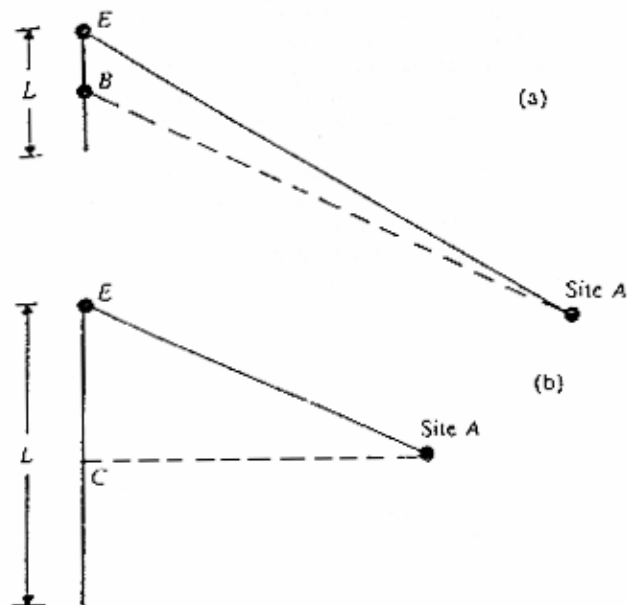
2.2.2 นิยามที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว (Definition of some earthquake Related Term)

- โฟกัส (Focus) คือ จุดที่อยู่ใต้ผิวดินซึ่งรอยแตกเริ่มเกิดขึ้นเป็นจุดแรก ดังรูป 2.1 (จุดF)
- ความลึกของจุดโฟกัส (Focus Depth) คือระยะทางที่แนวดิ่งที่วัดจากผิวดินไปถึงจุดโฟกัส ดังรูป 2.1 (a) (ระยะ EF) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท
 - โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับลึก (Deep-focus earthquake) คือ ความลึกของจุดโฟกัส ตั้งแต่ 300-700 กิโลเมตร (185-435 ไมล์)
 - โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับปานกลาง (Intermediate-focus earthquake) คือ ความลึกของ จุดโฟกัสตั้งแต่ 70 – 300 กิโลเมตร (45-185 ไมล์)

- โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับตื้น (Shallow-focus earthquake) คือ ความลึกของจุดโฟกัสน้อยกว่า 70 กิโลเมตร (45 ไมล์)
- อีพิเซนเตอร์ (Epicenter) คือ จุดที่อยู่เหนือจุดโฟกัสในแนวตั้ง ดังแสดงโดยจุด E ในรูป 2.1
- ระยะทางอีพิเซนทริก (Epicanthic Distance) คือ ระยะทางในแนวราบระหว่างอีพิเซนเตอร์กับตำแหน่งหรือสถานที่สนใจ ดังแสดงโดยเส้น EA ในรูป 2.1
- ระยะทางไฮโปเซนตริก (Hypo-centric Distance) คือ ระยะทางระหว่างจุดโฟกัสกับตำแหน่งหรือสถานที่สนใจ ดังแสดงโดยเส้น FA ในรูป 2.1 (a)
- Effective Distance to Causative Fault คือ ระยะทางจากจุดแบ่งครึ่งของรอยแตกร้าวถึงสถานที่สนใจ ดังรูปแสดงใน 2.2
- ความเข้มของการเกิดแผ่นดินไหว (Intensity) คือ การวัดขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวซึ่งวัดตามอำนาจการทำลาย แบ่งออกเป็น 12 ระดับ ในแนวของ Modified Mercalli Scale ดังแสดงในตาราง 2.1



รูปที่ 2.1 นิยามของจุดโฟกัสและอีพิเซนเตอร์; (a) รูปตัด และ (b) รูปแปลน



รูปที่ 2.2 ระยะทางประสิทธิผลจากรอยแตกถึงสถานที่อ้างอิง

ตารางที่ 2.1 การวัดขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 12 ระดับในแนวของ Modified Mercalli Scale

Intensity	Description
1	Detected only by sensitive instruments
2	Felt by a few persons at rest, especially on upper floors, delicate suspended objects may swing
3	Felt noticeably indoors, but not always recognized as a quake; standing rock slightly, vibration like passing trucks
4	Felt indoors by many, outdoors by a few; at night some awaken; dishes window, doors disturbed; motor cars rock noticeably
5	Felt by most people; some breaking of dishes, windows and plaster disturbance of all objects
6	Felt by all; many are frightened and run outdoors; falling plaster and chimneys; damage small
7	Everybody runs outdoors; damage to building varied, depending on quality of construction; noticed by diver auto

Intensity	Description
8	Panel walls thrown out of frames; fall off wall monuments, chimneys; sand and mud ejected; diver of auto disturbed
9	Buildings shifted off foundation, cracked, thrown out of plumb; ground cracked; underground pipe broken
10	Most masonry and frame structure destroyed; ground cracked; rails bent; landslide
11	New structure remain standing; bridges destroyed; fissures in ground; pipe broken; rails bent; landslide
12	Damage total; wave seen on the ground surface; lines of sight and level distorted; object thrown up into the air

2.2.3 ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ผลในการทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์

2.2.3.1 p-q ไดอะแกรมทางเดินของหน่วยแรงของ MIT

Lambe และ Whitman (1969) ได้เสนอวิธีการใช้ p-q ไดอะแกรมและทางเดินของหน่วยแรงสำหรับงานด้านวิศวกรรมปฐพีแทนการเขียนวงกลมของมอร์ โดยใช้ค่าจำกัดความของ p-q และทางเดินของหน่วยแรงดังนี้

p คือค่าหน่วยแรงในแนวตั้งฉากบนระนาบทำมุม 45 องศา กับระนาบของ σ (ดังรูปที่ 2.3) ส่วน q คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) ที่เกิดขึ้นในมวลดินที่จุดนั้น หน่วยแรงเฉือนนี้อยู่บนระนาบที่ทำมุม 45 องศา กับระนาบของ σ_1 เช่นกัน ดังนั้น

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad 2.1$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 2.2$$

เมื่อวงกลมของมอร์เขียนได้ทั้งรูปของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล p-q ไดอะแกรมจึงมีได้ทั้งรูปของหน่วยแรงรวมและแรงประสิทธิผล โดยค่า q หรือรัศมีของวงกลมของมอร์มีค่าเท่ากันทั้งในรูปของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลเพราะความดันน้ำในโพรงมีค่าเท่ากันทุกทิศทางและผลต่างระหว่าง p และ $\bar{p}$ นั่นคือ

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\bar{\sigma}_1 + u - \bar{\sigma}_3 - u}{2} = \frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{2} \quad 2.3$$

$$p - \bar{p} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3}{2} = u \quad 2.4$$

ทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของ p-q ในมวดดิน โดยปกติทางเดินของหน่วยแรงจะไม่เป็นเส้นตรงเสมอไป ทางเดินของหน่วยแรงอาจเขียนได้ทั้งในรูปของทางเดินของหน่วยแรงรวมเขียนใน p-q ไดอะแกรม และในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลเขียนใน $\bar{p} - \bar{q}$ ไดอะแกรม ทางเดินของหน่วยแรงนี้มีความสำคัญมากเพราะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลทำให้มวดดินก่อนเดียวกันมีพฤติกรรมและสมบัติทางด้านการรับแรงเฉือนหรือสมบัติทางด้านหน่วยแรงความเครียดต่างกันไปได้

การใช้ $p - q$ ไดอะแกรมมักจะใช้เขียนในมวดดินที่อยู่ใน center line ของหน่วยแรงภายนอกที่มากกระทำ ในกรณีดังกล่าว ค่า σ_1 คือ σ_v และ σ_3 คือ σ_h เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงมีผู้ใช้ความหมายของ p และ q ในรูปของ σ_v และ σ_h ดังนี้

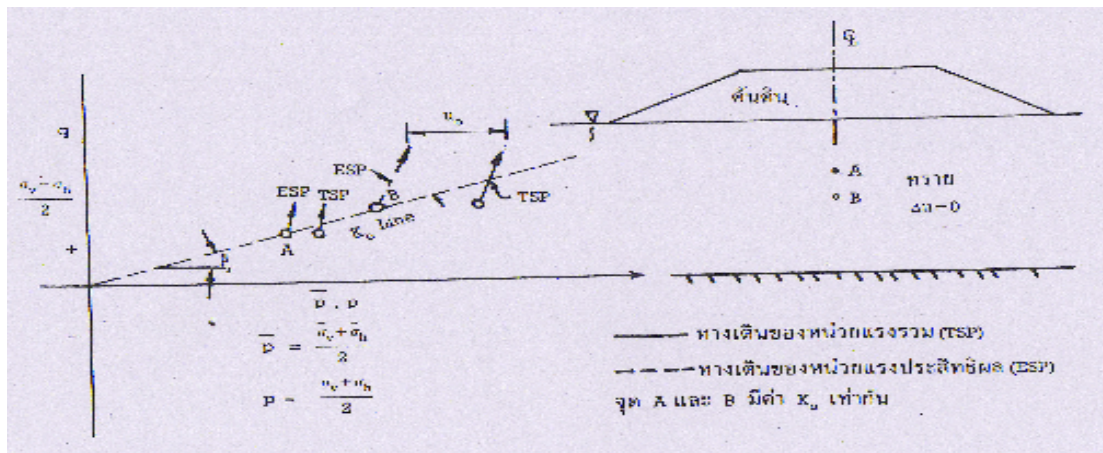
$$P = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \quad 2.5$$

$$q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\bar{\sigma}_v - \bar{\sigma}_h}{2} \quad 2.6$$

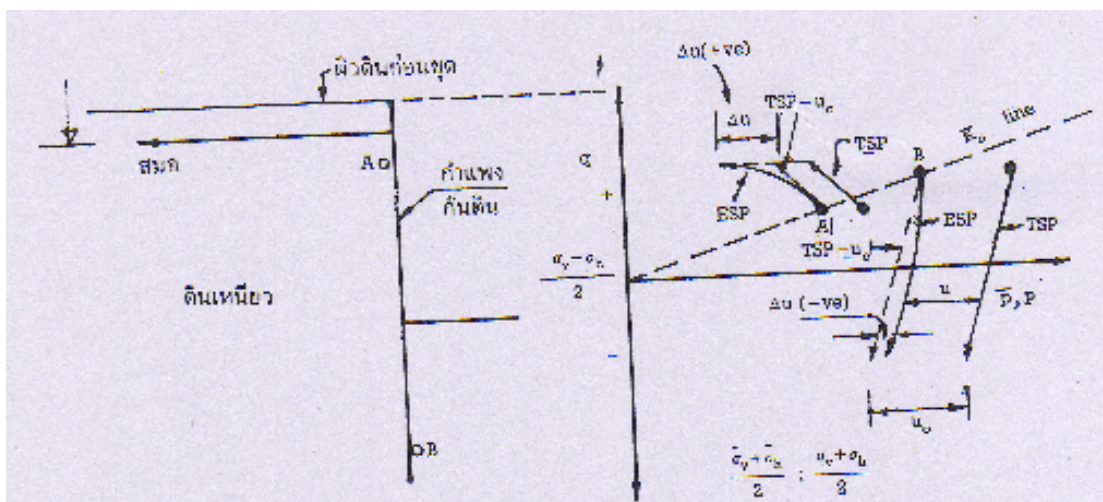
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของ p- q ไดอะแกรมในรูปต่างๆ และสมบัติของ p - q ไดอะแกรม สิ่งที่สำคัญที่ควรทราบเกี่ยวกับ p - q และ $\bar{p} - \bar{q}$ ไดอะแกรมมีดังนี้ :

$$(1) \frac{q}{p} = \tan \beta = \frac{1-K}{1+k} \text{ โดย } K = \frac{\bar{\sigma}_h}{\bar{\sigma}_v} \text{ ทุกจุดในมวดดินมีค่า K คงที่}$$

เช่น K_0 จุดเริ่มต้นของทางเดินของหน่วยแรงซึ่งแสดงสภาพของหน่วยแรงในมวดดินทุกจุดก่อนมีหน่วยแรงภายนอกมากกระทำจะอยู่บนเส้นตรงเส้นเดียวกัน (รูปที่ 2.3 ก.) และเมื่อ β สูงขึ้นในขณะที่ q เป็นค่าบวก ค่า K จะน้อยกว่า 1.0 และมีค่าลดลงที่แกน $\bar{p}$ เมื่อ ค่า K = 1.0 เมื่อค่า q เป็นลบค่า K มากกว่า 1.0



รูปที่ 2.3 (ก) แสดงสภาพของหน่วยแรงในดินก่อนและหลังมีหน่วยแรงภายนอกมากระทำ



รูปที่ 2.3 (ข) ตัวอย่างการเขียนทางเดินของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลในดินเหนียว
เมื่อมีค่า ΔU เกิดขึ้นในปัญหาการขุดดินเหนียวที่จุด A และ B หลังจากกำแพงกันดิน
และ ได้บริเวณที่ขุด

(2) ถ้าลากเส้น 45 องศา กับแนวตั้งจากจุดบน $p-q$ ไดอะแกรมออกไปทั้งสองข้าง เส้นทั้งสองนี้จะตัดแกน p ที่ σ_v และ σ_h สำหรับ $p-q$ ไดอะแกรมจุดที่เป็นจุดตัดคือ σ_v และ σ_h ดังนั้นทางเดินของหน่วยแรงที่เป็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา กับแนวแกน p ในขณะ σ_v (หรือ $\bar{\sigma}_v$) หรือ σ_h (หรือ $\bar{\sigma}_h$) ตัวใดตัวหนึ่งต้องคงที่

(3) ผลต่างของ $q-u_0$ และ $p-u_0$ คือค่า ΔU ดังนั้นถ้าลากเส้น TSP (Total Stress Path) - u_0 ซึ่งขนานไปกับทางเดินของหน่วยแรงรวม (TSP, Total Stress Path) ดังรูปที่ 2.3 ข ระยะทางตามแนวแกน p หรือ $\bar{p}$ ระหว่างเส้น TSP - u_0 กับทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิภาพ (ESP) ที่ค่า q ค่าใดค่าหนึ่งคือ ค่า ΔU จะเห็นได้ว่า ΔU อาจเกิดได้ทั้ง บวกและลบ ขึ้นอยู่กับทิศทางของ TSP

ในการเขียนทางเดินของหน่วยแรงนี้จำเป็นต้องทราบทั้ง $\Delta\sigma_v (\sigma_{zz})$ และ $\Delta\sigma_h (\Delta\sigma_{xx})$ ซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถคำนวณได้โดยทฤษฎีอีลาสติกในรูปที่ 2.3 ข. จะเห็นได้ว่าที่จุด B ทิศทางของ σ_1 จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุด ก่อนขุด $\sigma_v > \sigma_h$ (σ_v คือ σ_1) เมื่อขุดเสร็จแล้ว $\sigma_h > \sigma_v$ ในกรณีหลังนี้ σ_h คือ σ_1 ดังนั้นทิศทางของ σ_1 จึงเปลี่ยนไป 90 องศา ทำให้ q มีค่าเป็นลบ

2.2.4 ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ผลในการทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์

2.2.4.1 ความถูกต้องของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน (Accuracy of the dynamic soil property of site)

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 60 ม. โดยประมาณที่ถูกต้อง มีความสำคัญมากสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในขบวนการเกิดแผ่นดินไหว การคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินที่ตื้นขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินและการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินที่ถูกต้อง วิธีการวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุดและได้ผลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณผิวดินได้แก่ Linear Equivalent Method ซึ่งวิธีการนี้จะนำคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดิน เช่น Shear Modulus และ Damping Ratio นำไปใช้ในการวิเคราะห์

2.2.4.2 แบบจำลอง Linear Viscoelastic

พฤติกรรมของดินที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ Cyclic Triaxial สามารถแทนด้วยแบบจำลอง Linear Viscoelastic เพราะระดับของความเครียดแบบเฉือน (Shear Strain) อยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-3} ซึ่งยังสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่าง stress strain เป็น linear แต่พลังงานที่กระจายออกจะแสดงออกมาในรูปของ Damping Ratio เป็นคุณลักษณะของดินที่ระดับความเครียดเฉือนจุดนั้น ค่าของ Damping Ratio มีความสำคัญมากสำหรับการหาการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอพฤติกรรมของดินจะมีผลต่อการหา Damping Ratio ของตัวอย่างทดสอบดินด้วย

2.2.4.3 ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของแรงแบบวัฏจักร (The General Expression of Cyclic Stress – strain Relationships)

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด stress strain ของแบบจำลอง Viscoelastic มีดังนี้ เมื่อให้หน่วยแรงเฉือน (τ) ก่อให้เกิดความเครียดเฉือน (γ) ในรูปของการเปลี่ยนรูป (deformation) ที่ได้จาก triaxial simple shear หรือ torsion shear test กำหนดให้ τ และ γ โดยให้แต่ละค่าอยู่ในรูปของ Sinusoidal คือ

$$\tau = \tau_a \sin \omega t \quad 2.7$$

τ_a คือ amplitude, t คือเวลา, ω คือความถี่เชิงมุมหรือความถี่รอบที่กระทำต่อตัวอย่างดิน ก่อให้เกิดความเครียดอยู่ในรูปแบบ Sinusoidal เหมือนกัน แต่มีเวลาของการเกิดเข้าไปเกี่ยวข้องด้วยซึ่งสามารถเขียนสมการดังนี้

$$\gamma = \gamma_a \sin (\omega t - \delta) \quad 2.8$$

γ_a คือ amplitude ของความเครียดเฉือน และ δ คือ Angle of phase difference แสดงในรูปของ Time Lag ของความเครียดที่ตอบสนองต่อการกระทำของหน่วยแรงสมการ 3.5 และ 3.6 เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น นำสมการ 3.5 หารด้วยสมการ 3.6 จะได้ τ/γ ไม่เพียงแต่จะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของ τ_a/γ_a แต่ยังเป็นฟังก์ชันของ Angle of phase difference แต่จากการหาความสัมพันธ์ข้างต้น เขียนในรูปของค่าจำนวนเชิงซ้อน (Complex Variable) จะได้

$$\begin{aligned} \tau_R &= \tau_a \sin \omega t \\ \gamma_R &= \gamma_a \sin (\omega t - \delta) \end{aligned} \quad 2.9$$

โดยที่ τ_R และ γ_R เป็นหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือน จากสมการ 3.5 และ 3.6 มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็น Conjugate กัน หรือเป็น Viscoelastic Body เมื่อมีค่าหน่วยแรง (τ) มากกระทำมีผลทำให้มีความเครียด (γ) ออกมา ในขณะเดียวกัน ถ้าเป็น Body เดียวกัน ถ้าให้ค่าของความเครียด (γ_R) จะได้ค่าของหน่วยแรง (τ_R) เช่นเดียวกัน ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่า ค่าของหน่วยแรงของ Viscoelastic Body จะเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex Variable) ดังนั้น

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= \tau_R + i \tau_I \\ \bar{\gamma} &= \gamma_R + i \gamma_I\end{aligned}$$

โดยให้ i เป็นค่า Unit Imaginary Number และค่า $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ เป็นค่าหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนในรูปเชิงซ้อน จากสมการ 3.5, 3.6, และ 3.7 ถ้ากำหนดรูปแบบของ $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ เขียนในรูปเดียวกัน จะได้

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= \tau_R e^{i\omega t} \\ \bar{\gamma} &= \gamma_R e^{i(\omega t - \delta)}\end{aligned}\tag{2.10}$$

จากสมการ 3.8 เป็นรูปแบบทั่วไปของหน่วยแรงและความเครียดที่แสดงอยู่ในรูปเชิงซ้อนซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยแรงกับความเครียด ส่วนในกรณีที่มีทั้งหน่วยแรงและความเครียดจะสามารถอธิบายโดยอัตราส่วนของ $\bar{\tau} / \bar{\gamma}$ ซึ่งจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} e^{i\delta} = \left(\frac{\tau_a}{\gamma_a} \cos \delta + i \frac{\tau_a}{\gamma_a} \sin \delta \right)\tag{2.11}$$

โดยให้

$$\mu = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \cos \delta, \quad \mu' = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \sin \delta\tag{2.12}$$

เขียนใหม่เป็น

$$\mu \bullet = \mu + i\mu'$$

หรืออาจจะเขียนเป็น

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \mu + i\mu' = \mu \bullet\tag{2.13}$$

เมื่อ

$$\mu = \text{Elastic Modulus}$$

$$\mu' = \text{Loss Modulus}$$

$$\mu \bullet = \text{Complex Modulus}$$

ค่า Elastic modulus เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงให้เห็นของความเป็น Elastic ในขณะที่เดียวกันค่า Loss modulus จะแทนพลังงานที่กระจายออกไปซึ่งเป็นคุณลักษณะของ viscoelastic body จากสมการ 2.12 สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\tau_a}{\gamma_a} \sqrt{\mu^2 + \mu'^2} = |\mu|$$

$$\tan \delta = \frac{\mu'}{\mu} = \delta \quad 2.14$$

ค่า δ เป็นพารามิเตอร์ เรียกว่า Loss coefficient จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานสูญเสียหรือบางที่อาจจะเรียกว่าเป็นคุณลักษณะของ Damping ค่าสัมบูรณ์ของค่า Complex Modulus จะแสดงให้เห็นว่าเป็น ค่าโมดูลัสของวัสดุนั้น

คำว่าพารามิเตอร์ของวัสดุ ค่า μ และ μ' เป็นค่าคงที่ ค่าของ μ สามารถนำไปเป็นฟังก์ชันของความถี่เชิงมุม (Angular Frequency) ดังนั้นค่า Moduli คือ μ และ μ' ที่แสดงในสมการ 3.10 อาจจะเป็นรูปแบบที่สำคัญ และอาจจะนำไปเขียนอยู่ในรูปแบบอื่นได้ เช่น ฟังก์ชันในรูปของความถี่ ดังนั้นรูปแบบของฟังก์ชันที่กำหนดค่า Moduli ของพฤติกรรมของวัสดุที่เป็น Viscoelastic สามารถอธิบายได้ชัดเจนมากขึ้น การกำหนดค่า moduli มีอยู่หลายวิธี อาจจะนำเสนอในรูปแบบของการทดลองโดยตรง (Direct Experiment) บนพื้นฐานแบบจำลองของสปริง (Spring) และ Dashpot โดยจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

2.2.4.4 Hysteric Stress-Strain curve

พฤติกรรมของความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียด (Stress-Strain) ของส่วนที่เป็น Viscoelastic body ที่กล่าวมาแล้วนั้น จากสมการ 2.7 และ 2.9 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดกับค่าพารามิเตอร์ของ ωt ระหว่างสองสมการและสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของสมการได้ดังนี้

$$\left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 - 2 \cos \delta (\gamma/\gamma_a) (\tau/\tau_a) + (\gamma/\gamma_a)^2 - \sin^2 \delta = 0 \quad 2.15$$

สมการกำลังสอง ของค่า (τ/τ_a) สามารถอ้างอิงกับนิยามของ μ และ μ' ในสมการ 2.12 สมการเขียนเป็น

$$\tau = \mu\gamma \pm \mu\sqrt{\gamma'^2 + \gamma''^2} \quad 2.16$$

สมการที่ 2.12 อาจจะเป็นสมการสำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ซึ่งอาจจะเป็นตัวแทนของสมการ 2.7 และ 2.8 สมการ 2.12 สามารถเขียนแยกออกเป็นสองส่วน ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1 &= \mu\gamma, \tau_2 = \mu\gamma_a \\ (\tau_2/\mu\gamma_a)^2 + (\gamma/\gamma_a)^2 &= 1 \end{aligned} \quad 2.17$$

จะได้ $\tau_1 = \mu\gamma$ ในสมการ 2.17 จะบรรยายด้วยรูป 2.4 (a) คือเส้นตรงที่มีความชันเป็น μ ส่วนอีกสมการนั้น จะแสดงให้เห็นเป็นวงรีในรูป 2.4 (a) เหมือนกัน โดยที่ $\tau_2 = \mu\gamma_a$ เป็นแกนทางยาว ส่วน $\gamma = \gamma_a$ เป็นแกนทางสั้น ส่วนในรูป 2.4 (b) จะเป็นการรวมของส่วนเข้าด้วยกันได้เป็นวงรีแกนเอียงเป็นตัวแทนของสมการ 2.17 สำหรับ cyclic shear strain ก่อให้เกิดหน่วยแรงแบบเฉือน (Shear stress) ประกอบกันขึ้น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงกับความเครียดแบบเฉือน (Shear strain) กลับไปกลับมามาดังนั้นแสดงในรูป 2.4 (a) ส่วนที่ 2 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงเป็นวงรีหมุนตามเข็มนาฬิกาดังแสดงในรูป 2.4 (a) เช่นกัน ดังนั้นตามความเป็นจริงค่าของหน่วยแรงจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่แสดงเป็น วงรีเอียง ในกรณีของ cyclic loading เส้นทางการเดินบนวงรีเอียงจะเป็นตัวแทนของ hysteretic loops ดังแสดงในรูป 2.4 (b) โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นในการลงพิคต์ของ stress-strain ในการทดสอบ cyclic loading จากรูป 2.4 (b) วงรีเอียงตัดแกนหน่วยแรงแบบเฉือนที่ตำแหน่งเท่ากับ $\mu\gamma_a$ ดังนั้นค่าของ μ' จะนำไปเป็นค่าวัดระดับของความอ่อนหรือความผอมของวงรีค่าของ μ' มากจะแสดงว่าวงรีนั้นอ่อนค่า Energy loss หรือ Damping มาก ส่วนค่าของ μ' น้อยวงรีจะผอมค่า Damping ก็จะมีค่าน้อยด้วย ซึ่งจะได้จากกราฟของการทดสอบ cyclic loading ปริมาณค่าของ Damping เป็นคุณลักษณะที่แสดงถึง Energy Loss Per Cycle จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ล้อมรอบโดย Hysteresis Loop ที่แสดงในรูป 2.4 (b) ซึ่งพื้นที่ของ ΔW ล้อมรอบโดยวงรีเอียงควรจะเท่ากับพื้นที่ที่ปิดล้อมด้วยวงรีดังแสดงในรูป 2.4 (a) จึงสามารถคำนวณหาพื้นที่ได้โดยตรงโดยใช้สูตรการหาพื้นที่ของวงรีดังนี้

$$\Delta W = \int \tau d\gamma = \mu' \pi \gamma_a^2 \quad 2.18$$

เมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของ Elastic Energy หรือ (W) ที่สามารถเก็บให้ส่วนที่เป็น Viscoelastic body มีอยู่หลายวิธีในการกำหนดการเก็บพลังงานแต่ที่เป็นจริงมากที่สุด ค่าของ พลังงานที่เก็บโดย Elastic component ของหน่วยแรงแบบเฉือน (Shear stress) (τ_1)

$$W = (1/2) \tau \gamma_a = (1/2) \mu \gamma_a^2 \quad 2.19$$

ดังนั้นการวัดค่าของ Damping และ Energy loss หรือ ΔW ค่อนข้างจะลำบากเนื่องจากเป็น ค่าฟังก์ชัน ของ Strain amplitude หรือ (γ_a) ซึ่งไม่อาจจะแสดงให้เห็นคุณสมบัติแท้จริงของวัสดุได้ จึงนำค่าของปริมาณทั้งสองมากำหนดเป็นอัตราส่วนคือ Energy loss per cycle ต่อ Maximum stored energy จากสมการ 2.18 และ 2.19 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการใหม่ ดังนี้

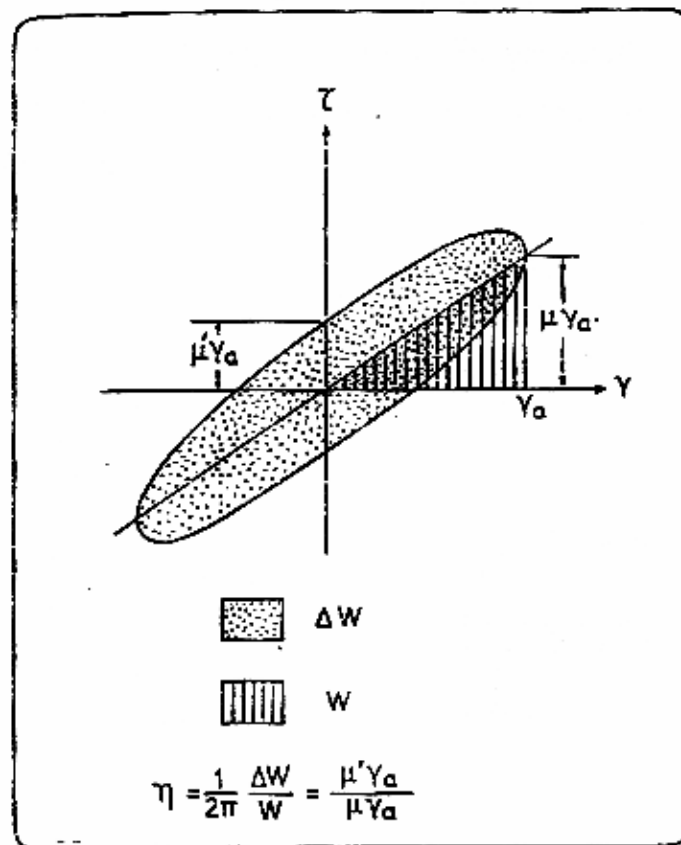
$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\mu' \pi \gamma_a^2}{(1/2) \pi \mu \gamma_a^2} = 2\pi \frac{\mu'}{\mu} \quad 2.20$$

หา η = Loss Coefficient

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{\mu'}{\mu} = \tan \delta \quad 2.21$$

ความสัมพันธ์ที่แสดงถึง Energy loss จะอยู่ในเทอมของ hysteresis loop ซึ่งจะสัมพันธ์กับ ค่า Damping อยู่ในรูปของ Phase Angle Difference ค่าของ Loss coefficient ของสมการ 3.19 เขียนใหม่ได้ดังนี้

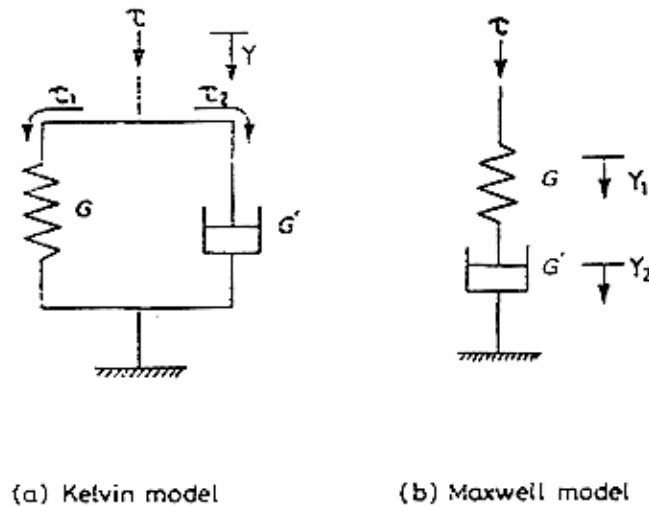
$$\eta = \frac{\mu' \gamma_a}{\mu \gamma_a} \quad 2.22$$



รูปที่ 2.5 นิยามของ Loss coefficient

2.2.4.5 แบบจำลองที่แทนระบบด้วย spring และ Dashpot (Model representation by the spring dashpot system)

เพื่อให้เข้าใจดีขึ้นในการอธิบายพฤติกรรมรูปแบบของ Viscoelastic โดยใช้ Spring-dashpot เข้ามาช่วยประกอบการอธิบายจะได้เห็นข้อกำหนดและคุณสมบัติทางกายภาพของ Viscoelastic ในแต่ละส่วนของแบบจำลองนั้นเช่น คุณสมบัติของ Elastic จะแทนด้วยสปริงและคุณสมบัติของ Damping จะแทนด้วย Dashpot เป็นต้น โดยการต่อเชื่อมกันของตัวแทนทั้งสองอาจเป็นแบบขนาน (Parallel) หรือ แบบอนุกรม (Series) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในส่วนของ loss energy จะทราบได้จากความแตกต่างภายในของการเปลี่ยนรูปของ mechanism แต่สิ่งสำคัญควรจำคือ Dashpot สามารถแทนในส่วนของความเร็ว หรือ เวลาของการ Deformation โดยจะกล่าวถึง rate dependent damping ส่วนในกรณี cyclic loading ค่าของ rate dependency จะปรากฏให้เห็นในรูปของ Deformation ขึ้นอยู่กับความถี่ซึ่งเป็น คุณลักษณะ frequency-dependent จึงสามารถสรุปได้ว่า Rate dependent เป็นรูปแบบทางเลือกหนึ่งสำหรับการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 2.6 แบบจำลอง Viscoelastic

2.2.4.6 แบบจำลองของเคลวิน (Kelvin Model)

เป็นรูปแบบจำลองพื้นฐานและใช้แพร่หลายมากที่สุด แบบจำลองของ Kelvin จะประกอบด้วย spring และ Dashpot ซึ่งจะต่อกันแบบขนานดังแสดงในรูป 2.6(a) จากรูป 2.6 (a) จะเห็นได้ว่าในเวลาที่ใส่ความเครียดเฉือน (γ) จะก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือน (τ) โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนส่วนแรกจะเกิดที่สปริงมีค่าเท่ากับ τ_1 และจะเกิดที่ Dashpot เท่ากับ τ_2 ดังนั้นการแบ่งหน่วยแรงออกเป็น 2 ส่วนนี้จะทำให้ความสอดคล้องกับกฎทั่วไปและเป็นไปตามสมการ 3.15 ค่าของหน่วยแรงจะส่งผ่านสปริงมีค่าเท่ากับ $G\gamma$ และที่ Dashpot จะเท่ากับ $G'd\gamma/dt$ ให้ G เป็นค่าของ Spring constant และค่า G' เป็นค่าของ Dashpot constant ดังนั้นหน่วยแรงทั้งหมดจะเท่ากับ $\tau = \tau_1 + \tau_2$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = G\gamma + G'\frac{d\gamma}{dt} \quad 2.24$$

จากสมการสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด (Stress-strain) จากแบบจำลองของ Kelvin สมการ 2.24 เชื่อว่าเป็นกรณีพิเศษของความสัมพันธ์แบบทั่วไปที่แสดงไว้ในสมการ 3.9 ดังนั้นสิ่งที่น่าสนใจคือค่า Elastic modulus (μ) และค่า Loss modulus (μ') อยู่ในเทอมของ G และ G' สำหรับจุดประสงค์สมการ 2.10 ค่าของหน่วยแรงและความเครียดจะแสดงในเทอมของ complex

variables มาเกี่ยวข้องกับค่าหน่วยแรงและความเครียดในสมการ 2.24 และผลจะเป็นได้ดังนี้

$$\tau_a e^{i\delta} = (G + i\omega G')\gamma_a \quad 2.25$$

อ้างถึงสมการที่ 2.12 จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\mu + i\mu' = G + i\omega G' \quad 2.26$$

เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของจริง (Real Part) และในส่วนของจินตภาพ (Imaginary Part) แยกออกเป็นส่วน ๆ จะมีค่าดังนี้

$$\mu = G, \mu' = \omega G', \eta = \tan \delta = G' \omega / G \quad 2.27$$

แบบจำลองของ Kelvin ในขณะที่ Elastic modulus (μ) มีค่าของ shear constant แต่ในส่วนของคุณค่า Loss modulus (μ') จะเป็น a linear function of angular frequency ดังนั้นแนวโน้มของ Loss coefficient (η) ภายใต้ Cyclic loading จะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ของ Body

ตามแบบจำลองของ Kelvin ถ้าเข้าใจในทฤษฎีของ Viscoelastic อาจจะใช้เป็นตัวแทนของพฤติกรรม การครีพ (Creep) ของวัสดุตามเวลาโดย Load คงที่ซึ่งแสดงในความสัมพันธ์ภายใต้เงื่อนไขของหน่วยแรงคงที่ (Stress-controlled) สามารถดูจากสมการ 3.22 กับการคาดคะเนว่าเวลาภายใต้เงื่อนไขคือ $\tau = \tau_0$ เมื่อ $\tau = 0$ ได้สมการเป็นดังนี้

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} (1 - e^{-t/\bar{t}}) \quad 2.28$$

โดยที่ $\bar{t}$ คือ G/G' เรียกว่า retardation time $\bar{t}$ ที่ใส่เข้าไปเท่ากับ t ในสมการ 2.28 จะได้ $\gamma = 0.632\tau_0/G$ ดังนั้นค่าของ retardation time คือระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดความเครียดเท่ากับ 63.2% ของค่าความเครียดทั้งหมด ภายใต้เงื่อนไขของหน่วยแรงแบบเฉือนที่เหลืออยู่

2.2.4.7 แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Model)

เป็นแบบจำลองที่ประกอบไปด้วย spring และ Dashpot จะต่อกันแบบอนุกรม (Series) ดังแสดงในรูป 2.6 (b) ในแบบจำลองนี้จะประยุกต์ค่าหน่วยแรง (γ) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกจะได้จาก Deformation ของ Spring มีค่าเท่ากับ γ_1 ส่วนที่สองมาจากการเปลี่ยนรูป ของ Dashpot เท่ากับ γ_2 โดยในแต่ละส่วนของหน่วยแรงจะมีความสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงดังนี้ $\tau = G\gamma_1$ และ $\tau = G'd\gamma_2/dt$ ดังนั้นแบบจำลองของแมกซ์เวลล์จะมีค่าของหน่วยแรงกับความเครียด (Stress-strain) สัมพันธ์กันดังนี้

$$\begin{aligned}\gamma &= \gamma_1 + \gamma_2 \\ \frac{\tau}{G} + \frac{1}{G'} \frac{d\tau}{dt} &= \frac{d\gamma}{dt}\end{aligned}\tag{2.29}$$

กรณีที่เหมือนกับความสัมพันธ์ข้างต้น ค่าของ Elastic modulus (μ) และ Loss modulus (μ') จะแทนด้วย τ และ γ ของสมการ 2.29 โดยการแทนที่ $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ ของสมการ 2.10 จะได้สมการใหม่เป็นดังนี้

$$\left[\frac{1}{G} + \frac{1}{i\omega G'} \right] \tau_a = e^{i\delta} \gamma_a\tag{2.30}$$

จากสมการ 2.12 สำหรับค่า (μ) และ (μ') จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\mu = \frac{(1/G)}{(1/G) + (1/\omega G')}\tag{2.31}$$

$$\mu' = \frac{(1/\omega G')}{(1/G) + (1/\omega G')}$$

$$\eta = \tan \delta = G' / G \omega$$

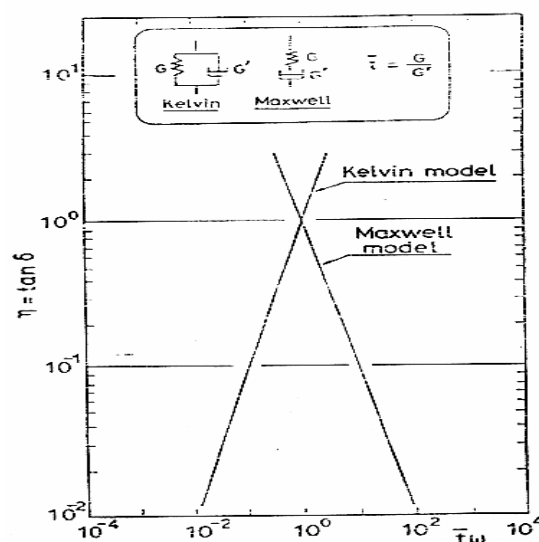
จากสมการ 2.31 จะเห็นได้ว่าค่าของ Loss coefficient (η) จะแปรผกผันกับค่าความถี่เชิงมุม (Angular frequency) แบบจำลองของแมกซ์เวลล์จะเป็นตัวแทนของ relaxation behavior ของวัสดุ ภายใต้การให้ ค่าของความเครียดที่มีขนาดคงที่โดยใช้สมการ 2.29 ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้น $\gamma = \gamma_a$ ที่ $\tau = 0$ สามารถเขียนอยู่ในรูปหน่วยแรงได้ดังนี้

$$\tau = \gamma_0 G e^{-t/\bar{t}} \quad 2.32$$

โดยที่ $\bar{t}$ คือ G/G' เรียกว่า relaxation time $\bar{t}$ ที่ใส่เข้าไปเท่ากับ t ลงในสมการ 2.32 จะได้ $\gamma = 0.368 G \gamma_0$ ดังนั้น relaxation time หมายถึงระยะเวลาที่ต้องการใช้สำหรับ relax ที่จะก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ขึ้นต้นเท่ากับ 63.0% ภายใต้เงื่อนไขของความเครียดแบบเฉือน (Shear strain) ที่เหลืออยู่

ส่วนที่เหลือแสดงถึงค่าของ loss coefficient จะเท่ากับสองเท่าของค่า damping ratio เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์การตอบสนองของ Seismic ดังนั้นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการหาค่า nature of loss coefficient ตามนิยามของแบบจำลองของ Kelvin และ Maxwell สังเกตได้จาก frequency dependency และค่า loss coefficient (η) จากสมการ 2.27 และ 2.31 ซึ่งพล็อตกับค่า no dimensional parameter $\omega \bar{t}$ ในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของ Loss coefficient ในแบบจำลองของเคลวินจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันของแมกซ์เวลล์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ของ cyclic loading

ในส่วนต่อมาจะแสดงวิธีการมากมายสำหรับการหาค่า Damping ratio ในการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับการหาค่า Damping ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินแต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า Damping ratio จะมีอิสระกับค่าความถี่ในช่วงปกติ โดยการพบแบบบังเอิญของการกระทำของแรงแผ่นดินไหว (Seismic loading) ดังนั้นการประยุกต์แบบจำลองของสปริงและ Dashpot จะเป็นปัญหาในทางปฏิบัติควรจะจำกัดเฉพาะในกรณีพิเศษซึ่งค่าความถี่ของ loading จะแปรเปลี่ยนในช่วงแคบ ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า Damping น้อยมากที่จะไปมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่



รูปที่ 2.7 Loss coefficient of two models as functions of frequency

2.2.4.8 Non-Viscous type Kelvin model

สิ่งที่พบคือ ค่าของ frequency dependent nature ของค่า Loss coefficient ตามแบบจำลองของ Spring – dashpot มาจาก Viscous dashpot ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงและอัตราเวลา (Time rate) ของความเครียด ดังนั้นการกำจัดข้อบกพร่องเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของ Dashpot ที่เป็น rate independent จากการทบทวนทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์การเปลี่ยนแปลงของ entropy จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานถูกแพร่กระจายเสมอเมื่อมีการจำกัดเทอมของ time rate ของการเปลี่ยนแปลงบนพื้นฐานทางฟิสิกส์แต่ยังมี rate independent เหลืออยู่จึงมีแนวความคิดใหม่โดยการรวม rate independent ของ Dashpot เข้าด้วยกันทำให้สามารถแก้ปัญหาของแบบจำลองไปได้มากสามารถสะท้อนกลับมาในความเป็นจริงของพฤติกรรมของดินในระดับความถูกต้องที่ดีมากแบบจำลองที่ว่ามันมีชื่อว่า nonviscous type Kelvin เขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = (G + iG_0')\gamma \quad 2.33$$

โดยที่ G_0' เป็นค่าของ Dashpot constant แบบจำลองนี้จะประกอบด้วยสปริงและ rate-independent dashpot จะต่อกันแบบขนานดังแสดงในรูป 2.8 ความแตกต่างของเครื่องหมายของ Dashpot เป็น สิ่งสำคัญ สมการ 2.33 สามารถวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดซึ่งหน่วยแรงจะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกจะเกิดขึ้นพร้อมกับความเครียดเท่ากับ $\tau_1 = G\gamma$ และส่วนที่สองจะเกิดขึ้นมีเฟสต่างกัน 90° เท่ากับ $\tau = G_0'\gamma$ ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดโดยแบบจำลองจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจินตภาพ (Imaginary) คือ $iG_0'\gamma$ จะไม่ถูกรวมเข้าไปในสมการเพื่อที่จะอธิบายส่วนจริงของโลกทางกายภาพแต่ในปัจจุบันส่วนของจินตภาพจะถูกรวมเข้าไปด้วยเพื่อเป็นตัวแทนของ phase loop และแดมปิงซึ่งเป็นคุณสมบัติของดิน

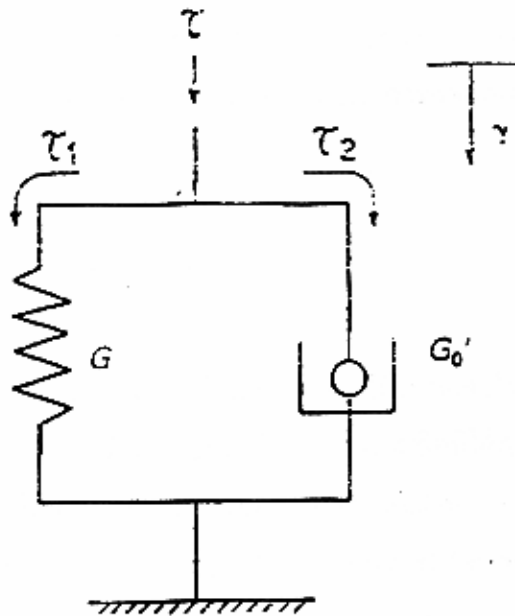
ค่า Elastic modulus (μ) และ Loss modulus (μ') ที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่สามารถนำสมการ 2.10 เข้าไปแทนสมการ 2.13 ที่เขียนเป็นสมการได้ใหม่นี้

$$\tau e^{i\delta} = (G + iG')\gamma \quad 2.34$$

จากสมการ 2.12 ค่าของ (μ) และ (μ') สำหรับ non-viscous type Kelvin model มีค่าดังนี้

$$\mu = G, \mu' = G_0, \eta = \tan \delta = G / G_0' \quad 2.35$$

ค่าคงที่ของ moduli ทั้งหมดที่เป็น independent of frequency of cyclic loading



รูปที่ 2.8 แบบจำลอง Non-viscous type Kelvin

2.2.5 วิธีการหาคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์

การหาคุณสมบัติดินทางด้านพลศาสตร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ด้วยกัน คือ

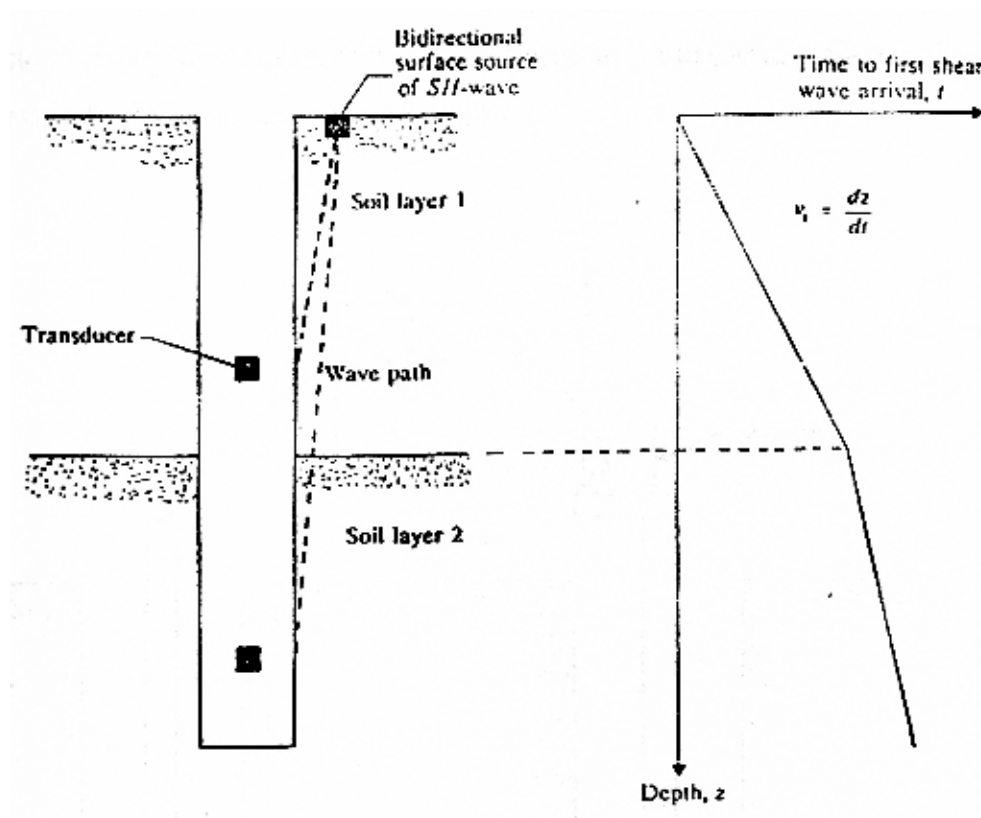
2.2.5.1 การวัดค่าความเร็วคลื่นแบบเฉือนในสนาม (measurement of in – situ shear wave velocity)

การวัดค่าความเร็วคลื่นในสนามนั้นเป็นการวัดเวลาและการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเฉือน (Shear wave) และ body wave ระหว่างระยะทางที่ทราบไว้แล้วคือรู้ระยะทางระหว่างตัวให้กำหนดคลื่นกับตัวรับคลื่นเพราะฉะนั้นสามารถหาความเร็วของการแผ่กระจายคลื่น (Propagation) ได้ ความเร็วของคลื่นถูกแปลงให้มาเป็นค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Shear modulus) และค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าโมดูลัสแบบนี้ไม่สามารถทราบค่าของระดับความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นได้ ทำให้มีความเห็นแย้งขึ้นมาว่าการกระตุ้นทำให้เกิดคลื่นนั้นเป็นการรบกวนดินหรือไม่ในการกระตุ้นให้กำเนิดคลื่นจึงจำเป็นต้องกระทำให้เกิดความรบกวนน้อยที่สุดเพื่อให้แน่ใจว่าพฤติกรรมของดินในช่วง Elastic ดังนั้นการคำนวณหาค่า Stiffness ควรจะเป็นค่าเริ่มต้น elastic stiffness การทดสอบแบบนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด

- Uphole and Downhole Method

Downhole method แหล่งกำเนิดคลื่นจะอยู่ที่ผิวดินแล้วให้ Stress wave วิ่งผ่านชั้นโดยมี geophone เป็นตัวรับคลื่นโดยอยู่ในตำแหน่งความลึกที่ได้กำหนดความลึกของหลุมไว้ก่อน วิธีการนี้สามารถค้นคว้าได้จาก Hight et al (1997) , Stokoe et al (1995), Richart (1997) , Abbiss (1981 and 1986), Kudo et al (1995), Larkin and Taylor (1979) ข้อบกพร่องอย่างหนึ่งของวิธี Downhole ไม่สามารถกำหนด polarization plane ของ shear wave ที่หลากหลายได้เป็นผลกระทบเนื่องมาจาก Stress anisotropy ได้สังเกตในการทดสอบ Downhole ในพวกทรายแบ่ง

ส่วนวิธี Uphole ก็ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Downhole ยกเว้นตัวรับคลื่นจะนำมาวางที่ผิวดินและในขณะเดียวกันตัวกำหนดคลื่นลงไปวางไว้ในหลุม การทดสอบวิธี Downhole จะแสดงดังในรูปที่ 2.9

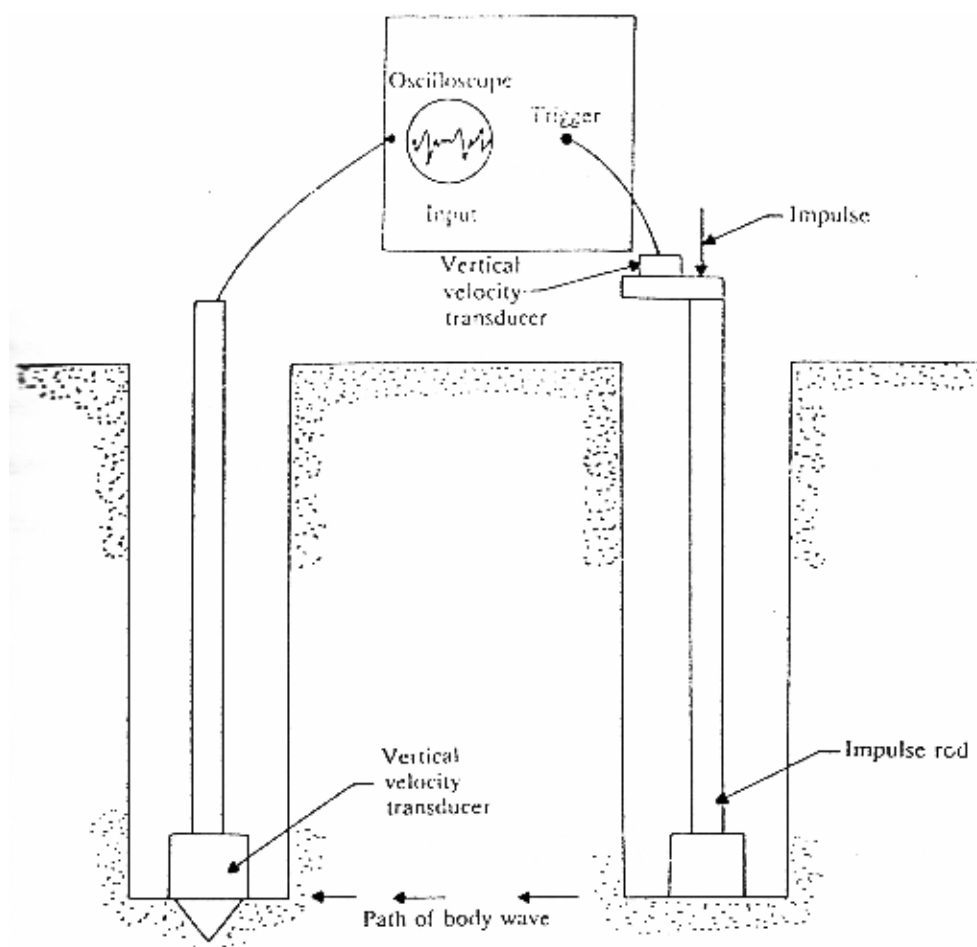


รูปที่ 2.9 การทดสอบวิธี Down-hole

- Cross-hole Method

Stokoe และ Wood (1972) ได้ประยุกต์วิธีการ Cross - hole โดยการวัด propagation velocity stress wave ในดินได้ โดยทำให้เกิด stress wave ในหลุมเจาะหนึ่งสามารถตรวจจับได้อีกหลุมเจาะหนึ่งที่ระดับเดียวกันเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ถึงครั้งแรกเป็นของคลื่นแบบเฉือน (Shear wave)

สามารถหาความเร็วของคลื่นแบบเฉือน (Shear wave) ได้เพราะรู้ระยะห่างระหว่างหลุมของตัวกำเนิดคลื่นและหลุมของตัวรับ ข้อดีของวิธี Cross-hole คือ stress wave มี polarized plane แตกต่างกันได้ผลของ stress anisotropy ได้ การวัดความเร็วของคลื่นแบบเฉือนสามารถหาศึกษาได้จาก Stokoe et al (1995), Nishiue and Katsure (1995), Salgado et al (1997) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า large strain Cross-hole test ซึ่งสามารถหาโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับของ strain ต่างๆ ซึ่งต้องมีความเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของความเร็วของคลื่นแบบเฉือนค่าของ strain ขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของคุณภาพและอัตราเร็วเฉลี่ยของคลื่นแบบเฉือน การทดสอบวิธี Cross-hole จะแสดงในรูปที่ 2.10



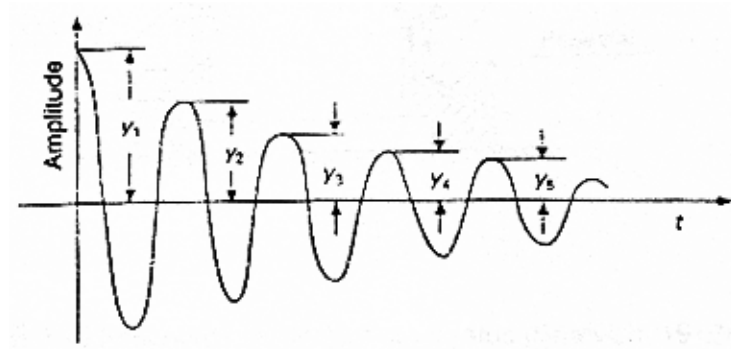
รูปที่ 2.10 การทดสอบวิธี Cross-hole

2.2.5.2 การหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ Measurement of dynamic properties in laboratory)

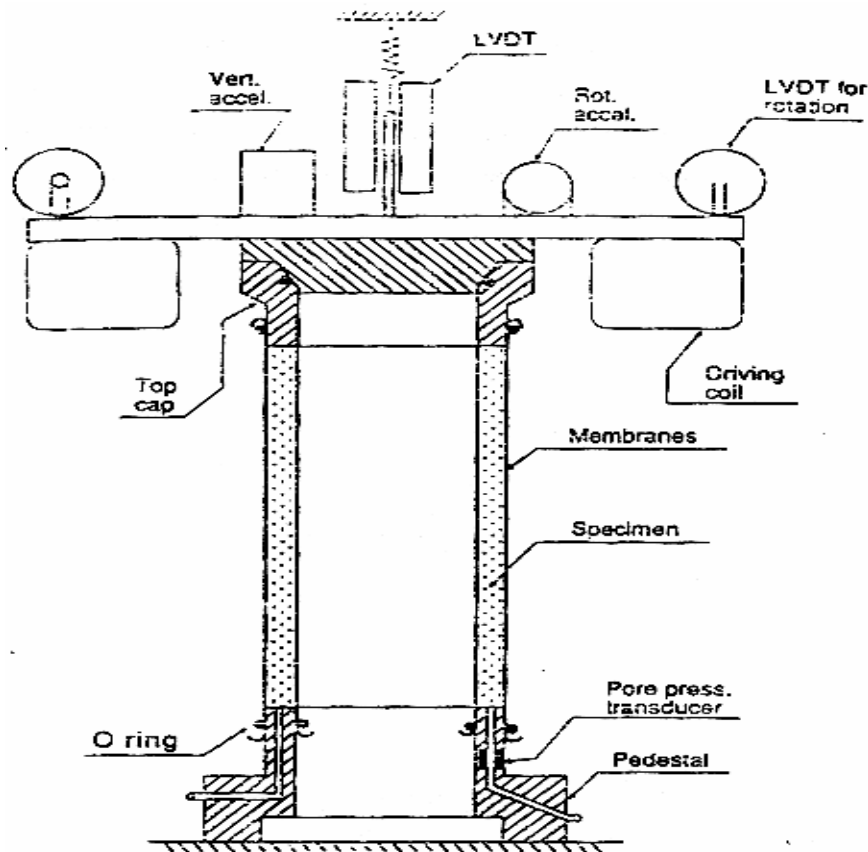
การหาค่าคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์สำหรับในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

2.2.5.2.1 Measurement of dynamic properties using wave propagation

เครื่องมือที่นิยมมากที่ใช้ในการวัดค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) และ Damping ratio ของดินนั้น ได้แก่ Resonant-Column Test (Hardin and Richart 1963 , Hardin and Drnevich 1972, Iwasaki et al 1978, Tatsuoka et al 1979, Duffy et al 1994) ข้อบกพร่องอย่างหนึ่งของ Resonant Column Apparatus คือไม่สามารถที่จะทดสอบที่ large strain ส่วน The cyclic torsional shear test ปกติจะรวมผลการทดสอบกับ Resonant Column Apparatus เพราะเป็นการทดสอบตัวอย่างดินที่ระดับ large strain (Iwasaki et al 1978, Lo-presti et al 1979) ค่า Damping Ratio ของแท่งตัวอย่างดินถูกวัดด้วย Resonant Column Apparatus ได้จากการคำนวณของการลดลงแบบ logarithmic ของการสลายของ Amplitude ของคลื่นของการสั่นหลังจากได้มีการปิดสวิทช์ที่ทำให้เกิดการสั่นดังแสดงในรูปที่ 3.12 และเครื่องมือ Resonant-Column Test แสดงในรูปที่ 3.13 ส่วนของ The cyclic torsional shear test ค่าของ Damping ratio ได้จากการคำนวณพื้นที่ของ hysteresis loop (Tatsuoka et al., 1979)

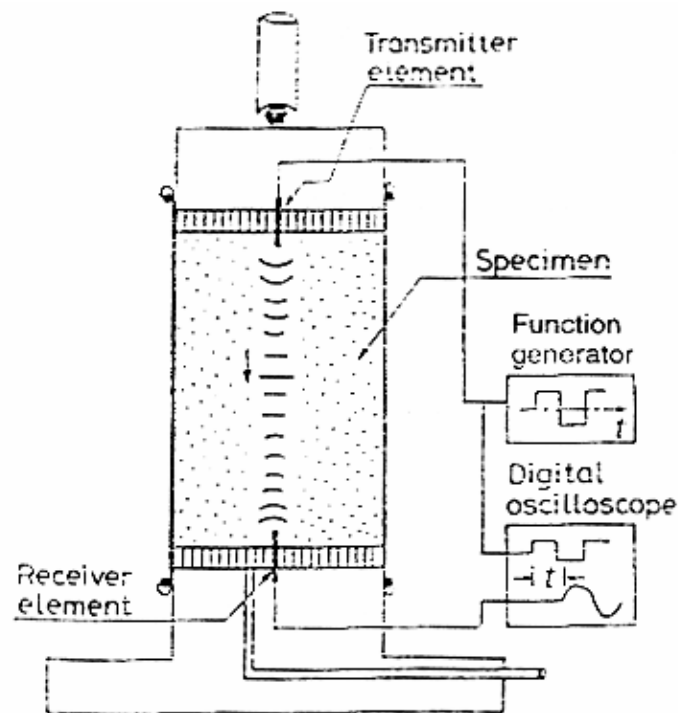


รูปที่ 2.11 วิธีการหา Damping ratio จากเครื่องทดสอบ Resonant-Column



รูปที่ 2.12 Resonant column test apparatus (Dnevich, 1972)

การพัฒนาและความก้าวหน้าของ stress wave generator และ pick up sensor สามารถนำไปติดตั้งที่บนหัวและฐานที่วางแท่งตัวอย่างดินของเครื่องทดสอบแบบดั้งเดิมเช่น Triaxial and plan strain apparatus ศึกษาความเร็วของการแผ่กระจายคลื่น (Wave propagation) ในแท่งตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบ Stokoe et al (1985) ได้ทำการวัดความเร็วคลื่นในเครื่อง Triaxial จริงโดยการสำรวจผลกระทบของ stress anisotropy ต่อโมดูลัสแบบเฉือน Tanizawa et al (1994) ได้ใช้วิธีที่เรียกว่า Bender Element ทำการวัดความเร็วของคลื่นแบบเฉือนอย่างต่อเนื่องระหว่างการทดสอบ cyclically shearing ของแท่งตัวอย่างสำรวจผลกระทบของหน่วยแรงแบบเฉือน (Shear stress) ที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือนของทรายเครื่องมือทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ยังสามารถหาวิธีการประยุกต์แบบนี้ได้จาก Shahariar et al (1957), Shibuya et al (1997), Hight et al (1997)



รูปที่ 2.13 Use of bender elements in the triaxial test apparatus

2.2.5.2.2 Measurement of the stiffness and damping using conventional equipment

เครื่องมือทดสอบแบบดั้งเดิมเช่น Torsional shear, Triaxial and plane strain test ถูกนำมาปรับปรุงและมีการติดตั้ง transducer เพื่อให้ค่าความแม่นยำในการวัดสูงขึ้นซึ่งสามารถวัด stress-strain มีค่าน้อยมาก ๆ ได้และได้มีการปรับปรุงเกี่ยวกับเทคนิคการทดสอบแบบ static เพื่อหาค่า shear modulus ให้กลายเป็นการทดสอบ dynamic เพื่อหาค่า shear modulus ศึกษาได้จากข้อความที่ตีพิมพ์จำนวนมากมายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 เป็นต้นมา Teachavorasinsakun et al (1992) ,Tatsuka and Sajibuya(1991), Jardin et al (1984) , Hight et al (1997)Bate(1989) , Lo-presi et al (1993) ผลที่ได้จากการค้นพบเครื่องมือ dynamic testing เครื่องมือนี้สามารถจะหา post cyclic behavior ของดินได้ เพื่อหาค่าของ strength และค่า stiffness ของตัวอย่างดินได้มีงานค้นคว้าของ Yasuhare et al(1997) และของ Yamazaki and Zen (1991) , Yasuhara et al. (1992)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 ศึกษาความรู้ทางด้านพลศาสตร์ปฐพี (Soil Dynamics) ทบทวนทฤษฎี (Theory) และผลงานในอดีต (Literature Review)

ทบทวนงานวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศึกษาทฤษฎีด้านพลศาสตร์ปฐพี (Soil Dynamics) ซึ่งได้แก่ การเคลื่อนตัวของมวลดิน (Ground Motion) นิยามที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว (Definition of some earthquake Related Term) ขนาดของการเกิดแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude) ลักษณะการเคลื่อนตัวของหินในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว (Characteristic of Rock Motion During an Earthquake) คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่มีความถูกต้อง (Accuracy of the dynamic soil property of site) แบบจำลอง Linear Viscoelastic ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของแรงแบบวัฏจักร (The General Expression of Cyclic Stress strain Relationship) Hystertic Stress-Strain curve แบบจำลองที่แทนระบบด้วยสปริงและ Dastpot (Model representation by the spring dashpot system) แบบจำลองของเคลวิน (Kelvin Model) แบบจำลองของแมกซ์เวล (Maxwell Model) วิธีการหาคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์ การวัดค่าความเร็วคลื่นแบบเฉือนในสนาม (measurement of in – situ shear wave velocity) การหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ (Measurement of dynamic properties in laboratory) การคำนวณหาโดยใช้สูตรเอ็มไพริคัล (Empirical) ทางเดินหน่วยแรง (stress path)

3.2 เก็บตัวอย่างทดสอบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่นำมาใช้สำหรับทดสอบเพื่อศึกษาวิจัยคือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

3.2.2 วิธีการเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่าง

วิธีการเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่างดินสำหรับนำมาทดสอบคือ การเก็บตัวอย่างทดสอบด้วยกระบอกบาง (Thin Wall Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และความยาวกระบอก 90 ซม. จะมาทำการเก็บตัวอย่างดินทุกระดับความลึก 1.0 ม. เริ่มเก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 4 ม. และความลึกของหลุมเจาะสุดท้ายประมาณ 16 ม. ซึ่งอยู่ในช่วงดิน soft clay และ medium clay นำดินตัวอย่างห่อหุ้มด้วยกระดาษฟรอยด์และเคลือบด้วยซีฟิ่งอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้เสียปริมาณความชื้นในดินและขนส่งในห้องปฏิบัติการอย่างระมัดระวังให้กระทบกระเทือนน้อยที่สุด

3.3 วิธีการทดสอบ

ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ทดสอบแบบ Cyclic Triaxial โดยใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นดิน Soft Clay และ Medium Clay วิธีการทดสอบจะทดสอบแบบหน่วยแรงคงที่ (Stress Controlled) ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition)

1. นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบและทำให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ
2. การอัดตัวคายน้ำจะเป็นแบบหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropically) ตามระดับความลึกของดิน (consolidated pressure)
3. ให้ความดันที่อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (overconsolidated ratio, OCR) ที่ OCR มีค่า 1 และที่ค่า 2, 6 ตามลำดับ
4. ใช้ความถี่ (frequency) ในการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที เพิ่มขนาดของคลื่น (Amplitude) ของน้ำหนักแรงเฉือนแบบ Stage cycle amplitude โดยในแต่ละ stage จะให้จำนวนรอบของน้ำหนักครั้งละ 15 รอบ/stage โดยจะไม่ระบายน้ำ (undrained) ในแต่ละขั้นของการเพิ่มขนาดหน่วยแรง (fully excess pore water pressure) จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ

3.4 ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

3.4.1 การทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์

1. นำตัวอย่างทดสอบที่เก็บไว้แบบไม่กระทบกระเทือนออกจากซีฟิ่งและแผ่นอลูมิเนียม เก็บความชื้นมาตัดแต่ง (trim) จนได้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.50 ซม. สูงประมาณ 7.00 ซม. วัดขนาดและน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่น (grammar) ของดิน ดินส่วนที่เหลือจากการตัดแต่งตัวอย่างนำไปหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดสอบ

2. นำตัวอย่างทดสอบเข้าแทนเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน โดยด้วยกระดาดาชกรองพันรอบตัวอย่างทดสอบช่วยในการระบายน้ำทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำได้เร็วขึ้นรองด้านบนและด้านล่างก่อนวางหินปูนเพื่อไม่ให้ดินสัมผัสกับหินปูนซึ่งอาจทำให้ดินไปอุดตัวช่องในหินปูน
3. หุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยถุงยาง (membrane) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำจากกระบอกน้ำ (cell mold) เข้าไปในตัวอย่างทดสอบ ติดตั้งหมวกบน (top cap) รััดถุงยางด้วยยางรััด (o ring) ทั้งด้านบนและล่างตำแหน่งละสองเส้น
4. ติดตั้ง cell mold และเติมน้ำให้เต็ม
5. จัดก้านทดสอบรับแรง (piston) ให้สัมผัสตัวอย่าง ตั้งค่าเกจวัดการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ เกจวัดแรง และเกจวัดแรงดันโพรงให้มีค่าเป็นศูนย์
6. ทำให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated sample) โดยการดูด (suction) อากาศในตัวอย่างทดสอบที่ความดัน -80 ถึง -100 kPa โดยแรงดันภายนอกตัวอย่างทดสอบมากกว่าประมาณ 5 kPa ใช้เวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัดแรงดันน้ำให้ตัวอย่างทดสอบโดยใช้แรงดันกับตัวอย่างทดสอบ back pressure ที่ประมาณ 200 kPa และ cell pressure ประมาณ 205 kPa ใช้เวลา 6-10 ชั่วโมง (ในการเพิ่มหรือลดความดันจะต้องเพิ่มครั้งละ 20-30 kPa สลับกันระหว่าง cell pressure และ back pressure จนกระทั่งถึงความดันที่ต้องการ)
7. ทำการตรวจสอบระดับของความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างทดสอบ โดยตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ B โดยปิดวาล์วระบายน้ำแล้วเพิ่ม cell pressure ($\Delta\sigma_3$) ประมาณ 10-20 kPa วัดค่าแรงดันโพรงที่เพิ่มขึ้น (ΔU) โดยค่าพารามิเตอร์ B จะต้องมีความน้อยกว่า 95%
$$(\text{ค่าพารามิเตอร์ B } (\%) = (\Delta\sigma_3 / \Delta U) \times 100)$$
8. เมื่อตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ทำการทดสอบในขั้นการอัดตัวคายน้ำ (consolidated sample) โดยบันทึกค่าระดับน้ำเริ่มต้นของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ (volume change buret) หลังจากนั้นเพิ่มค่า cell pressure ที่ต้องการอัดตัวคายน้ำ เปิดวาล์วระบายน้ำพร้อมทั้งจับเวลาและบันทึกค่าระดับน้ำของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ
9. นำข้อมูลที่ได้จาก เวลาและบันทึกค่าระดับน้ำของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ มาวาดกราฟการอัดตัวคายน้ำ โดยแกน X เป็นแกน Log scale ของเวลา แกน Y เป็นแกน Normal scale ของ ปริมาตร (การเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำที่ได้จากหลอดวัด)
10. ลากเส้นสัมผัสกราฟต่อเนื่องจนตัดกับแกน X และวัดจากค่าที่ตัดแกน X เพิ่มอีก 0.3 เท่าของค่าที่ได้จากเส้นกราฟตัดแกน X จะได้จุดปลายเส้นกราฟ ลากเส้นจากจุดปลาย

กราฟไปยังจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเดิมและจะได้เส้นกราฟใหม่เป็นเส้นแสดงจุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ โดยเวลาของการสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำหาค่าจากค่าแกน X ที่ได้จากจุดตัดของกราฟการอัดตัวคายน้ำที่วาดในตอนแรกตัดกับเส้นสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ

11. เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้ว ทำการทดสอบในขั้นตอนการให้แรงเฉือนกับตัวอย่างทดสอบ (shearing) บันทึกค่าเกจวัดการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ เกจวัดแรง และเกจวัดแรงดันโพรงสุดท้ายก่อนการ shearing หลังจากนั้นตั้งค่าเกจทั้งหมดให้มีค่าเป็นศูนย์ ใช้อัตราในการให้แรงเฉือนที่อัตรา 0.01 มม./นาที่ ปิดวาล์วระบายน้ำ เริ่มทำการทดสอบการรับแรงเฉือนพร้อมทั้งบันทึกค่าที่เกจทั้งหมดในทุกช่วงเวลาจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ

3.4.2 การทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์

1. นำตัวอย่างทดสอบที่เก็บไว้แบบไม่กระทบกระเทือนออกจากซีฟิ่งและแผ่นอลูมิเนียมเก็บความชื้นมาตัดแต่ง (trim) จนได้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.50 ซม. สูงประมาณ 7.00 ซม. วัดขนาดและน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่น (grammar) ของดิน ดินส่วนที่เหลือจากการตัดแต่งตัวอย่างนำไปหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดสอบ
2. นำตัวอย่างทดสอบเข้าแท่นเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน โดยด้วยกระดาด مخروطพันรอบตัวอย่างทดสอบช่วยในการระบายน้ำทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำได้เร็วขึ้นร่องด้านบนและด้านล่างก่อนวางหินพรุนเพื่อไม่ให้ดินสัมผัสกับหินพรุนซึ่งอาจทำให้ดินไปอุดตัวช่องในหินพรุน
3. หุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยถุงยาง (membrane) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำจากกระบอกน้ำ (cell mold) เข้าไปในตัวอย่างทดสอบ ติดตั้งหมวกบน (top cap) รั้วถุงยางด้วยยางรัด (o ring) ทั้งด้านบนและล่างตำแหน่งละสองเส้น
4. ติดตั้ง cell mold และเติมน้ำให้เต็ม
5. จัดก้านทดสอบรับแรง (piston) ให้สัมผัสตัวอย่าง ตั้งค่าเกจวัดการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ เกจวัดแรง และเกจวัดแรงดันโพรงให้มีค่าเป็นศูนย์
6. ทำให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated sample) โดยการดูด (suction) อากาศในตัวอย่างทดสอบที่ความดัน -80 ถึง -100 kPa โดยแรงดันภายนอกตัวอย่างทดสอบมากกว่าประมาณ 5 kPa ใช้เวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัดแรงดันน้ำให้ตัวอย่างทดสอบโดยใช้แรงดันกับตัวอย่างทดสอบ back pressure ที่ประมาณ 200 kPa และ cell pressure ประมาณ 205 kPa ใช้เวลา 6-10 ชั่วโมง (ในการเพิ่มหรือลดความ

- ดันจะต้องเพิ่มครั้งละ 20-30 kPa สลับกันระหว่าง cell pressure และ back pressure จนกระทั่งถึงความดันที่ต้องการ)
7. ทำการตรวจสอบระดับของความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างทดสอบ โดยตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ B โดยปิดวาล์วระบายน้ำแล้วเพิ่ม cell pressure ($\Delta\sigma_3$) ประมาณ 10-20 kPa วัดค่าแรงดันโพรงที่เพิ่มขึ้น (ΔU) โดยค่าพารามิเตอร์ B จะต้องมามีค่าไม่น้อยกว่า 95% (ค่าพารามิเตอร์ B (%) = $(\Delta\sigma_3 / \Delta U) \times 100$)
 8. เมื่อตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ทำการทดสอบในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (consolidated sample) โดยบันทึกค่าระดับน้ำเริ่มต้นของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ (volume change buret) หลังจากนั้นเพิ่มค่า cell pressure ที่ต้องการอัดตัวคายน้ำ เปิดวาล์วระบายน้ำพร้อมทั้งจับเวลาและบันทึกค่าระดับน้ำของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ
 9. นำข้อมูลที่ได้จาก เวลาและบันทึกค่าระดับน้ำของหลอดวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ มาวาดกราฟการอัดตัวคายน้ำ โดยแกน X เป็นแกน Log scale ของเวลา แกน Y เป็นแกน Normal scale ของ ปริมาตร (การเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำที่ได้จากหลอดวัด)
 10. ลากเส้นสัมผัสกราฟต่อเนื่องจนตัดกับแกน X และวัดจากค่าที่ตัดแกน X เพิ่มอีก 0.3 เท่าของค่าที่ได้จากเส้นกราฟตัดแกน X จะได้จุดปลายเส้นกราฟ ลากเส้นจากจุดปลายกราฟไปยังจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเดิมและจะได้เส้นกราฟใหม่เป็นเส้นแสดงจุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ โดยเวลาของการสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำหาจากค่าแกน X ที่ได้จากจุดตัดของกราฟการอัดตัวคายน้ำที่วาดในตอนแรกตัดกับเส้นสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ
 11. เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้ว ทำการทดสอบในขั้นตอนการให้แรงเฉือนกับตัวอย่างทดสอบ (shearing) บันทึกค่าเกจวัดการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ เกจวัดแรง และเกจวัดแรงดันโพรงสุดท้ายก่อนการ shearing หลังจากนั้นตั้งค่าเกจทั้งหมดให้มีค่าเป็นศูนย์ เลือกความถี่ของการทดสอบที่ 0.1 หรือ 0.01 Hz และเลือกรูปแบบของการให้น้ำหนักเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ (sine wave) ให้ขนาดน้ำหนักตั้งแต่ 30 N. (peak to peak) ครั้งละ 15 รอบ ปิดวาล์วระบายน้ำและเริ่มทำการทดสอบการรับแรงเฉือนพร้อมทั้งบันทึกค่าที่เกจทั้งหมดในทุกช่วงเวลา เมื่อทดสอบจนครบ 15 รอบแล้ว ให้เพิ่มขนาดน้ำหนักอีกครั้งละ 10 – 20 นิวตัน (ขึ้นอยู่กับช่วงของความเครียดตามแนวแกน) จำนวน 15 รอบเท่ากัน ทำการทดสอบเช่นเดิมจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ

ตารางที่ 3.1 แสดงรายการทดสอบของการวิจัย

Name of Test	Type of Test	PI (%)	OCR	Effective Confining Pressure (kPa)	Rate of Shearing
ST63-1-34	Statics	63	1	34	0.01mm./min.
ST55-1-52	Statics	55	1	52	0.01mm./min.
ST43-1-72	Statics	43	1	72	0.01mm./min.
DN63F-1-34	<u>Dynamics</u>	63	1	34	0.1 Hz
DN55F-1-52	<u>Dynamics</u>	55	1	52	0.1 Hz
DN43F-1-72	<u>Dynamics</u>	43	1	72	0.1 Hz
DN63S-1-34	<u>Dynamics</u>	63	1	34	0.01 Hz
DN55S-1-52	<u>Dynamics</u>	55	1	52	0.01 Hz
DN43S-1-72	<u>Dynamics</u>	43	1	72	0.01 Hz
DN63S-1-400	<u>Dynamics</u>	63	1	400	0.01 Hz
DN55S-1-400	<u>Dynamics</u>	55	1	400	0.01 Hz
DN43S-1-400	<u>Dynamics</u>	43	1	400	0.01 Hz
DO63S-2-200	<u>Dynamics</u>	63	2	200	0.01 Hz
DO55S-2-200	<u>Dynamics</u>	55	2	200	0.01 Hz
DO43S-2-200	<u>Dynamics</u>	43	2	200	0.01 Hz
DO63S-6-67	<u>Dynamics</u>	63	6	67	0.01 Hz
DO55S-6-67	<u>Dynamics</u>	55	6	67	0.01 Hz
DO43S-6-67	<u>Dynamics</u>	43	6	67	0.01 Hz

ตารางที่ 3.2 แสดงรายการทดสอบอิทธิพลของความถี่และ Plasticity Index

Plasticity Index (%)	Rate of Cyclic Load 0.1 Hz	Rate of Cyclic Load 0.01 Hz
63	DN63F-1-34	DN63S-1-34
55	DN55F-1-52	DN55S-1-52
43	DN43F-1-72	DN43S-1-72

ตารางที่ 3.3 แสดงรายการทดสอบอิทธิพลของสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) และ Plasticity Index (Rate of Cyclic Load 0.01 Hz)

Plasticity Index (%)	OCR			
	1 (at σ'_{vo})	1 (at $\sigma'_3=400$ kPa)	2 (at $\sigma'_3=200$ kPa)	6 (at $\sigma'_3=67$ kPa)
63	DN63S-1-34	DN63S-1-400	DO63S-2-200	DO63S-6-67
55	DN55S-1-52	DN55S-1-400	DO55S-2-200	DO55S-6-67
43	DN43S-1-72	DN43S-1-400	DO43S-2-200	DO43S-6-67

ตารางที่ 3.4 แสดงรายการเปรียบเทียบแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์

Plasticity Index (%)	Dynamics Test (Rate of Cyclic Load 0.1 Hz)	Dynamics Test (Rate of Cyclic Load 0.01 Hz)	Statics Test (rate 0.01 mm./min.)
63	DN63F-1-34	DN63S-1-34	ST63-1-34
55	DN55F-1-52	DN55S-1-52	ST55-1-52
43	DN43F-1-72	DN43S-1-72	ST43-1-72

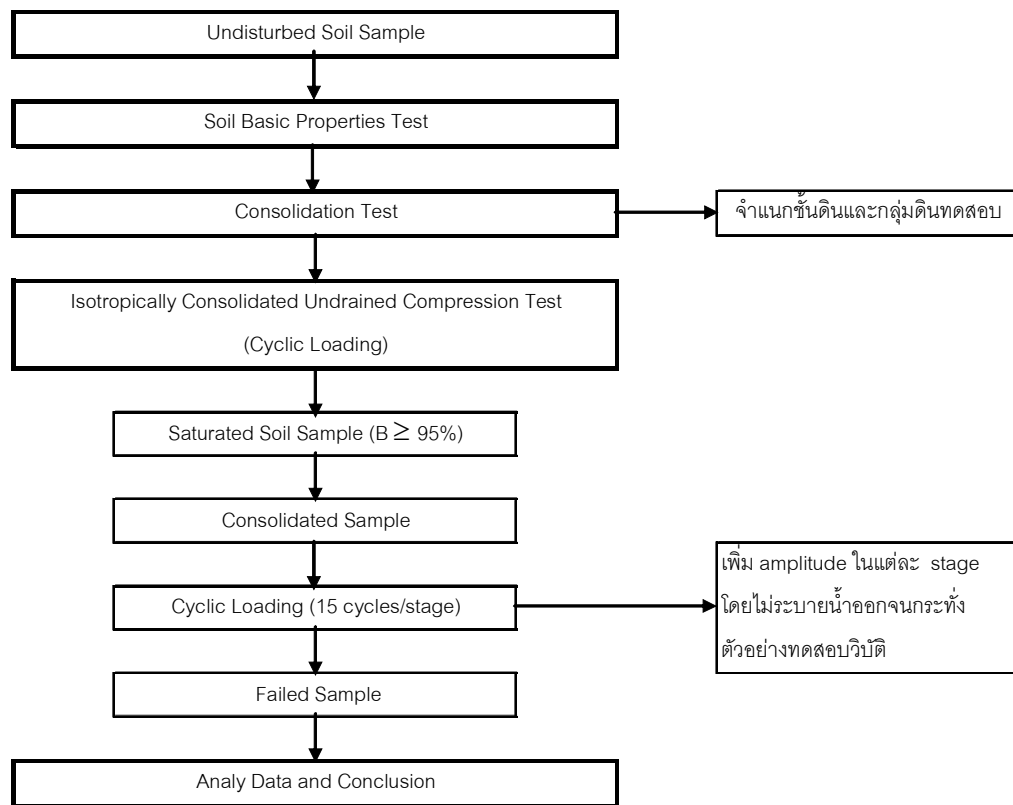
ตารางที่ 3.5 แสดงรายการทดสอบอิทธิพลของ Effective Confining Pressure และ Plasticity Index (Rate of Cyclic Load 0.01 Hz)

Plasticity Index (%)	OCR=1 (at σ'_{vo})	OCR=1 (at $\sigma'_3=400$ kPa)
63	DN63F-1-34	DN63S-1-400
55	DN55F-1-52	DN55S-1-400
43	DN43F-1-72	DN43S-1-400

หมายเหตุ ความหมายชื่อสัญลักษณ์ของการทดสอบ

- อักษรตัวที่ 1 และ 2 คือประเภทของการทดสอบ
 - DN = Dynamics Test, Normally Consolidated Clay
 - DO = Dynamics Test, Over Consolidated Clay
 - ST = Statics Test
- ตัวเลขตัวที่ 3 คือ Plasticity Index (%) (63%, 55%, 43%)
- อักษรตัวที่ 4 คือ Rate of Cyclic Load ($F=0.1\text{Hz}$, $S=0.01\text{ Hz}$)
- ตัวเลขตัวที่ 5 คือค่า OCR (1, 2, 6)
- ตัวเลขตัวที่ 6 คือค่า Effective Confining Pressure (43, 52, 67, 72, 200, 400 kPa)

เช่น DO43S-2-200 หมายถึง Dynamics Test, Over Consolidated Clay, $PI = 43\%$, Rate of Cyclic Load = 0.01 Hz , OCR = 2, Effective Confining Pressure = 200 kPa



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการทดสอบตัวอย่าง

บทที่ 4

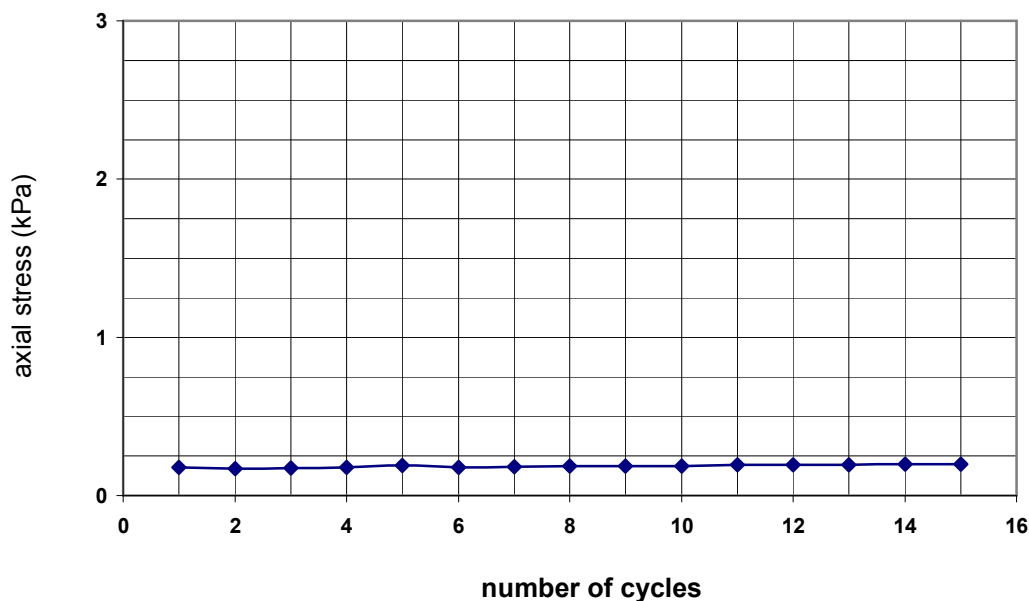
ผลการทดสอบ

การทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร ผลการทดสอบที่ได้เป็นผลการทดสอบที่แสดงถึงพฤติกรรมกำลังรับน้ำหนักเฉือนแบบพลศาสตร์ของดินจากอิทธิพลของความถี่ของการให้น้ำหนัก อิทธิพลของความเป็นดินเหนียว (plastic) และอิทธิพลของประวัติการอัดตัวคายน้ำ จากพฤติกรรมและ parameter ที่ทำการศึกษาคือ การเสียรูปในระหว่างที่รับน้ำหนัก ทางเดินหน่วยแรง การสะสมของแรงดันโพรง การเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนแอมป์

โดยทำการทดสอบกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่เก็บตัวอย่างจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ที่ระดับความลึก 7, 10 และ 14 เมตร ซึ่งดินมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้คือ มีค่า Plasticity Index 43-63 % มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 มีความชื้นเริ่มต้น 72-95%

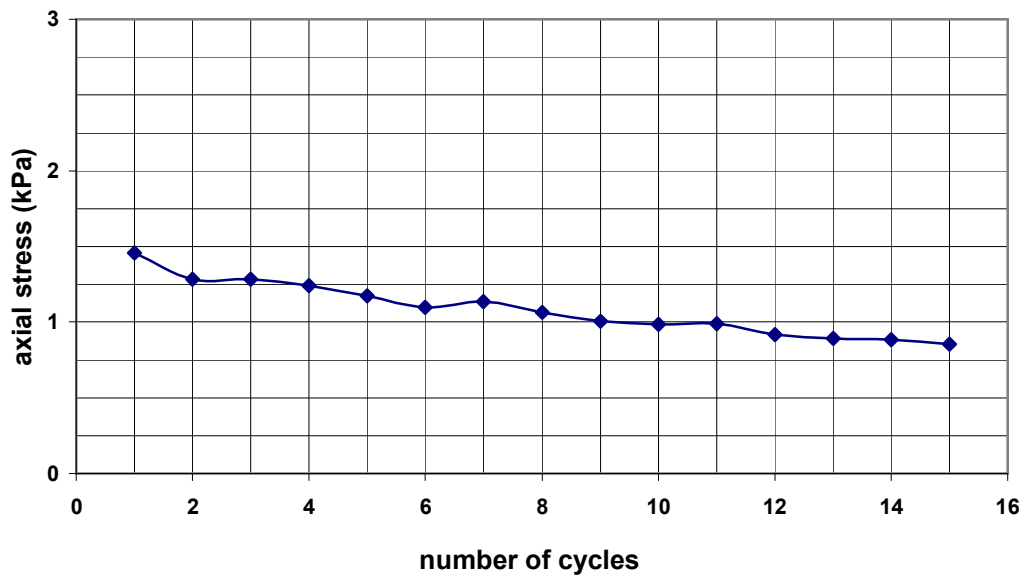
4.1 พฤติกรรมของหน่วยแรง

พฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนจะพิจารณาจากกราฟค่าหน่วยแรงตามแนวแกน (แกน Y) กับจำนวนรอบ (แกน X) โดยที่รูปที่ 4.1 และ 4.3 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร (DN63F-1-34) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 2.4% ตามลำดับรูปที่ 4.2 และ 4.4 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร (DN63S-1-34) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 5.3% แกน Y เป็นกราฟของหน่วยแรงที่ได้จากการรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบโดยค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงทั้งรอบ (อัดและขยาย) ของการรับน้ำหนักในหนึ่งรอบของการทดสอบ ส่วนแกน X เป็นลำดับรอบของการรับน้ำหนักที่ตัวอย่างทดสอบได้รับน้ำหนัก



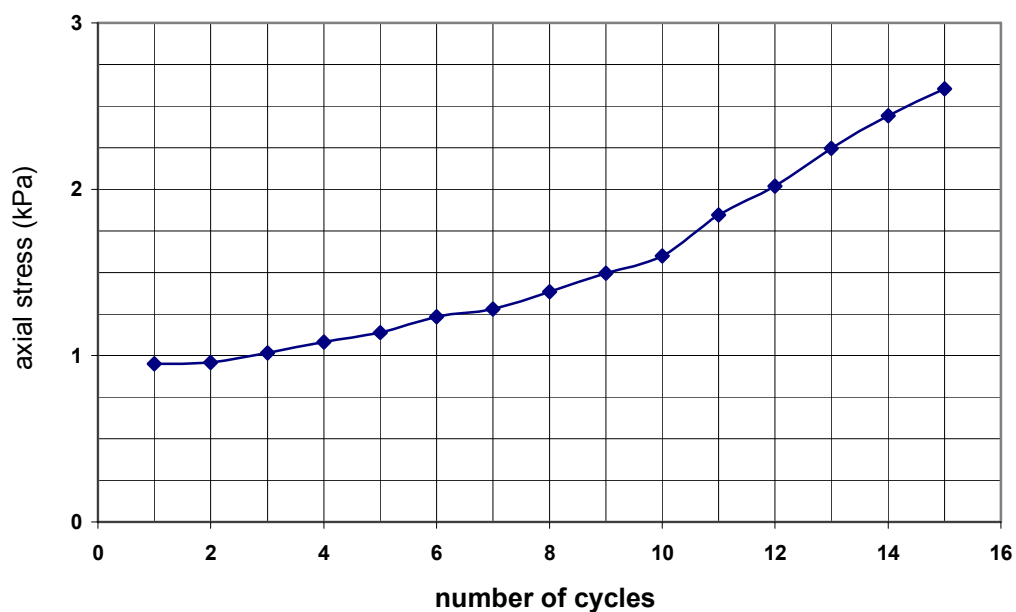
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบ ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่าๆกันตลอดทั้ง 15 รอบของการรับน้ำหนักซึ่งแสดงถึงพฤติกรรม การรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



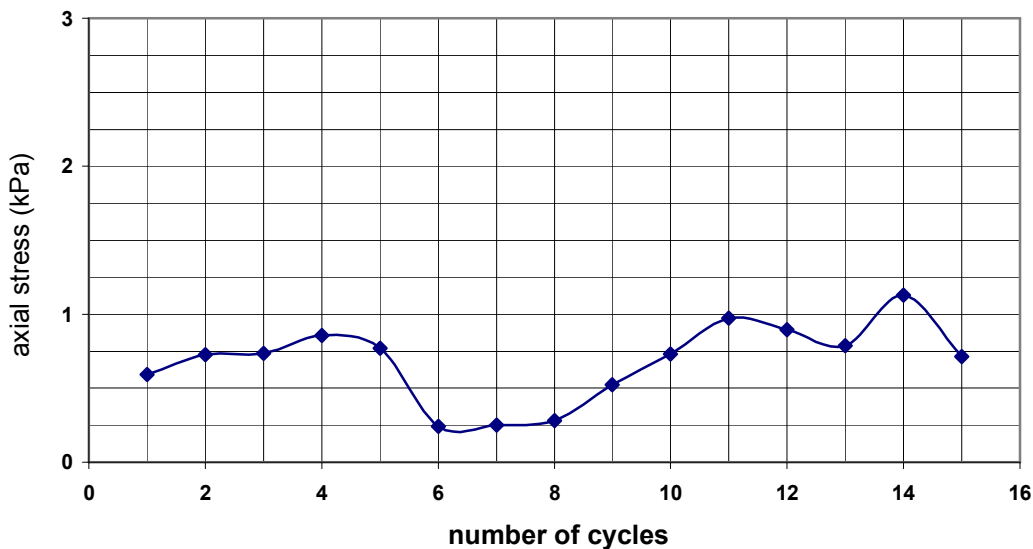
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบ ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63S-1-34)

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อรอบของการให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นทั้ง 15 รอบของการรับน้ำหนักซึ่งแสดงถึงตัวอย่างทดสอบสามารถรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic ได้ (เมื่อพิจารณาร่วมกับ hysteresis loop)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบ ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรอบของการให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นทั้ง 15 รอบของการรับน้ำหนักซึ่งตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมของการเสียรูปตัวอย่างทดสอบ (เมื่อพิจารณาร่วมกับ hysteresis loop, axial strain)



กราฟที่ 4.4 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบ ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3% (DN63S-1-34)

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงค่าหน่วยแรงตามแนวแกนกับจำนวนรอบของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนมีค่าของหน่วยแรงไม่คงที่เมื่อจำนวนรอบของการให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นและมีค่าน้อยมากบางรอบของการรับน้ำหนักมีค่าเพียง 0.2 kPa ซึ่งแสดงถึงตัวอย่างทดสอบได้วิบัติแล้วจึงทำให้ค่าหน่วยแรงแกว่งไปมาและมีค่าน้อยมาก

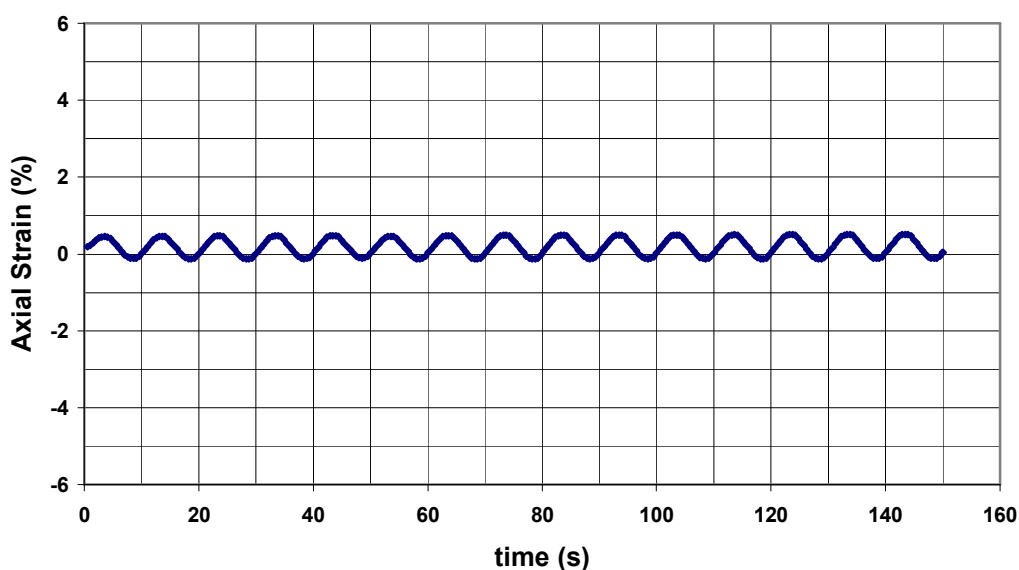
จากกราฟรูปที่ 4.1, 4.2, และ 4.3 พฤติกรรมของหน่วยแรงตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อจำนวนรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เมื่อพิจารณาทั้ง 15 รอบ) ซึ่งในช่วงดังกล่าวจะไม่ทราบพฤติกรรมเช่น การเสียรูป การyieldตัว การวิบัติ อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าหน่วยแรงเป็นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงในหนึ่งรอบดังนั้นหาก Hysteresis Loop มีการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการสะสมของความเครียด(strain relaxing) ก็จะทำให้ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นจึงต้องนำกราฟพฤติกรรมอื่นๆมาพิจารณาด้วยจึงจะสามารถทราบพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้ ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงถึงพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอย่างชัดเจน

4.2 พฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกน

พฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะพิจารณาจากกราฟความเครียดตามแนวแกน (แกน Y) กับเวลา (แกน X) โดยที่รูปที่ 4.5 และ 4.7 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร (DN63F-1-34) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 2.4% ตามลำดับ

รูปที่ 4.6 และ 4.8 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร (DN63S-1-34) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 5.3% โดยในการทดสอบกำหนดให้ความเครียดตามแนวแกนมีเคลื่อนที่

ขึ้นลงในทิศทางด้านบวกและลบตามแกน Y โดยที่เมื่อเส้นกราฟเคลื่อนที่ขึ้น (ทิศทางบวก) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงอัด (compression) ทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียรูปแบบถูกอัดตัวทำให้ ตัวอย่างทดสอบหดตัวและเมื่อเส้นกราฟเคลื่อนที่ลง (ทิศทางลบ) หมายถึงตัวอย่างทดสอบได้รับแรง ดึง (tension) ทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียรูปแบบถูกขยายตัวทำให้ตัวอย่างทดสอบยืดตัว

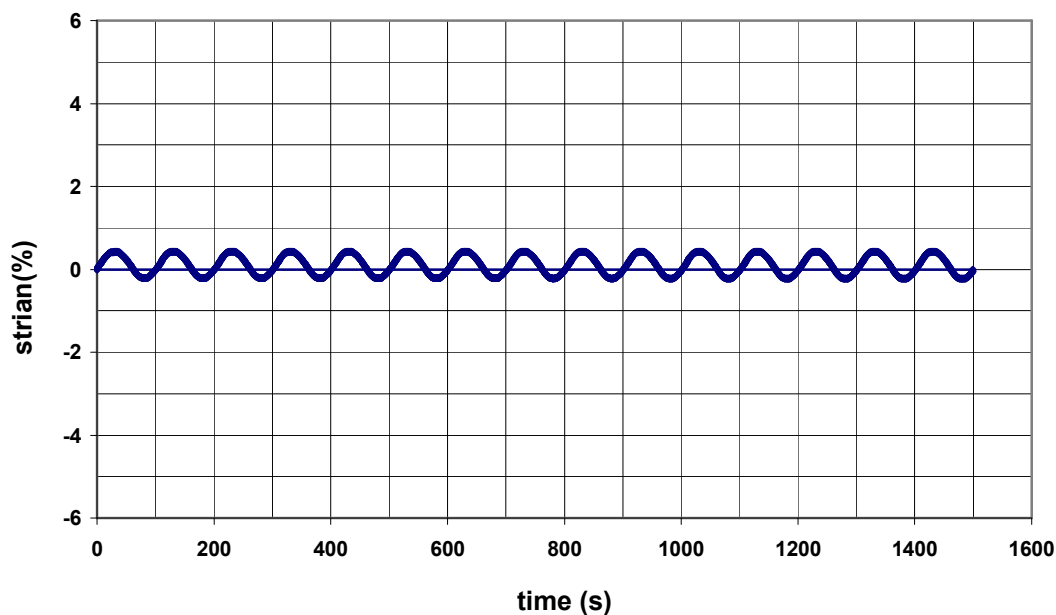


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลาของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตาม

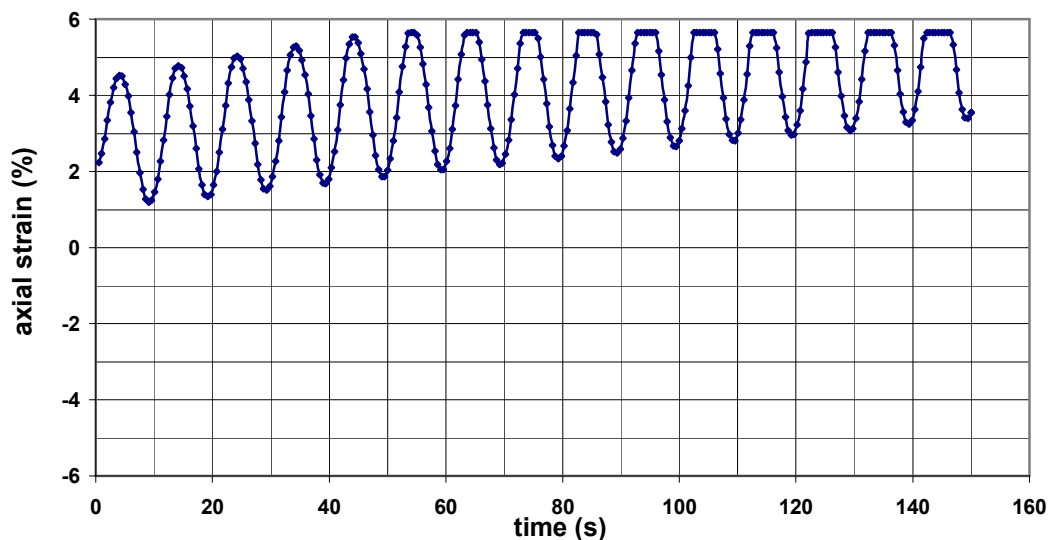
แนวแกน 0.6% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยที่กราฟแสดงการความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนทางด้านอัดและด้านขยายมีค่าประมาณ 0.5% และ 0.15% ของความเครียดตามแนวแกนตามลำดับ

โดยที่ค่าความเครียดตามแนวแกนมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมีค่าเท่ากันทั้ง 15 รอบ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



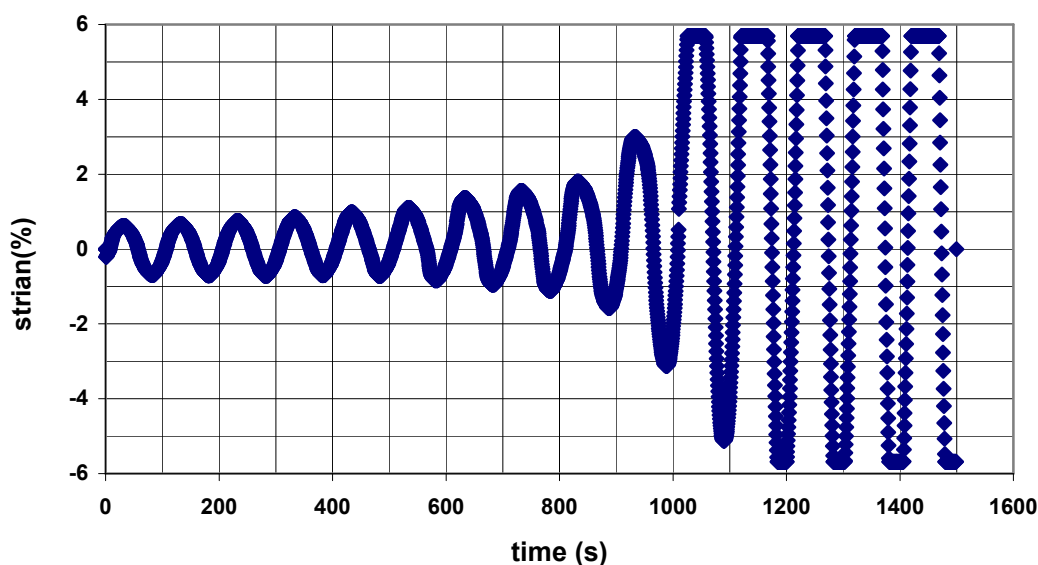
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63S-1-34)

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลาของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยที่กราฟแสดงการความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนทางด้านอัดและด้านขยายมีค่าประมาณ 0.4% และ 0.23% ของความเครียดตามแนวแกน ตามลำดับ โดยที่ค่าความเครียดตามแนวแกนมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมีค่าเท่ากันทั้ง 15 รอบ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลาของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยที่กราฟแสดงความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนทางด้านอัดและด้านขยายมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเครียดตามแนวแกนมีค่าสูงสุดที่รอบการให้น้ำหนักรอบสุดท้ายแต่เนื่องจากตั้งแต่รอบที่ 7 เส้นกราฟทางด้านอัดมีค่ามากกว่าช่วงระยะของเครื่องวัดระยะ (LVDT) จึงทำให้กราฟที่จุดสูงสุดมีลักษณะเป็นยอดตัดเป็นเส้นตรง ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่รอบแรกของการให้น้ำหนักและในรอบต่อมาค่าความเครียดตามแนวที่จุดต่ำสุดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบนั้นคือพฤติกรรมที่ตัวอย่างทดสอบยึดตัวกลับมาจากรอบการให้น้ำหนักเดิมแล้วกลับมาไม่ถึงจุดต่ำสุดของรอบก่อนหน้านี้เนื่องจากดินไม่สามารถนำหนักได้แต่เมื่อนำค่าผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด (เสียรูป) ของแต่ละรอบของการรับน้ำหนักมาพิจารณาแล้วจะพบว่า ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ได้ผ่านจุดคลาก (Yield) และแสดงว่าตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



กราฟที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วย อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3% (DN63S-1-34)

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลาของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยที่กราฟแสดงความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนทางด้านอัดและด้านขยายมีค่าเพิ่มมากโดยแบ่งได้เป็นสองช่วงคือในช่วงแรกตั้งแต่รอบที่ 1 ถึงรอบที่ 9 โดยกราฟแสดงความเครียดตามแนวแกนทางด้านอัดที่จุดต่ำและด้านขยายที่จุดสูงสุดของแต่ละรอบของการให้น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ได้ผ่านจุดคลาก ในช่วงที่สองตั้งแต่รอบที่ 10 ถึงรอบที่ 15 โดยกราฟแสดงความเครียดตามแนวแกนทางด้านอัดที่จุดต่ำและด้านขยายที่จุดสูงสุดของแต่ละรอบของการให้น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากตามรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการวิบัติ (Fail) ของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, และ 4.8 ทั้งหมด ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 7 เมตรจากผิวดิน โดยเปรียบเทียบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที จากกราฟแสดงผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมความเครียดตามแนวแกน

ของการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรสามารถแบ่งตามพฤติกรรมได้เป็น 2 ช่วงโดยแบ่งตามความเครียดในแนวแกนคือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% ช่วงสองเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนมากกว่า 1% เมื่อพิจารณาพฤติกรรมกราฟความเครียดตามแนวแกน (axial strain) กับเวลา ในกราฟรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, และ 4.8 พฤติกรรมของกราฟความเครียดตามแนวแกนจะมีแนวโน้มคงที่ในแต่ละรอบของการรับน้ำหนักเมื่อเวลา เพิ่มขึ้น (จำนวนรอบที่ให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น) ในช่วงความเครียดตามแนวแกนอยู่ในช่วงที่ความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% แต่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนมากกว่า 1% ความเครียดตามแนวแกนในแต่ละรอบของการรับน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากทดสอบทั้งที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที มีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน

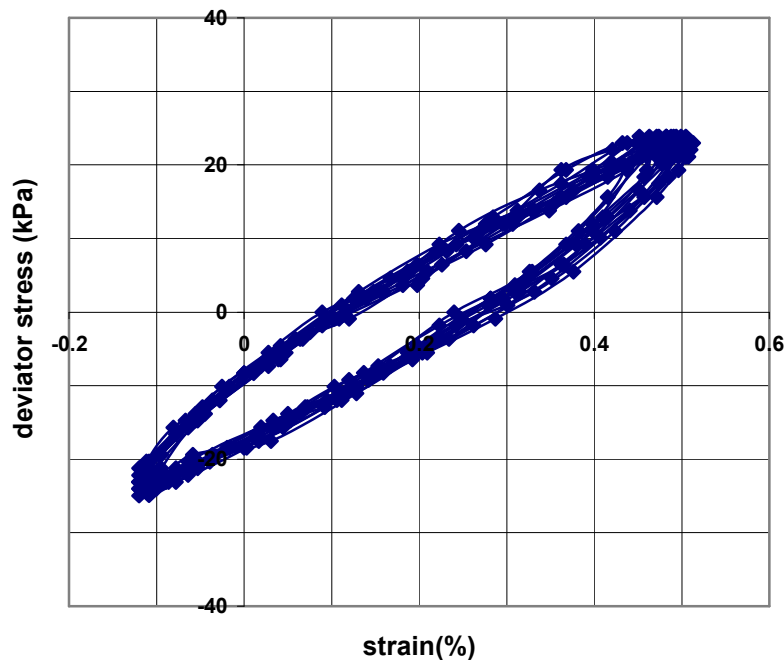
ส่วนการทดสอบที่ค่า $PI=55\%$ และ $PI=43\%$ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 10 และ 13 เมตรจากผิวดินตามลำดับ โดยเปรียบเทียบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาทีนั้นจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับที่ $PI=63\%$ (ความลึก 7 เมตร)

4.3 พฤติกรรมของ Hysteric Stress-Strain Curve

พฤติกรรมของกราฟแสดงค่า Hysteresis Loop จะพิจารณาจากกราฟลักษณะของ Loop ที่เกิดจากเส้นกราฟจากหน่วยแรง (แกน Y) และ ความเครียดตามแนวแกน (แกน X) โดยที่รูปที่ 4.9 และ 4.11 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 2.4% และรูปที่ 4.6 และ 4.8 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% และ 5.3%

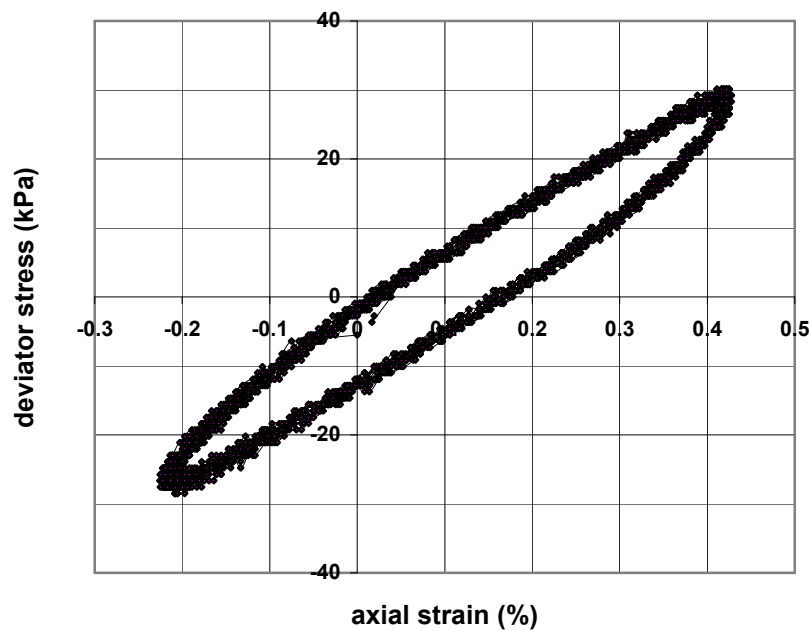
โดยในการทดสอบกำหนดพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยที่ เมื่อเส้นกราฟเคลื่อนที่ขึ้น (ทิศทางบวก) หมายถึงตัวอย่างทดสอบได้รับหน่วยแรงอัด (compression stress) ทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียรูปแบบถูกอัดตัวทำให้ตัวอย่างทดสอบหดตัว และเมื่อเส้นกราฟเคลื่อนที่ลง (ทิศทางลบ) หมายถึงตัวอย่างทดสอบได้รับหน่วยแรง

ดึง (tension stress) ทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียรูปแบบถูกขยายตัวทำให้ตัวอย่างทดสอบยืดตัว ภายใต้การรับน้ำหนักในแต่ละรอบทำให้ได้กราฟรูปวงรีในแต่ละรอบของการให้น้ำหนักซึ่งเรียกว่า Hysteric Stress-Strain Curve โดยในแต่ละวงเรียกว่า Loop



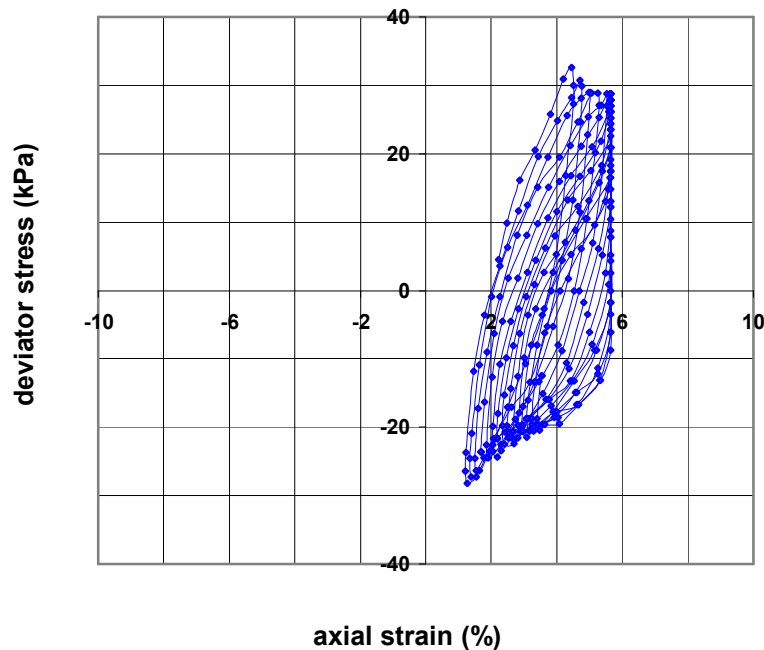
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่า Hysteresis Loop ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% จากการทดสอบพบว่า Hysteric Stress-Strain Curve ของรูปที่ 4.5 มีพฤติกรรมคือมีค่าหน่วยแรงสูงสุด (หน่วยแรงอัด) ประมาณ 24 kPa มีค่าหน่วยแรงต่ำสุด (หน่วยแรงดึง) ประมาณ -25 kPa และมีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนสูงสุด (ทางด้านอัด) ประมาณ 0.52% มีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนต่ำสุด (ทางด้านขยาย) มีค่าประมาณ -0.13% โดยที่ Hysteric Stress-Strain Curve ทั้ง 15 Loop มีขนาดของวงรีเท่าๆกันทั้งหมดซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



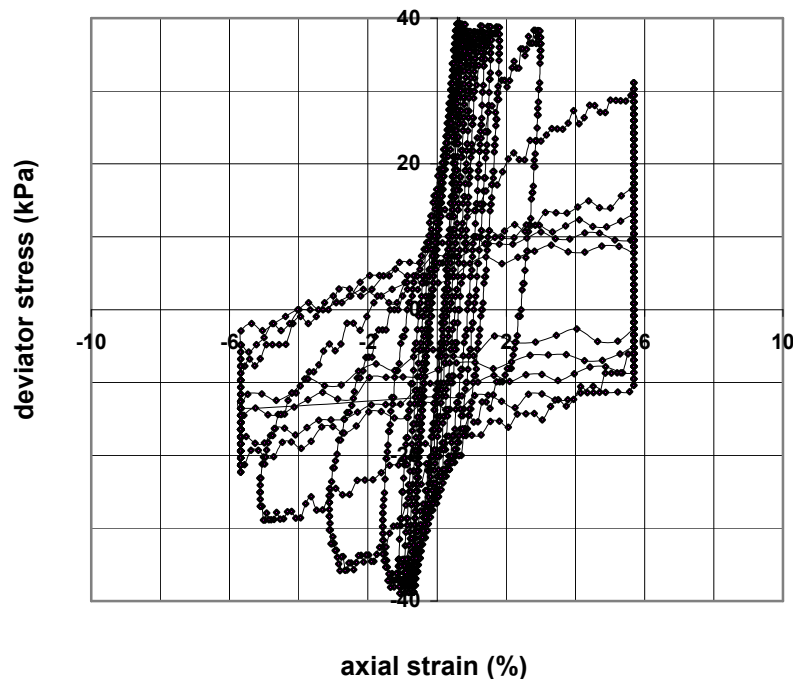
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า Hysteresis Loop ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% (DN63S-1-34)

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 0.6% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักในแต่ละรอบทำให้ได้กราฟรูปร่างในแต่ละรอบของการให้น้ำหนักซึ่งเรียกว่า Hysteric Stress-Strain Curve พบว่า Hysteric Stress-Strain Curve ของรูปที่ 4.10 มีพฤติกรรมคือมีค่าหน่วยแรงสูงสุด (หน่วยแรงอัด) ประมาณ 30 kPa มีค่าหน่วยแรงต่ำสุด (หน่วยแรงดึง) ประมาณ -29 kPa และมีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนสูงสุด (ทางด้านอัด) ประมาณ 0.42% มีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนต่ำสุด (ทางด้านขยาย) มีค่าประมาณ -0.23% โดยที่ Hysteric Stress-Strain Curve ทั้ง 15 Loop มีขนาดของวงรีเท่าๆกันทั้งหมดซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า Hysteresis Loop ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% (DN63F-1-34)

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63F-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.1 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 2.4% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักในแต่ละรอบทำให้ได้กราฟรูปวงรีในแต่ละรอบของการให้น้ำหนักซึ่งเรียกว่า Hysteric Stress-Strain Curve โดยในแต่ละวงเรียกว่า Loop จากการทดสอบพบว่า Hysteric Stress-Strain Curve ของรูปที่ 4.7 มีพฤติกรรมคือมีค่าหน่วยแรงสูงสุด (หน่วยแรงอัด) ตั้งแต่ 16 ถึง 32 kPa มีค่าหน่วยแรงต่ำสุด (หน่วยแรงดึง) ตั้งแต่ -20 ถึง -28 kPa และมีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนสูงสุด (ทางด้านอัด) ตั้งแต่ 4.2 ถึง 5.8 % มีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนต่ำสุด (ทางด้านขยาย) ตั้งแต่ 1.1 ถึง 5 kPa โดยที่ Hysteric Stress-Strain Curve ทั้ง 15 Loop มีขนาดของวงรีที่ขยายใหญ่ขึ้นตามจำนวนรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ได้ผ่านจุดคลากและแสดงว่าตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่า Hysteresis Loop ของดินที่ระดับความลึก 7 เมตร ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3 % (DN63S - 1-34)

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนของชุดทดสอบ DN63S-1-34 เป็นดินที่ระดับความลึก 7 เมตร มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ 0.01 รอบต่อวินาที จำนวน 15 รอบ ที่ความเครียดตามแนวแกน 5.3% จากกราฟพบว่าพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักในแต่ละรอบทำให้ได้กราฟรูปวงรีในแต่ละรอบของการให้น้ำหนักซึ่งเรียกว่า Hysteric Stress-Strain Curve โดยในแต่ละวงเรียกว่า Loop จากการทดสอบพบว่า Hysteric Stress-Strain Curve ของรูปที่ 4.12 มีพฤติกรรมคือมีค่าหน่วยแรงสูงสุด (หน่วยแรงอัด) ตั้งแต่ 5 ถึง 40 kPa มีค่าหน่วยแรงต่ำสุด (หน่วยแรงดึง) ตั้งแต่ -5 ถึง -40 kPa และมีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนสูงสุด (ทางด้านอัด) ตั้งแต่ 1 จนกระทั่งวัดค่าไม่ได้ (เกินช่วงวัดของ LVDT) มีค่าความเครียด (เสียรูป) ตามแนวแกนต่ำสุด (ทางด้านขยาย) ตั้งแต่ 1 จนกระทั่งวัดค่าไม่ได้ (เกินช่วงวัดของ LVDT)

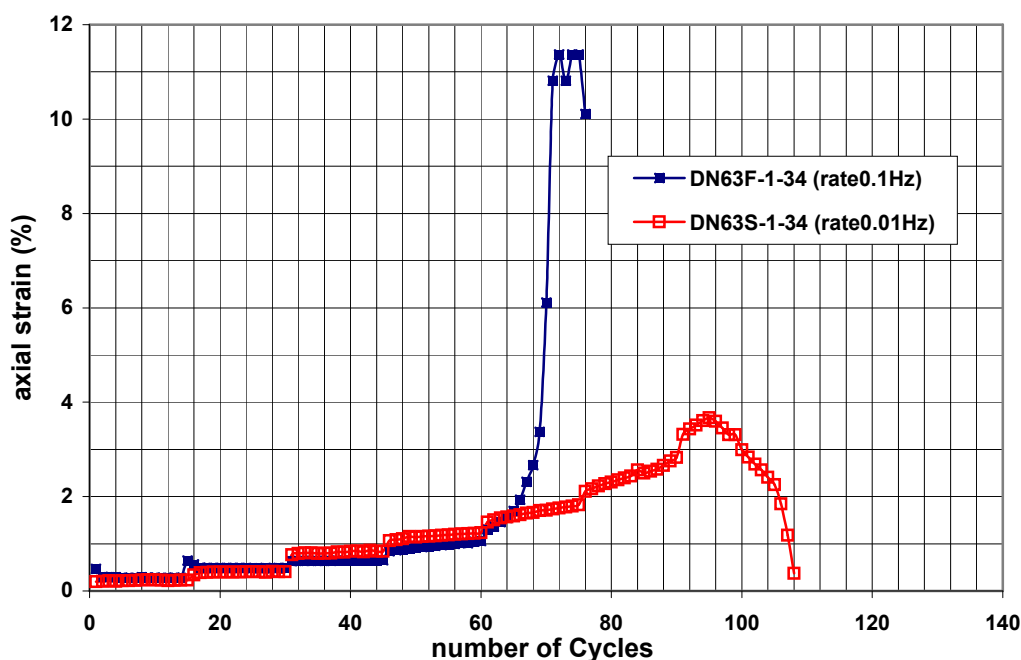
โดยที่ Hysteric Stress-Strain Curve ตั้งแต่ Loop ที่ 1-5 มีขนาดของวงรีที่ขยายเล็กน้อย เมื่อ Loop ที่ 6-9 วงรีมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นอย่างมากซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ได้ผ่านจุดคลากและแสดงว่าตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้ เมื่อ Loop ที่ 10 จนถึง Loop ที่ 15 วงรีจะเบี้ยวและบิดเข้าหา

แกน X (แกนความเครียดตามแนวแกน) เนื่องจากในช่วงดังกล่าวตัวอย่างทดสอบได้วิบัติทำให้ไม่สามารถรับแรงดั่งนั้นค่าในแกน Y (หน่วยแรงตามแนวแกน) จึงลดลงอย่างมากและเมื่อตัวอย่างทดสอบได้วิบัติจึงทำให้เกิดเสียรูปอย่างมากจนไม่สามารถวัดค่าตามแกน X ได้ดังนั้นที่ Loop ทางแกน X ของช่วงนี้จึงเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.12 ขึ้นตามจำนวนรอบของการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11, และ 4.12 ทั้งหมด ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 7 เมตรจากผิวดิน โดยเปรียบเทียบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที จากกราฟแสดงผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรม Hyteresis Loops ของการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรสามารถแบ่งตามพฤติกรรมได้เป็น 2 ช่วงโดยแบ่งตามความเครียดในแนวแกนคือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% ช่วงสองเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนมากกว่า 1% เมื่อพิจารณาพฤติกรรมกราฟหน่วยแรงกับความเครียดตามแนวแกนในแต่ละรอบ ในกราฟรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11, และ 4.12 เป็นชุดกราฟทดสอบการรับน้ำหนักทั้ง 15 รอบ จากกราฟ Hyteresis Loops เป็นรูปวงรีโดยกราฟวงรีจะมีลักษณะแคบและขยายกว้างขึ้นเมื่อความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาวงรีทั้ง 15 รอบ (ในชุดขนาดหน่วยแรงเดียวกัน) ในช่วงความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% จะมีขนาดวงรีเท่ากันและใกล้เคียงกัน (ทั้ง 15 รอบ) แต่เมื่อความเครียดตามแนวแกนมากกว่า 1% วงรีจะมีขนาดไม่เท่ากัน (ขยายใหญ่ขึ้น) ในทุกๆ รอบของการให้น้ำหนักจนกระทั่งเกิดการเสียรูปจนไม่สามารถสร้างรูป Hyteresis Loops ได้ โดยพฤติกรรมจะเหมือนกันทั้งที่ความถี่ที่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที

ส่วนการทดสอบที่ค่า $PI=55\%$ และ $PI=43\%$ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของความเครียดตามแนวแกนจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 10 และ 13 เมตรจากผิวดินตามลำดับ โดยเปรียบเทียบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาทีนั้นจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับที่ $PI=63\%$ (ความลึก 7 เมตร)

4.4 อิทธิพลของความถี่ที่มีต่อพฤติกรรมของการบีบอัด



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าความเครียดตามแนวแกนกับรอบของการให้น้ำหนัก

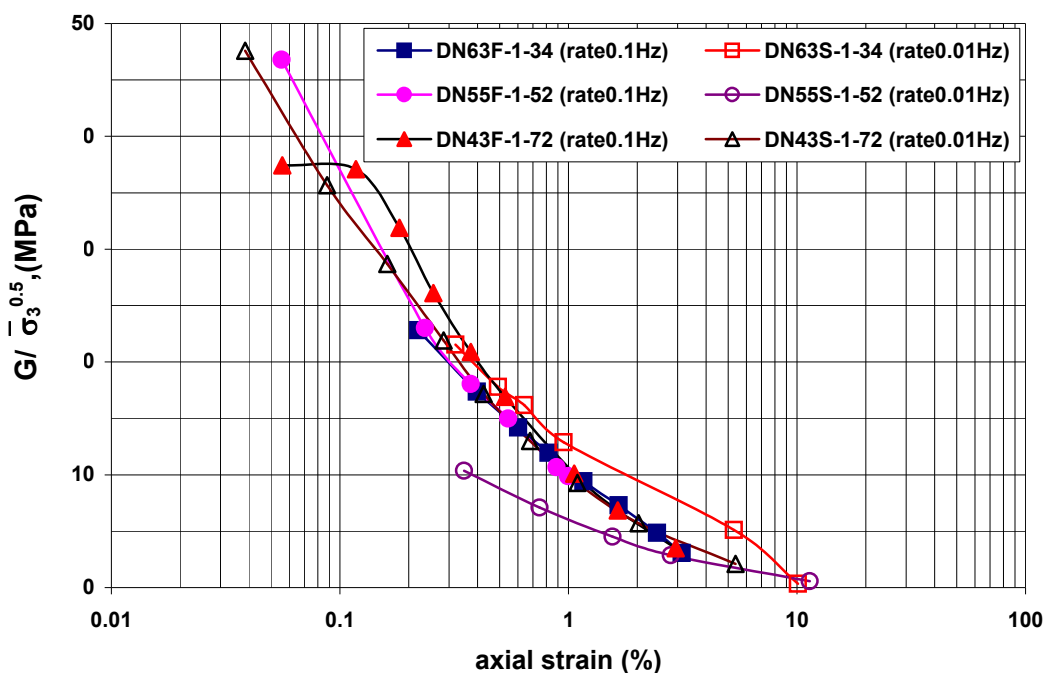
จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการเสียรูปตามแนวแกน (ค่าความเครียดตามแนวแกน) กับรอบของการให้น้ำหนัก ของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 7 เมตรจากผิวดิน มีค่า Plasticity Index 63%, Confining pressure 34 kPa ซึ่งมีค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) ตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบโดยให้น้ำหนักครั้งละ 15 รอบแล้วเพิ่มขนาดน้ำหนักจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเสียรูปตามแนวแกนของอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (DN63F-1-34) และความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที (DN63S-1-34) พบว่าจากกราฟแสดงผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมความเครียดตามแนวแกนสามารถแบ่งตามพฤติกรรมได้เป็น 2 ช่วงโดยแบ่งตามความเครียดในแนวแกนคือ

ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% ในช่วงนี้พฤติกรรมการเสียรูปโดยที่ความถี่ที่ 0.1 รอบต่อวินาที มีค่าเท่ากันหรือมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที ซึ่งช่วงนี้แสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายใต้พฤติกรรมแบบ elastic และแสดงถึงความสามารถรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคือสามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรในช่วงน้ำหนักนี้ได้ ช่วงที่สองเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดตามแนวแกนมากกว่า 1% ในช่วงนี้พฤติกรรมการเสียรูปโดยที่ความถี่ที่ 0.1 รอบต่อวินาที ค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที ที่จุดความเครียดตามแนวแกน 1 ถึง 2% แต่เมื่อความเครียดตาม

แนวแกนตั้งแต่ 2% เป็นต้นไป พฤติกรรมการเสียรูปที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาทีที่จะเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงจากกราฟของ DN63F-1-34 จะเกิดการวิบัติภายใต้การรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเพียง 6 รอบเท่านั้น (จากความเครียดตามแนวแกน 2% ถึง 12%) ในขณะที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที (จากกราฟของ DN63S-1-34) จะเกิดการวิบัติภายใต้การรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นถึง 20 รอบ (จากความเครียดตามแนวแกน 2% ถึง 3.9%) ซึ่งกราฟแสดงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่ได้ผ่านจุดคลากและเริ่มที่จะไม่สามารถรับน้ำหนักแบบวัฏจักรได้จนกระทั่งวิบัติ

เมื่อพิจารณาถึงช่วงความเครียดในช่วงของการวิบัติที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที จากความเครียดตามแนวแกน 2% ถึง 12% ภายใต้การรับน้ำหนัก 6 รอบ เฉลี่ย 2 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ในขณะที่ช่วงของการวิบัติที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที จากความเครียดตามแนวแกน 2% ถึง 3.9% ภายใต้การรับน้ำหนัก 20 รอบ เฉลี่ย 0.095 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วจะพบว่าช่วงของการวิบัติที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที จะเร็วกว่าอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที

4.5 อิทธิพลของความถี่ที่มีต่อค่าโมดูลัสเฉือน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสเฉือนที่ Normalized ด้วยรากที่สองของ Effective Confining Pressure กับ Axial Strain

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสเฉือนที่ Normalized ด้วยรากที่สอง Effective Confining Pressure กับ Axial Strain แสดงพฤติกรรมของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ ระดับความลึก 7, 10 และ 13 เมตร

และมีค่า Plasticity Index (PI) 63%, 55% และ 43% ตามลำดับ มีค่า Confining pressure 34, 52 และ 72 kPa ตามระดับความลึกของตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบจากผลของอัตรา (ความถี่) การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 ได้พฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนที่ Normalized ด้วย Effective Confining Pressure กับ Axial Strain คือพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนที่อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (กราฟของ DN63F-1-34, DN55F-1-52 , DN43F-1-72)

พฤติกรรมช่วงแรกอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงความเครียดตามแนวแกน 1% โดยที่พฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนจะพิจารณาตามเปอร์เซ็นต์ค่า PI ของตัวอย่าง พบว่ากราฟการเกิดของค่าโมดูลัสเฉือนทั้งสาม PI มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือน PI 43%(DN43F-1-72) มีค่าโมดูลัสเฉือนมากกว่าที่ PI 55%(DN55F-1-52) และ PI 63%(DN63F-1-34) ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน โดยที่ PI 55% และ 63% มีค่าเท่ากัน เนื่องจากเส้นกราฟทั้งสองจะทับเป็นเส้นเดียวกัน พฤติกรรมช่วงที่สองอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่ 1% จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนทั้งสามมีค่าเท่ากัน เนื่องจากกราฟทั้งสามเส้นทับเป็นเส้นเดียวกัน

สำหรับพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนที่อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที (กราฟของ DN63S-1-34, DN55S-1-52 , DN43S -1-72) พฤติกรรมช่วงแรกอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงความเครียดตามแนวแกน 1% โดยที่พฤติกรรมของแรงดันโพรงส่วนเกินจะพิจารณาตามเปอร์เซ็นต์ค่า PI ของตัวอย่าง พบว่ากราฟค่าโมดูลัสเฉือนที่ PI 63%(DN63S-1-34) มีค่ามากที่สุดและที่ PI 55% (DN55S-1-52) มีค่าน้อยที่สุด (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน)

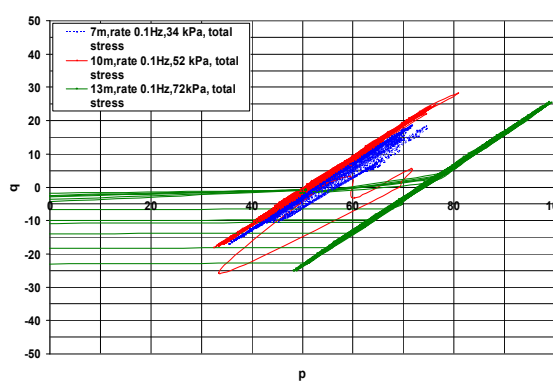
พฤติกรรมช่วงที่สองอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่ 1% จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับช่วงแรกคือที่ PI 63%(DN63S-1-34) มีค่ามากที่สุดและที่ PI 55%(DN55S-1-52) มีค่าน้อยที่สุด (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) แต่การแยกตัวของกราฟทั้ง 3 PI มีการแยกตัวกันที่ชัดเจนมากกว่าในช่วงแรก

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าโมดูลัสเฉือนที่ในชุดความถี่เดียวกันคือกราฟของ DN63S-1-34, DN55S-1-52 , DN43S -1-72 (ที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที) และกราฟของ DN63F-1-34, DN55F-1-52 , DN43F-1-72 (ที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที) พบว่าชุดกราฟของความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที เส้นกราฟค่าโมดูลัสเฉือนที่ของทั้ง 3 PI มีเส้นกราฟที่แยกตัวกันทำให้เห็นความแตกต่าง

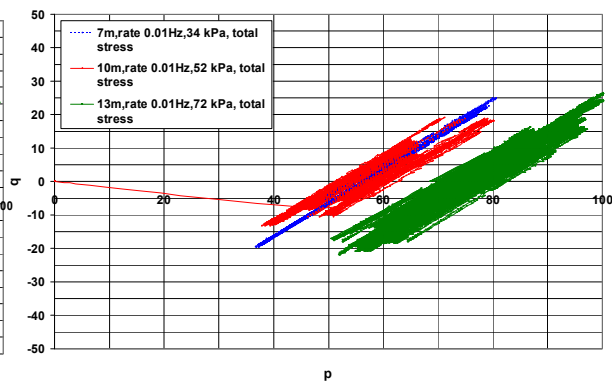
ในแต่ละ PI ที่ชัดเจนมากกว่าที่ชุดความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (ชุดความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที กราฟทั้งสาม PI มีเส้นกราฟที่ใกล้เคียงหรือทับกัน เส้นกราฟจะทับกันทั้ง 3 PI)

ผลของความถี่ที่มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสเฉือน จากกราฟทั้ง 6 กราฟมีค่าโมดูลัสเฉือน (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) จะเห็นว่ากราฟทั้งหมดมีค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเท่าๆกัน ทั้งหมดโดยที่กราฟจะไม่แยกตัวอย่างชัดเจนดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของความถี่ที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือน

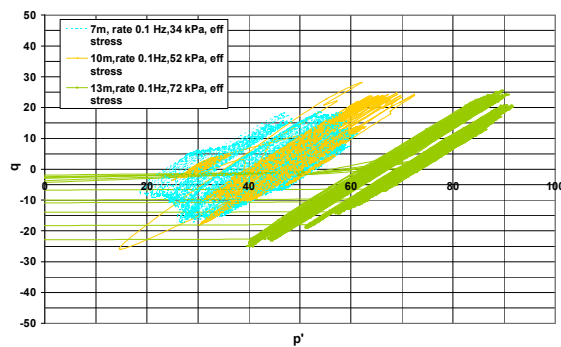
4.6 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่มีต่อทางเดินหน่วยแรง



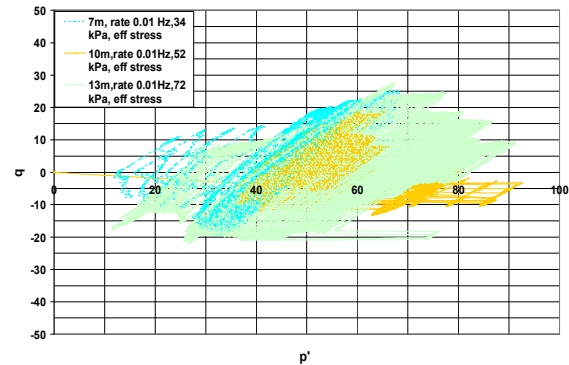
รูปที่ 4.15 a



รูปที่ 4.15 b



รูปที่ 4.15 c



รูปที่ 4.15 d

รูปที่ 4.15 a กราฟแสดงผลการทดสอบทางเดินหน่วยแรงรวมของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อวินาทีตามลำดับ ในตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงประสิทธิผล 34, 52 และ 72 กิโลปาสคาล (DN63F-1-34, DN55F-1-52 และ DN43F-1-72) รูปที่ 4.15 b กราฟแสดงผลการทดสอบทางเดินหน่วยแรงรวมของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.01

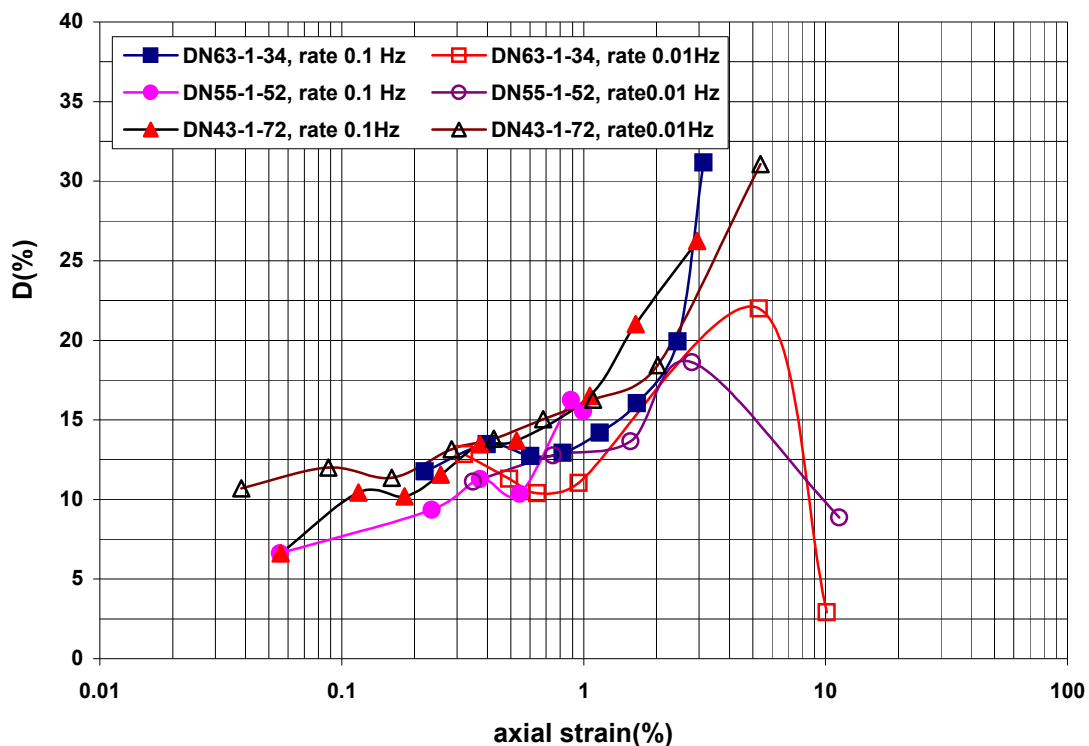
รอบต่อหน้าที่ตามลำดับ ในตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงประสิทธิผล 34, 52 และ 72 กิโลปาสคาล (DN63S-1-34, DN55S-1-52 และ DN43S-1-72) เมื่อเปรียบเทียบทางเดิน หน่วยแรงรวมของตัวอย่างทดสอบในอัตราการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรจะพบว่า ลักษณะทางเดิน หน่วยแรงรวมมีพฤติกรรมเหมือนกันทั้งในของสองอัตราการรับน้ำหนักคือทั้งสองจะให้ค่าขอบเขตทั้งในด้านอัดและด้านขยายที่ใกล้เคียงกันมากคือมีค่า a และมุมอัลฟา (α) สำหรับทางเดินหน่วยแรงรวมของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อหน้าที่ มีค่า 17 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 5.71 องศา ตามลำดับ ส่วนค่า a และมุมอัลฟา (α) สำหรับทางเดินหน่วยแรงรวมของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.01 รอบต่อหน้าที่ มีค่า 16 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 5.71 องศา ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่า a และมุมอัลฟาจะพบว่าค่า a ที่ได้จากทางเดินหน่วยแรงรวมมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อหน้าที่ มีค่ามากกว่าคือประมาณหนึ่งกิโลนิวตันต่อตารางเมตร ส่วนค่ามุมอัลฟาในทั้งสองอัตราการให้น้ำหนักเฉือนมีค่าเท่ากัน

รูปที่ 4.15 c กราฟแสดงผลการทดสอบทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อหน้าที่ตามลำดับ ในตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงประสิทธิผล 34, 52 และ 72 กิโลปาสคาล (DN63F-1-34, DN55F-1-52 และ DN43F-1-72) ในรูปที่ 4.15 d กราฟแสดงผลการทดสอบทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.01 รอบต่อหน้าที่ตามลำดับ ในตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงประสิทธิผล 34, 52 และ 72 กิโลปาสคาล (DN63S-1-34, DN55S-1-52 และ DN43S-1-72) เมื่อเปรียบเทียบทางเดิน หน่วยแรงรวมของตัวอย่างทดสอบในอัตราการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรจะพบว่า ลักษณะทางเดินหน่วยแรงรวมมีพฤติกรรมเหมือนกันทั้งในของสองอัตราการรับน้ำหนักคือทั้งสองจะให้ค่าขอบเขตทั้งในด้านอัดและด้านขยายที่ใกล้เคียงกันมากคือมีค่า a และมุมอัลฟา สำหรับทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อหน้าที่ มีค่า 7 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 5.39 องศา ตามลำดับ ส่วนค่า a และมุมอัลฟา สำหรับทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.01 รอบต่อหน้าที่ มีค่า 5 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 14.03 องศา ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่า a และมุมอัลฟาจะพบว่าค่า a ที่ได้จากทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.1 รอบต่อหน้าที่ มีค่ามากกว่าคือประมาณสองกิโลนิวตันต่อตารางเมตร แต่ค่ามุมอัลฟาที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตรา 0.01 รอบต่อหน้าที่ มีค่ามากกว่าประมาณสามเท่า

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่มีต่อพฤติกรรมของทางเดินหน่วยแรงจะพบว่าเมื่ออัตราการให้น้ำหนักเฉือนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า a ลดลง

แต่ค่ามุมอัลฟาเพิ่มขึ้น ค่ามุมอัลฟาที่เพิ่มขึ้นประมาณสามเท่าไม่ทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (q) เพิ่มขึ้นแตกต่างกันมากเนื่องจากค่า $\tan^{-1}$ ที่ได้จากมุมของทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลทั้งสองมีผลต่างกันเพียง 0.15 เท่านั้น แต่ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด q ลดลงอย่างมากเนื่องจากค่า a คือ ลดลงประมาณ 29%

4.7 อิทธิพลของความถี่ที่มีต่อค่าแดมปีง

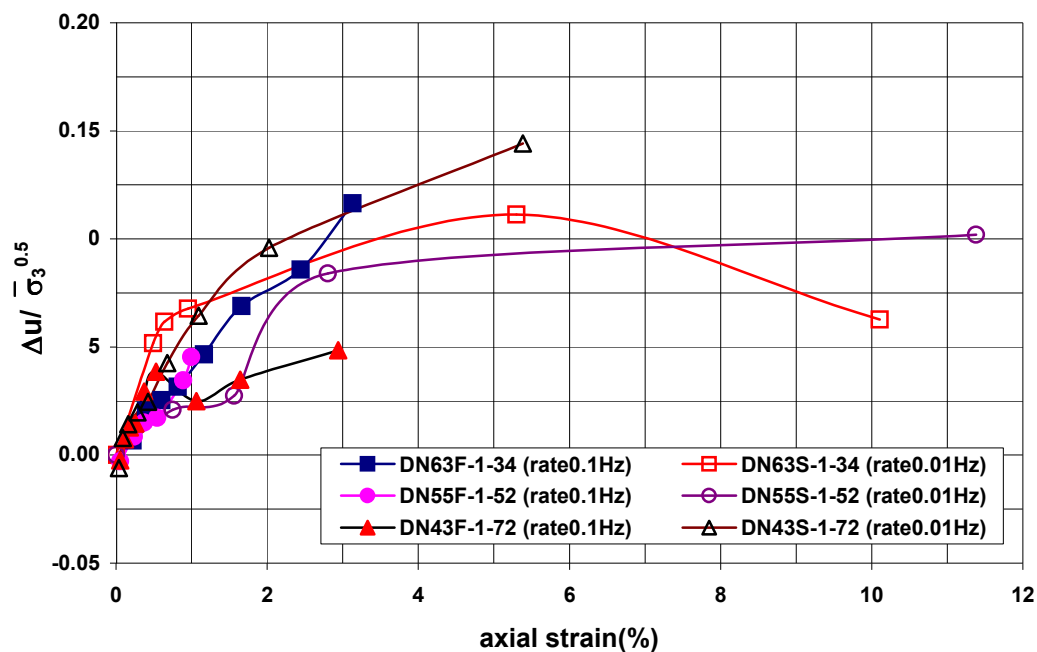


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าแดมปีง กับ Axial Strain

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าแดมปีง กับ Axial Strain แสดงพฤติกรรมของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ ระดับความลึก 7, 10 และ 13 เมตร และมีค่า Plasticity Index (PI) 63%, 55% และ 43% ตามลำดับ มีค่า Confining pressure 34, 52 และ 72 kPa ตามระดับความลึกของตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบจากผลของอัตรา (ความถี่) การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ผลของความถี่ที่มีอิทธิพลต่อค่าแดมปีง จากกราฟทั้ง 6 กราฟมีค่าแดมปีง (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) จะเห็นว่ากราฟทั้งหมดมีค่าแดมปีงมีกราฟไม่แยกตัวอย่างชัดเจนทั้งหมด มีค่าไม่แตกต่างกัน (ใกล้เคียงกันทั้ง 3 PI) ซึ่งมีผลเช่นเดียวกันกับผลของโมดูลัส

เงื่อนไขดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของความถี่ที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแอมป์

4.8 อิทธิพลของความถี่ที่มีต่อพฤติกรรมของแรงดันโพรง



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Excess Pore Pressure ที่ Normalized ด้วยรากที่สองของ Effective Confining Pressure กับ Axial Strain

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบค่า Excess Pore Pressure ที่ Normalized ด้วยรากที่สองของ Effective Confining Pressure กับ Axial Strain แสดงพฤติกรรมของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของดินเหนียวอ่อนที่เก็บตัวอย่างที่ ระดับความลึก 7, 10 และ 13 เมตร และมีค่า Plasticity Index (PI) 63%, 55% และ 43% ตามลำดับ มีค่า Confining pressure 34, 52 และ 72 kPa ตามระดับความลึกของตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นค่าความดันที่ระดับหน่วยแรงปัจจุบัน (Normally Consolidated Clay, OCR=1) โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบจากผลของอัตรา (ความถี่) การรับน้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 ได้พฤติกรรมของค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่ Normalized ด้วยรากที่สองของ Effective Confining Pressure กับ Axial Strain คือพฤติกรรมของค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (กราฟของ DN63F-1-34, DN55F-1-52 , DN43F-1-72)

พฤติกรรมช่วงแรกอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงที่ความเครียดตามแนวแกน 1% โดยที่พฤติกรรมของแรงดันโพรงส่วนเกินจะพิจารณาตามเปอร์เซ็นต์ค่า PI ของตัวอย่าง

พบว่ากราฟการเกิดของแรงดันโพรงส่วนเกินทั้งสาม PI มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่ PI 43% (DN43F-1-72) มีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าที่ PI 55% (DN55F-1-52) และ PI 63% (DN63F-1-34) สูงสุดประมาณ 25% (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) เนื่องจากดินที่มีค่า PI สูงกว่า (PI 63%, 55%) จะเกิดแรงดันโพรงส่วนเกินส่วนได้ ช้ำกว่าดินที่มีค่า PI ต่ำกว่า (PI 43%) ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ความถี่ที่เร็วทำให้เกิดแรงดันโพรงส่วนเกินส่วนได้น้อยกว่าดินที่มีค่า PI ต่ำกว่า (PI 43%)

พฤติกรรมช่วงที่สองอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่ 1% จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ พบว่าค่าแรงดันโพรงส่วนเกิน PI 55% (DN55F-1-52) และ PI 63% (DN63F-1-34) มีค่าเท่าๆกันและมีค่ามากกว่าที่ PI 43% (DN43F-1-72)

สำหรับพฤติกรรมของค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่อัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบที่ระดับความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที (กราฟของ DN63S-1-34, DN55S-1-52 , DN43S-1-72) พฤติกรรมช่วงแรกอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงที่ความเครียดตามแนวแกน 1% โดยที่พฤติกรรมของแรงดันโพรงส่วนเกินจะพิจารณาตามเปอร์เซ็นต์ค่า PI ของตัวอย่าง พบว่ากราฟการเกิดของแรงดันโพรงส่วนเกินทั้งสาม PI มีค่าใกล้เคียงกันโดยที่ค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่ PI 63% (DN63S-1-34) มีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าที่ PI 55% (DN55S-1-52) และ PI 43% (DN43S-1-72) สูงสุดประมาณ 75 % (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) เนื่องจากดินที่มีค่า PI สูงกว่า (PI 63%) จะเกิดแรงดันโพรงส่วนเกินส่วนได้มากกว่าดินที่มีค่า PI ต่ำกว่า (PI 43%, 55%) ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ความถี่ที่ช้าทำให้เกิดแรงดันโพรงส่วนเกินส่วนมีเวลา build up แรงดันโพรงส่วนเกินดังนั้นจึงมีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าดินที่มีค่า PI ต่ำกว่า (PI 43%, 55%)

พฤติกรรมช่วงที่สองอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่ 1% จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ พบว่าค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่ PI 43%(DN43S-1-72) มีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าที่ PI 55%(DN55S-1-52) และ PI 63%(DN63S-1-34)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความถี่ที่มีต่อแรงดันโพรงส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันโพรงส่วนเกินที่ตัวอย่างทดสอบที่มีค่า PI ที่เท่ากัน

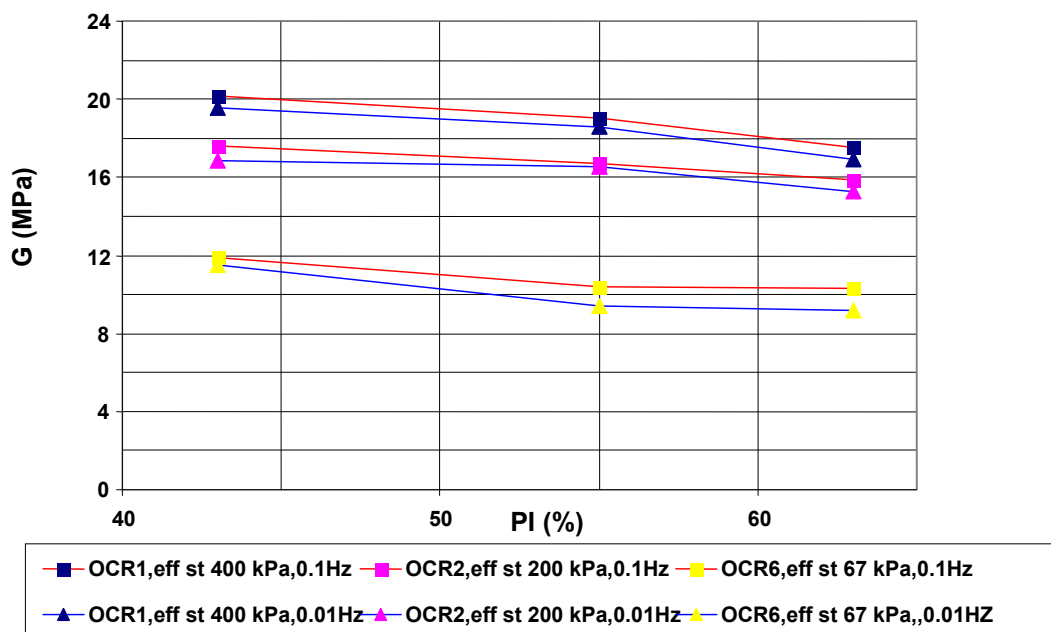
พบว่าพฤติกรรมช่วงแรกอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% ค่าแรงดันโพรงส่วนเกินของการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที มีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าหรือเท่ากับที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที โดยที่ PI 63% (DN63F-1-34% และ DN63S-1-34) กราฟที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที มากกว่าที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที สูงสุดประมาณ 130% (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) ส่วนที่ PI 55% (DN55F-1-52 และ DN55S-1-52) และ ที่ PI 43% (DN43F-1-72 และ DN43S-1-72) ที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที มีค่าแรงดันโพรง

ส่วนเกินใกล้เคียงกันหรือเท่ากับที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน)

พฤติกรรมช่วงที่สองอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนตั้งแต่ 1% จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ ค่าแรงดันโพรงส่วนเกินของการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที มีค่าแรงดันโพรงส่วนเกินมากกว่าที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (ที่ความเครียดตามแนวแกนเดียวกัน) อย่างชัดเจนในทุก PI ของตัวอย่างแต่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนมีค่ามาก ๆ ไม่สามารถเปรียบเทียบค่าแรงดันโพรงส่วนเกินได้เนื่องจากตัวอย่างที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที จะเกิดการวิบัติก่อนตัวอย่างที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที ดังนั้นเส้นกราฟของตัวอย่างที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที จึงหายไปของความเครียดตามแนวแกนมาก ๆ

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าแรงดันโพรงส่วนเกินในชุดความถี่เดียวกันคือกราฟของ DN63S-1-34, DN55S-1-52, DN43S -1-72 (ที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที) และกราฟของ DN63F-1-34, DN55F-1-52, DN43F-1-72 (ที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที) พบว่าชุดกราฟของความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที เส้นกราฟค่าแรงดันโพรงส่วนเกินของทั้งสาม PI มีเส้นกราฟที่แยกตัวกันทำให้เห็นความแตกต่างในแต่ละ PI ที่ชัดเจนมากกว่าที่ชุดความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที (ชุดความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที กราฟทั้งสาม PI มีเส้นกราฟที่ใกล้เคียงหรือทับกันโดยในช่วงความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่า 1% เส้นกราฟจะทับกันทั้งสาม PI

4.9 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนและแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อโมดูลัสเฉือน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนและค่าพลาสติกซิตีที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าแรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาล (OCR=1, Normally Consolidated Clay), 200 กิโลปาสคาล (OCR=2, Slightly Overconsolidated Clay), และ 67 กิโลปาสคาล (OCR=6, Heavily Overconsolidated Clay)

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนและค่าพลาสติกซิตีที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตีที่ 43%, 55% และ 63% ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ให้ค่าโมดูลัสเฉือนที่แตกต่างกันเล็กน้อยในทุกตัวอย่างทดสอบ (ที่ค่าแรงดันประสิทธิผล 400, 200 และ 67 กิโลปาสคาลเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าพลาสติกซิตีเดียวกัน) โดยที่อัตรา 0.1 รอบต่อวินาที จะให้ค่าโมดูลัสเฉือนมากกว่าที่อัตรา 0.01 รอบต่อวินาที ประมาณ 0.5 - 2 เมกะปาสคาลหรือมากกว่า 1.5%-10% ในทุกค่าของโมดูลัสเฉือน (เมื่อเปรียบเทียบในดินที่ทุกแรงดันประสิทธิผล) และพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนในดินที่ได้รับอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที มีพฤติกรรมเหมือนกันคือ โมดูลัสเฉือนจะมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซิตี

มากขึ้น และค่าโมดูลัสเฉือนมากที่สุดที่พลาสติกซิตีเดียวกันที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาล มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาล และมีค่าน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล (เมื่อพิจารณาที่ดินมีค่าพลาสติกซิตีเดียวกันคือ 43%, 55% และ 63%)

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของค่าพลาสติกซิตีที่มีต่อค่าโมดูลัสเฉือนสามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าพลาสติกซิตี 43% ถึง 55% ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซิตีมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงประมาณ 0.1-1.5 เมกะปาสคาลหรือลดลง 3 -14 % เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าพลาสติกซิตี 43% โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงมากที่สุดคือ 1.5 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 14% รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาล มีค่าลดลงคือ 1 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 5% และลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงคือ 0.5 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 3%

และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนต่อค่าพลาสติกซิตี พบว่าเมื่อค่าพลาสติกซิตีเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งพลาสติกซิตีมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีอัตราการลดลงเฉลี่ย 0.042-0.125 เมกะปาสคาล โดยที่อัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงมากที่สุดคือ 0.125 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 1.13% ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซิตี อัตราการลดลงรองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงคือ 0.083 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.42% ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซิตี และอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงคือ 0.5 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.25% ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซิตี

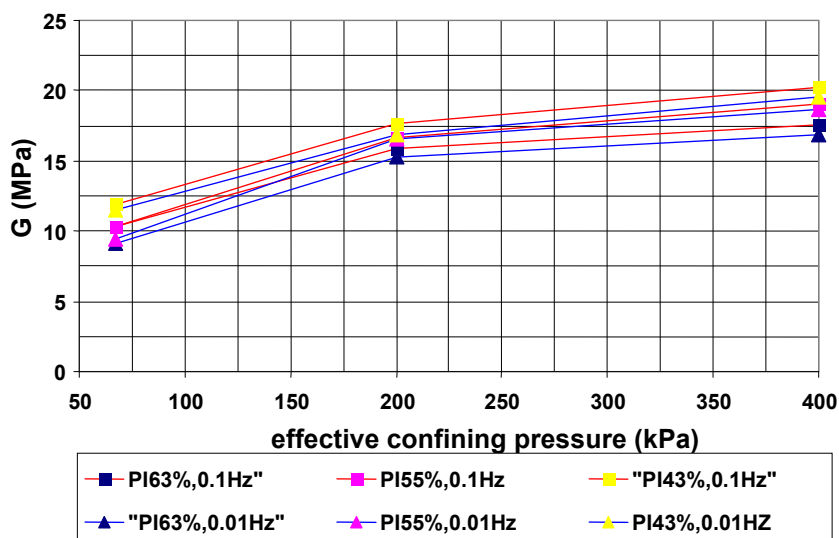
ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ดินมีค่าพลาสติกซิตี 55% ถึง 63% พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซิตีมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงประมาณ 0.1-1.5 เมกะปาสคาลหรือลดลง 3 -9 % เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าพลาสติกซิตี 55% โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงมากที่สุดคือ 1.5 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 8% รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงคือ 1 -1.5 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 7% และลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยมากคือ 0.1-0.2 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 1% และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนต่อค่าพลาสติกซิตี พบว่าเมื่อค่าพลาสติกซิตีเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งพลาสติกซิตีมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีอัตราการลดลงเฉลี่ย 0.006-0.083 เมกะปาสคาล โดยที่อัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงมากที่สุดคือ 0.083 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.45%

ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดี ร่องลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาล มีค่าอัตราการลดลงคือ 0.06 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.41% ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดี และอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล มีค่าอัตราการลดลงน้อยมากคือ 0.1 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.07% ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อค่าโมดูลัสเฉือนทั้งสองช่วงจะพบว่า พฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงในทุกแรงดันประสิทธิผลเมื่อพลาสติกซีดีมีค่าเพิ่มขึ้น

ถ้าเปรียบเทียบตามสัดส่วนของค่าโมดูลัสเฉือนที่ลดลงกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์) จะพบว่าพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนที่ดินมีค่าพลาสติกซีดีในช่วง 43% ถึง 55% จะมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงอย่างมาก ในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงเล็กน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 และ 200 กิโลปาสคาล ส่วนในดินมีค่าพลาสติกซีดีช่วง 55% ถึง 63% มีพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกับช่วงแรกคือ ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงอย่างมาก ในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 และ 200 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงเล็กน้อยจนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 กิโลปาสคาล

แต่หากเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนที่ลดลงต่อค่าพลาสติกซีดีที่เพิ่มขึ้น (ความชันของกราฟ) จะพบว่าพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนที่ดินมีค่าพลาสติกซีดีในช่วง 43% ถึง 55% จะมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงอย่างมาก ในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 และ 200 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงเล็กน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 และ 200 กิโลปาสคาล ส่วนในดินมีค่าพลาสติกซีดีช่วง 55% ถึง 63% มีพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกับช่วงแรกคือ ค่าโมดูลัสเฉือนลดลงอย่างมาก ในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 กิโลปาสคาล

4.10 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนและค่าพลาสติกซิตีที่มีต่อโมดูลัสเฉือน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนและค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63%

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนและค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ให้ค่าโมดูลัสเฉือนที่แตกต่างกันเล็กน้อยในทุกตัวอย่างทดสอบ (ค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63%) คือที่อัตรา 0.1 รอบต่อวินาทีจะให้ค่าโมดูลัสเฉือนมากกว่าที่อัตรา 0.01 รอบต่อวินาที ประมาณ 0.5-2 เมกะปาสคาลหรือมากกว่าประมาณ 1.5%-10% ในทุกค่าของโมดูลัสเฉือน (ทุกแรงดันประสิทธิผล) เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าแรงดันประสิทธิผลเดียวกันพบว่าดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55% และในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% มีค่าน้อยสุด ในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) และในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อวินาที

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนสามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงแรงดันประสิทธิผล 67 ถึง 200 กิโลปาสคาล พบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5-7 เมกกะปาสคาลหรือเพิ่มขึ้น 46-77 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น) เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่แรงดันประสิทธิผล 67 และ 200 กิโลปาสคาล สามารถเรียงลำดับค่าโมดูลัสเฉือนจากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ตามลำดับทั้งที่แรงดันประสิทธิผล 67 และ 200 กิโลปาสคาล ถ้าพิจารณาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนเมื่อแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนที่พลาสติกซิตี 63 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 7 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 77% รองลงมาคือดินที่พลาสติกซิตี 55 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 6 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 60% และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซิตี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 5.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 45% (เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น) และเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนต่อค่าแรงดันประสิทธิผลพบว่า เมื่อค่าแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาลมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.040-0.051 เมกกะปาสคาลหรือเพิ่มขึ้น 0.34%-0.56% ต่อการเพิ่มของแรงดันประสิทธิผลทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาล โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.051 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.56% รองลงมาคือ ดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นคือ 0.046 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.45% และอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้น 0.040 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 0.34% (ต่อการเพิ่มของแรงดันประสิทธิผลทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาล)

ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงแรงดันประสิทธิผล 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล พบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เมกกะปาสคาลหรือเพิ่มขึ้น 14 -18 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น) เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่แรงดันประสิทธิผล 200 และ 400 กิโลปาสคาล สามารถเรียงลำดับค่าโมดูลัสเฉือนจากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ตามลำดับทั้งที่ แรงดันประสิทธิผล 200 และ 400 กิโลปาสคาล ถ้าพิจารณาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนเมื่อแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากันในดินทั้งสาม พลาสติกซิตีคือ 2.5 เมกกะปาสคาล แต่เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์) จะได้ค่าโมดูลัสเฉือนที่พลาสติกซิตี 63 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคิดเป็น 18% รองลงมาคือดินที่พลาสติกซิตี 55 % มีค่าเพิ่มคิดเป็น 15% และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซิตี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยสุดคิดเป็น 14% และเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของ ค่าโมดูลัสเฉือนต่อ

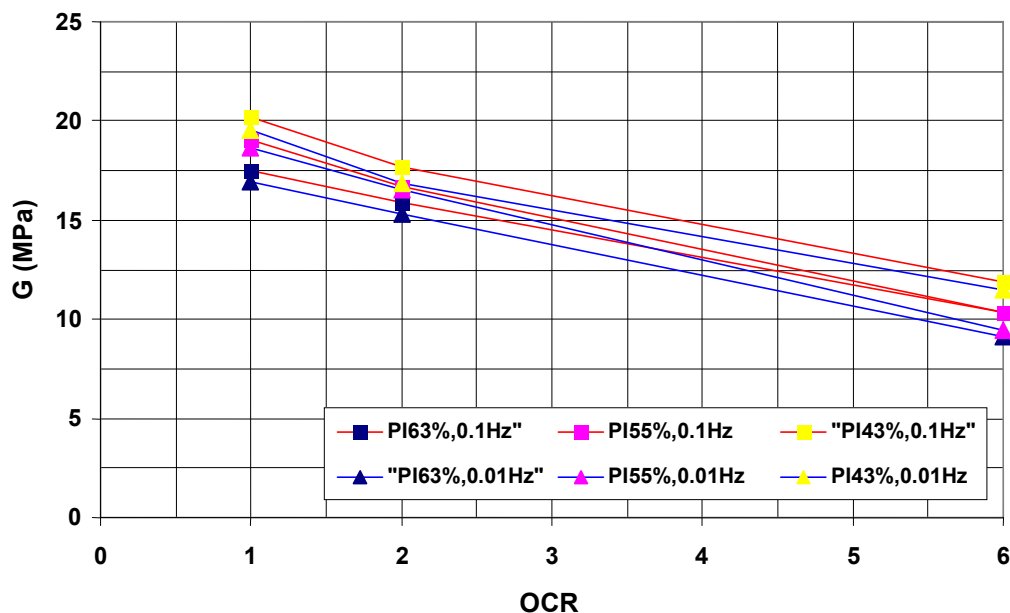
ค่าแรงดันประสิทธิผลพบว่าเมื่อค่าแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาลมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.0125 เมกกะปาสคาลหรือเพิ่มขึ้น 0.07%-0.085%

โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนในดินมีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากันทั้งสามพลาสติกซิตีคือ 0.0125 เมกกะปาสคาล เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์) จะได้อัตราการเพิ่มของค่าโมดูลัสเฉือนต่อการเพิ่มแรงดันประสิทธิผลหนึ่งกิโลปาสคาลจะได้ว่า ที่ดินพลาสติกซิตี 63 % มีอัตราการเพิ่มมากที่สุดคิดเป็น 0.085% รองลงมาคือดินที่พลาสติกซิตี 55 % มีอัตราการเพิ่มคิดเป็น 0.075% และอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซิตี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยสุดคิดเป็น 0.070%

พิจารณาอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลทั้งหมด (แรงดันประสิทธิผล 67 ถึง 400 กิโลปาสคาล) ที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนพบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินได้รับแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น เมื่อพิจารณา ค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าแรงดันประสิทธิผล 67 กับ 400 กิโลปาสคาล ค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าแรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาล มีค่ามากกว่า 8 - 10 เมกกะปาสคาลหรือเพิ่มขึ้น 67-95 % เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรงดันประสิทธิผลจาก 67 ถึง 200 กิโลปาสคาลคือเพิ่มขึ้น 65% - 80% ของค่าโมดูลัสเฉือนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอีก 20%- 35% ในช่วงแรงดันประสิทธิผลจาก 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.14 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากราฟค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงแรงดันประสิทธิผลที่ 67 ถึง 200 กิโลปาสคาล มีความชันมากกว่า ช่วงแรงดันประสิทธิผล 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นมากกว่า (ความชันมากกว่า)

เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าแรงดันประสิทธิผลเดียวกันพบว่าดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55 % และในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% มีค่าน้อยสุด ในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) และในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที

4.11 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนและค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีต่อ โมดูลัสเฉือน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือน (G) และค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติคิซิตี 43%, 55% และ 63%

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือน (G) และค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อนาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติคิซิตี 43%, 55% และ 63% ภายใต้ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 (ดินเหนียวในสภาวะ Normally Consolidated Clay), 2 (ดินเหนียวในสภาวะ Slightly Overconsolidated Clay) และ 6 (ดินเหนียวในสภาวะ Heavily Overconsolidated Clay) พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อนาที ให้ค่าโมดูลัสเฉือนที่แตกต่างกันเล็กน้อยในทุกตัวอย่างคือที่อัตรา 0.1 รอบต่อนาทีจะให้ค่าโมดูลัสเฉือนมากกว่าที่อัตรา 0.01 รอบต่อนาที ประมาณ 0.5-2 เมกกะปาสคาลหรือมากกว่าประมาณ 1.5%-10% ในทุกค่าของโมดูลัสเฉือน (ทุกค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว) เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเดียวกันพบว่า ดินที่มีค่าพลาสติคิซิตี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติคิซิตี 55 % และในดินที่มีค่าพลาสติคิซิตี 63% มีค่าน้อยสุด

ในทุกค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวและในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที่
พิจารณาพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนเนื่องจากอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักแสดงให้เห็นว่า
พฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นและพฤติกรรมนี้เกิด
ในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที่

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือน
สามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 ถึง 2
(ดินอยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ลดลงหนึ่งเท่า) พบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลง
เมื่อดินมีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลง 1-3 เมกกะ
ปาสคาลหรือลดลง 5 -15 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือน
เริ่มต้น) เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสเฉือนสูงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 และ 2 สามารถ
เรียงลำดับค่าโมดูลัสเฉือนจากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ
63% ตามลำดับทั้งที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 และ 2 ถ้าพิจารณาค่าการลดลงของ
ค่าโมดูลัสเฉือนค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนที่พลาสติกซิตี 43%
และ 55% มีค่าลดลงเท่ากันคือ 2.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 12.5%-13.5% ตามลำดับ และลดลง
น้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซิตี 63 % มีค่าลดลง 2 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 11% (เมื่อเทียบกับ
ค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น) และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนต่อค่าสัดส่วน
การอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นจะได้อัตราการลดลงค่าโมดูลัสเฉือนที่พลาสติกซิตี 43% และ 55%
มีอัตราการลดลงเท่ากันคือ 2.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 12.5%-13.5% ตามลำดับ และ
อัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซิตี 63 % มีค่าลดลง 2 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 11%
(เมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว)

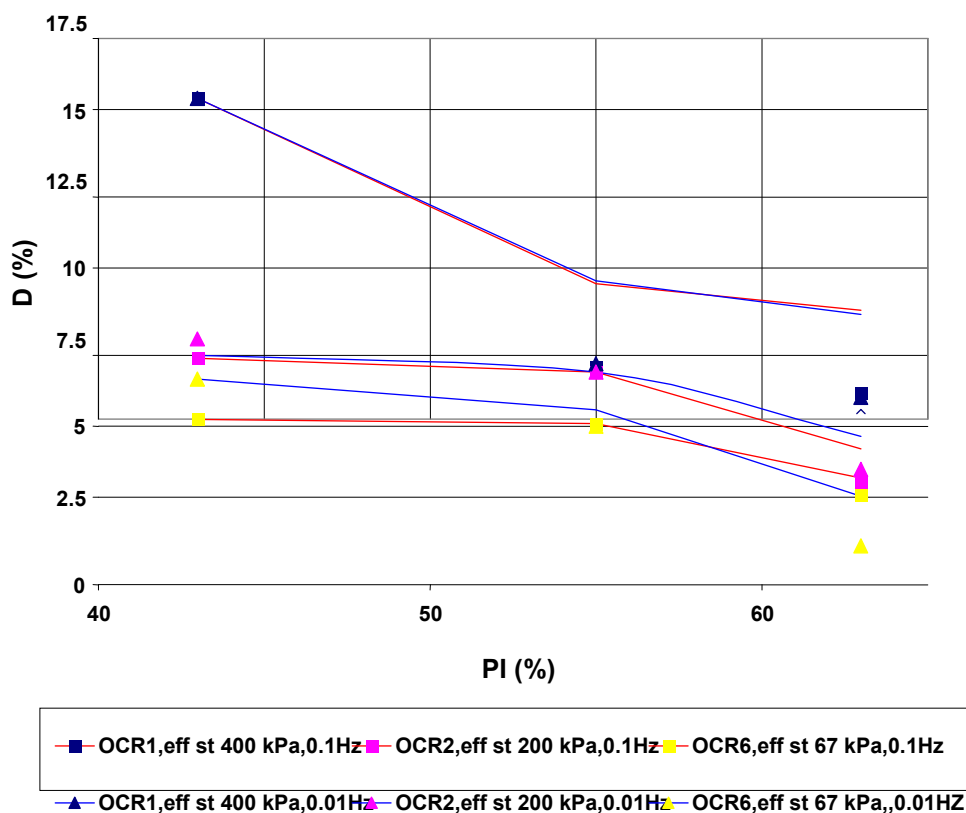
ช่วงที่สองค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 2 ถึง 6 (ดินอยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่
ลดลงสองเท่าเป็นหกเท่าพบว่า พฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าสัดส่วนการ
อัดแน่นเกินตัวมากขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงประมาณ 5-8 เมกกะปาสคาลหรือลดลง
30 -47 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าโมดูลัสเฉือนที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น)
เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสเฉือนสูงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 และ 6 สามารถเรียงลำดับ
ค่าโมดูลัสเฉือนจากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63%
ตามลำดับทั้งที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 และ 6 ถ้าพิจารณาค่าการลดลงของ
ค่าโมดูลัสเฉือนเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนที่พลาสติกซิตี 63
% มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 7.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 47% รองลงมาคือดินที่พลาสติกซิตี
55 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 6.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 40% และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่

พลาสติกซีดี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากคือ 5.5 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 31% (เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น) และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนต่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีอัตราการลดลง 1.37-1.63 เมกกะปาสคาลหรือลดลง 7.85%-11.73% ต่อการเพิ่มเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว โดยที่อัตราการลดลงของค่าโมดูลัสเฉือนในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63%และ55% มีค่าอัตราการลดลงเท่ากันคือ 1.63 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 11.73% และอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% มีค่าอัตราการลดลง 1.37 เมกกะปาสคาลหรือคิดเป็น 7.85% (เมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว)

พิจารณาอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวทั้งหมด (ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 ถึง 6) ที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนพบว่า พฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสเฉือนที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 มีค่ามากกว่า 8 – 9.5 เมกกะปาสคาลหรือลดลง 40-53 % เมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินที่ 6 โดยที่ค่าโมดูลัสเฉือนที่ลดลงประมาณ 25%-30%ในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 ถึง 2 และลดลงอย่างมากประมาณ 70%- 75%ในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 แต่หากพิจารณาเปอร์เซ็นต์การลดลงต่อการเพิ่มเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว จากกราฟรูปที่ 4.15 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากราฟค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 ถึง 2 และช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 กราฟที่ได้มีความชันใกล้เคียงกันซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีต่อพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงเท่าๆกัน สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวในช่วงที่มีค่า 1 ถึง 2 มีอิทธิพลกับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% และ 55% ทำให้พฤติกรรมค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงมากกว่าในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% ส่วนในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีค่า 2 ถึง 6 มีอิทธิพลกับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% ทำให้พฤติกรรมค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงมากกว่าในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% และ 63%

4.12 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนและแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อค่าแอมป์



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์และค่าพลาสติกซิตีที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าแรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาล (OCR=1, Normally Consolidated Clay), 200 กิโลปาสคาล (OCR=2)

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์และค่าพลาสติกซิตีที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล พบว่าค่าแอมป์ของดินที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ให้ค่าแอมป์ที่มีค่าเท่าๆกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาล เส้นกราฟของค่าโมดูลัสเฉือนจากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ที่ได้จะทับกัน (มีค่าเท่ากัน) ในทุกพลาสติกซิตี (43%, 55% และ 63%) ในดินภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 200 กิโลปาสคาล กราฟทั้งสองจะทับกันในช่วงพลาสติกซิตี 43%

และ 55% แต่จะแตกต่างกันเล็กน้อยที่ดินมีค่าพลาสติกซีดี 63% ส่วนในดินภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 กิโลปาสคาล ที่ดินมีค่าพลาสติกซีดี 43% เส้นกราฟของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาทีที่มีค่ามากกว่าที่ 0.1 รอบต่อนาที แต่ที่ดินที่ดินมีค่าพลาสติกซีดี 63% มีพฤติกรรมตรงข้ามกันคือ เส้นกราฟของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาที มีค่าน้อยกว่าที่ 0.1 รอบต่อนาที และที่ดินมีค่าพลาสติกซีดี 55% กราฟที่ได้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากราฟพฤติกรรมของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 กับ 0.1 รอบต่อนาที จะมีค่าเท่ากันเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลสูง (400 และ 200 กิโลปาสคาล) และไม่ชัดเจนว่าค่าแอมป์ในอัตราการให้น้ำหนักใดสูงกว่าเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลต่ำ (67 กิโลปาสคาล)

อิทธิพลของค่าพลาสติกซีดีที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่าแอมป์ในดินที่ได้รับอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 และ 0.01 รอบต่อนาทีที่มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันในทั้งสองอัตราการให้น้ำหนักเฉือนคือ ค่าแอมป์จะมีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซีดีมากขึ้นและเมื่อพิจารณาที่ดินที่ค่าพลาสติกซีดีเดียวกันคือ 43%, 55% และ 63% ค่าแอมป์มีค่ามากที่สุดที่พลาสติกซีดีเดียวกันคือที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาล รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาล และมีย่าน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของค่าพลาสติกซีดีที่มีต่อค่าแอมป์สามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าพลาสติกซีดี 43% ถึง 55% ค่าแอมป์มีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซีดีมากขึ้นโดยที่ค่าแอมป์มีค่าลดลงประมาณ 0.5-8.5 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 7-55% เมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น โดยที่ค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงมากที่สุดคือ 8.5 เปอร์เซ็นต์หรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 55% รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล มีค่าลดลงคือ 1.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 23% ของแอมป์เริ่มต้นและลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงคือ 0.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 7% ของแอมป์เริ่มต้นและเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าแอมป์ต่อค่าพลาสติกซีดีพบว่าเมื่อค่าพลาสติกซีดีเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งพลาสติกซีดีมีผลทำให้ค่าแอมป์มีอัตราลดลงเฉลี่ย 0.042-0.71 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดี โดยที่อัตราการลดลงของค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงมากที่สุดคือ 0.71 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 4.58 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดี อัตราการลดลงรองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงคือ 0.125 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 1.92 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดีและอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดิน

ที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงคือ 0.042 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีตีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.58 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีตี

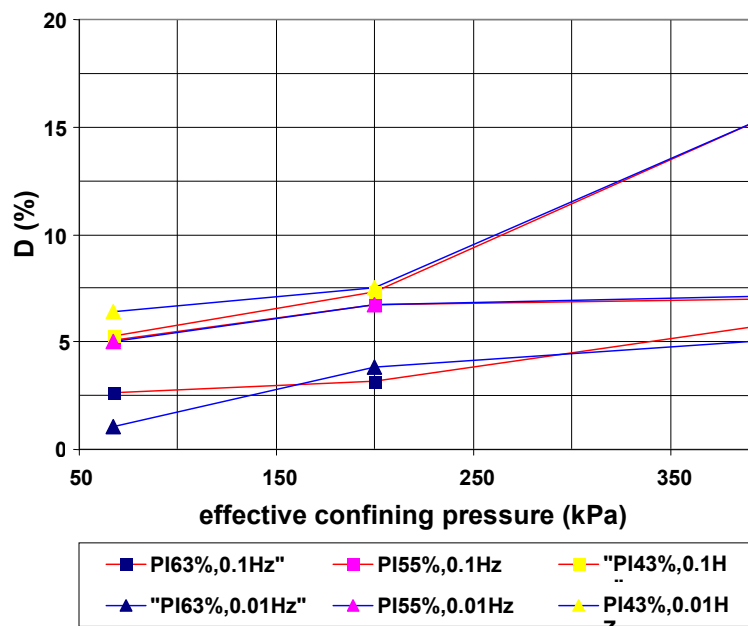
ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ดินมีค่าพลาสติกซีตี 55% ถึง 63% พบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าพลาสติกซีตีมากขึ้น โดยที่ค่าแอมป์มีค่าลดลงประมาณ 1.5-4.0 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 22 -80 % เมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น โดยที่ค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าลดลงมากที่สุดคือ 4 เปอร์เซ็นต์หรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น คิดเป็น 80% รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาล มีค่าลดลงคือ 4 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 57% และลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าลดลง 1.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 22% และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าแอมป์ต่อค่าพลาสติกซีตีพบว่าเมื่อค่าพลาสติกซีตีเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งพลาสติกซีตีจะมีผลทำให้ค่าแอมป์มีอัตราการลดลงเฉลี่ย 0.19-0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีตี โดยที่อัตราการลดลงของค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงมากที่สุดคือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีตีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีตี รองลงมาคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลงคือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีตีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 7.13 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีตี และอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลมีค่าอัตราการลดลง 0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีตีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 2.75 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีตี

ถ้าเปรียบเทียบตามสัดส่วนของค่าแอมป์ที่ลดลงกับค่าแอมป์เริ่มต้น (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์) จะพบว่าพฤติกรรมของแอมป์ที่ดินมีค่าพลาสติกซีตีในช่วง 43% ถึง 55% จะมีผลทำให้ค่าแอมป์ลดลงอย่างมากในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาลคือลดลง 85%เมื่อเทียบกับการลดลงทั้งหมด มีผลทำให้ค่าแอมป์ลดลงเล็กน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 และ 200 กิโลปาสคาลคือลดลง 25%และ 11%ตามลำดับ (เมื่อเทียบกับการลดลงทั้งหมด) ส่วนในดินมีค่าพลาสติกซีตีช่วง 55% ถึง 63% มีพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกับช่วงแรกคือ ค่าแอมป์ลดลงอย่างมากในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 และ 200 กิโลปาสคาลคือ เมื่อเทียบกับการลดลงทั้งหมดจะลดลง 75%และ 89%ตามลำดับ มีผลทำให้ค่าแอมป์ลดลงเล็กน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาลคือลดลง15%เมื่อเทียบกับการลดลงทั้งหมด

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมอัตราการลดลงของค่าแอมป์โดยเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่าแอมป์ที่ลดลงต่อค่าพลาสติกซีตีที่เพิ่มขึ้น (ความชันของกราฟ) จะพบว่าพฤติกรรมของแอมป์ที่ดินมีค่าพลาสติกซีตีในช่วง 43% ถึง 55% จะมีผลทำให้ค่าแอมป์ลดลงอย่างมาก ในดินที่อยู่

ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ค่าแอมป์ลดลงน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 และ 200 กิโลปาสคาล ส่วนในดินมีค่าพลาสติกซีดีช่วง 55% ถึง 63% มีพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกับช่วงแรกคือ ค่าแอมป์ลดลงอย่างมากในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 67 และ 200 กิโลปาสคาล แต่ค่าแอมป์ลดลงน้อยในดินที่อยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400 กิโลปาสคาล

4.13 ผลกระทบของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนและค่าพลาสติกซีดีที่มีต่อค่าแอมป์



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์และค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซีดี 43%, 55% และ 63%

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์และค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อวินาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซีดี 43%, 55% และ 63% ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ 400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล พบว่าค่าแอมป์ของดินที่ได้จากการทดสอบการรับ

น้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อนาที ให้ค่าแอมป์ที่มีค่าเท่ากันในดินทั้งสามชนิดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55% คือเส้นกราฟของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบ วัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 และ 0.01 รอบต่อนาที ที่ได้จะทับกัน (มีค่าเท่ากัน) ในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) ในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% กราฟแอมป์ของอัตราการให้น้ำหนักทั้งสองมีค่าเท่ากันตั้งแต่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาลถึง 400 กิโลปาสคาล ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลค่าแอมป์ของอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 รอบต่อนาทีมีค่าแอมป์มากกว่าที่อัตรา 0.1 รอบต่อนาทีเล็กน้อย ส่วนในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% มีพฤติกรรมคือเส้นกราฟของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาที มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยที่ 0.1 รอบต่อนาที ที่แรงดันประสิทธิผล 67 และ 400 กิโลปาสคาลแต่ค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาที มีค่ามากกว่าเล็กน้อยที่ 0.1 รอบต่อนาที ที่แรงดันประสิทธิผล 200 กิโลปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบค่าแอมป์ที่ค่าแรงดันประสิทธิผลเดียวกันพบว่า ดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55 % และในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% มีค่าน้อยสุดในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) และในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที

อิทธิพลของค่าแรงดันประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่าแอมป์ในดินที่ได้รับอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 และ 0.01 รอบต่อนาที มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันในทั้งสองอัตราการให้น้ำหนักเฉือนคือค่าแอมป์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อพฤติกรรมของแอมป์สามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงแรงดันประสิทธิผล 67 ถึง 200 กิโลปาสคาลพบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น โดยที่ค่าแอมป์มีค่า เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 - 2.0 เปอร์เซ็นต์หรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นหรือคิดเป็น 25 - 133 % เมื่อพิจารณาค่าแอมป์สูงสุดที่แรงดันประสิทธิผล 67 และ 200 กิโลปาสคาล สามารถเรียงลำดับค่าแอมป์จากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ตามลำดับทั้งที่แรงดันประสิทธิผล 67 และ 200 กิโลปาสคาล ถ้าพิจารณาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์เมื่อแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าแอมป์ที่พลาสติกซิตี 63 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 2 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 133% ของแอมป์เริ่มต้น รองลงมาคือดินที่พลาสติกซิตี 55 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 2 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 40% ของแอมป์เริ่มต้น และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่

พลาสติกซีดี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากคือ 1.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 25%ของแอมป์เริ่มต้นและเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์ต่อค่าแรงดันประสิทธิผลพบว่าเมื่อค่าแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาลมีผลทำให้ค่าแอมป์มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.01-0.015 เปอร์เซ็นต์หรือเพิ่มขึ้น 0.19%-1.0% ต่อการเพิ่มของแรงดันประสิทธิผลทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาล โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์ในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.015 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดี รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นคือ 0.015 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.3เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดีและอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้น 0.01 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดี

ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงแรงดันประสิทธิผล 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล พบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น โดยที่ค่าแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.3-8 เปอร์เซ็นต์หรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นหรือคิดเป็น 4.3 -107 % เมื่อพิจารณาค่าแอมป์สูงสุดที่แรงดันประสิทธิผล 200 และ 400 กิโลปาสคาล สามารถเรียงลำดับค่าแอมป์จากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43%, 55% และ 63% ตามลำดับทั้งที่แรงดันประสิทธิผล 200 และ 400 กิโลปาสคาล ถ้าพิจารณาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์เมื่อแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นพบว่าค่าแอมป์ที่พลาสติกซีดี 43 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 8 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 107%ของแอมป์เริ่มต้น รองลงมาคือดินที่พลาสติกซีดี 63 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากคือ 2 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 57%ของแอมป์เริ่มต้นและเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซีดี 55 % มีค่าเพิ่มขึ้นมากคือ 0.3 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 4.3% ของแอมป์เริ่มต้น และเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์ต่อค่าแรงดันประสิทธิผลพบว่าเมื่อค่าแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้นทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาลมีผลทำให้ค่าแอมป์มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.0015-0.04 เปอร์เซ็นต์หรือเพิ่มขึ้น 0.022%-0.23% ต่อการเพิ่มของแรงดันประสิทธิผลทุกๆ หนึ่งกิโลปาสคาล โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแอมป์ในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.04 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.54 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดี รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 65% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นคือ 0.01 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.23 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดีและอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดจนแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้น 0.00015 เปอร์เซ็นต์ต่อ

การเพิ่มหนึ่งพลาสติกซีดีหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 0.022 เปอร์เซ็นต์ต่อหนึ่งพลาสติกซีดี

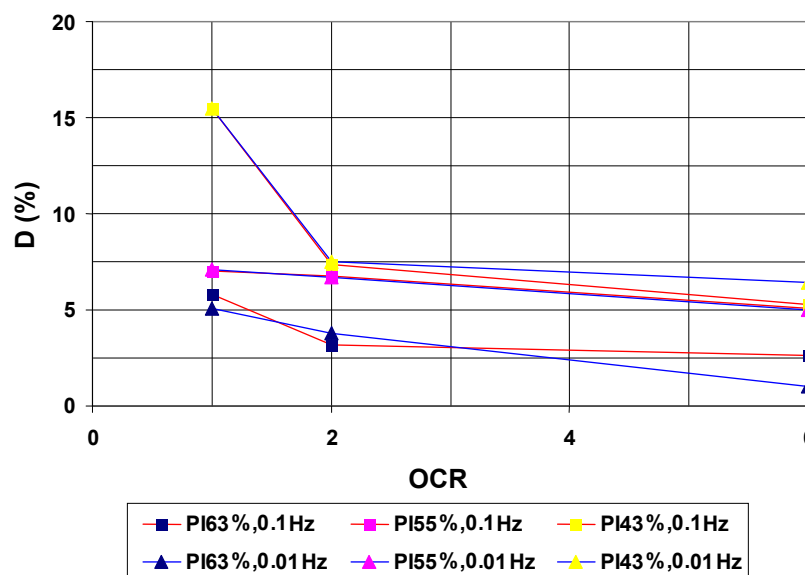
พิจารณาอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลทั้งหมด (แรงดันประสิทธิผล 67 ถึง 400 กิโลปาสคาล) ที่มีต่อพฤติกรรมของแอมป์พบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันประสิทธิผลมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าแอมป์ที่ค่าแรงดันประสิทธิผล 67 กับ 400 กิโลปาสคาล ค่าโมดูลเฉือนที่ค่าแรงดันประสิทธิผล 400 กิโลปาสคาลมีค่าเพิ่มขึ้น 4-10 เปอร์เซ็นต์หรือเพิ่มขึ้น 46-267 % เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล

โดยที่อิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลทำให้ค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรงดันประสิทธิผลจาก 67 ถึง 200 กิโลปาสคาล สำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55% คือเพิ่มขึ้น 87% เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลและมีอิทธิพลน้อยมากสำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% คือเพิ่มขึ้น 16% เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล ส่วนในช่วงแรงดันประสิทธิผลจาก 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล อิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลทำให้ค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมากสำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% คือเพิ่มขึ้น 84% เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาลและมีผลน้อยสำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55% คือเพิ่มขึ้น 13% เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล ในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% อิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลทำให้ค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นเท่ากันในช่วงแรงดันประสิทธิผล

เมื่อเทียบกับค่าแอมป์ที่แรงดันประสิทธิผล 67 กิโลปาสคาล ของค่าแอมป์ทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอีก 20%- 35% ในช่วงแรงดันประสิทธิผลจาก 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.14 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากราฟค่าแอมป์ในช่วงแรงดันประสิทธิผลที่ 67 ถึง 200 กิโลปาสคาล มีความชันเท่าๆกันในดินทั้งสามพลาสติกซีดีแต่ในช่วงแรงดันประสิทธิผล 200 ถึง 400 กิโลปาสคาล ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผลที่มีต่อพฤติกรรมของแอมป์มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก (ความชันมากกว่า) สำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% แต่มีผลทำให้มีอัตราเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากจนแทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงสำหรับดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55% (กราฟมีความชันน้อยมาก)

เมื่อเปรียบเทียบค่าแอมป์ที่ค่าแรงดันประสิทธิผลเดียวกันพบว่า ดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55 % และในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% มีค่าน้อยสุด ในทุกแรงดันประสิทธิผล (400, 200 และ 67 กิโลปาสคาล) และในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที

4.14 ผลกระทบของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีต่อค่าแอมป์



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์ (D) และค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตรา การให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติก ซิตี 43%, 55% และ 63%

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าแอมป์ (D) และค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่า 0.01% โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตรา การให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1 กับ 0.01 รอบต่อนาที ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% ภายใต้ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 (ดินเหนียวในสภาวะ Normally Consolidated Clay), 2 (ดินเหนียวในสภาวะ Slightly Overconsolidated Clay) และ 6 (ดินเหนียวในสภาวะ Heavily Overconsolidated Clay) พบว่าค่าแอมป์ของดินที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนัก เฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 กับ 0.01 รอบต่อนาที ให้ค่าแอมป์ที่มีค่าเท่าๆกัน ในดินทั้งสามชนิดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%, 55% และ 63% เมื่อเทียบที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 55%คือเส้นกราฟของ ค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.1 และ 0.01 รอบต่อนาที ที่ได้จะทับกัน (มีค่าเท่ากัน) ในทุกค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกิน(1, 2 และ 6) ในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43%กราฟแอมป์ของอัตราการให้น้ำหนักทั้งสองมีค่าเท่ากันตั้งแต่ค่า สัดส่วนการอัดแน่นเกินที่ 1 ถึง 2 แต่ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินที่ 6 ค่าแอมป์ของอัตราการ

ให้น้ำหนักที่ 0.01 รอบต่อนาที่มีค่าแอมป์มากกว่าที่อัตรา 0.1 รอบต่อนาที่เล็กน้อย

ส่วนในดินมีค่าพลาสติกซีดี 63% มีพฤติกรรมคือเส้นกราฟของค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาที่มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยที่ 0.1 รอบต่อนาที่ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินที่ 1 ถึง 2 แต่ค่าแอมป์จากการทดสอบการรับน้ำหนักเฉือนแบบวัฏจักรที่อัตราการให้น้ำหนักเฉือน 0.01 รอบต่อนาที่มีค่ามากกว่าเล็กน้อยที่ 0.1 รอบต่อนาที่ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินที่ 6

เมื่อเปรียบเทียบค่าแอมป์ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเดียวกันพบว่าดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43% มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 55 % และในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% มีค่าน้อยสุด ในทุกค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวและในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที่ พิจารณาพฤติกรรมของแอมป์เนื่องจากอิทธิพลของอัตราการน้ำหนักแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของแอมป์มีค่าลดลงเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้น และพฤติกรรมนี้เกิดในทั้งอัตราการให้น้ำหนักที่ 0.01 และ 0.1 รอบต่อนาที่

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่มีต่อพฤติกรรมของแอมป์สามารถแบ่งพิจารณาพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ

ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ดินมีค่าในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 ถึง 2 (ดินอยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ลดลงหนึ่งเท่า) พบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมากขึ้น โดยที่ค่าแอมป์มีค่าลดลง 0.5-8 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 7 -52 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น) เมื่อพิจารณาค่าแอมป์สูงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 และ 2 สามารถเรียงลำดับค่าแอมป์จากมากที่สุดจนถึงน้อยสุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 43%, 55% และ 63% ตามลำดับซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันทั้งที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 และ 2 ถ้าพิจารณาการลดลงของค่าแอมป์เมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นพบว่าค่าแอมป์ที่พลาสติกซีดี 43 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 8 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 52%ของแอมป์เริ่มต้น รองลงมาคือดินที่พลาสติกซีดี 63 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 2.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 45%ของแอมป์เริ่มต้น และลดลงน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซีดี 55 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 0.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 7%ของแอมป์เริ่มต้น และเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าแอมป์ต่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นจะได้โดยที่อัตราการลดลงของค่าแอมป์ในดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 8 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 52 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซีดี 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 2.5 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น

คิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวและอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่มีค่าพลาสติกซี้ด 55% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 7 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว

ช่วงที่สองค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 2 ถึง 6 (ดินอยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ลดลงสองเท่าเป็นหกเท่าพบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมากขึ้น โดยที่ค่าแอมป์มีค่าลดลงประมาณ 1-1.5 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 13 -33 % (เปอร์เซ็นต์เป็นค่าแอมป์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้น) เมื่อพิจารณาค่าแอมป์ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 และ 6 สามารถเรียงลำดับค่าแอมป์จากมากที่สุดจนถึงน้อยที่สุดคือในดินที่มีค่าพลาสติกซี้ด 43%, 55% และ 63% ตามลำดับทั้งที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 และ 6 ถ้าพิจารณาค่าการลดลงของค่าแอมป์เมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นพบว่าค่าแอมป์ที่พลาสติกซี้ด 63 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 1 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 33%ของแอมป์เริ่มต้น รองลงมาคือดินที่พลาสติกซี้ด 55 % มีค่าลดลงคือ 1.5 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 23%ของแอมป์เริ่มต้นและลดลงน้อยที่สุดคือดินที่พลาสติกซี้ด 43 % มีค่าลดลงมากที่สุดคือ 1 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 13%ของแอมป์เริ่มต้น

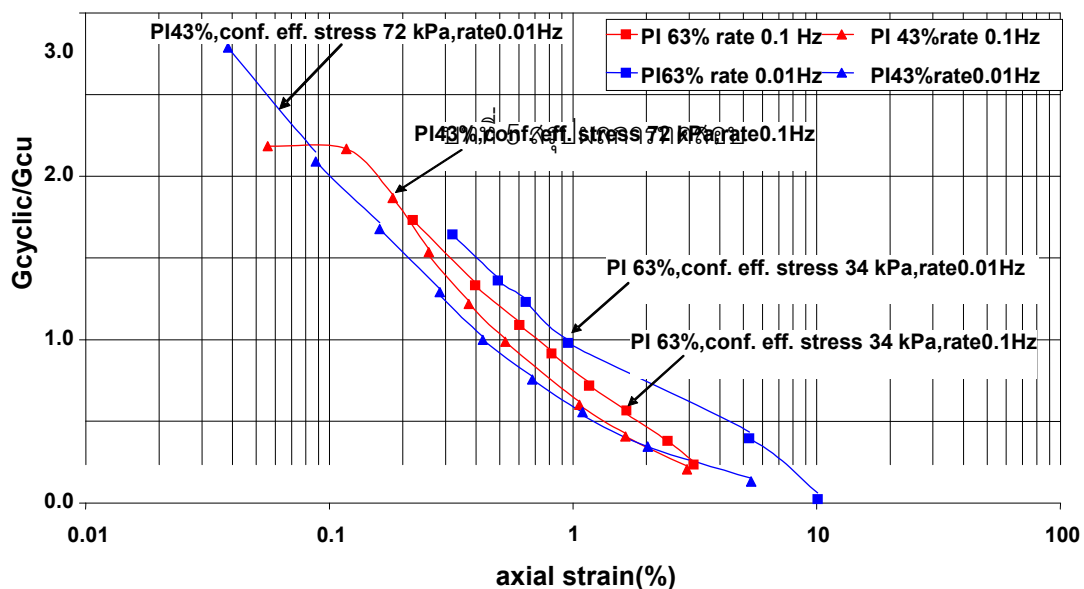
เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าแอมป์ต่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าแอมป์มีอัตราลดลง 0.25-0.375 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 3.25%-8.25% ต่อการเพิ่มเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว โดยที่อัตราการลดลงของค่าแอมป์ในดินที่มีค่าพลาสติกซี้ด 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.25 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 8.25 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว รองลงมาคือดินที่มีค่าพลาสติกซี้ด 63% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.375 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 5.75 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวและอัตราการลดลงน้อยที่สุดคือดินที่มีค่าพลาสติกซี้ด 43% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 0.25 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวหรือเมื่อเทียบกับค่าแอมป์เริ่มต้นคิดเป็น 3.25 เปอร์เซ็นต์ต่อการเพิ่มหนึ่งเท่าของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว

พิจารณาอิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวทั้งหมด (ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีค่าจาก 1 ถึง 6) ที่มีต่อพฤติกรรมของแอมป์พบว่าพฤติกรรมของค่าแอมป์มีค่าลดลงเมื่อดินมีค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าแอมป์ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 มีค่ามากกว่า 2 – 9 เปอร์เซ็นต์หรือลดลง 29-64 % เมื่อเทียบค่าแอมป์ที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 6 โดยที่

ค่าแอมป์ที่ลดลงประมาณ 25%-90% ในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 ถึง 2 โดยลดลงอย่างมากในดินที่มีค่าพลาสติกซิติ 43% และ 63% คือลดลงคิดเป็น 89% และ 71% ตามลำดับ และลดลงประมาณ 11%-75% ในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 โดยลดลงอย่างมากในดินที่มีค่าพลาสติกซิติ 55% คือลดลงคิดเป็น 75% แต่หากพิจารณาเปอร์เซ็นต์การลดลงต่อการเพิ่มเมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัว จากกราฟรูปที่ 4.18 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากราฟค่าแอมป์ในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 ถึง 2 และช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 กราฟที่ได้มีความชันในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 ถึง 2 ความชันมากกว่าช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 แสดงถึงอิทธิพลของการเพิ่มของค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวมีผลทำให้ดินทั้งสามพลาสติกซิติมีค่าแอมป์ลดลงมากในช่วงค่าสัดส่วนอัดแน่นเกินตัว 1 ถึง 2 (OCR=1, Normally Consolidated Clay เปลี่ยนเป็น OCR=2, Slightly Overconsolidated Clay) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่าพลาสติกซิติ 43% ลดลงถึง 8% หรือคิดเป็น 90% ของการลดทั้งหมด ส่วนในช่วงค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 ถึง 6 ค่าแอมป์มีค่าลดลงเล็กน้อยในดินทั้งสามพลาสติกซิติ แม้ว่าค่าสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัวจะเปลี่ยนแปลงถึงสี่เท่า

4.15 เปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนระหว่างการทดสอบให้น้ำหนักแบบวัฏจักร (พลศาสตร์) กับค่าโมดูลัสของ CU test (Su, สถิตยศาสตร์).



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบพลศาสตร์ภายใต้การให้น้ำหนักแบบวัฏจักรเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้จาก

การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบสถิตยศาสตร์ด้วยการทดสอบแบบ CU Test (G_{cyclic}/G_{static}) และค่าความเครียดตามแนวแกน (%) โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% (ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure 72 กิโลปาสคาล) และ 63% (ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure 34 กิโลปาสคาล)

จากกราฟรูปที่ 4.24 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบของค่าโมดูลัสเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบพลศาสตร์ภายใต้การให้น้ำหนักแบบวัฏจักรเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (จุดวิบัติ) ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบสถิตยศาสตร์ด้วยการทดสอบแบบ Consolidate Undrain Test (G_{cyclic}/G_{static}) และค่าความเครียดตามแนวแกน (%) โดยเปรียบเทียบผลของอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักเฉือนที่อัตรา 0.1% กับ 0.01% ในตัวอย่างทดสอบที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% (ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure 72 กิโลปาสคาล) ซึ่งเป็นดินที่อยู่ระดับความลึก 13 เมตรจากผิวดิน และ 63% (ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure 34 กิโลปาสคาล) ซึ่งเป็นดินที่อยู่ระดับความลึก 7 เมตรจากผิวดิน พบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบพลศาสตร์ภายใต้การให้น้ำหนักแบบวัฏจักรเทียบกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบสถิตยศาสตร์ด้วยการทดสอบแบบ Consolidate Undrain Test มีค่าลดลงเมื่อค่าความเครียดตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของค่าโมดูลัสเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบพลศาสตร์ภายใต้การให้น้ำหนักแบบวัฏจักรมีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบสถิตยศาสตร์ด้วยการทดสอบแบบ Consolidate Undrain Test ($G_{cyclic} = G_{static}$) พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนที่เท่ากันจะเกิดในช่วงความเครียดตามแนวแกน 0.4% - 1% โดยในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 43% ซึ่งอยู่ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure มีค่า 72 กิโลปาสคาล ในตัวอย่างทดสอบที่อัตราการให้น้ำหนัก 0.01 รอบต่อนาที มีค่าความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่าในตัวอย่างทดสอบที่อัตราการให้น้ำหนัก 0.1 รอบต่อนาที (จุดที่ค่าโมดูลัสเฉือนแบบพลศาสตร์กับสถิตยศาสตร์มีค่าเท่ากัน) แต่ในดินที่มีค่าพลาสติกซิตี 63% (ภายใต้แรงดันประสิทธิผลที่ overburden pressure 34 กิโลปาสคาล) มีพฤติกรรมตรงกันข้ามคือในตัวอย่างทดสอบที่อัตราการให้น้ำหนัก 0.1 รอบต่อนาที มีค่าความเครียดตามแนวแกนน้อยกว่าในตัวอย่างทดสอบที่อัตราการให้น้ำหนัก 0.01 รอบต่อนาที

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ

จากกราฟพฤติกรรมต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่เปรียบเทียบผลของความถี่ ที่ความถี่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที จะพบว่าพฤติกรรมจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ

ช่วงที่หนึ่งพฤติกรรมของดินในการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรจะมีพฤติกรรมในลักษณะอยู่ภายใต้ขอบเขตยืดหยุ่น (elastic) เนื่องจากพฤติกรรม hysteric stress-strain จะได้ Hyteresis loops ที่มีขนาดเท่าๆกัน (ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน) และขนาด amplitude ของหน่วยแรงมีค่าเท่ากัน (ที่ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน) ซึ่งเรียกว่าพฤติกรรมนี้อยู่ในพฤติกรรมสมดุล (equilibrium) โดยในช่วงพฤติกรรมนี้จะอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนไม่เกิน 1%

ช่วงที่สองพฤติกรรมของดินในการทดสอบการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรจะมีพฤติกรรมในลักษณะอยู่ภายใต้ขอบเขตพลาสติก (plastic) เนื่องจากวงรีซึ่งเกิดจากการเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดจะได้ Hyteresis loops ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน) และขนาด (amplitude) ของหน่วยแรงมีค่าเท่าๆกัน (ที่ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน) โดยในช่วงพฤติกรรมนี้จะอยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนประมาณ 1-2% ขึ้นอยู่ความถี่ของการให้น้ำหนัก ถ้าใช้ความถี่สูงกว่าจะเกิดพฤติกรรมขอบเขตพลาสติก (plastic) เร็วกว่า (ความเครียดตามแนวแกนที่น้อยกว่า) ซึ่งในงานทดสอบนี้ที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที พฤติกรรมนี้จะเกิดที่ช่วงความเครียดตามแนวแกนประมาณ 1-1.6% และความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที พฤติกรรมนี้จะเกิดที่ช่วงความเครียดตามแนวแกนประมาณ 1-3%

หลังจากผ่านช่วงความเป็น plastic แล้ว ตัวอย่างทดสอบจะเข้าสู่พฤติกรรมของการวิบัติ เนื่องจาก Hyteresis loops ซึ่งเกิดจากการเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดจะได้วงรีที่มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน) จนไม่สามารถสร้าง Hyteresis loops และขนาด (amplitude) ของหน่วยแรงมีค่าลดลง (ที่ขนาดหน่วยแรงเท่ากัน)

ผลของความถี่ที่มีต่อพฤติกรรมต่างๆ ของการรับน้ำหนักแบบวัฏจักรคือกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผล โดยที่กำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ความถี่ที่ต่ำกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด (build up) ของแรงดันโพรงส่วนเกิน ถ้าใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า (ช้ากว่า) จะทำให้แรงดันโพรงส่วนเกินเกิดขึ้นมากกว่าเนื่องมีเวลาในเกิดมากกว่าการใช้ความถี่ที่สูงกว่าดังนั้นจึงทำให้กำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลที่ความถี่ที่ต่ำกว่ามีค่าน้อยกว่าที่ความถี่สูง (เร็วกว่า)

สำหรับผลการทดสอบในงานวิจัยเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลที่ได้จากการใช้ความถี่ที่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ให้กำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลที่ใกล้เคียงกันมาก โดยที่ที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที มีค่ากำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลมากกว่าเล็กน้อย

นอกจากนี้ยังให้ผลการเกิดแรงดันโพรงส่วนเกินที่น้อยกว่าเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งผลแตกต่างที่น้อยมาก ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักประสิทธิผลที่ได้จากการใช้ความถี่ที่ 0.1 และ 0.01 รอบต่อวินาที ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนจากความถี่ทั้งสองซึ่งเมื่อพิจารณากราฟพฤติกรรมต่างๆ แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความเครียดตามแนวแกนที่ความถี่ 0.01 รอบต่อวินาที จะพบการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงของกราฟที่ชัดเจนมากกว่าที่ความถี่ 0.1 รอบต่อวินาที โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้าสู่ช่วงของพฤติกรรมของการวิบัติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการทดสอบด้วยความถี่ที่ 0.01 รอบต่อวินาทีเพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของการรับน้ำหนักแบบวัฏจักร

อิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นดินตัวมีอิทธิพลต่อโมดูลัสเฉือนเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ค่าสัดส่วนการอัดแน่นดินตัวที่อยู่ในช่วง Normally Consolidated Clay ($OCR=1$) จะมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสเฉือนเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่อยู่ช่วง Slightly Consolidated Clay ($OCR=2$) และมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสเฉือนอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่อยู่ช่วง Heavily Consolidated Clay ($OCR=6$) เมื่ออยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนที่ค่าช่วงน้อยกว่า 0.1 % (small strain) ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลของแรงดันประสิทธิผล (σ'_3) ส่วนช่วงที่ความเครียดตามแนวแกนที่มีค่ามาก (large strain) คือที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่ามากกว่า 0.1 % ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันและยังความเครียดตามแนวแกนมีค่ามากขึ้น (มากกว่า 1%) ค่าโมดูลัสจะมีค่าเข้าใกล้เคียงกันและจนถึงเท่ากัน เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังรับน้ำหนักเฉือนมีอิทธิพลมากกว่าอิทธิพลของอัตราการให้น้ำหนักและแรงดันประสิทธิผล เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าพลาสติกซิตีมีอิทธิพลต่อโมดูลัสเฉือนพบว่าอิทธิพลน้อยถึงแม้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกซิตีที่ 73% กับ 43% จะได้โมดูลัสเฉือนที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยที่ดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกซิตีที่ 73% มีค่าโมดูลัสเฉือนมากกว่าดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกซิตีที่ 43%

พฤติกรรมของค่าแอมป์มีพฤติกรรมที่ไม่ชัดเจนเมื่ออยู่ในช่วงความเครียดตามแนวแกนที่ค่าช่วงน้อยกว่า 0.1 % (small strain) แต่จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ในช่วงที่ความเครียดตามแนวแกนที่มีค่ามาก (large strain) คือที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่ามากกว่า 0.1 % ค่าแอมป์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น โดยที่ดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกซิตีน้อยกว่าจะให้ค่าแอมป์มากกว่าดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกซิตีมาก อิทธิพลของค่าสัดส่วนการอัดแน่นดินตัวมีอิทธิพลต่อค่าแอมป์เมื่อค่าสัดส่วนการอัดแน่นดินตัวมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแอมป์มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากแรงดันประสิทธิผลมีค่าลดลงตามค่าสัดส่วนการอัดแน่นดินตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรไม่มีอิทธิพลต่อค่าแอมป์

บรรณานุกรม

1. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ : วิศวกรรมปฐพี, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2540
2. สุพจน์ เตชวรสินสกุล : พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
3. Bardet, J.P. : A Scaled Memory Model for the Cyclic Behavior of Soil, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 411-416, 1995
4. Bishop, A.W., and Henkel, D.J. : The Measurement of Properties in the Triaxial Test , Edward Arnold Ltd., London, 2nd. edition, 1962
5. Das, B.M. : The Principles of Geotechnical Engineering, PWS-KENT Publishing Company , Boston , U.S.A , 1990
6. Dwight, H., Sangrey, A. and France, J.W. : Peak Strength of Clay Soils after a Repeated Loading, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading. Swansea, pp 421-429, 1980
7. Geogianou, V.N., Hight, D.W. and Burland, J.B. : Behavior of Clayey Sand Under Undrained Cyclic Triaxial Loading, Geotechnique 41, No. 3, pp 383-393, 1991
8. Hicher, P.Y. and Taghzouti, A. : 3D Cyclic Behavior of Saturated Clay, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 271-276, 1995
9. Ishihara, H. and Yasuda, S. : Cyclic Strengths of Undisturbed Cohesive Soils of Western Tokyo, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, pp 43-54, 1980
10. Kokusho, T. : Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties with Strain Range. Soil and Foundation, Vol 20, No. 2, pp 45-60, 1989
11. Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y. : Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range, Soil and Foundation, Vol 2, No. 2, pp 1-18, 1982
12. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. : Soil Mechanics, 6 version, John Wiley & Sons, 1979
13. Lee, C.J. and Sheu, S.F. : Cyclic Shear Strength and Pore Water Pressure Generation Model under Irregular Loading, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 417-422, 1995

14. Meimon, Y. and Hicher, P.Y. : Mechanical Behaviour of Clays under Cyclic Loading, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading. Swansea, pp 77-87, 1980
15. Nakai, T., Hoshikawa, T. and Chowchung, E.Q. : Stress Strain Behavior of Clay Undrain Cyclic Loading and Its Modeling, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 405-410, 1995
16. Pradhan, TB.S., Dam, L.T.K. and Imai, G. : Effect of Cyclic Loading Period on the Behavior of Clay Under Undrained Torsional Simple Shear, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 119-124, 1995
17. Rix, G.J. and Spang, A.W. : Measurement of in Situ Damping Ratio Using Surface Wave, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 345-350, 1995
18. Skempton, A.W. and Sowa, V.A. : The Behavior of Saturated Clays During Sampling and Testing Geotechnique , London , England , 1963
19. Teachavorasinskun, S. , Thongchim, P. and Lukkunaprasit, P : Shear Modulus and Damping Ratio of a Clay During Undrained Cyclic Loading, Geotechnique 51, No. 5, pp 467-470, 2001
20. Teachavorasinskun, S. , Thongchim, P. and Lukkunaprasit, P : Shear Modulus and Damping Ratio of Soft Bangkok Clay, Can. Geotech. J, Vol. 39, pp 1201-1208, 2002
21. Teachavorasinskun, S. , Thongchim, P. and Lukkunaprasit, P. : Stress Rate Effect on the Stiffness of Soft Clay from Cyclic Compression and Extension Triaxial Tests, Geotechnique 52, No. 1, pp 51-54, 2002
22. Zhang, L. : Elastoplastic Modeling of Soil Behavior Under Cyclic Loading, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), pp 423-428, 1995