

รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-73



รายงานการวิจัย

ผลกระทบของอัตราการกดต่อกำลังกดในสามแกน
ของหินทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

(Effects of Loading Rate on Triaxial Compressive Strength
of Saturated Sandstone)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-73



รายงานการวิจัย

ผลกระทบของอัตราการกดต่อกำลังกดในสามแกน
ของหินทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

(Effects of Loading Rate on Triaxial Compressive Strength
of Saturated Sandstone)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

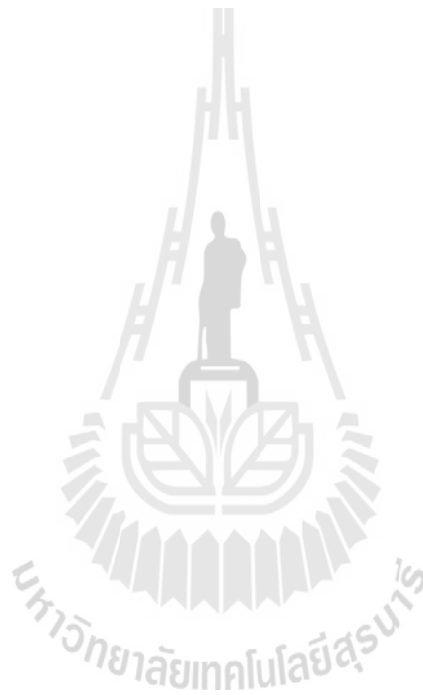
เมษายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

เมษายน 2555



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ เพื่อทดสอบหาผลกระทบจากแรงดันน้ำและอัตราการให้แรงกดต่อกำลังรับแรงกดและคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินทราย ซึ่งเป็นหินทรายจากหมวดหินพระวิหาร ถูกตัดและขัดผิวให้เรียบเพื่อให้ได้แท่งตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอกขนาด $54 \times 54 \times 108$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร การทดสอบได้ใช้โครงกดทดสอบแบบสามแกนจริงโดยให้ค่าความเค้นกดด้านข้างคงที่เท่ากับ 0, 3, 5 และ 12 เมกะปาสคาล และให้ความเค้นกดในแนวแกนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ซึ่งผันแปรจาก 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 เมกะปาสคาลต่อวินาที ตัวอย่างหินได้จัดเตรียมขึ้นเพื่อนำมาทดสอบในสองสภาวะ คือ สภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลการวิจัยพบว่า หินทรายมีค่าความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงกดสูงสุดและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้แรงกด กำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้นกดด้านข้างและอัตราการให้แรงกดสูง แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างส่งผลให้ความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหินลดลง ซึ่งผลกระทบจากแรงดันน้ำต่อการลดลงของความเค้นประสิทธิผลจะสูงขึ้นเมื่อตัวอย่างหินอยู่ภายใต้อัตราการกดสูงและปรากฏการณ์ลักษณะนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อหินอยู่ภายใต้ความดันล้อมรอบสูง เนื่องจากน้ำในช่องว่างไม่สามารถระบายออกจากตัวอย่างหินได้ อัตราส่วนปัวซองของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงกว่าตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดันน้ำในช่องว่างมีผลทำให้การขยายตัวของตัวอย่างหินมีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่างการให้แรงกดในแนวแกน สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินทรายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้แรงกดสูงขึ้น โดยตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงกว่าตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเสมอ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินทั้งสองสภาวะนี้จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่ออัตราการให้แรงกดสูงขึ้น ผลการวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายหรือประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่อยู่ในหรือบนหินทรายจากหมวดหินพระวิหารที่อยู่ใต้ระดับน้ำ เช่น ฐานรากหรืออุโมงค์ของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ และอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกันในขณะที่มีการก่อสร้างหรือการใช้งาน

Abstract

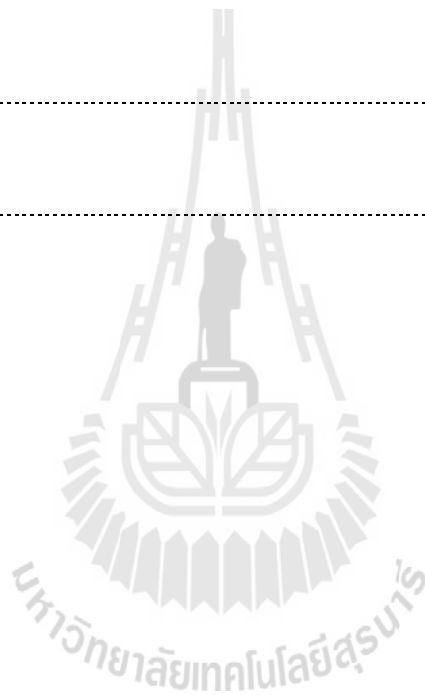
The objective of this study is to experimentally determine the effects of pore pressure and loading rate on compressive strength and elastic properties of sandstone specimens. The sandstone belongs to the Phra Wihan formation. It is cut and ground to obtain rectangular block with nominal dimensions of 54×54×108 mm³. A polyaxial load frame is used to apply constant confining pressures of 0, 3, 5, and 12 MPa. The axial stress is increased at constant rates varying from 0.001, 0.01, 0.1, 1 to 10 MPa/s. The specimens are prepared to test under two conditions: completely dry and fully saturated. The results indicate that the sandstone has an average porosity of about 15%. For both dry and saturated condition the sandstone compressive strengths and elastic modulus increase exponentially with the loading rate. The strengths of the saturated specimens are lower than those of the dry specimens particularly under high confining pressures and high loading rates. The built-up pore pressure can reduce the total deviatoric stresses more effective when the specimens are subject to rapid loading. This phenomenon is more obvious when the rock is under high confining pressures because water in the pore spaces cannot drain out off the specimen. The saturated specimens show slightly higher Poisson's ratio than do the dry specimens, probably because the pore pressure increases the specimen dilations during loading. The elastic modulus of the sandstone increases with the loading rate. The dry specimens always show greater elastic modulus than does the saturated specimens. The discrepancy becomes larger under higher loading rates. The research findings can be used to predict or assess the stability of the submerged geological structures in and on the Phra Wihan sandstone (e.g. dam and reservoir foundations or tunnels) where the rock is subject to various loading rates during construction or operation.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	9
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	15
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	15
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	15
4.3 การทดสอบกำลังกดของหินทราย.....	17
4.4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์.....	41
5.1 กำลังความต้านทานแรงกดสูงสุดของหิน.....	41
5.2 ความยืดหยุ่นของหิน.....	43
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	47
บรรณานุกรม.....	49
ประวัติผู้วิจัย.....	53



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะแห้ง.....	12
3.2 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	13
4.1 ผลการทดสอบกำลังกดในสภาวะแห้ง.....	20
4.2 ผลการทดสอบกำลังกดในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	21
4.3 กำลังของหินตามกฎของคูลอมป์.....	39



สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	3
2.1	7
3.1	10
3.2	10
3.3	11
3.4	11
4.1	16
4.2	16
4.3	17
4.4	18
4.5	22
4.6	23
4.7	24
4.8	25
4.9	26
4.10	27
4.11	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะ อิมมิตด้วยน้ำโดยมีความดันล้อมรอบเท่ากับ 12 MPa.....	29
4.13 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดโดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.001 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	30
4.14 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดโดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.01 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	30
4.15 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดโดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.1 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	31
4.16 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดโดยใช้อัตราการให้แรงกด 1 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	31
4.17 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดโดยใช้อัตราการให้แรงกด 10 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	32
4.18 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดของหินทรายในสภาวะแห้ง และสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	32
4.19 เกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.001 MPa/s.....	33
4.20 เกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.01 MPa/s.....	33
4.21 เกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิมมิต ด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.1 MPa/s.....	34
4.22 เกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 1 MPa/s.....	34
4.23 เกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 10 MPa/s.....	35
4.24 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราการให้แรงกดในสภาวะแห้งและ ในสภาวะอิมมิตด้วยน้ำ.....	35
4.25 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง และสภาวะอิมมิตด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 0.001 MPa/sec.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 0.01 MPa/sec.....	36
4.27 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 0.1 MPa/sec.....	37
4.28 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 1 MPa/sec.....	37
4.29 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 10 MPa/sec.....	38
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติดของหินและอัตราการให้แรงกดของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	42
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานและอัตราการให้แรงกดของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	42
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานของตัวอย่างหินแห้งต่อตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำและอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน.....	44
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราการให้แรงกดในสภาวะแห้งและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	44
5.5 อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสภาวะแห้งและอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน.....	45
5.6 อัตราส่วนปัวซองของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสภาวะแห้งภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน.....	46
5.7 สัมประสิทธิ์ก๊อนของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสภาวะแห้งภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน.....	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในสภาวะความเป็นจริงชั้นหินที่มีอยู่ในภาคสนามมักจะมีรอยแตกและความพรุน ส่งผลให้เกิดช่องว่างในเนื้อหิน ทำให้ของเหลวที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น น้ำหรือน้ำมันเข้าไปอยู่ในช่องว่างดังกล่าว โดยเฉพาะหินที่มีความพรุนและความซึมผ่านสูง เช่น หินทราย ดังนั้นของเหลวอาจส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของหิน หากมีการก่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่บนชั้นหินนั้น เช่น ฐานรากเขื่อน ตอหม้อสะพาน หรืออาคารพาณิชย์ อาจส่งผลกระทบต่อสัดส่วนความปลอดภัยของการสร้างหรือแม้กระทั่งกรณีของการสูบน้ำมันดิบออกมาจากชั้นหินก็เก็บ ความเค้นที่กระทำต่อชั้นหินดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของของเหลวที่อยู่ในหินต่อค่าความแข็งของหินโดยใช้การแปรผันการให้ความเค้นกับเวลาที่แตกต่างกัน จึงเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญและจำเป็นเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้เป็นปัจจัยในการออกแบบฐานรากของโครงสร้างที่วางตัวบนชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือนำไปใช้ในการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยในกรณีที่ต้องทำกิจกรรมบนชั้นหิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินทรายภายใต้อัตราการให้แรงกดที่ต่างกัน โดยที่ตัวอย่างหินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
- 2) สร้างเกณฑ์การวิบัติของหินที่ขึ้นกับเวลาและอัตราการให้แรงกดของตัวอย่างหินที่อยู่ในสภาวะปกติ และในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ประโยชน์เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการแตกของหินรอบหลุมเจาะในเทคโนโลยีการนำความร้อนใต้พิภพมาผลิตกระแสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหินทรายชุดพระวิหาร (Phra Wihan Sandstone)
- 2) การทดสอบกำลังรับแรงกด (กำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน) ของตัวอย่างหินทราย ดำเนินการทั้งในสภาวะปกติ (แห้งในห้องปฏิบัติการ) และในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- 3) การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวใช้อัตราการให้ความเค้น (Loading rate) 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/sec
- 4) การทดสอบกำลังกดในสามแกนใช้อัตราการให้ความเค้น 5 อัตรา (ตามข้อ 3) โดยมีการทดสอบภายใต้ความดันล้อมรอบ 3 ระดับ คือ 3, 7 และ 12 MPa

- 5) การทดสอบที่อัตราการให้ความเค้นกดต่ำจะแสดงกำลังกดของหินแบบมีการอัดตัวคายน้ำ ส่วนอัตราการให้ความเค้นกดสูงจะแสดงกำลังกดของหินแบบมีการอัดตัวไม่คายน้ำ
- 6) ในงานวิจัยนี้จะไม่มีการทดสอบและสำรวจในภาคสนาม

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ค่าความแข็งของหินในธรรมชาติมักมีปัจจัยทั้งภายนอกและภายในที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งลดลง น้ำบาดาลก็เป็นหนึ่งในปัจจัยเหล่านั้นที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของหิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการแท้จริงแล้วเพื่อศึกษาพฤติกรรมของชั้นหิน ดังนั้นการทดสอบที่มีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนามที่มีสภาวะแวดล้อมอ้อมตัวของน้ำบาดาลที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างของเนื้อหิน จึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของชั้นหินที่อ้อมตัวด้วยน้ำเมื่อมีความเค้นมากระทำในอัตราที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปเป็นปัจจัยในการออกแบบโครงสร้างที่ก่อสร้างบนชั้นหินที่อ้อมตัวด้วยน้ำเพื่อคำนวณหาค่ากำลังรับแรงกดที่แท้จริงของชั้นหิน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของน้ำที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างของเนื้อหิน (Pore pressure) ต่อค่าความแข็งของหิน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหิน ด้วยการทดสอบแรงกดสามแกนในสภาวะอัดตัวคาย การศึกษาผลกระทบของความพรุนในเนื้อหิน และความสามารถในการคายน้ำของตัวอย่างหิน

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ซึ่งถูกจัดเตรียมให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอก มีขนาดกว้าง 54 มิลลิเมตร ยาว 54 มิลลิเมตร สูง 108 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวได้ใช้ตัวอย่างหิน 15 ตัวอย่าง และการทดสอบกำลังกดในสามแกนได้ใช้ตัวอย่างหิน 36 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างหินที่สภาวะคล้ายจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ชั้นหินในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอ้อมตัวด้วยน้ำบาดาล การทดสอบนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุด ได้แก่

1) การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว เป็นการศึกษาคูณสมบัติค่าความแข็งของหิน ซึ่งได้ทดสอบในสองสภาวะปกติคือ หินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และในสภาวะที่หินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยให้อัตราความเค้นหลักแปรผันกับเวลาที่แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa ต่อวินาที เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำต่ออัตราการรับแรงกดของหิน โดยใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 15 ตัวอย่าง

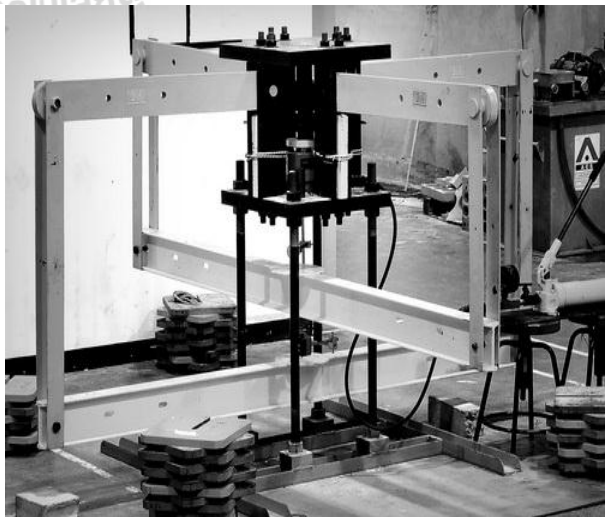
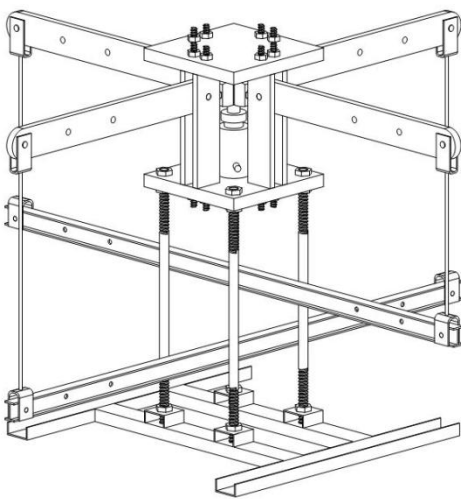
2) การทดสอบกำลังกดในสามแกน เป็นการศึกษาคูณสมบัติค่าความแข็งของหิน ซึ่งได้ทดสอบในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยให้อัตราแรงกดแปรผันกับเวลาแตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa ต่อวินาที โดยทำการจำลองสภาวะความดันล้อมรอบต่างกันว่า 0, 3, 7 และ 12 MPa เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำต่ออัตราการรับแรงกดของหินในสภาวะที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยจะใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 36 ตัวอย่าง รูปที่ 1.1 แสดงโครงกวดทดสอบในสามแกนจริงที่จะใช้ในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างเกณฑ์การแตก

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในขั้นตอนที่ 3 มาวิเคราะห์ค่าความแข็งของหินในสภาวะที่แห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินทรายต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ



รูปที่ 1.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนออย่างละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ วิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

องค์ความรู้ที่เกี่ยวกับผลกระทบของแรงดันน้ำต่อความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูปร่างของหิน มีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบและประเมินเสถียรภาพของมวลหินที่เป็นฐานรากของเขื่อน อาคาร และ สะพาน ซึ่งจะมีน้ำหนักกดทับอยู่บนมวลหินนั้นๆ และยังสามารถนำองค์ความรู้นี้มาประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นน้ำบาดาลและน้ำมัน หน่วยงานที่จะได้รับประโยชน์ประกอบด้วย

- กรมทางหลวง
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- กระทรวงพลังงาน
- กรมทรัพยากรธรณี
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
- บริษัทเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมธรณี
- สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของแรงดันต้นต่อความแข็งของหิน ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่นำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับหินโดยมีผลกระทบจากน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การสร้างฐานรากของเขื่อนและต่อหม้อสะพานโดยที่หินอยู่ใต้ระดับน้ำทำให้น้ำเข้าไปอยู่ในช่องว่างของหิน เป็นต้น ได้ค้นคว้าศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ และยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหินด้วยการทดสอบแรงกดแบบสามแกนในสภาวะอัดตัวคาย ผลกระทบของความพรุนในเนื้อหิน และความสามารถในการคายน้ำของตัวอย่างหิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Peng and Zhang (2007) ได้สรุปผลจากการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวของหินตะกอนสามชนิดซึ่งพบว่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินลดลงเมื่อค่าความชื้นในตัวอย่างหินเพิ่มขึ้น และได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดในแกนเดียวและค่าความเค้นยึดติดของหินในสภาวะแห้งที่ลดลงเนื่องจากแรงดันน้ำที่อยู่ในช่องว่างของหินดังสมการ

$$UCS_w = UCS - [(2 \cdot p \cdot \sin \phi) / (1 - \sin \phi)] \quad (2.1)$$

$$c_w = c - p \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

เมื่อ UCS และ UCS_w คือค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและในสภาวะเปียก และมีแรงดันน้ำเท่ากับ p ค่า α เป็นค่าคงที่ (Biot's constant) ϕ คือค่ามุมเสียดทานภายใน c และ c_w คือค่าความเค้นยึดติดของหินในสภาวะแห้งและในสภาวะที่มีแรงดันน้ำเท่ากับ p

Hawkins and McConnel (1992) และ Vasarhelyi and Van (2006) ได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในตัวอย่างหินต่อกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (UCS) ของหินไว้ดังสมการ

$$UCS = a [\exp(-bw)] + c \quad (2.3)$$

เมื่อ w คือค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างหิน ส่วน a , b และ c เป็นค่าคงที่สำหรับตัวอย่างหินที่มีความชื้นเท่ากับ 0 หรือเป็นตัวอย่างหินแห้ง ค่า $UCS_{dry} = a + c$ และถ้าตัวอย่างหินมีการอิ่มตัวด้วยน้ำจะทำให้ค่า UCS_{sat} เข้าใกล้ค่าคงที่ c โดยที่ค่าคงที่ b จะไม่มีหน่วยแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังกดของหินตามการเปลี่ยนแปลงความชื้น

Li et al. (2012) ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำต่อความแข็งของหินแปรจากหินทราย (meta-sedimentary rock) ได้แก่ หินแปรจากหินทราย (meta-sandstone) และหินแปรจากหินดินดาน (meta-siltstone) โดยที่หินทั้งสองชนิดนี้มีความชื้นขณะอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 0.10 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ และมีความพรุนเท่ากับ 0.18 และ 0.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าน้ำมีผลต่อการลดกำลังของหินเนื่องจากส่งผลให้ค่ามุมเสียดทานลดลงสำหรับกฎกำลังของคูลอมบ์ และมีผลให้ค่าคงที่ m , ตามกฎกำลังของ Hoek and Brown ลดลงด้วย ด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน น้ำมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินลดลงและในทางกลับกันจะมีผลให้ค่าอัตราส่วนปริมาตรของหินเพิ่มขึ้น

Masuda (2001) ได้ศึกษาผลกระทบจากน้ำต่อกำลังของหินแกรนิตและหินแอนดีไซต์ ตัวอย่างหินถูกทดสอบในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้แรงดันล้อมรอบแตกต่างกันระหว่าง 0.1 ถึง 200 MPa ในการทดสอบได้มีการผันแปรอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดของตัวอย่างหินให้คงที่ (Constant strain-rate tests) ในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-8} s^{-1} ผลการศึกษาระบุว่ากำลังของตัวอย่างหินลดลงเมื่ออัตราการให้ความเครียดต่อตัวอย่างหินลดลง ตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างหินที่อยู่ในสภาวะแห้ง ผลกระทบของอัตราการให้ความเครียดต่อกำลังของหินจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันล้อมรอบที่สูงขึ้นและจะมีผลกระทบต่อตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่าตัวอย่างหินแห้งในสภาวะที่มีแรงดันล้อมรอบต่ำ

Sun และ Hu (1997) ได้ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงในหินแกรนิตเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงและอัตราการให้แรงกดในหินแกรนิตโดยมีผลกระทบของน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยการทดสอบแบบ Brazil split tension โดยการให้แรงแปรผันตามเวลาที่ 60, 300, 600 และ 172,800 วินาที ตัวอย่างหินที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 41.3 มิลลิเมตร ยาว 30-50 มิลลิเมตร ตัวอย่างหินทุกชิ้นถูกนำไปแช่น้ำมากกว่า 10 วัน ก่อนนำไปทดสอบ ผลการทดสอบระบุว่าน้ำทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงลดลงที่ระยะเวลาานาน

Fuenkajorn และ Kenkhunthod (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดี่ยวและสามแกนของหินทรายสามชนิดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาอิทธิพลของอัตราการกดต่อกำลังรับแรงกดในหินทราย โดยผันแปรอัตราการให้แรงกดที่ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa ต่อวินาที และมีความดันล้อมรอบที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa โดยใช้หินทรายชุดพระวิหาร ชุดพุกพาน และชุดภูกระดึงในการทดสอบ ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอกขนาด 50×50×100 มิลลิเมตร ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดของหินทรายแต่ละชนิดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อได้รับอัตราการให้แรงกดที่สูงขึ้น

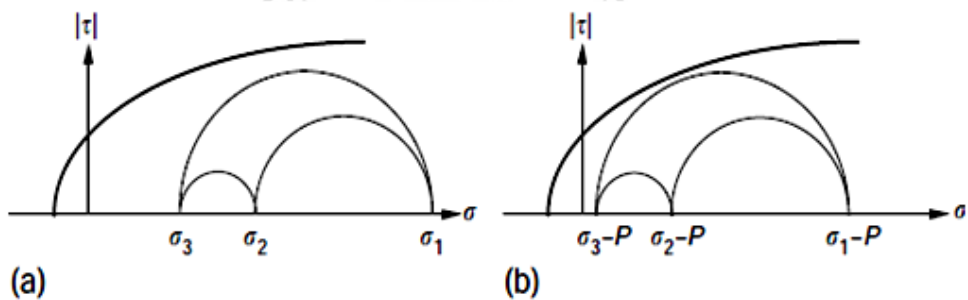
Derakhshandi (2008) ได้ทำการศึกษาการเกิดแรงดันน้ำในช่วงระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความเค้นเฉือน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบเฉือน และลักษณะการทรุดตัวในโครงสร้างของดิน ซึ่งมีผลกระทบใน Plastic fines (Kaolinite) ต่อการเกิดแรงดันน้ำในชั้นดินอิ่มตัว และได้ทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดิน โดยทำการทดสอบการกดในสามแกนแบบวัฏจักร ในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ค่าความเครียดเฉือนที่ทำให้เกิดแรงดันน้ำและปริมาตรเฉลี่ยจากการกดอัดของตัวอย่างในช่วงการกระจายของดิน

ผลลัพธ์ที่ได้นำไปสร้างเกณฑ์ความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ระดับของความเครียดที่เกิดขึ้นในช่องว่างภายในเนื้อดินและใช้คาดคะเนความแตกต่างของเนื้อดิน (Kaolinite-sand) เกณฑ์ความเครียดเฉือนนี้ ได้แสดงพฤติกรรมของดิน (Clean sand) ประมาณ 0-20% และพฤติกรรมของเนื้อดิน (Kaolinite) ระหว่าง 20-30% ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของดิน

Jaeger and Cook (2007) ได้อธิบายการแตกของหินภายใต้ผลกระทบของแรงดันน้ำและความแตกต่างของช่องในเนื้อหินภายใต้ความดันล้อมรอบ โดยทำการทดสอบการกดในสามแกนและทำการวิเคราะห์โดยใช้เกณฑ์การแตกของ Coulomb ในการพิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำ ผลที่ได้พบว่าแรงดันน้ำจะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าต่ำลงที่ค่าความเค้นหลักต่ำสุดเดียวกันดังรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่จุดแตกของหินภายใต้แรงดันน้ำ

Yozinaka et al. (1997) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหินด้วยการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักรในสภาวะอัดตัวคายน้ำของหิน 4 ชนิด ได้แก่ หินทัฟฟ์ หินทราย หินโคลน และหินทรายแป้ง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงดันน้ำมีผลกระทบต่อค่าความแข็งของหินที่มีเนื้ออ่อนเนื่องจากค่ามุมเสียดทานภายในวัฏจักร (Internal friction angle) ของการกดทดสอบมีค่าสูง และจะลดต่ำลงเมื่อตัวอย่างหินถูกกดทดสอบด้วยวัฏจักรที่มากขึ้น เป็นผลให้เกิดรอยแตกในผลึกมากขึ้น แรงดันน้ำที่อยู่ในช่องว่างในเนื้อหินนอกจากจะลดค่ากำลังกดโดยรวมของหินแล้วยังส่งผลให้หินมีพฤติกรรมแบบพลาสติก กล่าวคือ มีความเปราะลดลง

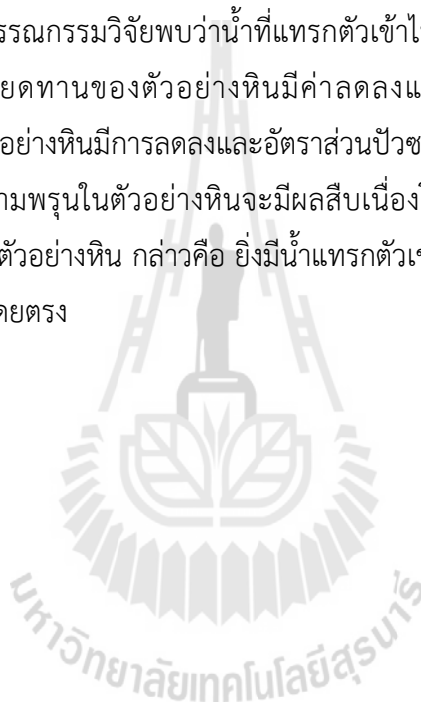
Fredrich et al. (1994) ได้ทำการทดสอบหินเถ้าภูเขาไฟ (Tuff) และหินทรายภายใต้แรงดันน้ำในห้องปฏิบัติการ พบว่าอัตราการกดหรือการให้แรงต่อตัวอย่างหินจะมีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่วัดได้ ซึ่งผลที่ได้ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ อาทิ ความพรุนของเนื้อหินและความสามารถในการคายน้ำของตัวอย่างหิน



รูปที่ 2.1 ความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉาก โดยที่ a) ไม่พิจารณาแรงดันน้ำ และ b) พิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำ

Perera et al. (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบการผันแปรแรงดันของของไหลซึ่งประกอบด้วย น้ำ ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ในถ่านหินสีน้ำตาล ต่อค่ากำลังรับแรงกดของถ่านหิน โดยใช้การทดสอบ กำลังกดในแกนเดียว ตัวอย่างถ่านหิน (Latrobe Valley brown coal) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ยาว 76 มิลลิเมตร โดยให้ตัวอย่างอิมิตัวด้วยของไหลสามชนิด ได้แก่ น้ำ ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อทำการทดสอบจะให้ของไหลมีแรงดันต่างกันที่ 1, 2 และ 3 MPa ผลการทดสอบระบุว่าแรงดันน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ค่ากำลังรับแรงกดที่จุดวิกฤติของถ่านหินมีค่าลดลง 17% และ 10% ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามไนโตรเจนทำให้ค่ากำลังรับแรงกดเพิ่มขึ้น 2% ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าลดลง 8% และ 16% เมื่อตัวอย่างอิมิตัวด้วยน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มขึ้น 5.5% เมื่อตัวอย่างอิมิตัวด้วยไนโตรเจน

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่าน้ำที่แทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างของตัวอย่างหินส่งผลให้กำลังของหินลดลง โดยมุมเสียดทานของตัวอย่างหินมีค่าลดลงและหินมีการอ่อนตัวมากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินมีการลดลงและอัตราส่วนปัวซองของหินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สัมพันธ์กับความพรุนของตัวอย่างหิน เพราะความพรุนในตัวอย่างหินจะมีผลสืบเนื่องโดยตรงต่อความชื้นในตัวอย่างหินและปริมาณอัตราส่วนของน้ำที่อยู่ในตัวอย่างหิน กล่าวคือ ยิ่งมีน้ำแทรกตัวเข้าไปอยู่ในปริมาณสูงก็จะส่งผลต่อกำลังของหินและการอ่อนตัวของหินโดยตรง



บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

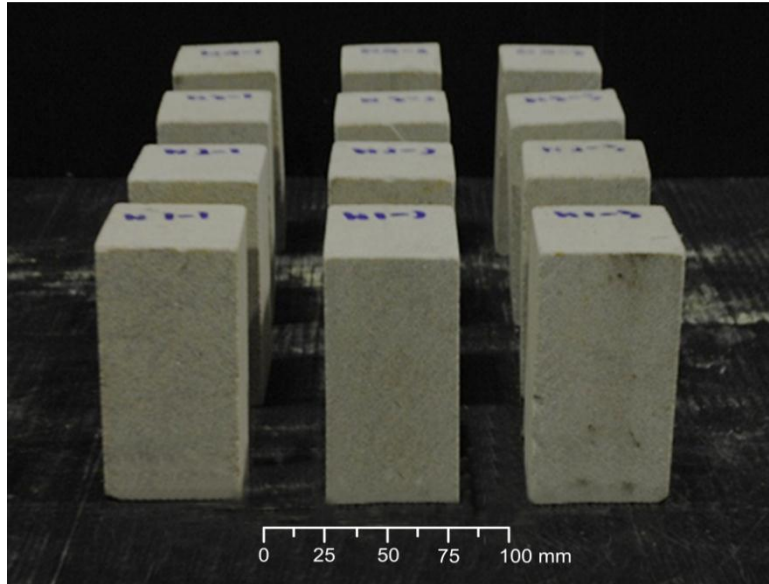
ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (Phra Wihan Sandstone - PWSS) มีสีขาว มีความพรุน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง อีกทั้งยังกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งโครงสร้างทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มีโอกาสที่จะก่อสร้างในชั้นหินดังกล่าวนี้ ในการจัดเตรียมตัวอย่างหินเบื้องต้นได้ทำการตัดหินเป็นรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอก มีพื้นที่หน้าตัด 54×54 มิลลิเมตร และมีความยาว 108 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) โดยคัดเลือกตัวอย่างที่มีความสมบูรณ์มาใช้ในการทดสอบ กล่าวคือ ต้องเป็นตัวอย่างหินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นอยู่ก่อนหน้า

คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าเป็นหินทรายที่มีสีขาว มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่หินทรายชุดนี้มีแร่องค์ประกอบหลัก ได้แก่ แร่ควอตซ์ 75% แร่เฟลด์สปาร์ 15% แร่ไมกา 7% และแร่อื่นๆ 3% (Phueakphum and Fuenkajorn, 2010)

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแบบแห้ง (Completely dry) ซึ่งเป็นการทดสอบตามแบบมาตรฐานสากลทั่วไป และตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนซึ่งเป็นสภาวะของหินที่อยู่ใต้ระดับน้ำหรือจมอยู่ในน้ำ ในแต่ละกลุ่มของการทดสอบจะใช้ตัวอย่างกลุ่มละ 30 ก้อน

สำหรับตัวอย่างหินที่ต้องทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีวิธีการทำให้ตัวอย่างหินอิ่มตัวด้วยน้ำโดยนำตัวอย่างหินบรรจุในหม้อดูดสุญญากาศ (รูปที่ 3.2) ที่มีน้ำอยู่ภายในและใช้ปั๊มแรงดัน (รูปที่ 3.3) เพื่อช่วยให้น้ำในหม้อดูดสุญญากาศดันตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอน ซึ่งทำให้ตัวอย่างหินเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบและเพื่อให้มั่นใจว่าตัวอย่างหินเกิดการอิ่มตัว จากนั้นทิ้งตัวอย่างหินไว้ในหม้อสุญญากาศที่ให้แรงดันเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (สังเกตว่าไม่มีฟองอากาศออกมาจากตัวอย่างหินซึ่งหมายถึงช่องว่างในตัวอย่างหินถูกเติมเต็มด้วยน้ำแล้ว)

ตัวอย่างหินที่จัดเตรียมทุกก้อนมีการอ่านและบันทึกขนาดของตัวอย่างอย่างละเอียดและมีการชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของหินที่นำมาทดสอบมีค่าประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจะมีค่าความชื้น (Water content) ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 หม้อดูดสูญญากาศ



รูปที่ 3.3 ปั๊มแรงดัน



รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารให้อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะแห้ง

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Dry Density (g/cc)	Void Ratio* = $[(G_s \times \rho_w) / \rho_d] - 1$
PWSS-D-01	53.0	54.0	103.8	2.17	0.22
PWSS-D-02	53.5	53.0	104.0	2.19	0.21
PWSS-D-03	52.5	53.0	103.1	2.23	0.19
PWSS-D-04	52.4	53.4	103.8	2.23	0.19
PWSS-D-05	52.4	53.6	104.4	2.21	0.20
PWSS-D-06	52.3	53.3	103.7	2.22	0.19
PWSS-D-07	52.6	52.7	104.3	2.26	0.17
PWSS-D-08	52.5	53.2	103.8	2.25	0.18
PWSS-D-09	52.7	53.7	103.8	2.20	0.20
PWSS-D-10	52.2	52.5	104.1	2.22	0.19
PWSS-D-11	52.9	52.6	103.4	2.26	0.17
PWSS-D-12	52.1	52.3	103.4	2.31	0.15
PWSS-D-13	52.4	52.4	104.3	2.23	0.19
PWSS-D-14	52.3	52.4	104.3	2.23	0.19
PWSS-D-15	52.3	52.4	103.5	2.25	0.18
PWSS-D-16	53.4	52.0	103.1	2.23	0.19
PWSS-D-17	52.3	52.3	103.8	2.25	0.18
PWSS-D-18	52.3	52.5	104.4	2.23	0.19
PWSS-D-19	52.6	52.5	104.4	2.21	0.20
PWSS-D-20	53.0	52.4	103.4	2.25	0.18
PWSS-D-21	52.3	53.3	103.3	2.22	0.19
PWSS-D-22	53.1	52.3	103.3	2.26	0.17
PWSS-D-23	52.4	52.9	103.3	2.27	0.17
PWSS-D-24	52.9	52.5	102.5	2.24	0.18
PWSS-D-25	52.3	50.3	103.1	2.25	0.18
PWSS-D-26	52.3	51.8	103.0	2.24	0.18
PWSS-D-27	52.8	52.9	103.7	2.22	0.19

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะแห้ง (ต่อ)

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Dry Density (g/cc)	Void Ratio* = $[(G_s \times p_w) / \rho_d] - 1$
PWSS-D-28	52.2	52.9	102.7	2.32	0.14
PWSS-D-29	52.4	51.8	102.7	2.26	0.17
PWSS-D-30	52.4	52.4	102.1	2.29	0.16

* $G_s = 2.65$ และ $\rho_w = 1$ g/cc

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Dry Density (g/cc)	Wet Density (g/cc)	Water Content (%)	Void Ratio* = $[(G_s \times \rho_w) / \rho_d] - 1$
PWSS-W-01	52.4	52.8	103.7	2.23	2.35	5.3	0.19
PWSS-W-02	52.4	52.7	103.5	2.23	2.34	4.7	0.19
PWSS-W-03	53	53.6	103.6	2.31	2.44	5.4	0.15
PWSS-W-04	54.2	52.4	103.3	2.28	2.38	4.2	0.16
PWSS-W-05	52.4	54.4	104.5	2.21	2.32	4.9	0.20
PWSS-W-06	54.6	52.7	103.8	2.19	2.31	5.4	0.21
PWSS-W-07	53	52.2	103.8	2.22	2.33	4.7	0.19
PWSS-W-08	52.5	54.2	103.5	2.26	2.38	4.8	0.17
PWSS-W-09	52.4	52.5	103.8	2.25	2.35	4.6	0.18
PWSS-W-10	54.1	52.7	104.3	2.23	2.35	5.7	0.19
PWSS-W-11	53.4	52.5	103.7	2.28	2.40	4.9	0.16
PWSS-W-12	52.5	52.9	103.6	2.25	2.36	4.6	0.18
PWSS-W-13	52.3	52.3	103.4	2.30	2.39	4.3	0.15
PWSS-W-14	51.9	53.6	103.9	2.26	2.36	4.7	0.17
PWSS-W-15	52.4	53.7	103.2	2.29	2.40	4.8	0.16
PWSS-W-16	51.9	53.2	103.5	2.29	2.40	5.3	0.16
PWSS-W-17	52.7	53.3	104.3	2.20	2.30	4.9	0.20

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (ต่อ)

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Dry Density (g/cc)	Wet Density (g/cc)	Water Content (%)	Void Ratio* = $[(G_s \times p_w) / \rho_d] - 1$
PWSS-W-18	52.6	52.7	103.4	2.23	2.34	5.1	0.19
PWSS-W-19	52.2	52.8	104.7	2.23	2.33	4.7	0.19
PWSS-W-20	52.4	52.5	103.4	2.25	2.36	5.1	0.18
PWSS-W-21	52.9	52.7	103.6	2.21	2.32	5.0	0.20
PWSS-W-22	52.7	51.5	102.8	2.29	2.40	4.9	0.16
PWSS-W-23	52.7	51.5	103.0	2.30	2.43	6.0	0.15
PWSS-W-24	52.4	54.1	104.5	2.22	2.33	5.0	0.19
PWSS-W-25	52.5	54.2	103.1	2.27	2.38	4.7	0.17
PWSS-W-26	52.4	52.5	103.8	2.25	2.37	5.2	0.18
PWSS-W-27	52.4	53.6	103.2	2.27	2.40	5.6	0.17
PWSS-W-28	52.7	51.6	102.8	2.30	2.37	4.0	0.15
PWSS-W-29	54.1	52.3	104.1	2.24	2.34	4.5	0.18
PWSS-W-30	52.4	52.9	103.6	2.29	2.39	4.4	0.16

* $G_s = 2.65$ และ $\rho_w = 1$ g/cc

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

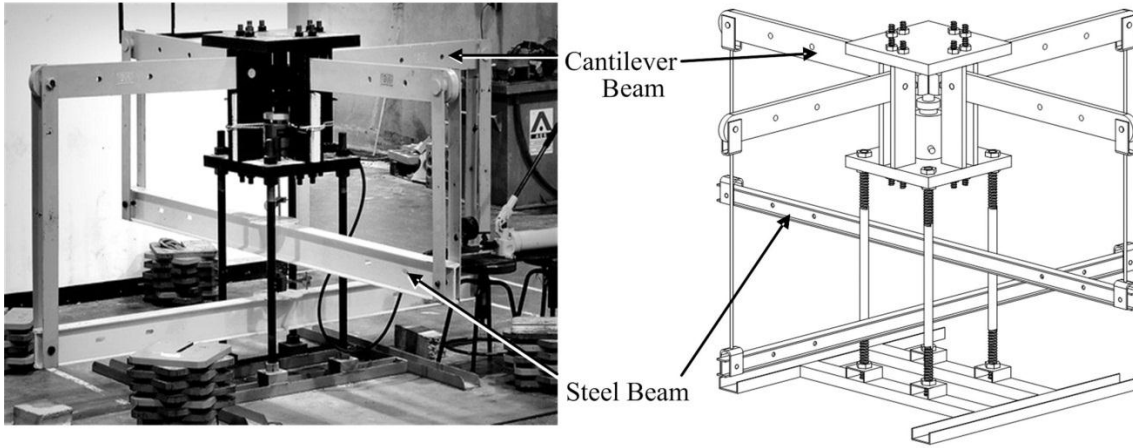
เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังกดสูงสุดภายใต้สภาวะแห้งและอิมตัวด้วยน้ำ และผลของการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการจำลองลักษณะความเค้นของหินในสามทิศทางภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกันในหินที่อิมตัวด้วยน้ำ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนาม เช่น การออกแบบโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนชั้นหินที่อิมตัวด้วยน้ำ การประเมินเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นน้ำบาดาลและน้ำมัน

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

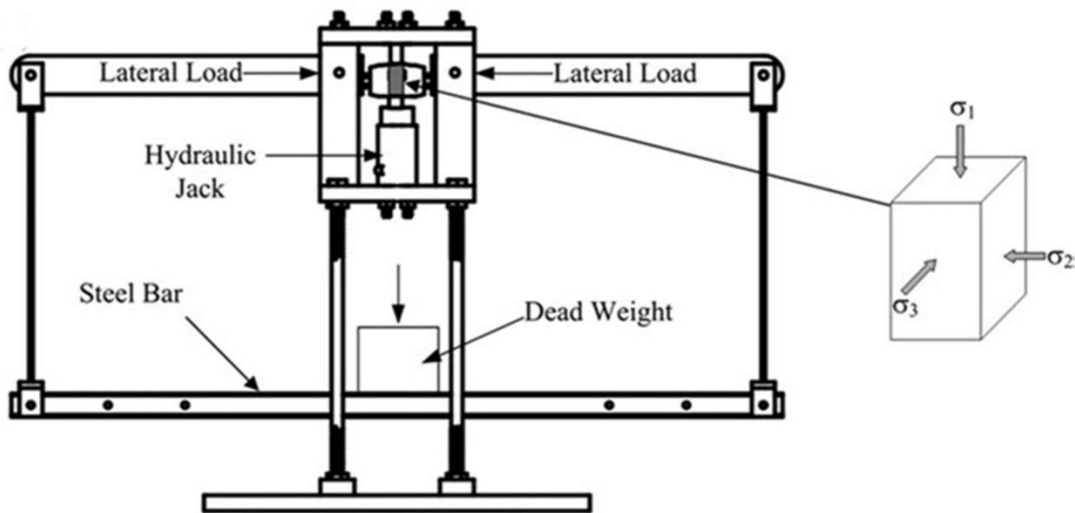
การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหินทราย (กำลังและความยืดหยุ่น) ที่อยู่ในสภาวะแห้งและอิมตัวด้วยน้ำภายใต้แรงกดทดสอบในแกนเดียวและแบบสามแกนโดยมีการผันแปรอัตราการกดที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาจะแสดงถึงผลกระทบของอัตราการกดและน้ำที่อยู่ในช่องว่างต่อกำลังกดของหินทรายด้วยการใช้กฎของคูอมบีในการวิเคราะห์กำลังของหิน

4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

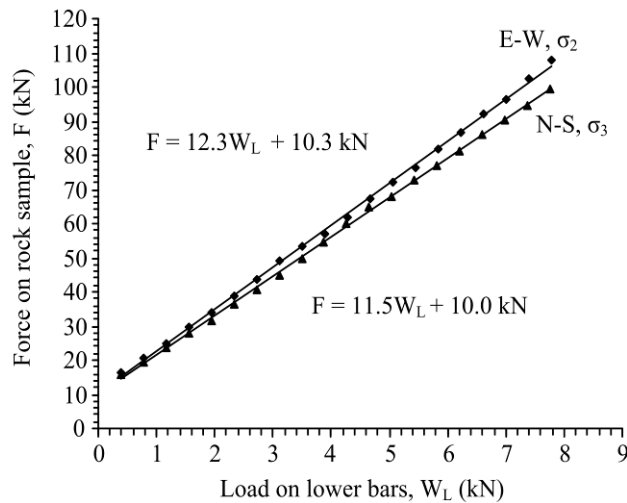
โครงกทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้ว (Walsri et al., 2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแกนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแกนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 ในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัด



รูปที่ 4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้ได้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

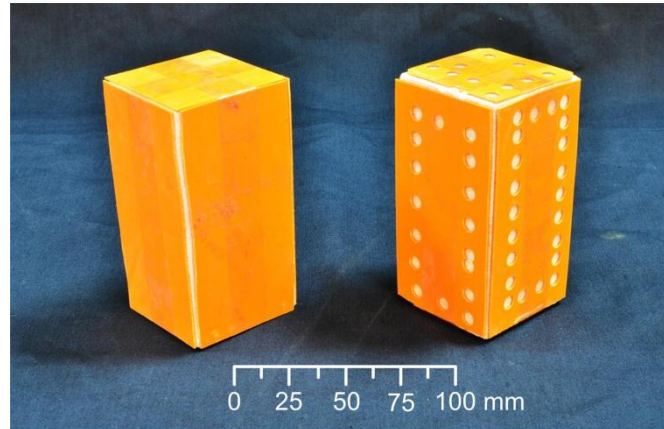
อัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกวดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4.3 การทดสอบกำลังกดของหินทราย

การทดสอบกำลังกดของหินทรายในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน โดยมีการทดสอบกำลังกดแบบสามแกนอยู่ภายใต้แรงดันล้อมรอบเท่ากับ 3, 7 และ 12 MPa ทั้งการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและแบบสามแกนจะมีการให้อัตราการกดคงที่ (Rate-controlled) โดยมีอัตราการกดที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/sec ระหว่างการทดสอบจะมีการอ่านและบันทึกการเคลื่อนตัวในแนวแรงกดและการขยายตัวด้านข้างของตัวอย่างหินเพื่อนำไปคำนวณความยืดหยุ่นของหิน (สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง)

การติดตั้งตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดทั้งสองสถานะ (แห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ) มีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดแผ่น neoprene ทุกด้านของตัวอย่างหิน (รูปที่ 4.4) เตรียมพร้อมเพื่อนำไปติดตั้งในเครื่องกวดทดสอบ (สำหรับสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ) ทันทีก่อนนำตัวอย่างหินออกจากหม้อดูดสุญญากาศจะทำการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น)



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างหินที่ติดแผ่น Neoprene เพื่อลดผลกระทบจากแรงเสียดทานระหว่างแผ่นกวดและผิวหินซึ่งตัวอย่างหินด้านขวาจะมีการเจาะรูไว้เพื่อให้มีการระบายน้ำออกขณะทดสอบสำหรับตัวอย่างหินที่อิมมัวด้วยน้ำ

- 2) ให้ผู้ช่วยยกคานทั้ง 4 ด้าน โดยยกคานในแนว E-W ขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างหินทรายเข้าไปในแท่นกวดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกวดทดสอบชนกับตัวอย่างหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักกลาง (σ_2) จากนั้นยกคานด้าน N-S ขึ้นใส่แท่นกวดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกวดทดสอบชนกับตัวอย่างหินทรายสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักรอง (σ_3)
- 3) ใส่หัวกดให้แรงในแนวแกนทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกนหลักสูงสุด (σ_1) ในทิศทางนี้จะใช้ปั๊มเพื่อเพิ่มความเค้นจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ
- 4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านแรงทั้งความเค้นหลักกลาง (σ_2) และความเค้นหลักรอง (σ_3) จากนั้นให้เพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ ($\sigma_2 = \sigma_3$) ในขณะที่มีการเพิ่มความเค้นกวดด้านข้างจะมีการปั๊มให้เกิดความเค้นกวดในแนวแกนด้วยอัตราที่เท่ากัน
- 5) ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนและด้านข้างของตัวอย่างหินเพื่อนำไปคำนวณความเครียดในแนวแกนและในแนวด้านข้าง
- 6) กวดตัวอย่างหินทรายด้วยปั๊มไฮดรอลิกในอัตราการให้แรงกวดที่กำหนดไว้ (10, 1, 0.1, 0.01 และ 0.001 MPa/วินาที)

ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกนโดยจะติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน และได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบ ในขณะที่ตัวอย่างหินทรายถูกกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic pump) ด้วยอัตราที่กำหนดจนกระทั่งหินแตก

ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ในการทดสอบด้วยอัตราการกดเท่ากับ 10 MPa/sec จะไม่มีการวัดค่าการเคลื่อนตัว เนื่องจากกระทำได้ยากเพราะหินจะแตกในเวลาไม่กี่วินาที ดังนั้นจะมีการวัดเฉพาะการทดสอบกำลังกดของหินเท่านั้น

รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบกำลังกดของตัวอย่างหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลที่ได้จะนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และอัตราส่วนปัวซองของของแต่ละแท่งตัวอย่าง รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการกดเท่ากับ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/sec ตามลำดับ นอกจากนี้ยังแสดงกำลังกดของหินในรูปแบบของวงกลมมอร์ (รูปที่ 19 ถึงรูปที่ 4.23) ผลกระทบของอัตราการกดต่อกำลังของหินทรายได้แสดงผลในรูปที่ 4.24 และความสัมพัทธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเค้นตั้งฉากเฉลี่ยได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.29 ตารางที่ 3 สรุปค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกดต่างกัน

4.4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

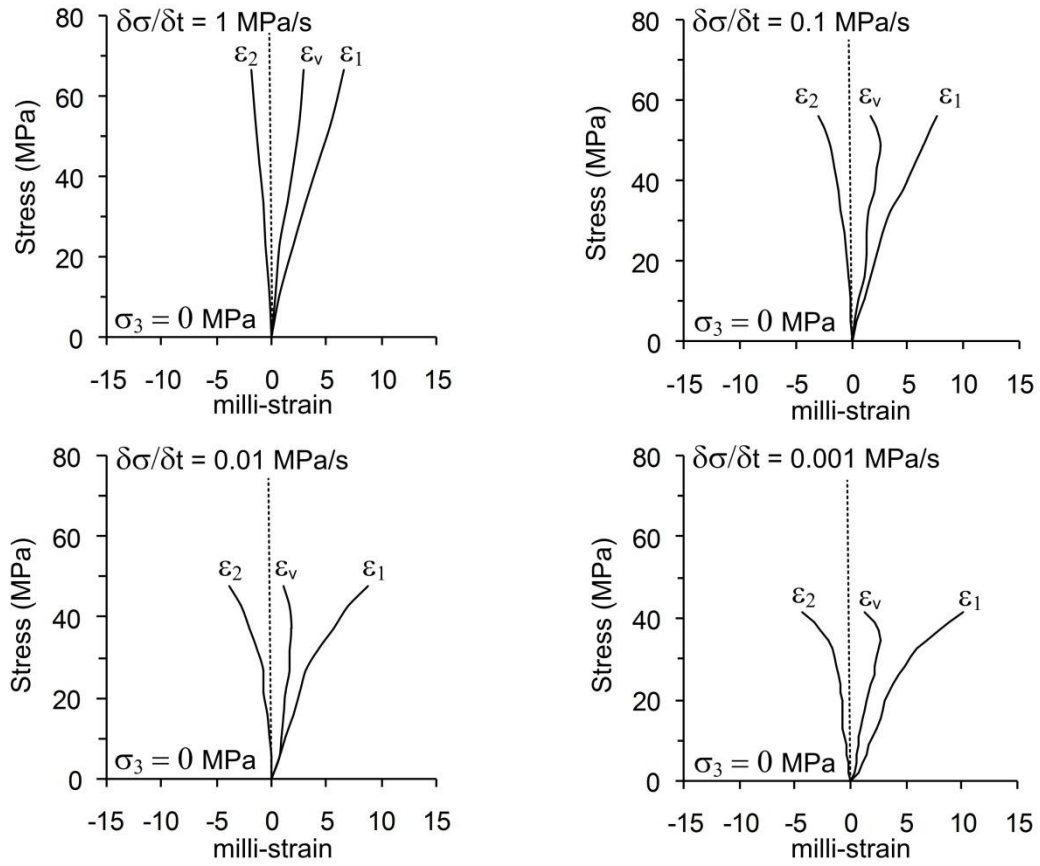
ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและกำลังรับแรงกดแบบสามแกนของตัวอย่างหินทรายระบุว่า น้ำมีผลกระทบต่อตรงต่อกำลังของหิน ตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีกำลังต่ำกว่าตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งทุกความดันล้อมรอบและทุกอัตราการกด ที่อัตราการกดสูงน้ำจะส่งผลกระทบต่อมากต่อกำลังของหิน ทำให้ผลต่างระหว่างกำลังของทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกันสูงขึ้น และที่อัตราการกดต่ำกำลังของหินทั้งสองสภาวะจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักทุกความดันล้อมรอบ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำจากช่องว่างมีเวลาในการระบายออกมาได้ จึงไม่ส่งผลต่อกำลังของหินมากนัก ภายใต้ความดันล้อมรอบสูง ตัวอย่างหินจะระบายน้ำได้ช้าลง จึงทำให้แรงดันน้ำในช่องว่างมีผลต่อกำลังของหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีความแตกต่างกันในทุกอัตราการกด นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าอัตราการกดมีผลต่อกำลังของตัวอย่างหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Fuenkajorn and Kenkhunthod (2010) ทั้งนี้ที่อัตราการกดสูงแสดงกำลังของหินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) ส่วนที่อัตราการกดต่ำแสดงกำลังของหินแบบมีการอัดตัวคาย (Drained condition) นั่นเอง ภายใต้การทดสอบด้วยอัตราการกดต่ำกว่า 0.01 MPa/sec ซึ่งเป็นอัตราการให้ความเค้นกดที่ช้าพอที่จะทำให้การระบายออกจากช่องว่างได้ จึงทำให้ผลต่างระหว่างกำลังของตัวอย่างหินที่แห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้น หากต้องการทดสอบหินในสภาวะที่มีการอัดตัวคายน้ำควรทดสอบด้วยอัตราการกดที่ต่ำกว่า 0.01 MPa/sec

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังกดในสภาวะแห้ง

Confining Pressure (MPa)	Loading rate (MPa/s)	Dry Density (g/cc)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's Ratio
0	0.001	2.21	41	6.7	0.26
	0.01	2.22	48	8	0.25
	0.1	2.26	54	9.5	0.26
	1	2.25	67	11.8	0.28
	10	2.20	79	N/A	N/A
3	0.001	2.22	53	6.6	0.25
	0.01	2.26	65	8.1	0.28
	0.1	2.31	73	9.8	0.28
	1	2.23	86	12	0.27
	10	2.23	103	N/A	N/A
7	0.001	2.25	71	6.8	0.29
	0.01	2.23	87	8.5	0.28
	0.1	2.25	103	10.3	0.28
	1	2.23	120	11.6	0.28
	10	2.21	134	N/A	N/A
12	0.001	2.25	100	7.1	0.29
	0.01	2.22	120	8.2	0.28
	0.1	2.26	130	10	0.28
	1	2.27	154	12.5	0.26
	10	2.24	178	N/A	N/A

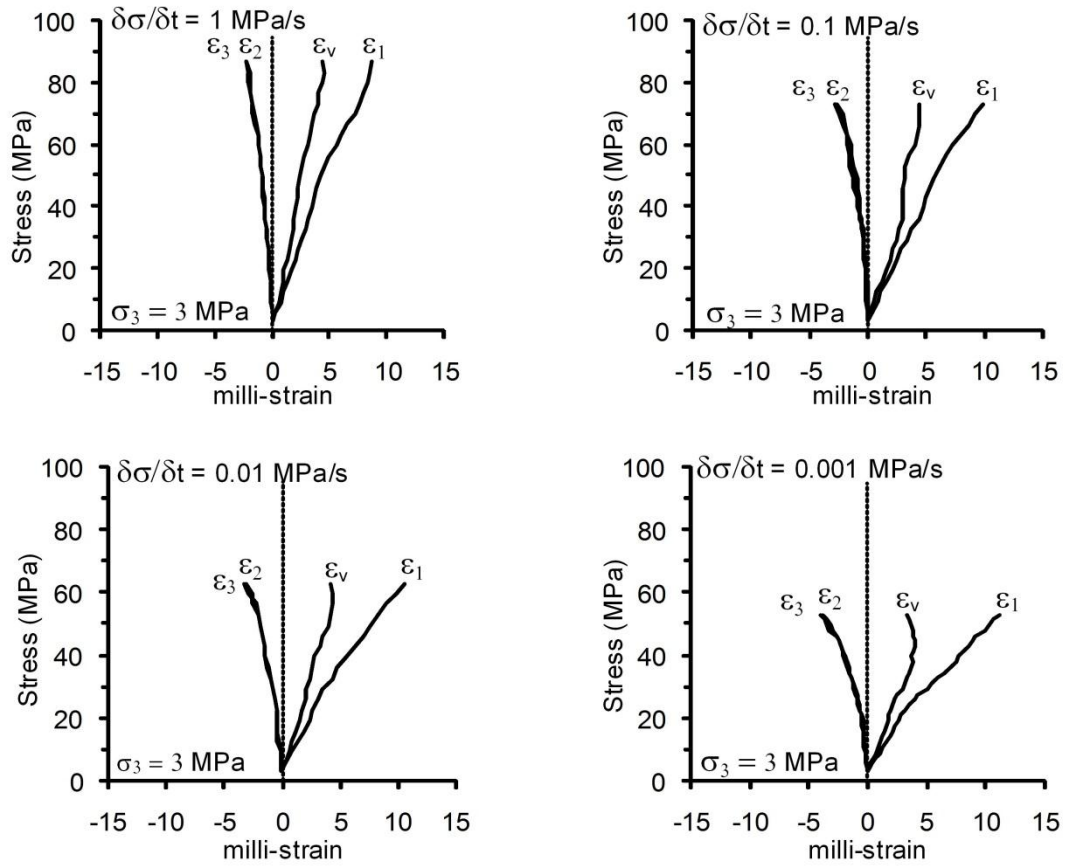
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังกดในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

Confining pressure (MPa)	Loading rate (MPa/s)	Dry Density (g/cc)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's Ratio
0	0.001	2.21	39	6.2	0.25
	0.01	2.22	48	7.9	0.25
	0.1	2.26	51	9.5	0.27
	1	2.25	60	10	0.26
	10	2.20	66	N/A	N/A
3	0.001	2.22	51	6.6	0.29
	0.01	2.26	63	8.7	0.28
	0.1	2.31	70	9.4	0.28
	1	2.23	76	10.2	0.27
	10	2.23	80	N/A	N/A
7	0.001	2.25	69	6.5	0.28
	0.01	2.23	86	8.4	0.29
	0.1	2.25	95	9	0.28
	1	2.23	103	10	0.30
	10	2.21	105	N/A	N/A
12	0.001	2.25	95	6.8	0.29
	0.01	2.22	110	7.8	0.28
	0.1	2.26	118	8.9	0.29
	1	2.27	130	9.8	0.31
	10	2.24	142	N/A	N/A

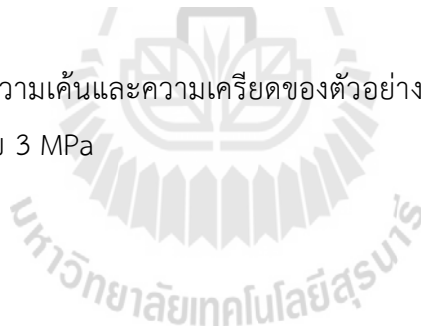


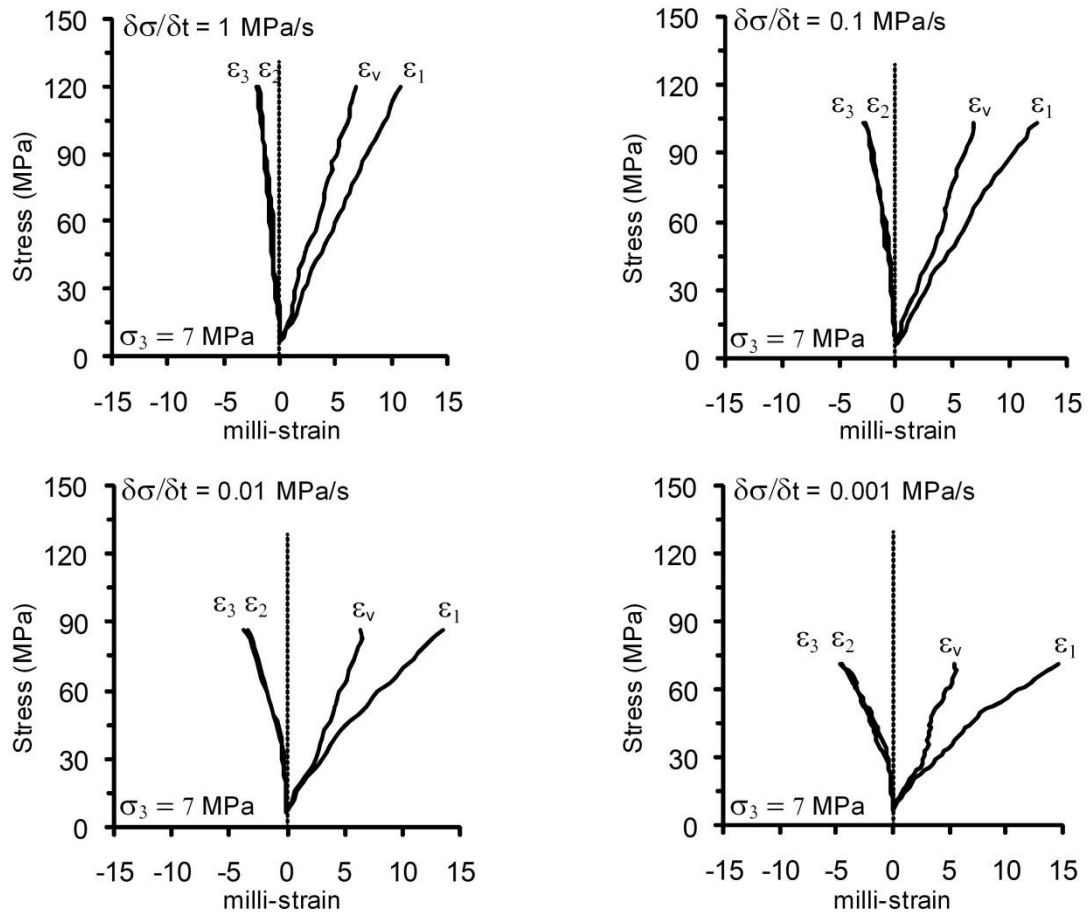
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะแห้งที่ความดันล้อมรอบเท่ากับ 0 MPa



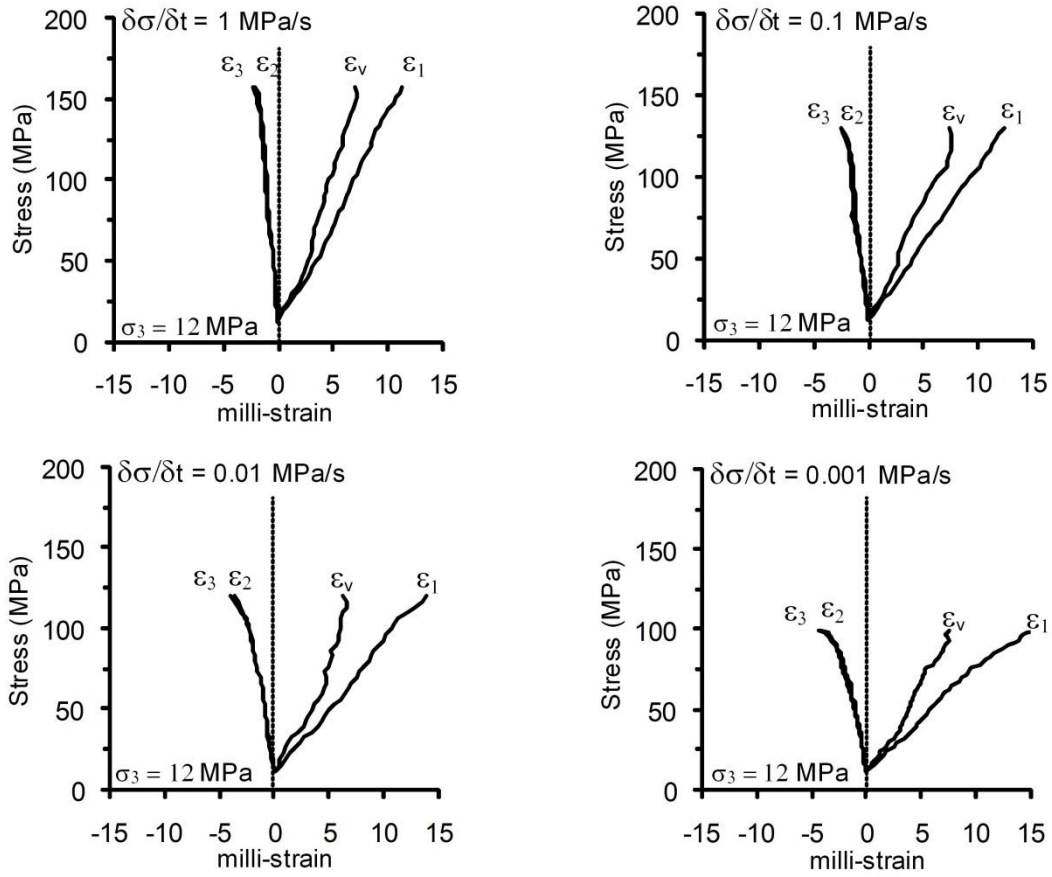


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะแห้งที่ความดันล้อมรอบเท่ากับ 3 MPa



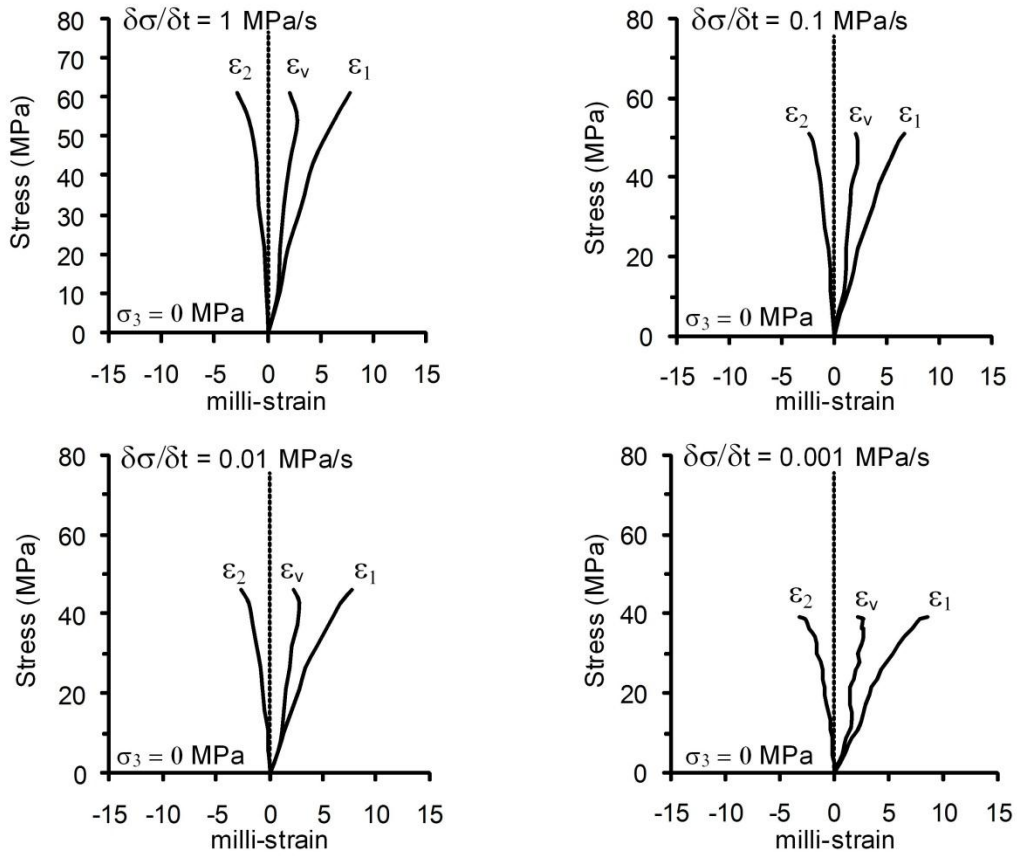


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะแห้งที่ความดันล้อมรอบเท่ากับ 7 MPa

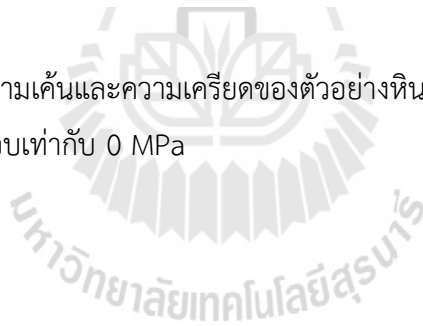


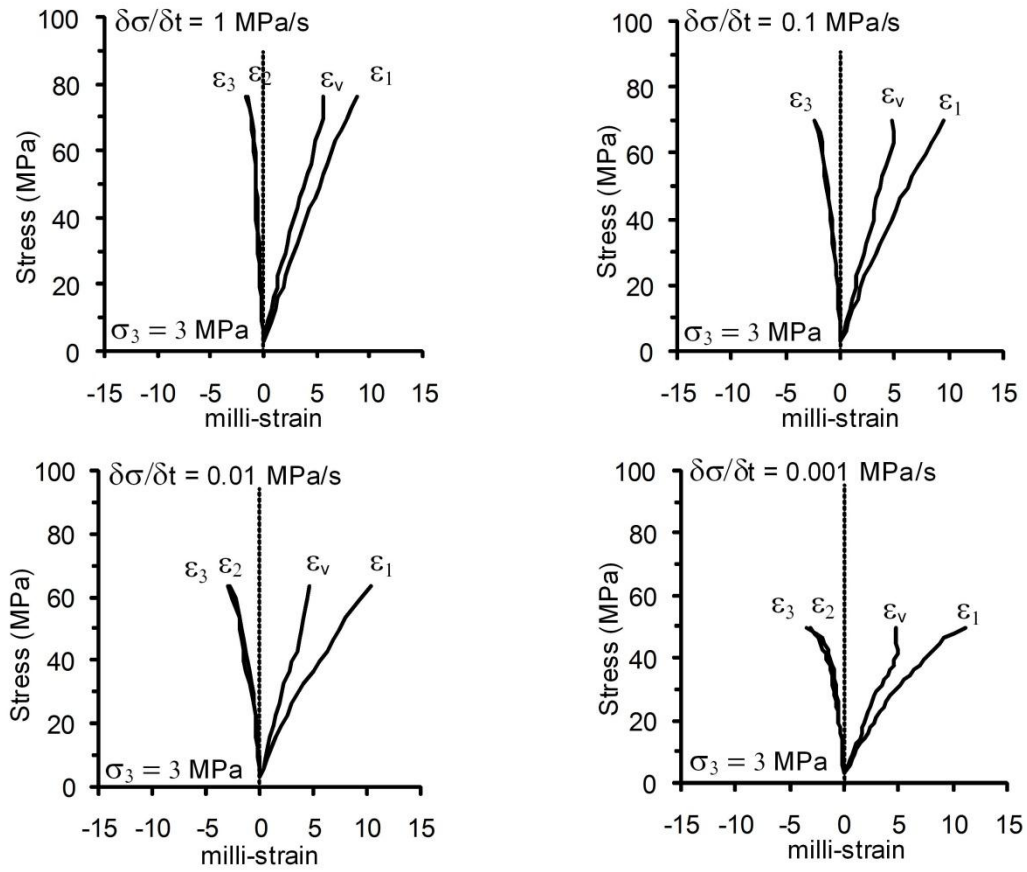
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะแห้งที่ความดันล้อมรอบเท่ากับ 12 MPa



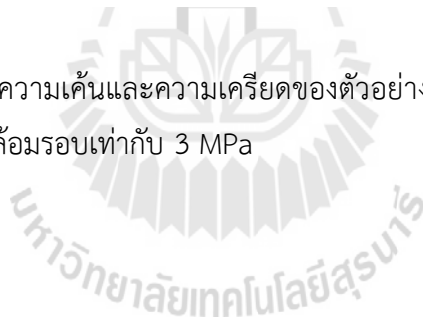


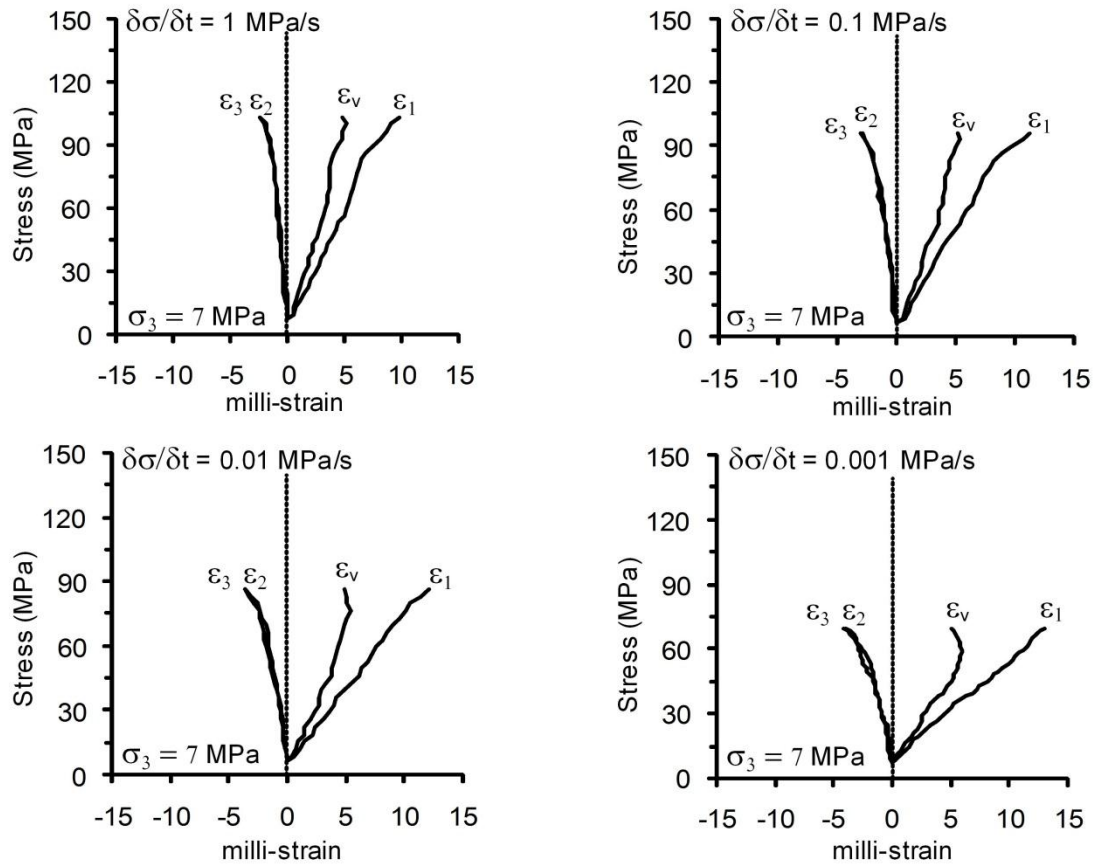
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะอิมมิตัวด้วยน้ำโดยมีความดันล้อมรอบเท่ากับ 0 MPa



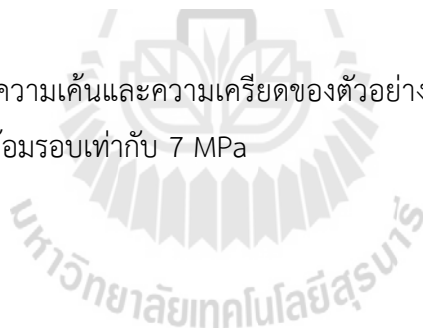


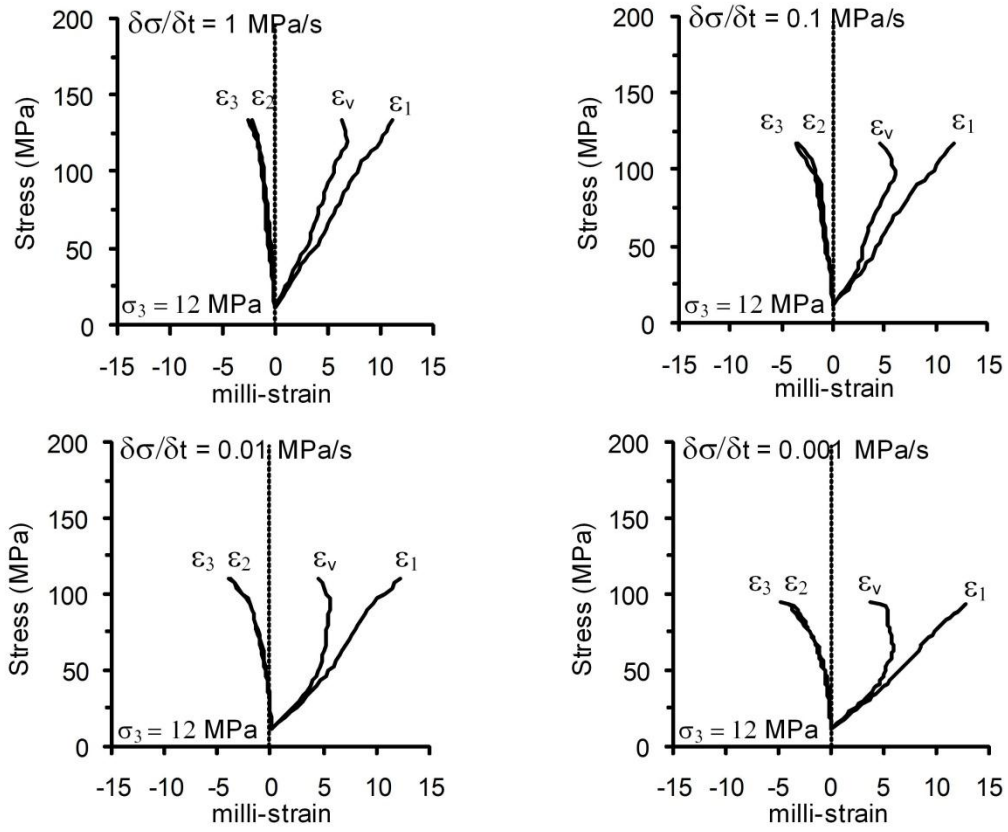
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะอิมตัวด้วยน้ำโดยมีความดันล้อมรอบเท่ากับ 3 MPa



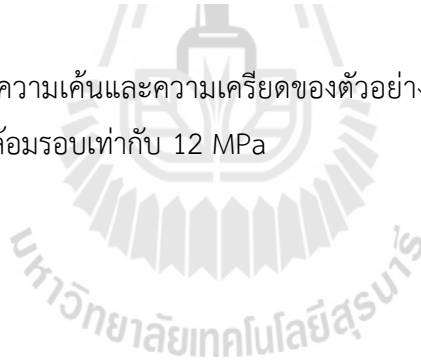


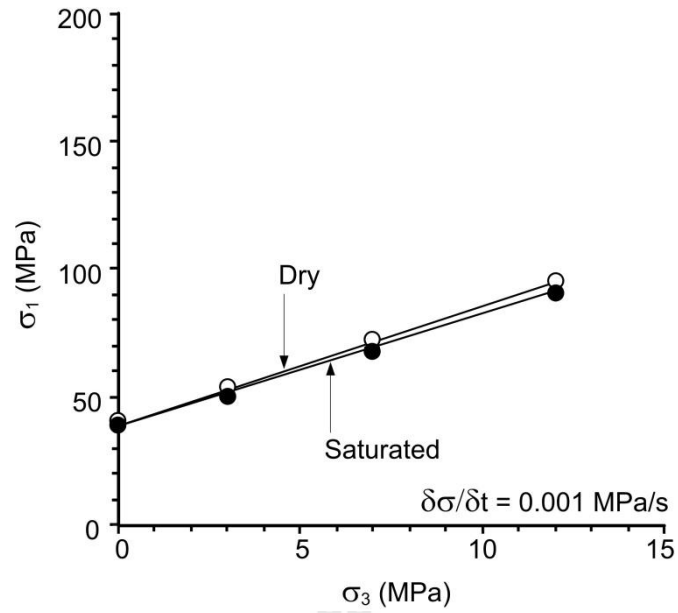
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะอิมมิตัวด้วยน้ำโดยมีความดันล้อมรอบเท่ากับ 7 MPa



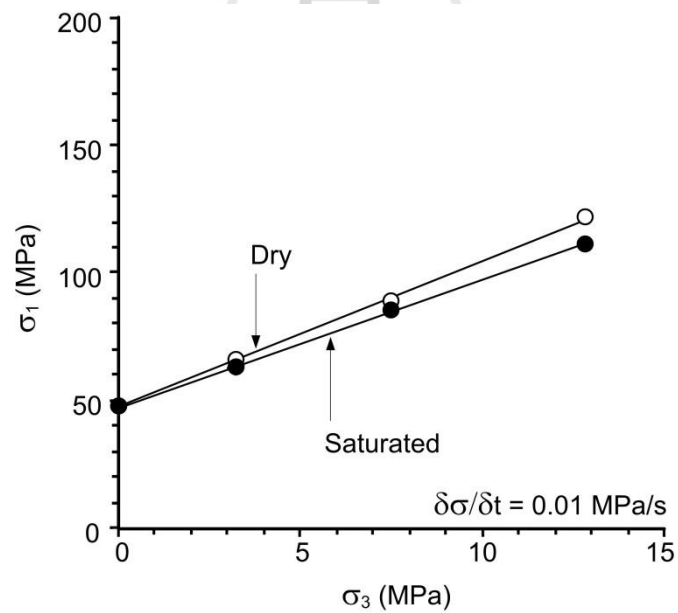


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินทรายที่ทดสอบในสภาวะอิมมิตัวด้วยน้ำโดยมีความดันล้อมรอบเท่ากับ 12 MPa

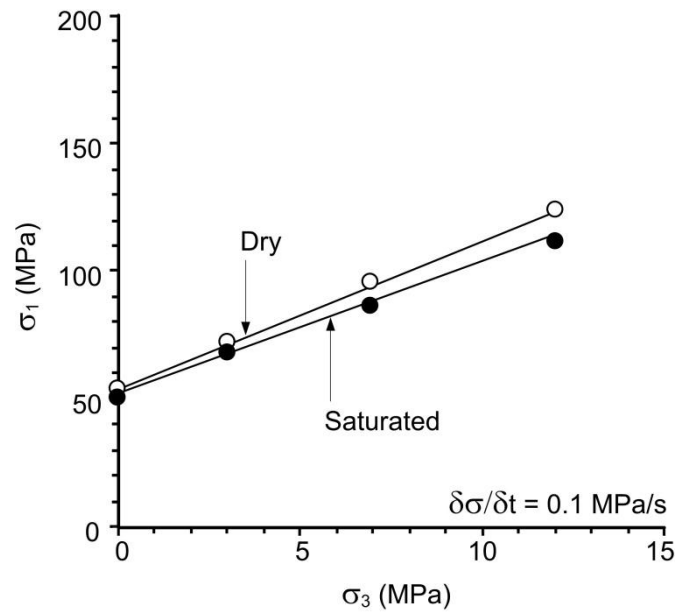




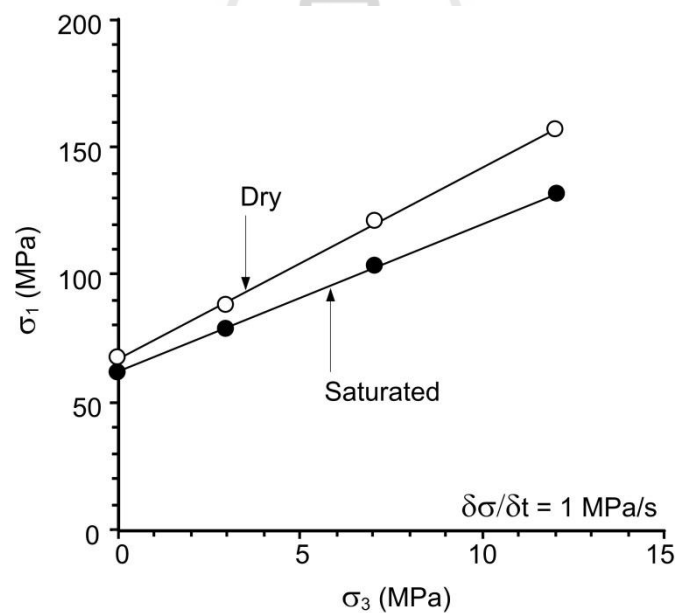
รูปที่ 4.13 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.001 MPa/s ของหินทรายในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



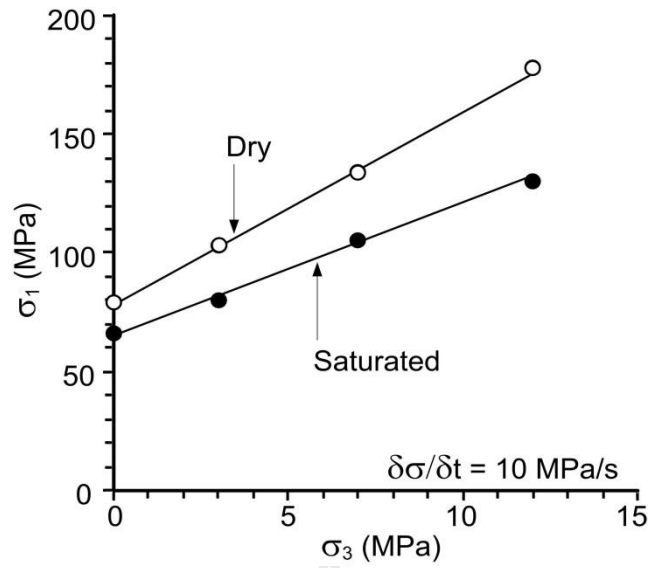
รูปที่ 4.14 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.01 MPa/s ของหินทรายในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



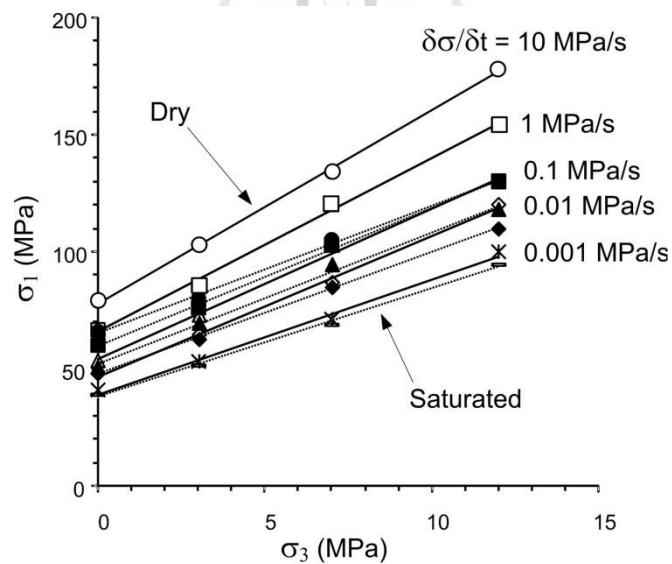
รูปที่ 4.15 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการให้แรงกด 0.1 MPa/s ของหินทรายในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



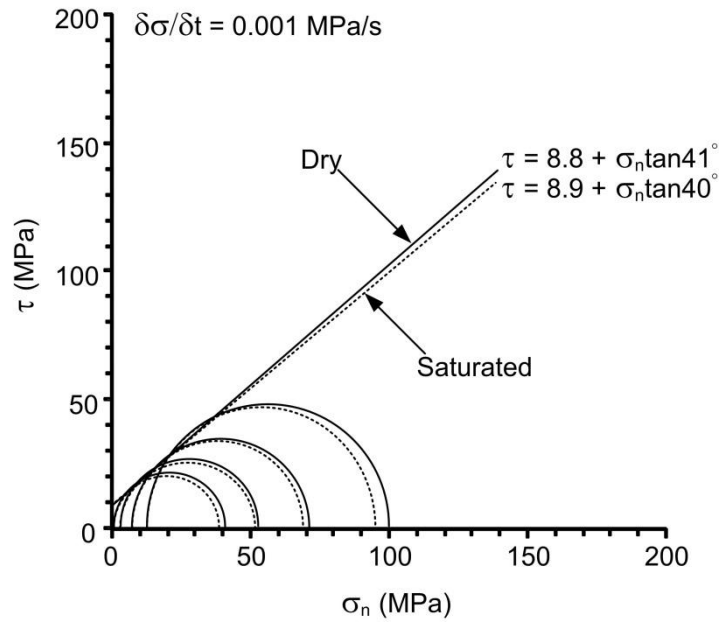
รูปที่ 4.16 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการให้แรงกด 1 MPa/s ของหินทรายในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



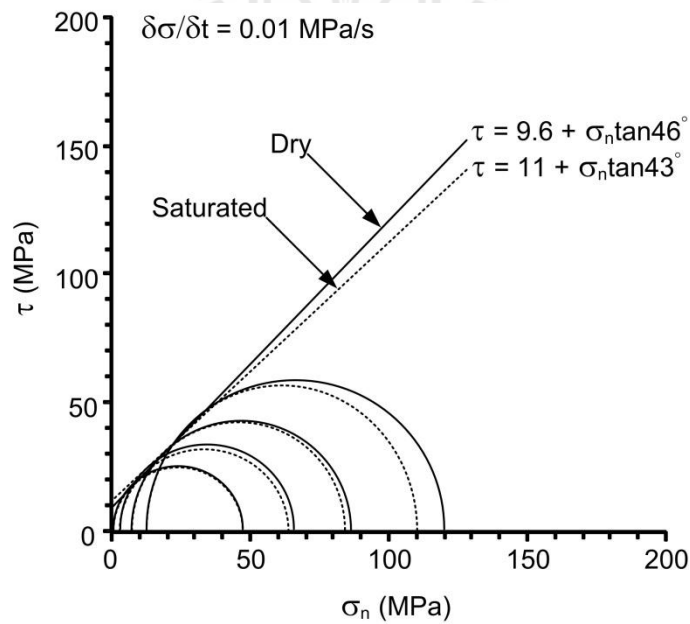
รูปที่ 4.17 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) โดยใช้อัตราการให้แรงกด 10 MPa/s ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



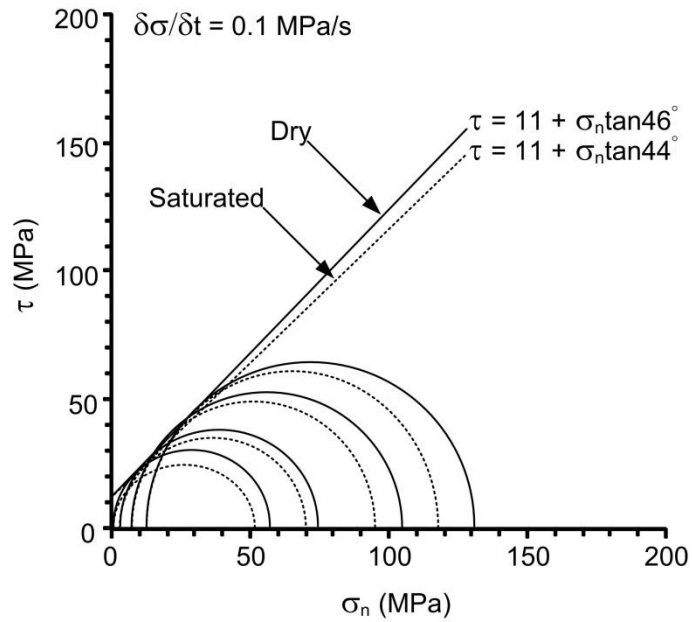
รูปที่ 4.18 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) ของหินทรายในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



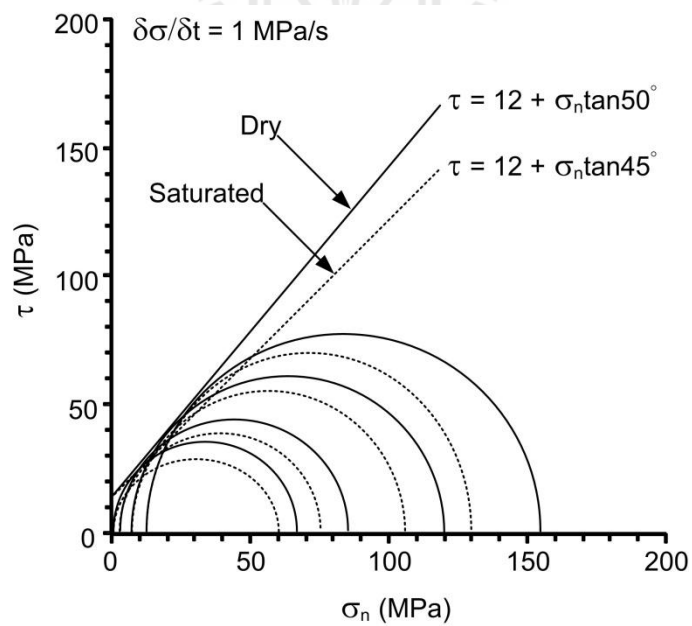
รูปที่ 4.19 เกลนซ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.001 MPa/s



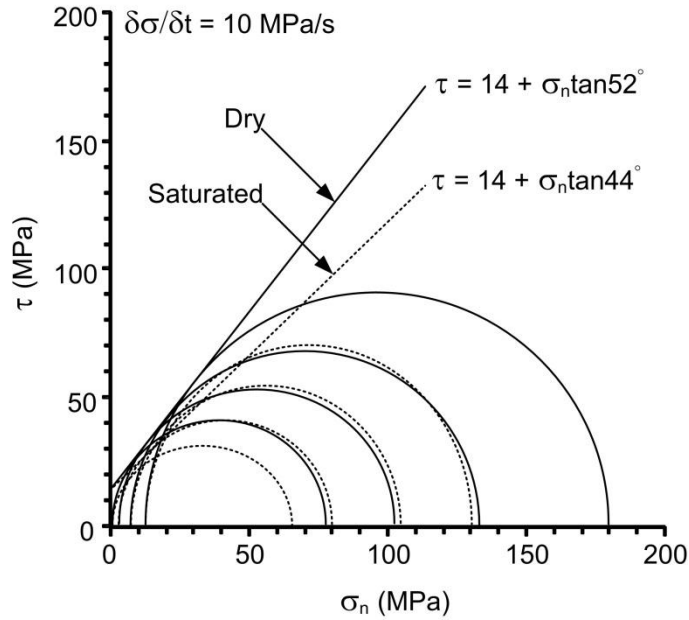
รูปที่ 4.20 เกลนซ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.01 MPa/s



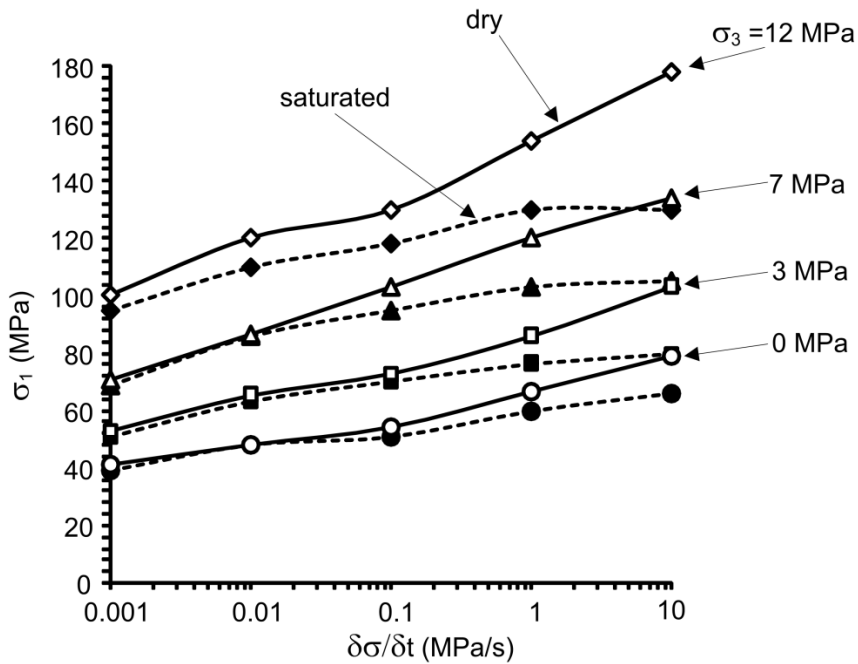
รูปที่ 4.21 เกลนซ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.1 MPa/s



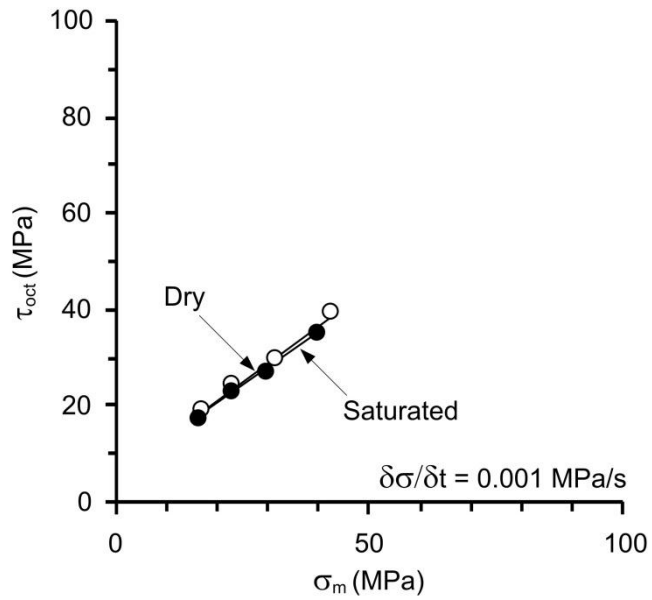
รูปที่ 4.22 เกลนซ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 1 MPa/s



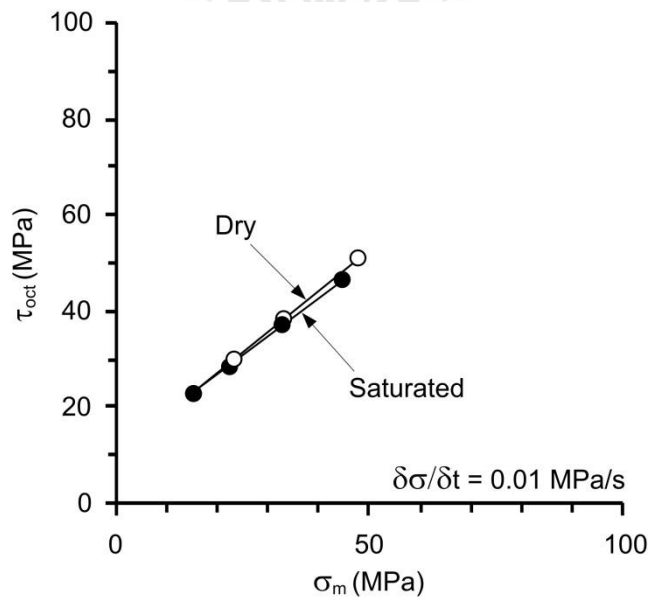
รูปที่ 4.23 เกลนซ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ของคูลอมบ์ของหินทรายในสภาวะแห้ง (เส้นทึบ) และสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (เส้นประ) ที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 10 MPa/s



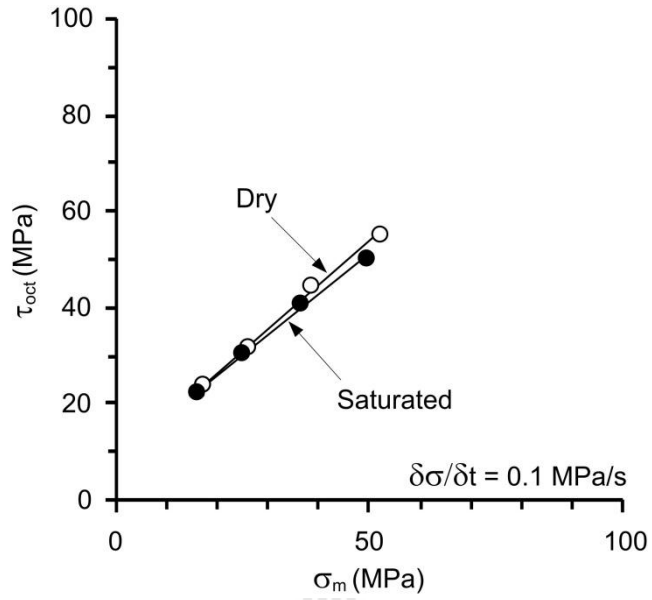
รูปที่ 4.24 ความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) ในฟังก์ชันของอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ในสภาวะแห้ง (จุดทึบ) และเส้นประ) และในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (จุดโปร่งและเส้นทึบ)



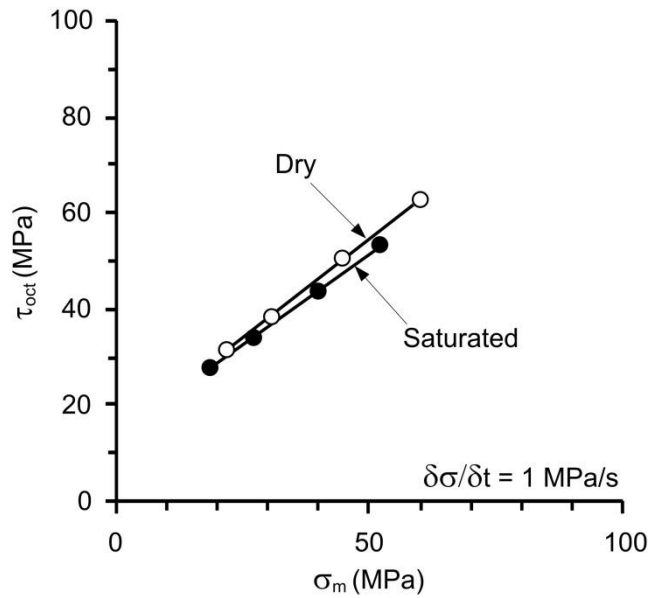
รูปที่ 4.25 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการการกด 0.001 MPa/sec



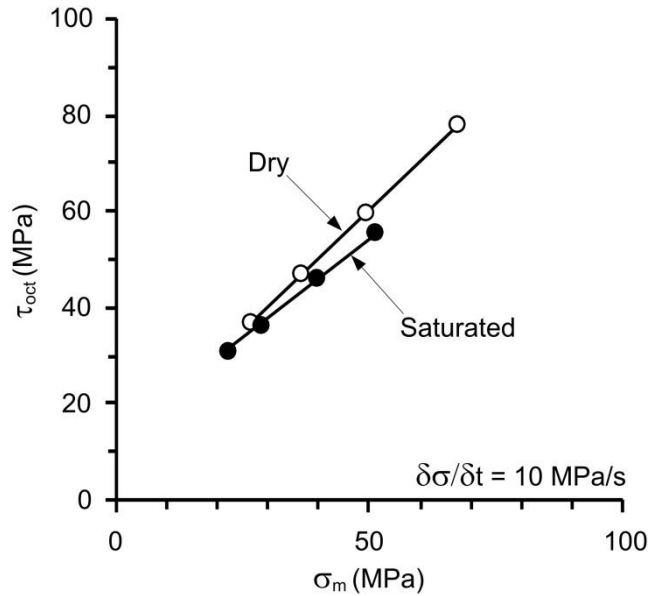
รูปที่ 4.26 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการการกด 0.01 MPa/sec



รูปที่ 4.27 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 0.1 MPa/sec

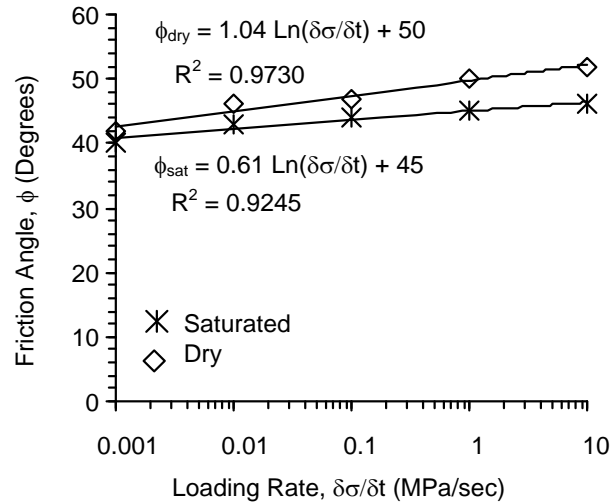


รูปที่ 4.28 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 1 MPa/sec



รูปที่ 4.29 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกด 10 MPa/sec

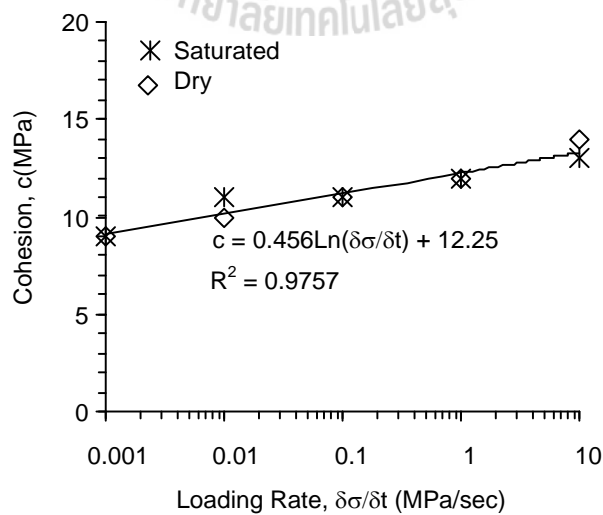
เมื่ออธิบายกำลังของหินด้วยกฎของคูลอมบ์พบว่าน้ำมีผลให้ค่ามุมเสียดทานลดลงเป็นอย่างมาก (รูปที่ 4.30) ส่วนค่าความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ตารางที่ 4.3) กล่าวคือมีการลดลงไม่มากนัก (รูปที่ 4.31) ส่วนความยืดหยุ่นของหิน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของตัวอย่างหินในสถานะแห้ง (รูปที่ 4.32) และอัตราส่วนปัวซองของหินในสถานะแห้งจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำเล็กน้อย (รูปที่ 4.33) ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลของนักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการศึกษาซึ่งสรุปไว้ในบทที่ 2 สมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของหิน (ค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติด) และความยืดหยุ่นของตัวอย่างหิน (อัตราส่วนปัวซองและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น) ในความสัมพันธ์ของอัตราการกดของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำได้อธิบายไว้ในบทที่ 5



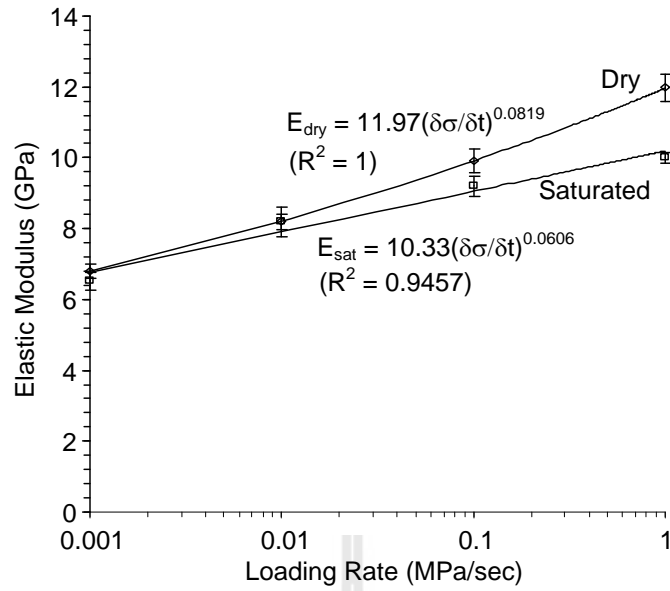
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสถานะแห้ง (\diamond) และในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($*$)

ตารางที่ 4.3 กำลังของหินตามกฎของคูลอมบ์

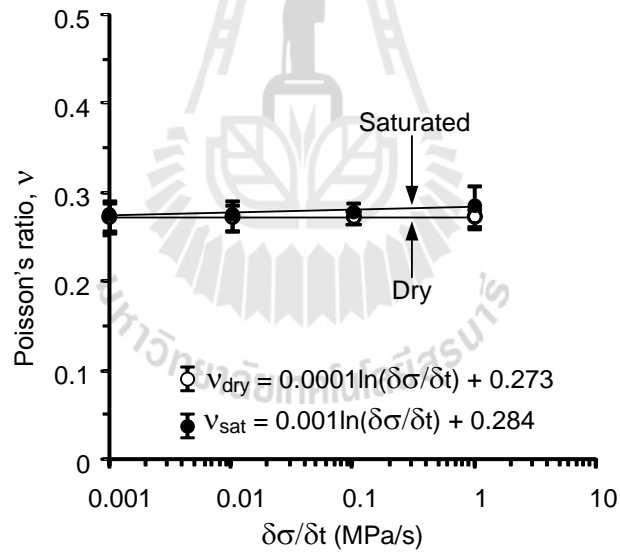
อัตราการกด (MPa/sec)	ตัวอย่างแห้ง		ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ	
	c (MPa)	ϕ (Degrees)	c (MPa)	ϕ (Degrees)
0.001	9	42	9	40
0.01	10	46	11	43
0.1	11	47	11	44
1	12	50	12	45
10	14	52	13	46



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติดของหิน (c) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสถานะแห้ง (\diamond) และในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($*$)



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ในสภาวะแห้ง (\diamond) และในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (\square)



รูปที่ 4.33 อัตราส่วนปัวซองของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสภาวะแห้งภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้อธิบายถึงการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของหิน (มุมเสียดทานพื้นฐานและความเค้นยึดติด) และความยืดหยุ่นของหิน (สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง) ของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้อัตราการกดระหว่าง 0.001 ถึง 10 MPa/sec

5.1 กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดของหิน

กฎของคูลอมบ์ถูกนำมาใช้อธิบายเกณฑ์การแตกของหินจากผลของการทดสอบ โดยตารางที่ 4.3 ในบทที่ 4 ระบุว่าค่ามุมเสียดทานของหินสำหรับตัวอย่างหินในสภาวะเปียกและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าใกล้เคียงกันมาก (รูปที่ 5.1) ซึ่งสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าน้ำไม่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นยึดติดของหิน ความเค้นยึดติดของหิน (c) มีการเพิ่มขึ้นตามอัตราการกด ($\delta\sigma/\delta t$) ที่เพิ่มขึ้นและสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$c = 0.456 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 12.25 \text{ (MPa)} \quad (5.1)$$

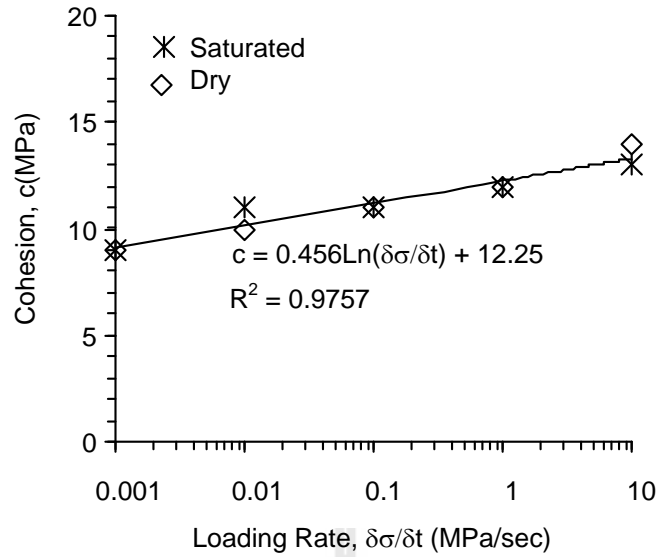
ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (รูปที่ 5.2) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ที่สูงขึ้นส่งผลให้หินมีความแข็งมากขึ้นและทำให้ค่ามุมเสียดทานของหินสูงขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกดและค่ามุมเสียดทานของหินทั้งสองสภาวะสามารถสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi_{\text{dry}} = 1.04 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 50 \text{ (degrees)} \quad (5.2)$$

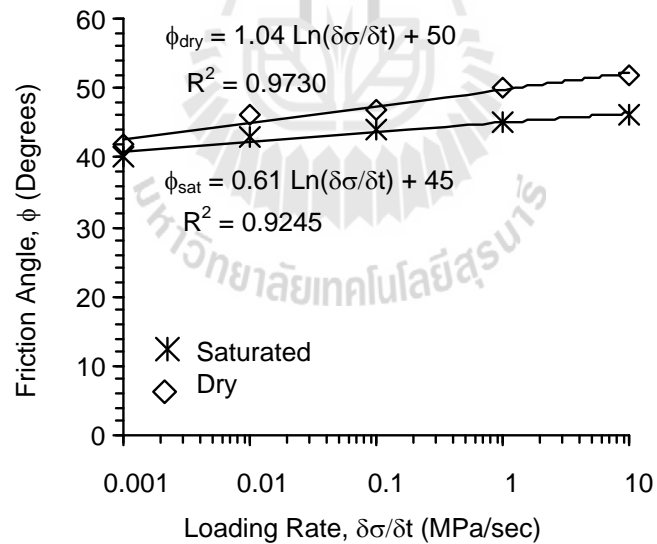
$$\phi_{\text{sat}} = 0.61 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 45 \text{ (degrees)} \quad (5.3)$$

อัตราส่วนระหว่างค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างที่แห้งและตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($\phi_{\text{sat}}/\phi_{\text{dry}}$) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างดังสมการ

$$\phi_{\text{sat}}/\phi_{\text{dry}} = -0.0074 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 0.9046 \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติดของหิน (c) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสถานะแห้ง (\diamond) และในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($*$)



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ของตัวอย่างหินที่ทดสอบในสถานะแห้ง (\diamond) และในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ($*$)

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานของตัวอย่างหินที่แห้งต่อตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ_{sat}/ϕ_{dry}) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ต่อตัวอย่างหิน ซึ่งสรุปได้ว่าค่ามุมเสียดทานของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำหรือตัวอย่างหินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินสามารถประเมินได้จากสมการ

$$\phi_{sat} = \phi_{dry} [- 0.0074 \ln (\delta\sigma/\delta t) + 0.9046] \text{ (degrees)} \quad (5.5)$$

5.2 ความยืดหยุ่นของหิน

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) ที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 (บทที่ 4) เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างหินพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มขึ้นของการให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน (รูปที่ 5.4) และพบว่าหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำกว่าตัวอย่างหินที่แห้ง เมื่อผลกระทบของน้ำต่ำค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินจะรุนแรงหรือมีผลกระทบมากขึ้นเมื่อหินอยู่ภายใต้อัตราการกดที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงสภาวะของหินที่มีการอัดตัวไม่คายน้ำนั่นเอง ส่วนหินที่มีอัตราการกดต่ำค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งมีสภาวะเข้าสู่การอัดตัวคายน้ำนั่นเอง อัตราการกดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ (E_{dry} และ E_{sat}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_{dry} = 11.97 (\delta\sigma/\delta t)^{0.0819} \text{ (GPa)} \quad (5.6)$$

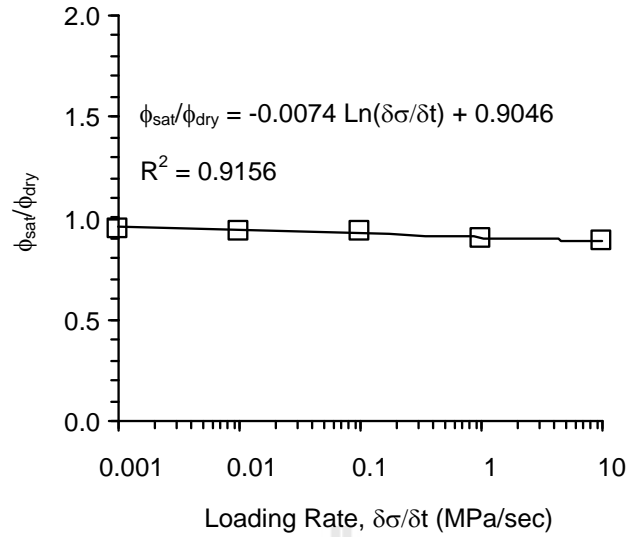
$$E_{sat} = 10.33 (\delta\sigma/\delta t)^{0.0606} \text{ (GPa)} \quad (5.7)$$

อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างที่แห้งและตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (E_{sat}/E_{dry}) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างดังสมการ

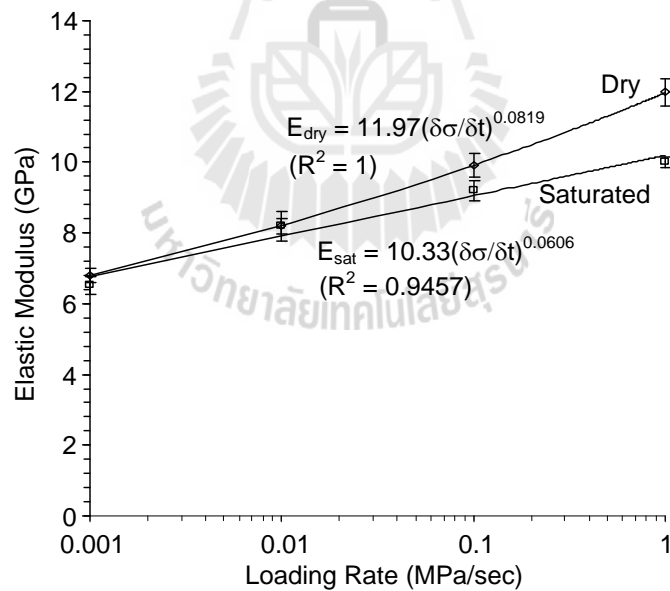
$$E_{sat}/E_{dry} = - 0.0193 \ln (\delta\sigma/\delta t) + 0.86 \text{ (GPa)} \quad (5.8)$$

รูปที่ 5.5 แสดงอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างที่แห้งและตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (E_{sat}/E_{dry}) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ต่อตัวอย่างหิน ซึ่งสรุปได้ว่าค่ามุมเสียดทานของหินในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือเป็นตัวอย่างหินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินสามารถประเมินได้จากสมการ

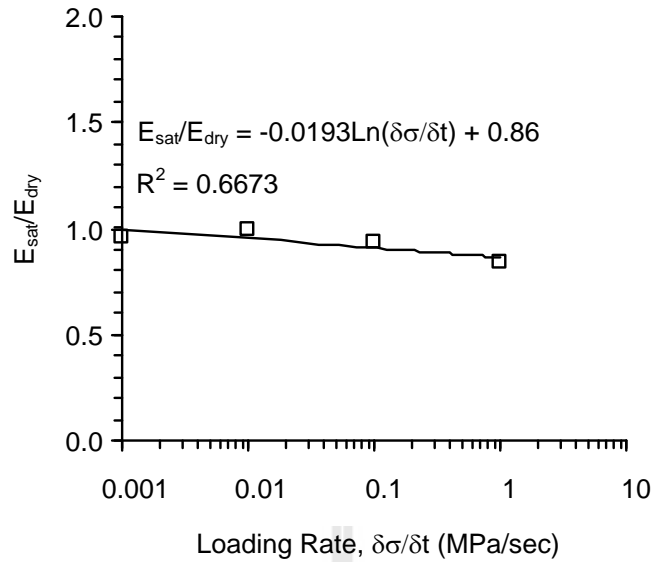
$$E_{sat} = E_{dry} [- 0.0193 \ln (\delta\sigma/\delta t) + 0.86] \text{ (GPa)} \quad (5.9)$$



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานของตัวอย่างหินแห้งต่อตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ_{sat}/ϕ_{dry}) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ต่อตัวอย่างหิน



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ในสถานะแห้ง (\diamond) และในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (\square)



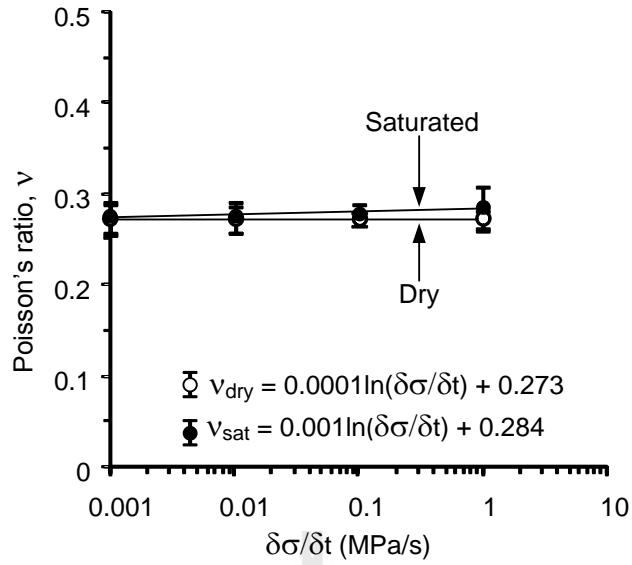
รูปที่ 5.5 อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสถานะแห้ง (E_{sat}/E_{dry}) และอัตราการให้แรงกด ($\delta\sigma/\delta t$) ต่อตัวอย่างหิน

อัตราส่วนปัวซองของหินในสถานะแห้งมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำเล็กน้อย และอัตราส่วนปัวซองไม่ขึ้นกับอัตราการให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน (รูปที่ 5.6) รูปที่ 5.7 แสดงสัมประสิทธิ์ก้อน (bulk modulus) ของตัวอย่างหินกับอัตราการกดของตัวอย่าง

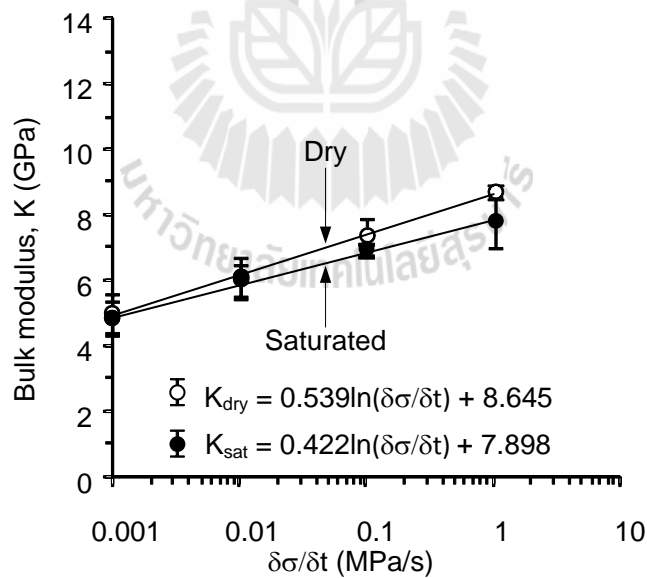
$$K_{dry} = 0.539 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 8.645 \quad (\text{GPa}) \quad (5.10)$$

$$K_{sat} = 0.422 \ln(\delta\sigma/\delta t) + 7.898 \quad (\text{GPa}) \quad (5.11)$$

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าหินในสถานะที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินหรืออิ่มตัวด้วยน้ำจะมีการอ่อนตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าหินที่อยู่ในสถานะแห้ง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับมวลหินจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของหิน



รูปที่ 5.6 อัตราส่วนปัวซองของหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสถานะแห้งภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.7 สัมประสิทธิ์ก้อนของหินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและในสถานะแห้งภายใต้อัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการให้แรงกดของตัวอย่างหินทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินทรายภายใต้การผันแปรอัตราการกดและความดันล้อมรอบ ตัวอย่างหินทรายรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอกขนาด $54 \times 54 \times 108$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถูกจัดเตรียมขึ้นจากหินทรายชุดพระวิหารเพื่อใช้ทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียวและในสามแกนโดยอาศัยโครงกดทดสอบในสามแกน (Polyaxial load frame) ที่ผันแปรความดันล้อมรอบจาก 0, 3, 7 และ 12 MPa และผันแปรอัตราการให้แรงกดจาก 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s

ผลระบุว่าน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของหินมีผลโดยตรงต่อกำลังของหิน กล่าวคือ มีผลให้ค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างหินลดลง แต่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นยึดติดน้อยมาก ซึ่งอาจสรุปได้ว่าน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของหินไม่มีผลต่อความเค้นยึดติดของตัวอย่างหิน หินที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าหินที่อยู่ในสถานะแห้ง กล่าวคือ ความชื้นในตัวอย่างหินส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินมีค่าลดลงและส่งผลให้อัตราส่วนปัวซองสูงขึ้น ผลกระทบของน้ำต่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกดสูงขึ้น ทั้งนี้ในสถานะที่มีอัตราการกดสูงขึ้น ตัวอย่างหินจะเกิดการระบายน้ำไม่ทันก่อนที่จะเกิดการวิบัติหรือไม่เกิดการระบายน้ำนั่นเอง ซึ่งค่ากำลังกดที่ได้เป็นค่าของหินในสถานะที่มีการอัดตัวไม่คายน้ำ ส่วนตัวอย่างหินที่มีการทดสอบที่อัตราการให้แรงกดต่ำ ตัวอย่างหินจะมีการระบายน้ำได้ดีซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังและความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินน้อย ที่สถานะดังกล่าวค่ากำลังกดของหินที่ได้เป็นกำลังกดที่มีการอัดตัวคายน้ำนั่นเอง

สำหรับการวิจัยในอนาคตควรมีการวัดแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงในตัวอย่างขณะที่มีการทดสอบ หรือการทดสอบในรูปแบบอื่น เช่น เริ่มต้นด้วยการเพิ่มความเค้นให้ตัวอย่างหินที่ระดับหนึ่ง (ตัวอย่างหินต้องไม่วิบัติ) จากนั้นเพิ่มแรงดันน้ำเข้าไปในตัวอย่างหินจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ การทดสอบสำหรับตัวอย่างหินชนิดอื่นก็มีความสำคัญ ทั้งนี้ต้องเป็นตัวอย่างหินที่มีความพรุนแตกต่างกัน เนื่องจากการที่หินมีความพรุนสูงจะทำให้มีน้ำแทรกเข้าไปในช่องว่างสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบจากความพรุนของตัวอย่างหินด้วย เพื่อเน้นความหลากหลายของชนิดหินที่แพร่กระจายในประเทศไทย และเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ด้านนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

- Chiu, H. K. Johnston, I. W. and Donald, I. B. (1983). Appropriate techniques for triaxial testing of saturated soft rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &** 20 (3): 107-120.
- Derakhshandi, M. Rathje, E. M. Hazirbaba, K. and Mirhosseini, S.M. (2008). The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 28(5): 376-386.
- Gräsle, W. (2011). Multistep triaxial strength tests: Investigating strength parameters and pore pressure effects on Opalinus Clay. **Physics and Chemistry of the Earth**. 36(17-18): 1898-1904.
- Hoxha, D. and Giraud, A. (2007). Françoise Homand, Christophe Auvray, Saturated and unsaturated behaviour modelling of Meuse-Haute-Marne argillite. **International Journal of Plasticity**. 23 (5): 733-766.
- Kowalski, S. J. and Rajewska, K. (2002). Drying-induced stresses in elastic and viscoelastic saturated materials. **Chemical Engineering Science**. 57 (18): 3883-3892.
- Lamei, M. and Mirghasemi, A. A. (2011). A discrete element model for simulating saturated granular soil. **Particuology**. 9(6): 650-658.
- Li, D., Wong, L.N.Y., Liu, G. and Zhang, X. (2012). Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression. *Engineering Geology* 126: 46-66.
- Lomov, I. N. Hiltl, M. Vorobiev, O. Yu. and Glenn, L.A (2001). Dynamic behavior of berea sandstone for dry and water-saturated conditions. **International Journal of Impact Engineering**. 26 (1-10): 465-474.
- Masuda, K. (2001). Effects of water on rock strength in a brittle regime. *Journal of Structural Geology* 23 (11): 1653-1657.
- Olgaard, D. L., Ko, s. and Wong, T. F. (1995). Deformation and pore pressure in dehydrating gypsum under transiently drained conditions. **Tectonophysics**, 245 (3-4): 237-248.
- Peng, S. and Zhang, J. (2007). *Engineering Geology for Underground Rocks*, Springer, New York: 342 p.

- Perera, M.S.A., Ranjith, P.G., and Peter, M. (2011). Effect of saturation medium and pressure on strength parameters of Latrobe Valley brown coal: Carbon dioxide, water and nitrogen saturations. *Energy* 36 (12): 6941-6947.
- Qu, P. Shen, R. Fu, L. and Wang, Z.(2001). Time delay effect due to pore pressure changes and existence of cleats on borehole stability in coal seam. **International Journal of Coal Geology**. 85 (2): 212-218.
- Ravichandran, N. (2009). Fully coupled finite element model for dynamics of partially saturated soils. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 29 (9): 1294-1304.
- Song, C. R. and Voyiadjis, G. Z. (2005). Pore pressure response of saturated soils around a penetrating object. **Computers and Geotechnics**. 32 (1): 37-46.
- Sulem, J. and Ouffroukh, H. (2006). Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone: Porosity and permeability evolution. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 43 (2): 292-310.
- Sun, J. and Hu, Y. Y. (1997). Time-dependent effects on the tensile strength of saturated granite at Three Gorges Project in China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34 (3-4): 306.e1-306.e13.
- Tang, Y. Q. Cui, Z. D. Zhang, X. and Zhao, S. K. (2008). Dynamic response and pore pressure model of the saturated soft clay around the tunnel under vibration loading of Shanghai subway. **Engineering Geology**. 98 (3-4): 126-132.
- Tien, Y.M. Lee, D.H. Juang. and Strain, C.H. (1990). Pore pressure and fatigue characteristics of sandstone under various load conditions. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &** 27 (4): 283-289.
- Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1983). Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands. **International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 2 (3): 171-177.
- Vasarhelyi, B. and Van, P. (2006). Influence of water content on the strength of rock. *Engineering Geology* 84:70-74.
- Vercueil, D. Billet, P. and Cordary, D.(1997). Study of the liquefaction resistance of a saturated sand reinforced with Geosynthetics. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 16 (7-8): 417-425.

- Vlahinić, I. Jennings, H. M. Andrade, J. E. and Thomas, J. J. (2011). A novel and general form of effective stress in a partially saturated porous material: The influence of microstructure. **Mechanics of Materials**. 43 (1): 25-35.
- Wang, W. H. and Wong, T. F. (2003). Effects of reaction kinetics and fluid drainage on the development of pore pressure excess in a dehydrating system. **Tectonophysics**. 370 (1-4): 227-239.
- Xie, N. Zhu, Q. Z. Shao, J. F. and Xu, L. H. (2012). Micromechanical analysis of damage in saturated quasi brittle materials. **International Journal of Solids and Structures**. 49 (6): 919-928.
- Xu, X. Lai, Y. Dong, Y. and Qi, J. (2011). Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil. **Cold Regions Science and Technology**. 69 (1): 98-104.
- Yilmaz, I. (2010). Influence of water content on the strength and deformability of gypsum. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42 (2): 342-347.
- Yoshinaka, R. Tran, T.V. and Osada, M. (1997). Pore pressure changes and strength mobilization of soft rocks in consolidated-undrained cyclic loading triaxial tests. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34 (5): 715-726.
- Zhou, C. Y. and Zhu, F. X. (2010). An elasto-plastic damage constitutive model with double yield surfaces for saturated soft rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 47 (3): 385-395.
- Zhu, W. and Wong, T. F. (1997). Shear-enhanced compaction in sandstone under nominally dry and water-saturated conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34 (3-4): 364.e1-364.e12.

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2543 จบการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี หลักสูตรวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2546 และปี พ.ศ. 2552 ตามลำดับ ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้เป็นผู้ช่วยวิจัยให้กับโครงการวิจัยหลายโครงการ หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัยให้กับหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีเป็นระยะเวลา 1 ปี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 15 บทความ ทั้งวารสารและบทความการประชุมนานาชาติ

