



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-41

## รายงานการวิจัย

### การศึกษาผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อกำลังเฉือน ของรอยแตกในหินทราย

(Effect of Loading Rates on Joint Shear Strength in Sandstone)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-41

## รายงานการวิจัย

### การศึกษาผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อกำลังเฉือน ของรอยแตกในหินทราย

(Effect of Loading Rates on Joint Shear Strength in Sandstone)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. เดช ฝือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2556

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555-2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการ-วิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2556



## บทคัดย่อ

การทดสอบกำลังเฉือนแบบตรงได้ดำเนินการเพื่อหาผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่ทำขึ้นในตัวอย่างหิน โดยรอยแตกในตัวอย่างหินที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมี 2 ชนิด คือการให้แรงดึงและการตัด ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย หินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน และชุดภูกระดึง การให้ความเค้นเฉือนได้ถูกควบคุมในอัตราคงที่เท่ากับ 0.00002, 0.0002, 0.002, 0.02 และ 0.2 MPa/วินาที ค่าความเค้นตั้งฉากมีการผันแปรตั้งแต่ 0.2, 1, 2, 3 ถึง 4 MPa ผลการทดสอบระบุว่า สำหรับหินทรายทั้งสามชนิดพบว่า ค่ากำลังเฉือนสูงสุด ค่ากำลังเฉือนคงเหลือ และค่าความเหนียวของรอยแตกมีการเพิ่มขึ้นแบบ Exponential กับอัตราการกด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าสูง ส่วนอัตราการเฉือนไม่มีผลกระทบต่อมุมเสียดทานของรอยแตกแบบผิวเรียบ สมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกแบบขรุขระภายใต้การผันแปรอัตราการกด ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้คาดคะเนกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้สภาวะอัตราการกดและความเค้นตั้งฉากที่หลากหลาย

## Abstract

Direct shear tests have been performed to determine the effects of loading rate on shearing resistance of tension-induced fractures and smooth saw-cut surfaces in sandstone specimens. The sandstones are prepared from: Phra Wihan, Phu Phan and Phu Kradung formations. The applied shear stresses are controlled at constant rates of 0.00002, 0.0002, 0.002, 0.02 and 0.2 MPa/s. The normal stresses are varied from 0.2, 1, 2, 3 to 4 MPa. The results indicate that for all sandstone types the peak and residual shear strengths and joint shear stiffness increase exponentially with loading rate, particularly under high normal stresses. The shear rate has no effect on the basic friction angle of the smooth saw-cut surfaces. An empirical relation has been developed to represent the shear strengths of the rough fractures under various loading rates. The results can be used to predict the shear strengths of fractures under various loading rates and normal stresses.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 รอยแตกและความขรุขระของรอยแตก.....	7
2.2 ผลกระทบของอัตราการให้แรงและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	8
2.3 ผลกระทบของลักษณะทางศิลาวิทยาต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน.....	9
<b>บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>13</b>
3.1 บทนำ.....	13
3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างหิน.....	13
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>19</b>
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	19
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในหินทราย.....	19
4.3 การคำนวณผลการทดสอบ.....	21

## สารบัญ

	หน้า
4.3.1 การคำนวณค่ากำลังเฉือนของรอยแตก.....	21
4.3.2 การคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก.....	25
4.3.3 การคำนวณค่าการรุดตัวของรอยแตก.....	25
4.4 ผลการทดสอบ.....	28
4.4.1 ค่าความเค้นเฉือนต่ออัตราการเฉือน.....	28
4.4.2 ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกต่ออัตราการเฉือน.....	32
4.4.3 ค่าการกระดก อัตราการกระดก และค่าการรุดตัวของรอยแตก.....	32
<b>บทที่ 5 การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์.....</b>	<b>43</b>
5.1 ค่าความเค้นเฉือน.....	43
5.2 ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก.....	46
5.3 ค่าการรุดตัวของรอยแตก.....	48
<b>บทที่ 6 การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....</b>	<b>51</b>
6.1 วัตถุประสงค์.....	51
6.2 การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	51
6.3 เสถียรภาพของความลาดชัน51	
<b>บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....</b>	<b>59</b>
7.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	59
7.2 สรุปผลการทดสอบ.....	59
7.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	60
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>61</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>65</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดภูพาน.....	16
3.2	คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดภูกระดึง.....	17
3.3	คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดพระวิหาร.....	18
4.1	สรุปค่าความแข็งเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด.....	27
4.2	ผลการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร.....	29
4.3	ผลการทดสอบกำลังกดของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน.....	30
4.4	ผลการทดสอบกำลังกดของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง.....	31
5.1	ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด.....	44
5.2	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	46
5.3	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	48
5.4	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	48
6.1	คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ใช้ในแบบจำลอง.....	52
6.2	ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	58



## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัว..... 9
3.1	ตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดสอบหาค่าอัตราความเค้นเฉือน..... 14
3.2	การทำรอยแตกของตัวอย่างหิน..... 14
3.3	การหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกในหินแต่ละชนิด..... 15
4.1	ตัวอย่างหินหลังจากหล่อปูนยึดติดกับเบ้าเหล็ก..... 20
4.2	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการศึกษา..... 21
4.3	ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการศึกษา..... 22
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร..... 22
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง..... 23
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน..... 24
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนของรอยแตกกับอัตราการเฉือนในตัวอย่าง หินทรายที่มีรอยแตกผิวเรียบทั้ง 3 ชนิด..... 26
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉือนของรอยแตกกับความเค้นตั้งฉากของรอยแตก ในตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด..... 33
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร..... 34
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง..... 35
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตก ผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน..... 36
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของ รอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร..... 37
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของ รอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง..... 38

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวการเลื่อนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน.....	39
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกระดกของรอยแตกกับความเค้นในแนวตั้งฉากของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด.....	40
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของรอยแตกกับความเค้นในแนวตั้งฉากของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด.....	42
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติดของหิน (c) ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) และอัตราการให้แรงเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	45
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\omega$ ตัวแปร A และอัตราการให้แรงเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	47
6.1 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย.....	52
6.2 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง.....	53
6.3 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ.....	53
6.4 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ.....	54
6.5 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง.....	55
6.6 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ.....	55
6.7 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ.....	56
6.8 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง.....	56
6.9 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ.....	57
6.10 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ.....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

มวลหินที่อยู่ตามธรรมชาติประกอบด้วยความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) ของโครงสร้างทางธรณีวิทยา ได้แก่ รอยแตก รอยแยก ชั้นหิน และรอยเลื่อน หากมีการก่อสร้างอาคาร เขื่อน หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่บนมวลหิน จะทำให้มีความเสี่ยงต่อการไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างดังกล่าวได้ เช่น เกิดการทรุดตัวของโครงสร้างเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลหิน โครงสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่บนมวลหินจะมีส่วนในการเพิ่มน้ำหนักกดทับหรือแรงขับเคลื่อนของหินบนรอยแตกทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น ในสถานะที่ไม่มีโครงสร้างทางวิศวกรรมสร้างอยู่ในพื้นที่ที่มีรอยแตกหรือรอยเลื่อน มวลหินจะเกิดการเคลื่อนตัวด้วยอัตราที่ช้ามาก แต่ถ้ามีโครงสร้างทางวิศวกรรมไปเพิ่มแรงขับเคลื่อนก็จะทำให้สมดุลของแรงในธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนตัวในรอยแตกของหินเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในอัตราที่สูงขึ้นได้

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราความเค้นเฉือนในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบแรงเฉือนเป็นการทดสอบโดยการให้แรงเฉือนคงที่ที่อัตราเดียว โดยที่การให้แรงเฉือนในห้องปฏิบัติการจะมีอัตราให้แรงที่สูงมากกว่าความเป็นจริงในภาคสนาม ส่งผลให้การทำนายค่ากำลังเฉือนของรอยแตกสูงกว่าความเป็นจริงและไม่สอดคล้องกับสถานะในภาคสนาม ทั้งนี้วิศวกรต้องพึงตระหนักถึงผลกระทบของอัตราการกดเพื่อให้ออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมบนมวลหินมีความมั่นคงและมีเสถียรภาพในระยะยาว ดังนั้นจึงต้องนำค่าการทดสอบกำลังเฉือนในสถานะที่สอดคล้องกับในภาคสนามมาใช้ในการออกแบบ แต่การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในมวลหินที่มีการพิจารณาถึงผลกระทบจากอัตราการให้แรงที่ต่างกันยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังและเป็นรูปธรรมเพียงพอที่จะสามารถนำผลไปใช้ในการออกแบบในสถานะจริงตามธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาองค์ความรู้นี้ให้สามารถนำไปใช้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อคาดคะเนอิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนของหินทราย 3 ชนิด ภายใต้สถานะอัตราการให้แรงเฉือนที่ต่างกัน 5 อัตรา และความเค้นแนวตั้งจากคงที่ 4 ค่า
- 2) สร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างพลังงานความเครียดและอัตราการให้แรงเฉือน โดยผลที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวในมวลหินที่ใกล้เคียงกับสถานะความเป็นจริงในภาคสนาม

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการทดสอบและหาผลกระทบต่ออัตราการให้แรงเฉือนรวมไปถึงความแข็ง ความยืดหยุ่น และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลา
- 2) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการได้ใช้หินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายพระวิหาร หินทรายภูพาน และหินทรายภูกระดึง
- 3) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกโดยตรง (Direct shear test) โดยใช้อัตราการให้แรงเฉือนอย่างน้อย 5 ระดับ แต่ละระดับได้ผันแปรความเค้นกดในแนวตั้งฉากกับรอยแตกอย่างน้อย 4 ค่า เพื่อให้การสร้างเกณฑ์การแตกเป็นไปอย่างแม่นยำ
- 4) การทดสอบทุกประเภทได้ดำเนินการที่อุณหภูมิลบ
- 5) ในงานวิจัยนี้ไม่มีการออกสำรวจในภาคสนาม

### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กำลังเฉือนมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของมวลหินที่มีรอยแตกและเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการออกแบบฐานรากและโครงสร้างในชุดหินโคราชที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเคลื่อนตัวของมวลหินที่มีผลกระทบจากอัตราการให้แรง ผลการทดสอบจะนำมาสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกำลังเฉือนของหินที่ขึ้นกับอัตราการให้แรงและใช้ในการคาดคะเนอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและรอยแตกในมวลหิน เกณฑ์การเฉือนที่เสนอไว้โดย Coulomb และ Barton จะนำมาใช้อธิบายกำลังเฉือนของรอยแตก ซึ่งเกณฑ์ทั้ง 2 นี้ได้พิจารณาทั้งคุณลักษณะของรอยแตก เช่น ความขรุขระ การเปิดเผย และการขยายตัวของรอยแตก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวยังไม่เคยมีนักวิจัยท่านใดได้นำมาพิจารณา ดังนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดสอบของคุณสมบัติเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการอย่างละเอียด

ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมอัตราการเคลื่อนตัวของรอยแตกในหินโดยมีค่าปัจจัยและตัวแปรที่สำคัญคือ ความเค้นตั้งฉากคงที่ อัตราแรงเฉือน คุณลักษณะของรอยแตก (การเปิดเผย ทิศทาง ระยะห่าง ฯลฯ) และสัมประสิทธิ์ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนของรอย เพื่อนำผลการทดสอบมาสร้างสมการความสัมพันธ์ที่สมบูรณ์ขึ้นและใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงในภาคสนาม โดยสมการใหม่ที่พัฒนาขึ้นนอกจากจะรวมค่าปัจจัยและตัวแปรที่สำคัญไว้เรียบร้อยแล้ว ค่าคงที่ต่างๆ จะถูกสอบทานด้วยผลการทดสอบที่จะดำเนินการในงานวิจัยนี้

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ประเด็นหลักประกอบด้วย การศึกษาผลกระทบของอัตราการให้แรงเฉือน และอัตราการให้แรงกดกับตัวอย่างหิน รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของหินทราย

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

การทดสอบอัตราการให้แรงเฉือนด้วยตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  โดยผ่านแปรอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉากคงที่ ตัวอย่างหินแต่ละชนิดถูกทดสอบไม่น้อยกว่า 25 ตัวอย่าง

### ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าทางด้านกายภาพและธรณีวิทยา

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกโดยใช้แผนภูมิของ Barton (1982) และค่าความหนาแน่นของหินทรายทั้งสามชนิดที่นำมาทดสอบเป็นเกณฑ์

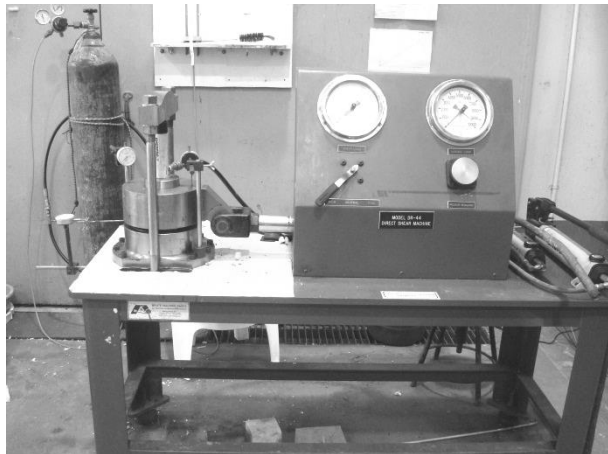
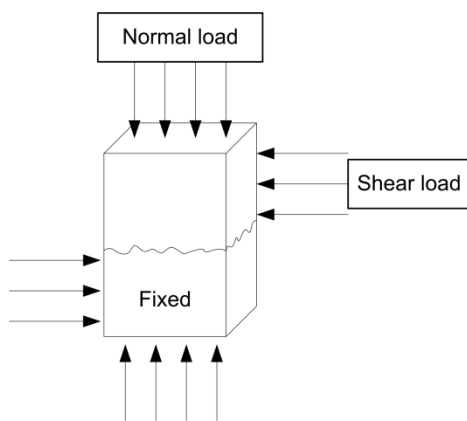
### ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบหาค่าอัตราความเค้นเฉือน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าอัตราแรงเฉือนของหินทราย 3 ชนิด โดยใช้เครื่องทดสอบหาค่าแรงเฉือน (Direct shear machine) ดังรูปที่ 1.1 ตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ถูกจัดเตรียมเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  โดยผ่านแปรอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉากคงที่ ตัวอย่างหินแต่ละชนิดถูกทดสอบไม่น้อยกว่า 20 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราแรงเฉือนสูงสุดของหินทรายทั้ง 3 ชนิด และผลกระทบของค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานที่จุดความเค้นเฉือนสูงสุดและจุดความเค้นเฉือนคงเหลือต่ออัตราการให้แรงเฉือน

### ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ 4 แบบ คือ

1) สร้างความสัมพันธ์จากค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานที่จุดความเค้นเฉือนสูงสุดและจุดความเค้นเฉือนคงเหลือต่ออัตราการให้แรงเฉือนที่ต่างกัน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน



รูปที่ 1.1 เครื่องทดสอบหาค่าแรงเฉือน

- 2) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของรอยแตกในหินและอัตราการใช้แรงเฉือน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากแผนภูมิอัตราระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวแกนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ
- 3) สร้างความสัมพันธ์ในเชิงพลังงานความเครียดต่ออัตราการใช้แรงเฉือนที่ต่างกัน
- 4) ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ตามเกณฑ์ของ Coulomb and Barton ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยนำเสนอในรูปแบบของค่าความเค้นเฉือนของหินทราย 3 ชนิด ภายใต้สภาวะอัตราการใช้แรงเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ของแต่ละเกณฑ์การแตก

### ขั้นตอนที่ 6 การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 5 ได้นำค่าคุณสมบัติมาใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาอัตราการเคลื่อนตัว (Shear rate) โดยทำการสร้างแบบจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของงานด้านวิศวกรรมหินที่มีผลกระทบขึ้นกับเวลา และผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในแนวตั้งฉากและแนวเฉือนว่าส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมอย่างไร โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ FLAC 4.0 หรือ UDEC (Itasca 1994, 2002)

### ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

## 1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

### 1) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เป็นองค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบฐานรากและโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของหินในสภาวะอัตราการให้แรงเฉือน และเกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวที่ขึ้นกับเวลาของหินมากขึ้น การศึกษานี้ยังได้รวบรวมองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินเพื่อใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพของโครงสร้างในทางวิศวกรรมเพื่อประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

### 2) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของอัตราการเคลื่อนตัวของความไม่ต่อเนื่องที่ขึ้นกับเวลาของหิน และผลกระทบของความไม่ต่อเนื่องของมวลหินที่ขึ้นกับเวลาเพื่อใช้ในการพิจารณาและการคาดคะเนเสถียรภาพของฐานรากเขื่อนและการทำเหมืองแร่

### 3) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ เช่น งานด้านการก่อสร้าง เขื่อน อุโมงค์ และเหมืองแร่ ทำให้มีแนวทางหรือทางเลือกในการประเมินเสถียรภาพของมวลหินสามารถกำหนดพื้นที่ป้องกันการพังทลายของมวลหินที่อาจเกิดขึ้นและหลีกเลี่ยงพื้นที่เสี่ยงอันตรายด้านเสถียรภาพมวลหินในทางวิศวกรรมได้

### 4) เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

ในงานด้านเหมืองแร่สามารถนำผลผลิตออกจากพื้นที่ได้มากขึ้นเมื่อมีความเข้าใจในเรื่องผลกระทบของอัตราการเคลื่อนตัวของความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน โดยสามารถวางแผนเพื่อเพิ่มผลผลิตของสินแร่ได้มากขึ้นและยังสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการพังทลายของมวลหิน ทำให้กระบวนการผลิตมีต้นทุนลดลงและมีประสิทธิภาพในการผลิตมากขึ้น

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยรอยแตกและความขรุขระของรอยแตกในหิน ผลกระทบของอัตราการใช้แรงและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน การทดสอบแบบแรงกดสามแกนและผลกระทบของลักษณะทางศิลาวิทยาต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน

#### 2.1 รอยแตกและความขรุขระของรอยแตกในหิน

Lee et al. (1997) ได้ศึกษาตัวแปรที่แสดงความขรุขระอื่นๆ ของรอยแตกแทนการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (JRC) ซึ่งมีการทำรอยแตกในแต่ละชั้นตัวอย่างและพื้นผิวของรอยแตกจะถูกดิจิตัลไลซ์ข้อมูลโดยเครื่องวัดพิคัด จากการศึกษาจำแนกได้ทั้งหมด 6 ตัวแปร ได้แก่ มุมเอียงเฉลี่ย (Micro average inclination angle,  $i_{ave}$ ) ค่าหลักกลางของมุมเอียง (Root mean square of  $i$ -angle,  $i_{rms}$ ) ค่ามุมเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูง (Standard deviation of height, SDH) ดัชนีโปรไฟล์ความขรุขระ (Roughness profile index, Rp) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมเอียง (Standard deviation of  $i$ -angle, SDi) และเศษส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง (Fractal dimension, D) ตัวแปรเหล่านี้จะถูกคำนวณจากข้อมูลดิจิตัลโปรไฟล์ของรอยแตก ยกเว้นตัวแปรเศษส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยตรง

Gehle and Kutter (2003) ได้ทำการศึกษาการแตกและพฤติกรรมการเฉือนของหินที่มีรอยแตกไม่ต่อเนื่อง โดยทำการทดสอบกับอุปกรณ์การทดสอบใหม่ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบในครั้งนี้ ซึ่งได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีลักษณะคล้ายหินแข็ง มีการสร้างรอยแตกที่มีขนาดสั้นและไม่ต่อเนื่องเรียงอยู่บริเวณแกนกลางของก้อนหรือตามแนวแกนการเฉือน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงหลังจากหนึ่งนาที่ที่การเฉือนเคลื่อนตัวไป (~1/10 mm) เริ่มมีการร้าวและมีเสียงที่สามารถได้ยินได้แต่จะมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า รอยแตกที่เห็นจะเป็นรอยแตกสั้นๆ ที่เกิดขึ้นต่อจากรอยแตกแรกที่มีอยู่แล้ว

Fuenkajorn and Kemthong (2007) ได้ทำการศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการที่ใช้ในภาคสนามสำหรับกำหนดค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน ( $\phi_0$ ) ค่ากำลังกดในแกนเดียว (UCS หรือความแข็งของผนังรอยแตก) และค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (JRC) ที่ต่างกันในตัวอย่งหินที่ตัดให้มีผิวเรียบ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณได้จากกฎของ Barton จะอ่อนไหวต่อค่า  $\phi_0$  มากกว่าค่า UCS ส่วนค่า JRC สามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงเฉือนบนพื้นที่ผิวของรอยแตกผิว



ขรุขระได้ดีสำหรับหินอ่อนและหินทราย แต่ไม่สามารถอธิบายกำลังเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินแกรนิตได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากผิวตัดเรียบของหินที่มีขนาดผลึกแร่ใหญ่และมีความแข็งแรงมาก

Park and Song (2009) ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงบนรอยแตกของหินด้วยการใช้แบบจำลองอนุภาคยึดติด (PFC3D) โดยกำหนดให้ความขรุขระของรอยแตกกับค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 เพื่อจำลองการลดลงของความแข็งแรงของผนังรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการผุพังและการเปลี่ยนแปลงในรอยแตก ความแข็งแรงยึดติด (Bond strength) ระหว่างอนุภาคจะเกี่ยวข้องกับผิวสัมผัสของรอยแตกเมื่อผิวสัมผัสลดลงถึง 70% พฤติกรรมแรงเฉือนและการวิบัติจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการสังเกตการณ์ในห้องปฏิบัติการ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมกำลังรับแรงเฉือนและมุมการกระดกของหิน

Moradian et al. (2010) ได้ทำการประเมินความเสียหายในระหว่างการทดสอบแรงเฉือนของรอยแตกในหินโดยใช้การปล่อยคลื่นเสียง ซึ่งคลื่นเสียง (acoustic emission, AE) ที่ปล่อยออกไปเพื่อจำแนกชนิดของรอยแตก (หิน-หิน หิน-คอนกรีต และ คอนกรีต-คอนกรีต) แท่ง core ของหลุมเจาะได้จากตัวเชื่อม มวลหิน และบริเวณเชื่อมต่อระหว่างเชื่อมกับมวลหิน ตัวอย่างจะถูกเตรียมและทำการทดสอบภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์โปรไฟล์ถูกนำมาใช้สำหรับการสแกนพื้นผิวของรอยแตกเพื่อที่จะประเมินความขรุขระของพื้นผิว โดยการเทียบเคียงสัญญาณ AE กับกราฟการเฉือนที่สามารถคาดการณ์ไปถึงจุดเริ่มต้นของการเฉือนในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง จำนวนและตัวแปรพลังงานจะถูกนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงเฉือนในสองวิธีที่ต่างกันคือ กราฟของจำนวนกับอัตราการใช้พลังงาน และกราฟของจำนวนสะสมกับพลังงาน

## 2.2 ผลกระทบของอัตราการให้แรงและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

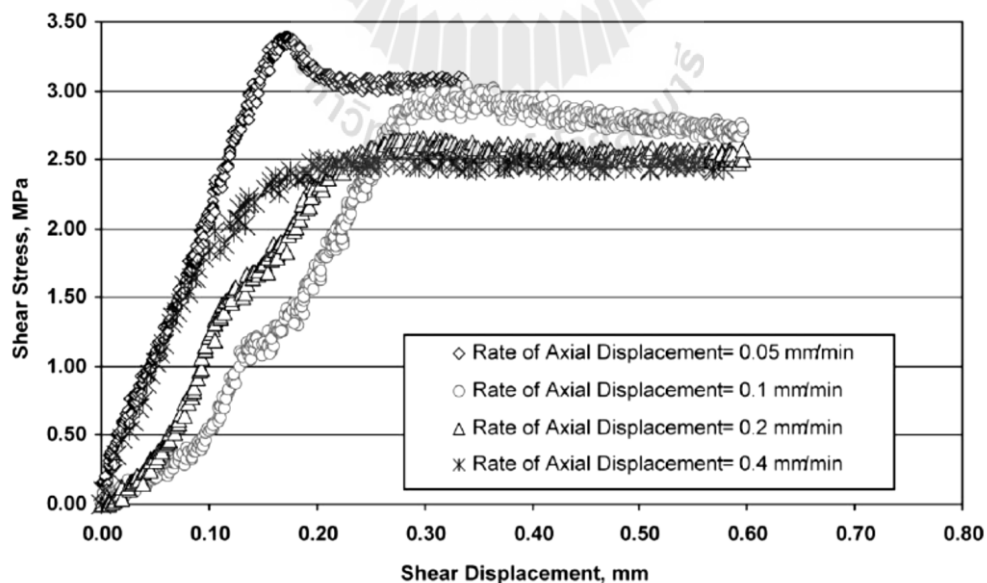
Vasarhelyi (1999) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการให้แรงคงที่ต่ออัตราการขยายตัว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามุมของการขยายตัวจะลดลงเมื่อให้แรงในแนวตั้งฉากเพิ่มขึ้น การจำลองพฤติกรรมการเฉือนในความไม่ต่อเนื่องของหินต้องคำนึงถึงสภาวะความแข็งแรงของมวลหินเป็นสำคัญ ในสภาวะนี้ควรใช้ค่าความเค้นตั้งฉากที่เหมาะสมเพื่อการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนที่แม่นยำ

Jafari et al. (2003) ได้ทำการศึกษาการประเมินกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกหินภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรและบางส่วนได้ศึกษาผลกระทบของอัตราการเคลื่อนที่หรือความเร็วในการให้แรงเฉือนกับกำลังรับแรงเฉือนในทิศทางเดียว (Monotonic) โดยได้ดำเนินการในช่วงของระยะเวลาการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่แตกต่างกันในสภาวะความดันล้อมรอบ 4 MPa จาก

อัตราการเคลื่อนตัวที่ 0.05 ถึง 0.4 mm/s ผลบางส่วนได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งพบว่าความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟความสัมพันธ์กับผลกระทบของความเร็วในการให้แรงเฉือนซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงเมื่อความเร็วในการให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดและความแข็งแรงคงเหลือ (Peak and residual strength) จะมีค่าเหมือนกันหรือเกือบเท่ากันเมื่อความเร็วในการให้แรงเฉือนสูง

### 2.3 ผลกระทบของลักษณะทางศิลาวิทยาต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน

ผลกระทบจากขนาดของเม็ดหินหรือขนาดของผลึกแร่ประกอบหินต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของหินได้มีการศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน ในหินทรายพบว่ากำลังอัดของหินจะมีค่าสูงเมื่อหินมีเนื้อละเอียด (Brace, 1961) Handlin and Hasger (1957) ได้บันทึกไว้ว่ากำลังอัดของหินปูนและหินอ่อนจะสูงขึ้นเมื่อขนาดของเม็ดหินเล็กลง Hoek (1965) ได้เสนอว่าการให้ความเค้นที่สูงเป็นสาเหตุสำคัญของการวิบัติบริเวณขอบของเม็ดหิน ตามลักษณะการยึดตัวกันแน่นของเม็ดหิน Onodera and Asoka (1980) รายงานว่าในหินอัคนีกำลังของหินจะลดเมื่อขนาดของผลึกแร่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการศึกษาจากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างขนาดผลึกและกำลังอัดของหินซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดผลึกของหินแกรนิตเล็กลงกำลังอัดของหินจะมีค่าสูงขึ้น Shakoor and Bonelli (1991) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของเม็ดหินที่มีขอบเหลี่ยมพบว่าเมื่อผลกำลังและคุณสมบัติความยืดหยุ่นของหิน



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัว (from Jafari et al., 2003)

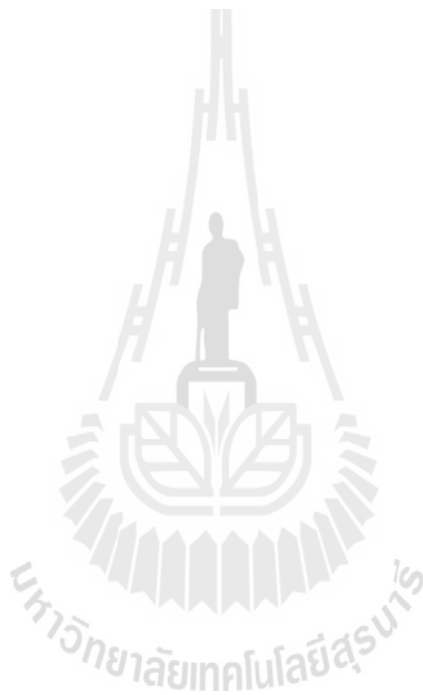
แร่ประกอบหินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงของหิน หินที่มีแร่จำพวก Quartz เป็นส่วนประกอบจะมีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเทียบกับหินที่มีแร่ประกอบจำพวก Calcite และเหล็กออกไซด์ หินที่มีแร่ประกอบจำพวกหินจะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด (Vutukuri et al., 1974) ความสัมพันธ์ของแร่ประกอบหินกับลักษณะเชิงกลศาสตร์ของหินทรายชนิดต่างๆ ที่ผ่าน มาได้มีการศึกษาจากนักวิจัยหลายท่าน เมื่อจำนวนของแร่ feldspar และ mica และเศษหินในหิน ทรายมีปริมาณน้อย ค่าต่างๆ เหล่านี้จะไม่ถูกนำไปพิจารณา การพิจารณาความสัมพันธ์จะตั้งอยู่ บนพื้นฐานของหินที่มีแร่ Quartz เป็นส่วนประกอบเท่านั้น (Bell, 1978; Fahy and Cuccione, 1979; Gunsallus and Kulhawy, 1984; Dobereiner and De Freitas, 1986 และ Shakoor and Bonelli, 1991)

ความหนาแน่น (Density) หรือปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดหินเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มี ความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงของหิน Bell (1978) และ Doberenier and De Freitas (1986) ได้ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดหินใน Fell sandstone จะทำให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นสูงขึ้น Howarth and Rowland (1986) ได้เสนอตัวแปร Texture coefficient เพื่อใช้ร่วมกับความหนาแน่นของเม็ดหิน Doberenier and De Freitas (1986) ได้สรุปว่าหินทรายที่มีความแข็งต่ำโดยทั่วไปจะเกิดจากความหนาแน่นของเม็ดหินต่ำ Grain contact ส่งผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังอัดของหินทราย และกำลังอัดของหินในสภาวะอิมดัวซึ่งมี ค่าเท่ากับ 20 MPa จะใช้สำหรับแสดงค่าขอบเขตของกำลังอัดสูงสุดของหินที่มีกำลังอัดต่ำ การ วิบัติของหินจะถูกควบคุมโดยลักษณะการแตกตามขอบของเม็ดหินแทนการใช้ Rolling of grain นอกจากนี้แล้วยังพบว่าความหนาแน่นที่มีค่าสูงยังทำให้หินมีกำลังสูงขึ้นด้วย (Bell, 1978) Ulusay et al. (1994) ได้รายงานว่าลักษณะของผิว (Texture) มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทาง กลศาสตร์ของหินทรายมากกว่าชนิดของแร่ที่เป็นส่วนประกอบของหิน

ความชื้นในเนื้อหินเป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของหิน ทราย โดยปริมาณความชื้นมากขึ้นจะทำให้ค่าแรงกดในแกนเดียวลดลง (Dyke and Dobereiner, 1991)

กำลังอัดของหินที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ที่ได้จากการทดลองใน ห้องปฏิบัติการมักได้รับผลกระทบด้านขนาดของหินตัวอย่าง ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายตัวแบบไม่ สม่าเสมอของรอยแตกเล็กๆ ในหิน (Griffith, 1924) กำลังของหินมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อหินมี ขนาดใหญ่ขึ้น (Evans, 1961; Jaeger and Cook, 1979; Bieniawski, 1981 และ Farmer, 1983) และสำหรับหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันผลกระทบจากขนาดยังสัมพันธ์กับการกระจายตัวแบบ ไม่สม่าเสมอของช่องว่างเล็กๆ เช่น ขนาดของเม็ดหิน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดหิน วัสดุประสาน ความหนาแน่น ชนิดของแร่ สิ่งเจือปน และความประสานกัน

Fuenkajorn and Daemen (1992) ได้สร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อเชื่อมโยงระหว่างความเค้นกดสูงสุดของหินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเช่นหินภูเขาไฟ (Volcanic tuff) กับความพรุน ขนาด อัตราการกัด และความหนาแน่นของตัวอย่างหิน ผลที่ได้ระบุว่าค่าความแปรปรวนของความเค้นกดสูงสุด (Strength) จะลดลงเมื่อตัวอย่างหินที่ทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น และค่าความเค้นกดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นถ้าความหนาแน่นของหินและอัตราการกัดทดสอบเพิ่มขึ้น



## บทที่ 3

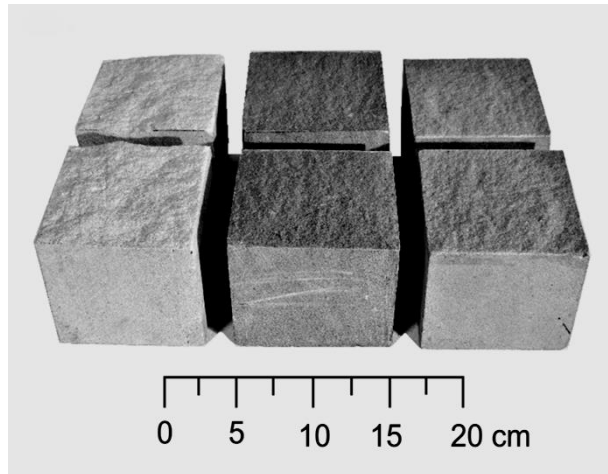
### การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

#### 3.1 บทนำ

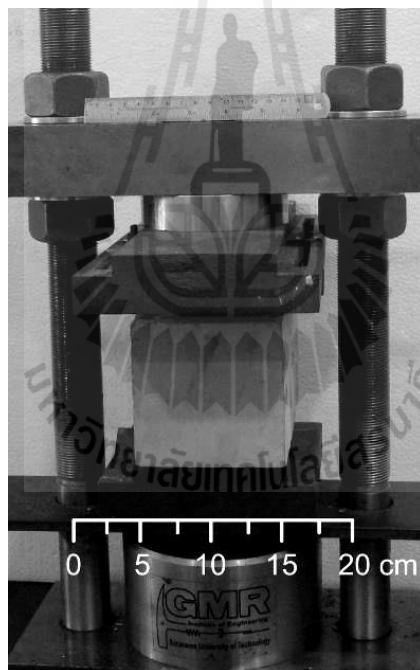
เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างหิน เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (Phra Wihan Sandstone – PWSS) หินทรายชุดภูพาน (Phu Phan Sandstone – PPSS) และหินทรายชุดภูกระดึง (Phu Kradung Sandstone – PKSS) ซึ่งมีกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โครงสร้างทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มีโอกาที่จะก่อสร้างในชั้นหินดังกล่าวนี้ ในการจัดเตรียมตัวอย่างหินเบื้องต้นได้ทำการตัดหินเป็นรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอกขนาด  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  (รูปที่ 3.1) โดยคัดเลือกตัวอย่างที่มีความสมบูรณ์มาใช้ในการทดสอบ กล่าวคือ ต้องเป็นตัวอย่างหินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นอยู่ก่อนหน้า

#### 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

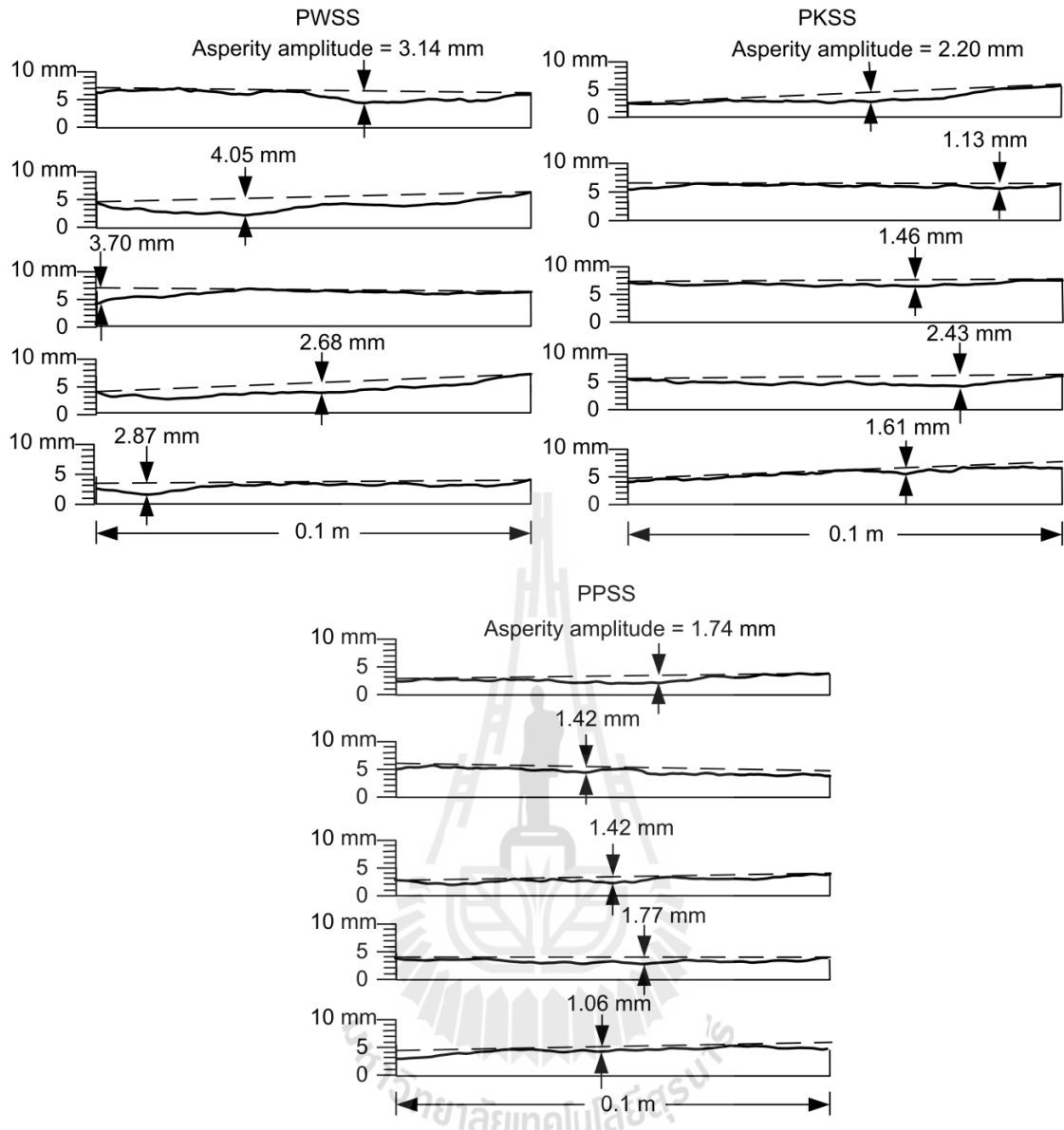
นำตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด มาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอกขนาด  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  จากนั้นทำการสร้างรอยแตกในห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วนำหินไปทำการสแกนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกที่ถูกทำขึ้นในหินแต่ละชนิด (รูปที่ 3.3) เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าอัตราความเค้นเฉือนโดยใช้เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear machine) สำหรับตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดสอบหาค่าอัตราความเค้นเฉือน



รูปที่ 3.2 การทำรอยแตกของตัวอย่างหิน (Line load)



รูปที่ 3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกในหินแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดภูพาน

Specimen no.	Size (cc)	Density (g/cc)	JRC
PP-1	10×9.8×15.4	2.38	5
PP-2	10.2×9.7×15.5	2.46	6
PP-3	10×10.3×15	2.46	6
PP-4	10.5×9.5×15.6	2.39	7
PP-5	9.8×10.2×15.3	2.41	5
PP-6	10×10.3×15.4	2.42	6
PP-7	10.2×9.8×15.4	2.46	7
PP-8	9.8×9.7×15.2	2.43	5
PP-9	10×10.4×15.6	2.30	5
PP-10	10×10×15	2.41	6
PP-11	10.3×9.8×15	2.43	8
PP-12	10×10×15.7	2.43	5
PP-13	10.2×9.8×15.5	2.37	6
PP-14	10×10.4×15	2.49	7
PP-15	10.3×10×15.6	2.40	6
PP-16	10.2×10.4×15.4	2.48	5
PP-17	9.7×10.2×15.5	2.43	5
PP-18	10×9.8×15.7	2.44	8
PP-19	10×10×16	2.48	6
PP-20	10.3×9.8×15.3	2.37	5
PP-21	10×10.5×15.3	2.43	6
PP-22	9.8×10.7×15.4	2.40	6
PP-23	10×9.8×15.2	2.43	5
PP-24	10×10×15.5	2.46	5
PP-25	10.2×10×15.4	2.33	7



ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดภูกระดึง

Specimen no.	Size (cc)	Density (g/cc)	JRC
PK-1	10×10×16	2.50	7
PK-2	10.3×9.8×15.3	2.52	8
PK-3	10×10.5×15.3	2.53	8
PK-4	9.8×10.7×15.4	2.56	8
PK-5	10×9.8×15.2	2.53	7
PK-6	10×10×15.5	2.53	6
PK-7	10.2×10×15.4	2.56	6
PK-8	9.8×9.7×15.2	2.53	7
PK-9	10×10.4×15	2.53	7
PK-10	10.3×10×15.6	2.53	6
PK-11	10.2×10.4×15.4	2.54	8
PK-12	9.7×10.2×15.5	2.54	8
PK-13	10×9.8×15.7	2.54	9
PK-14	10×10×16	2.54	5
PK-15	10.3×10×15.6	2.54	7
PK-16	10×9.8×15.2	2.52	7
PK-17	10×10×15.5	2.55	6
PK-18	10.2×10×15.4	2.52	5
PK-19	9.8×9.7×15.2	2.52	9
PK-20	10×10.4×15	2.60	8
PK-21	10.3×10×15.6	2.64	6
PK-22	10.2×10.4×15.4	2.47	6
PK-23	9.7×10.2×15.2	2.50	7
PK-24	10×9.8×15.7	2.47	8
PK-25	10×10×16	2.53	8

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดพระวิหาร

Specimen no.	Size (cc)	Density (g/cc)	JRC
PW-1	10×9.8×15.7	2.23	9
PW-2	10×10×16	2.23	10
PW-3	10.3×10×15.6	2.31	12
PW-4	10×9.8×15.2	2.28	9
PW-5	10×10×15.5	2.21	8
PW-6	10.2×10×15.4	2.19	12
PW-7	10×10.4×15	2.22	11
PW-8	10.3×10×15.6	2.26	10
PW-9	10.2×10.4×15.4	2.25	12
PW-10	9.7×10.2×15.2	2.23	13
PW-11	9.7×10.2×15.5	2.28	12
PW-12	10×9.8×15.7	2.30	12
PW-13	10×10×16	2.26	8
PW-14	10.3×10×15.6	2.29	9
PW-15	10×9.8×15.2	2.29	10
PW-16	10×10×15.5	2.20	14
PW-17	10×10×15.5	2.23	12
PW-18	10×9.8×15.7	2.23	10
PW-19	10×10×16	2.25	11
PW-20	10.3×10×15.6	2.21	11
PW-21	10×9.8×15.2	2.29	12
PW-22	10×10×15.5	2.30	13
PW-23	10.2×10×15.4	2.22	10
PW-24	9.8×9.7×15.2	2.27	12
PW-25	10×10.4×15	2.25	9

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

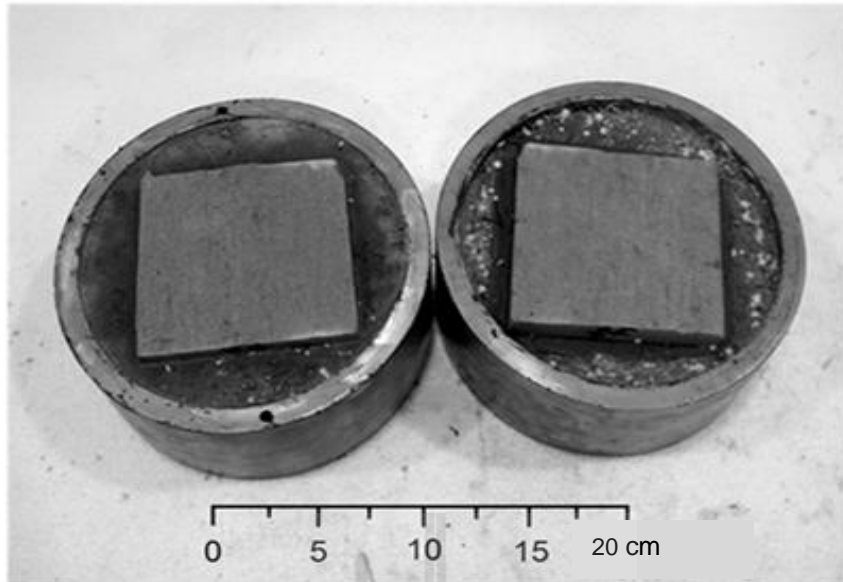
เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธี และผลการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกแบบตรง (Direct shear test) ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการแปรผันอัตราการให้แรงเฉือน 5 ระดับ โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อคาดคะเนกำลังเฉือนของหินทราย 3 ชนิด ภายใต้สภาวะอัตราการให้แรงเฉือนที่ต่างกัน 5 ระดับ และความเค้นในแนวตั้งฉากคงที่ ผลการทดสอบจะนำมาพัฒนาสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างกำลังเฉือนและอัตราการให้แรงเฉือนในบทต่อไป

#### 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในหินทราย

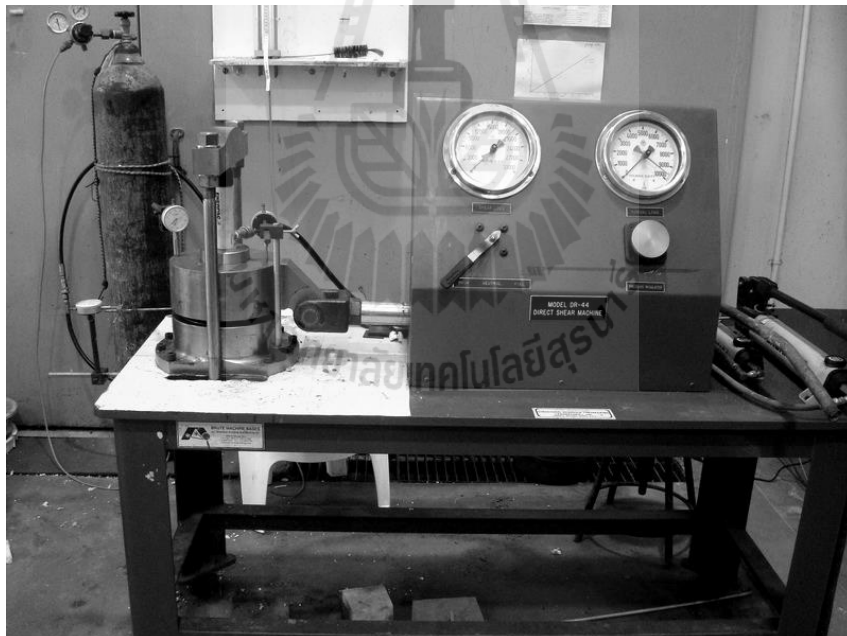
การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหินทรายภายในห้องปฏิบัติการมีปัจจัยของการทดสอบคือ การให้ความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตกเท่ากับ 0.2, 1, 2, 3 และ 4 MPa โดยมีอัตราการให้แรงเฉือนที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ  $2 \times 10^{-5}$  ถึง  $2 \times 10^{-1}$  MPa/s ระหว่างการทดสอบได้มีการอ่านและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในทิศทาง การให้แรงกดต่อตัวอย่างหินเพื่อคำนวณกำลังเฉือนของรอยแตกหินต่อไป

การติดตั้งตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

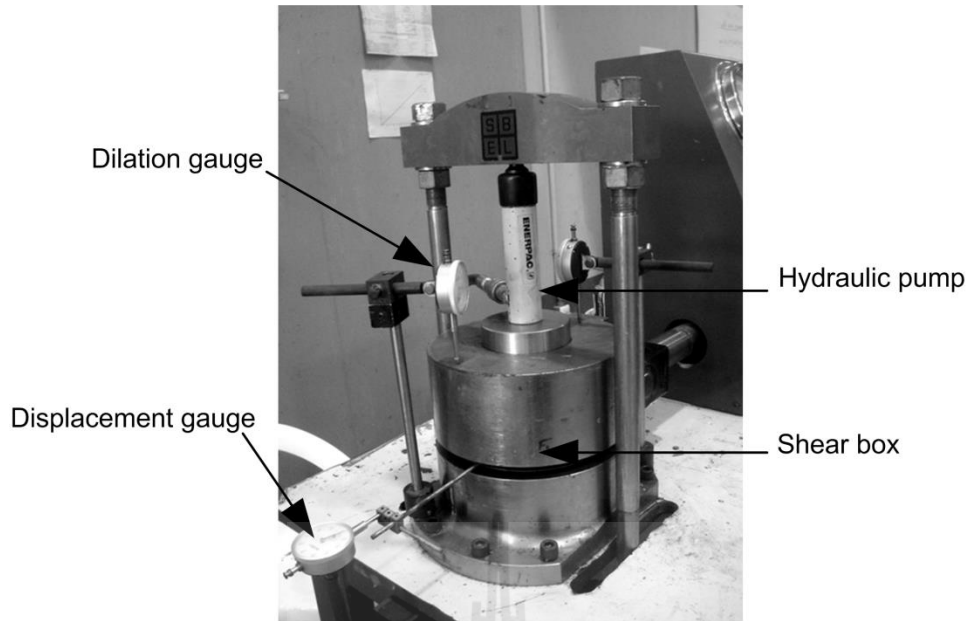
- 1) นำตัวอย่างหินทรายที่ได้จัดทำรอยแตกในขั้นตอนการจัดเตรียมตัวอย่าง (บทที่ 2) มาทำการวัดขนาดอีกครั้งและจดบันทึกข้อมูลเพื่อหาค่าการเปิดของรอยแตก
- 2) นำตัวอย่างหินมาทำการหล่อปูนยึดติดเข้ากับเบ้าของเครื่องทดสอบ โดยทำการหล่อที่ละครึ่งก่อนดังรูปที่ 4.1 เมื่อปูนที่หล่อไว้ก่อนแรกแห้งแล้วจึงนำตัวอย่างหินอีกครั้งก่อนวางประกบกับตัวอย่างหินชิ้นแรกแล้วหล่อปูนเข้ากับเบ้าด้านบนของเครื่องทดสอบ
- 3) ติดตั้งเครื่องทดสอบดังรูปที่ 4.2 โดยติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและระนาบของการให้ความเค้น เพื่อวัดระยะการยกกระดกและการเคลื่อนตัวในแนวระนาบ (รูปที่ 4.3)
- 4) ทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกหินโดยการให้ความเค้นกด (0.2, 1, 2, 3 และ 4 MPa) กับตัวอย่างหินในแนวตั้งฉากกับรอยแตกและให้อัตราความเค้นเฉือนทั้ง 5 อัตรา ( $2 \times 10^{-5}$  ถึง  $2 \times 10^{-1}$  MPa/s)



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างหินหลังจากหล่อปูนยึดติดกับเบ้าเหล็ก



รูปที่ 4.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการศึกษา

### 4.3 การคำนวณผลการทดสอบ

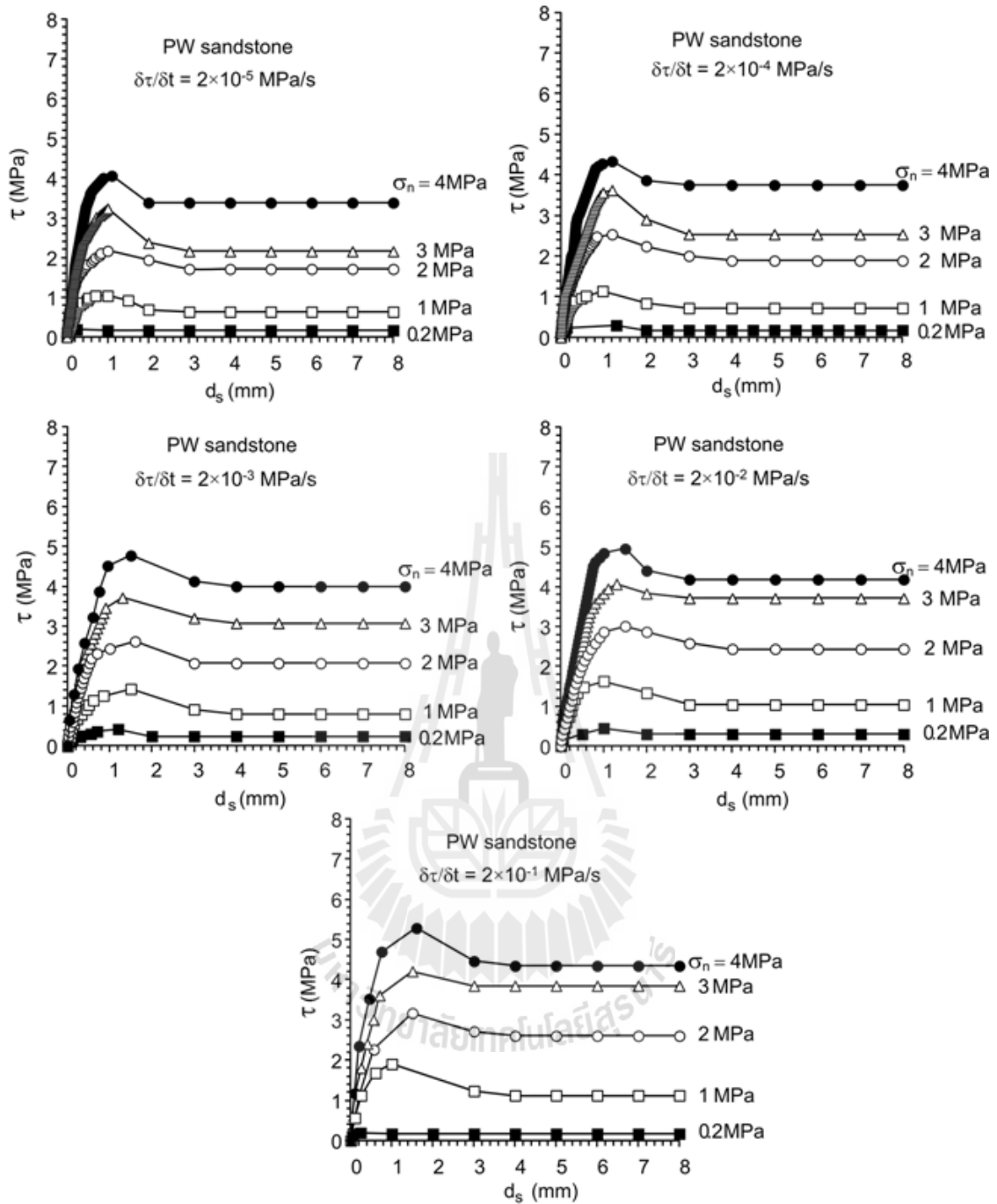
#### 4.3.1 การคำนวณค่ากำลังเฉือนของรอยแตก

การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหินทรายทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) สัมพันธ์กับความเค้นที่กดอยู่ในแนวตั้งฉากซึ่งมีความสอดคล้องกับกฎของ Coulomb ผลการทดสอบที่ได้จากการเคลื่อนตัวของรอยแตกหินในสองมิติสามารถนำมาวิเคราะห์และกำหนดว่า กฎเกณฑ์ของการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกฎของ Coulomb (Jaeger et al., 2007) กล่าวคือ

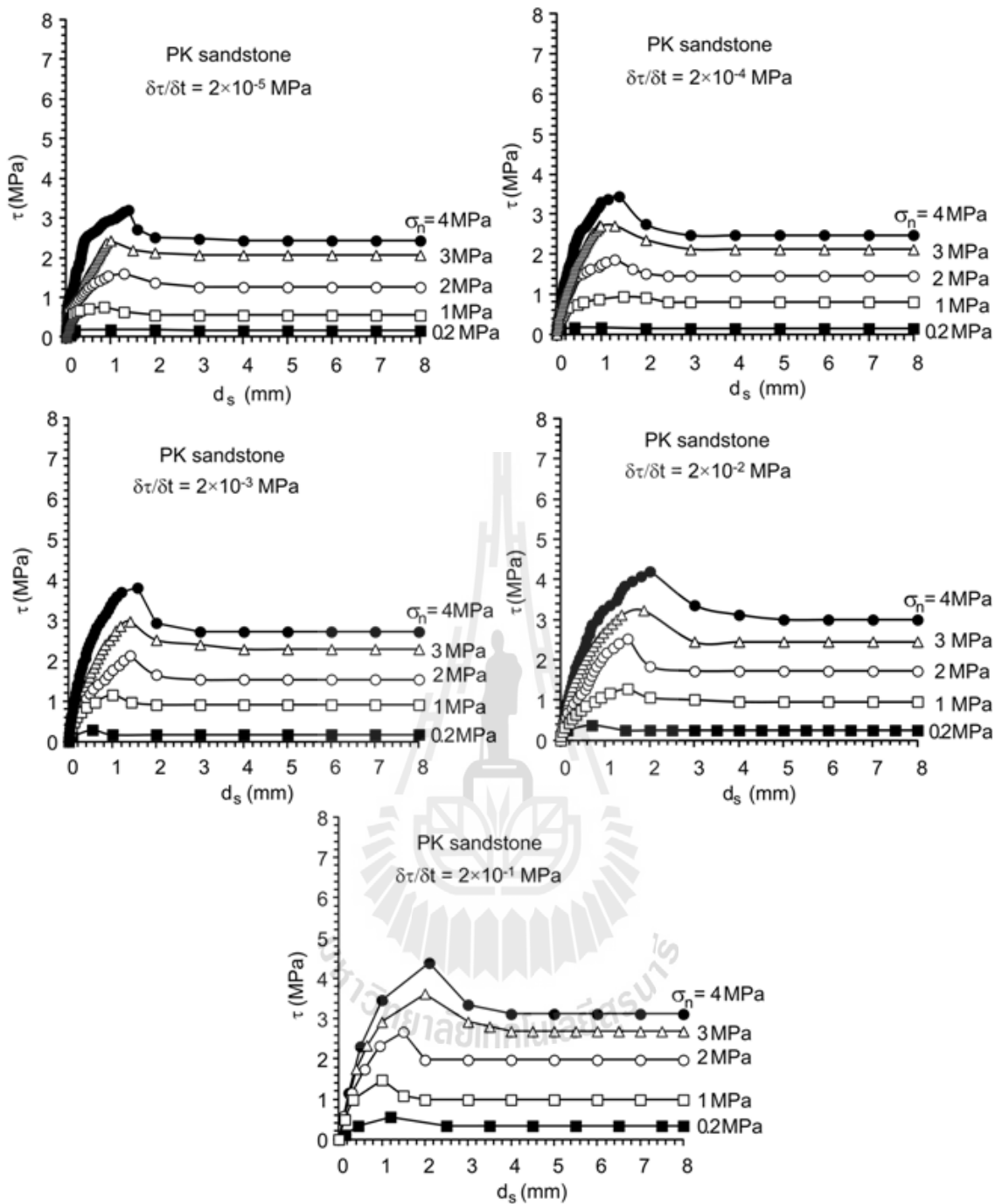
$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (4.1)$$

โดยที่  $\sigma_n$  คือความเค้นกดในแนวตั้งฉาก  
 $c$  คือค่าความเค้นยึดติดของหิน  
 $\phi$  คือมุมเสียดทานของรอยแตก

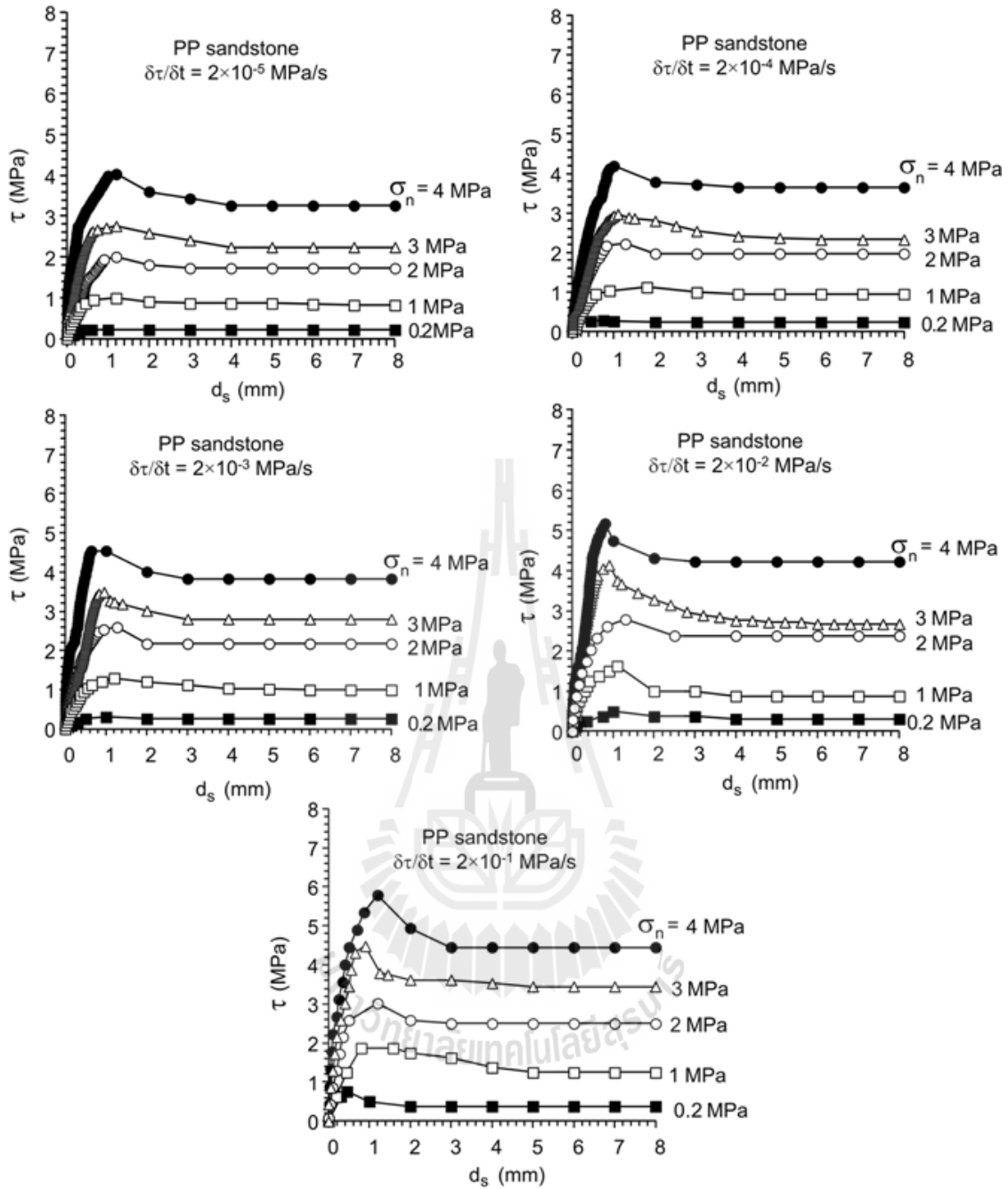
จากกฎเกณฑ์ของ Coulomb ความเค้นเฉือนจะขึ้นอยู่กับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นในแนวตั้งฉากสูงขึ้นค่าความเค้นต้านในทิศทางการเฉือนจะสูงขึ้นด้วย (Vásárhelyi, 1998) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของหินทรายทั้ง 3 ชนิด ที่ได้ทำการทดสอบ (รูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6) จากการทดสอบสามารถพัฒนาสมการความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนจากกฎเกณฑ์ของ Coulomb ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความกระจัดเฉือนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



#### 4.3.2 การคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก

ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก (Joint shear stiffness,  $K_s$ ) เป็นค่าที่ได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ด้านอยู่ในทิศทางการเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (Displacement) นั่นคือ

$$K_s = \Delta\tau / \Delta d_s \quad (4.2)$$

โดยที่  $\Delta\tau$  คือผลต่างของค่าความเค้นที่ด้านอยู่ในทิศทางการเฉือน  
 $\Delta d_s$  คือผลต่างของค่าระยะการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน

จากสมการที่ 4.2 พบว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกแปรผันโดยตรงกับค่าความเค้นที่ด้านอยู่ในทิศทางการเฉือน แสดงว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกขึ้นกับความเค้นในแนวตั้งฉากด้วยเช่นกัน (รูปที่ 4.7) เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกสรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และสามารถพัฒนาความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกกับอัตราการเฉือนขึ้นใหม่ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

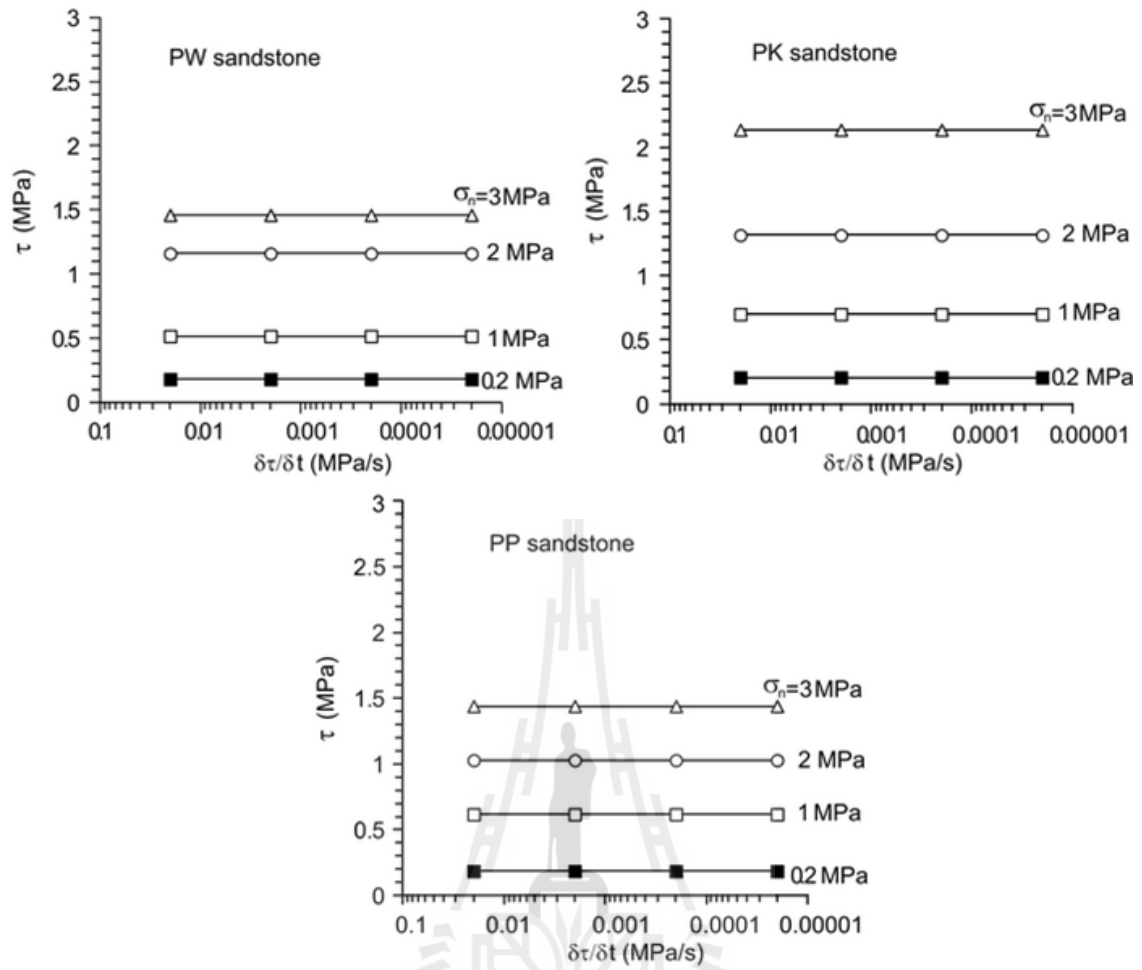
#### 4.3.3 การคำนวณค่าการยุบตัวของรอยแตก

การหาค่าการยุบตัวของรอยแตก (Joint normal stiffness,  $K_n$ ) ของหินทั้ง 3 ชนิดสามารถหาได้จากสมการ

$$K_n = \sigma_n / \Delta e \quad (4.3)$$

โดยที่  $\sigma_n$  คือค่าความเค้นกดในแนวตั้งฉากของรอยแตก  
 $\Delta e$  คือผลต่างของค่าระยะการเปิดของรอยแตกก่อนให้แรงกับหลังให้แรงในแนวตั้งฉากของรอยแตก

จากสมการที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าการยุบตัวของรอยแตกแปรผันโดยตรงกับค่าความเค้นในแนวตั้งฉากกล่าวคือยิ่งค่าความเค้นกดในแนวตั้งฉากมีมาก ค่าการยุบตัวของรอยแตกจะเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนของรอยแตกกับอัตราการเฉือนในตัวอย่างหินทรายที่มีรอยแตกผิวเรียบทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความแข็งเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด

Normal load (MPa)	Shearing rate (MPa/s)	Joint shear stiffness, $K_s$ (GPa/m)		
		PW	PK	PP
0.2	$2 \times 10^{-1}$	1.50	1.39	1.70
	$2 \times 10^{-2}$	1.00	1.05	0.80
	$2 \times 10^{-3}$	0.75	0.98	0.52
	$2 \times 10^{-4}$	0.70	0.74	0.48
	$2 \times 10^{-5}$	0.52	0.69	0.37
1	$2 \times 10^{-1}$	2.64	2.39	2.30
	$2 \times 10^{-2}$	2.51	1.99	1.62
	$2 \times 10^{-3}$	2.42	1.53	1.41
	$2 \times 10^{-4}$	2.13	1.49	1.265
	$2 \times 10^{-5}$	1.58	1.46	0.84
2	$2 \times 10^{-1}$	3.97	3.78	5.40
	$2 \times 10^{-2}$	3.73	3.06	3.30
	$2 \times 10^{-3}$	3.54	2.72	2.90
	$2 \times 10^{-4}$	3.28	2.41	2.51
	$2 \times 10^{-5}$	3.08	2.08	2.13
3	$2 \times 10^{-1}$	4.78	4.44	6.08
	$2 \times 10^{-2}$	4.28	4.13	5.65
	$2 \times 10^{-3}$	4.02	3.46	4.27
	$2 \times 10^{-4}$	3.86	3.05	3.19
	$2 \times 10^{-5}$	3.44	2.83	2.92
4	$2 \times 10^{-1}$	5.95	5.10	6.81
	$2 \times 10^{-2}$	5.69	4.93	6.31
	$2 \times 10^{-3}$	5.16	4.35	5.70
	$2 \times 10^{-4}$	4.84	4.28	4.37
	$2 \times 10^{-5}$	4.73	3.58	3.65

#### 4.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ทำการพิจารณาประกอบด้วย ค่าความเค้นเฉือนต่ออัตราการเฉือน ค่าความแข็งเฉือนของรอยแตกต่ออัตราการเฉือน ค่าการกระดก อัตราการกระดก และค่าการยุบตัวของรอยแตกทั้งผิวเรียบและผิวขรุขระ

##### 4.4.1 ค่าความเค้นเฉือนต่ออัตราการเฉือน

1) **รอยแตกผิวขรุขระ** จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการเฉือนมีอิทธิพลต่อค่าความเค้นเฉือนของรอยแตก โดยเมื่อทำการทดสอบด้วยอัตราการเฉือนที่สูง ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จะสูงขึ้นด้วย สามารถเห็นได้ชัดเจนในการทดสอบภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังเฉือนของหินทรายทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นเฉือนคงเหลือจะขึ้นกับอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉาก กลไกที่ทำให้ค่าความเค้นเฉือนขึ้นต่ออัตราการเฉือนหรือเวลาคือกลไกการร้าวของเม็ดหินในรอยแตก เมื่อทำการทดสอบที่อัตราการเฉือนสูง เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนตัวจะรวดเร็ว รอยแตกที่มีความขรุขระจะประกบกันเมื่อถูกให้แรงผลักในเวลาที่จะรวดเร็ว จึงเกิดการบดอัดอย่างแรงคล้ายกับการทดสอบการกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength) ทำให้ได้กำลังเฉือนของรอยแตกสูง ได้มีผู้ทำการศึกษาที่คล้ายคลึงกันโดย Fuenkajorn and Kenkhunthod (2010) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการให้แรงต่อค่าความแข็งของหินทรายทั้ง 3 ชนิด ในประเทศไทยซึ่งก็คือหินชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ โดยทำการทดสอบการกดในแกนเดียวและในสามแกนที่มีการแปรผันอัตราการให้แรงจาก 0.001 ถึง 10 MPa/s ผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกันกับการทดสอบในครั้งนี้ คือที่อัตราการให้แรงสูงขึ้นค่าความแข็ง (Compressive strength) ของรอยแตกหินจะสูงขึ้นด้วย ส่วนที่อัตราการเฉือนต่ำจะใช้เวลาในการเคลื่อนตัวช้า ทำให้เกิดการบดอัดระหว่างผิวของรอยแตกที่ละน้อย เม็ดหินของรอยแตกจึงมีเวลาในการร้าวและค่อยๆ พัฒนาการร้าวที่ละน้อย เมื่อเม็ดหินเกิดการร้าวมากจนกระทั่งรับแรงไม่ไหวก็จะเกิดการเคลื่อนตัวในที่สุด ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนต่ำจึงมีค่าน้อยกว่าที่อัตราการเฉือนสูง มีผู้ศึกษาและทำการทดสอบที่คล้ายคลึงกันกล่าวไว้ว่า อัตราการให้แรงเฉือนมีผลกระทบโดยตรงต่อค่ากำลังเฉือนและค่าความแข็งเฉือนของรอยแตก กล่าวคือ เมื่ออัตราการให้แรงกดที่มีความเร็วสูงจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนของรอยแตกเพิ่มขึ้น และการให้แรงกดที่มีอัตราต่ำค่าความเค้นเฉือนจะน้อย เนื่องจากการตอบสนองของหินจะมีลักษณะแบบเปราะเมื่อหินนั้นต้องรับแรงกดที่มีอัตราการกดด้วยอัตราสูง ทำให้ความเค้นกดสูงสุดและความยืดหยุ่นที่วัดได้มีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าหินชนิดเดียวกันนี้มารับแรงกดที่อัตราการกดด้วยความเร็วต่ำ การตอบสนองของหินต่อแรงลักษณะนี้จะเป็นแบบเหนียว โดยมีความเค้นกดสูงสุดและความยืดหยุ่นที่วัดได้จะมีค่าต่ำ (Farmer, 1983; Aubertin et al., 1999; Chong et al., 1987; Costin, 1987; Li and xia, 2000; Kohmura and Inada, 2006)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร

Normal load (MPa)	Shearing rate (MPa/s)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)
0.2	$2 \times 10^{-1}$	0.69	0.46
	$2 \times 10^{-2}$	0.45	0.30
	$2 \times 10^{-3}$	0.42	0.24
	$2 \times 10^{-4}$	0.29	0.18
	$2 \times 10^{-5}$	0.19	0.17
1	$2 \times 10^{-1}$	1.90	1.23
	$2 \times 10^{-2}$	1.63	1.04
	$2 \times 10^{-3}$	1.43	0.80
	$2 \times 10^{-4}$	1.08	0.72
	$2 \times 10^{-5}$	1.04	0.63
2	$2 \times 10^{-1}$	3.16	2.60
	$2 \times 10^{-2}$	3.01	2.44
	$2 \times 10^{-3}$	2.62	2.07
	$2 \times 10^{-4}$	2.53	1.89
	$2 \times 10^{-5}$	2.17	1.71
3	$2 \times 10^{-1}$	4.21	3.73
	$2 \times 10^{-2}$	4.06	3.47
	$2 \times 10^{-3}$	3.78	3.07
	$2 \times 10^{-4}$	3.62	2.54
	$2 \times 10^{-5}$	3.23	2.24
4	$2 \times 10^{-1}$	5.28	4.46
	$2 \times 10^{-2}$	4.95	4.18
	$2 \times 10^{-3}$	4.77	3.99
	$2 \times 10^{-4}$	4.33	3.75
	$2 \times 10^{-5}$	4.06	3.38

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังกดของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน

Normal load (MPa)	Shearing rate (MPa/s)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)
0.2	$2 \times 10^{-1}$	0.76	0.38
	$2 \times 10^{-2}$	0.49	0.30
	$2 \times 10^{-3}$	0.30	0.26
	$2 \times 10^{-4}$	0.26	0.24
	$2 \times 10^{-5}$	0.22	0.22
1	$2 \times 10^{-1}$	1.87	1.25
	$2 \times 10^{-2}$	1.64	1.06
	$2 \times 10^{-3}$	1.29	0.99
	$2 \times 10^{-4}$	1.12	0.95
	$2 \times 10^{-5}$	0.99	0.82
2	$2 \times 10^{-1}$	3.02	2.50
	$2 \times 10^{-2}$	2.79	2.38
	$2 \times 10^{-3}$	2.60	2.17
	$2 \times 10^{-4}$	2.22	1.97
	$2 \times 10^{-5}$	2.00	1.72
3	$2 \times 10^{-1}$	4.48	3.45
	$2 \times 10^{-2}$	4.14	3.28
	$2 \times 10^{-3}$	3.49	2.80
	$2 \times 10^{-4}$	2.97	2.32
	$2 \times 10^{-5}$	2.76	2.24
4	$2 \times 10^{-1}$	5.79	4.45
	$2 \times 10^{-2}$	5.17	4.22
	$2 \times 10^{-3}$	4.54	3.83
	$2 \times 10^{-4}$	4.19	3.65
	$2 \times 10^{-5}$	4.03	3.26

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังกดของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง

Normal load (MPa)	Shearing rate (MPa/s)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)
0.2	$2 \times 10^{-1}$	0.56	0.33
	$2 \times 10^{-2}$	0.37	0.25
	$2 \times 10^{-3}$	0.29	0.17
	$2 \times 10^{-4}$	0.17	0.14
	$2 \times 10^{-5}$	0.17	0.14
1	$2 \times 10^{-1}$	1.48	0.98
	$2 \times 10^{-2}$	1.28	0.96
	$2 \times 10^{-3}$	1.15	0.91
	$2 \times 10^{-4}$	0.94	0.81
	$2 \times 10^{-5}$	0.76	0.58
2	$2 \times 10^{-1}$	2.67	1.97
	$2 \times 10^{-2}$	2.53	1.72
	$2 \times 10^{-3}$	2.13	1.54
	$2 \times 10^{-4}$	1.79	1.34
	$2 \times 10^{-5}$	1.60	1.26
3	$2 \times 10^{-1}$	3.62	2.68
	$2 \times 10^{-2}$	3.23	2.45
	$2 \times 10^{-3}$	2.97	2.28
	$2 \times 10^{-4}$	2.71	2.12
	$2 \times 10^{-5}$	2.43	2.07
4	$2 \times 10^{-1}$	4.38	3.11
	$2 \times 10^{-2}$	4.19	2.99
	$2 \times 10^{-3}$	3.80	2.71
	$2 \times 10^{-4}$	3.44	2.48
	$2 \times 10^{-5}$	3.22	2.34

2) **รอยแตกผิวเรียบ** จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการเฉือนมีผลต่อรอยแตกที่มีพื้นผิวขรุขระเท่านั้น แต่จะไม่มีผลต่อค่าความเค้นเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ กล่าวคือ แม้ว่าอัตราการเฉือนจะสูงขึ้นหรือต่ำลงค่าความเค้นเฉือนที่ได้จะยังไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเค้นตั้งฉากมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นค่าความเค้นเฉือนที่ได้จะสูงขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.7

#### 4.4.2 ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกต่ออัตราการเฉือน

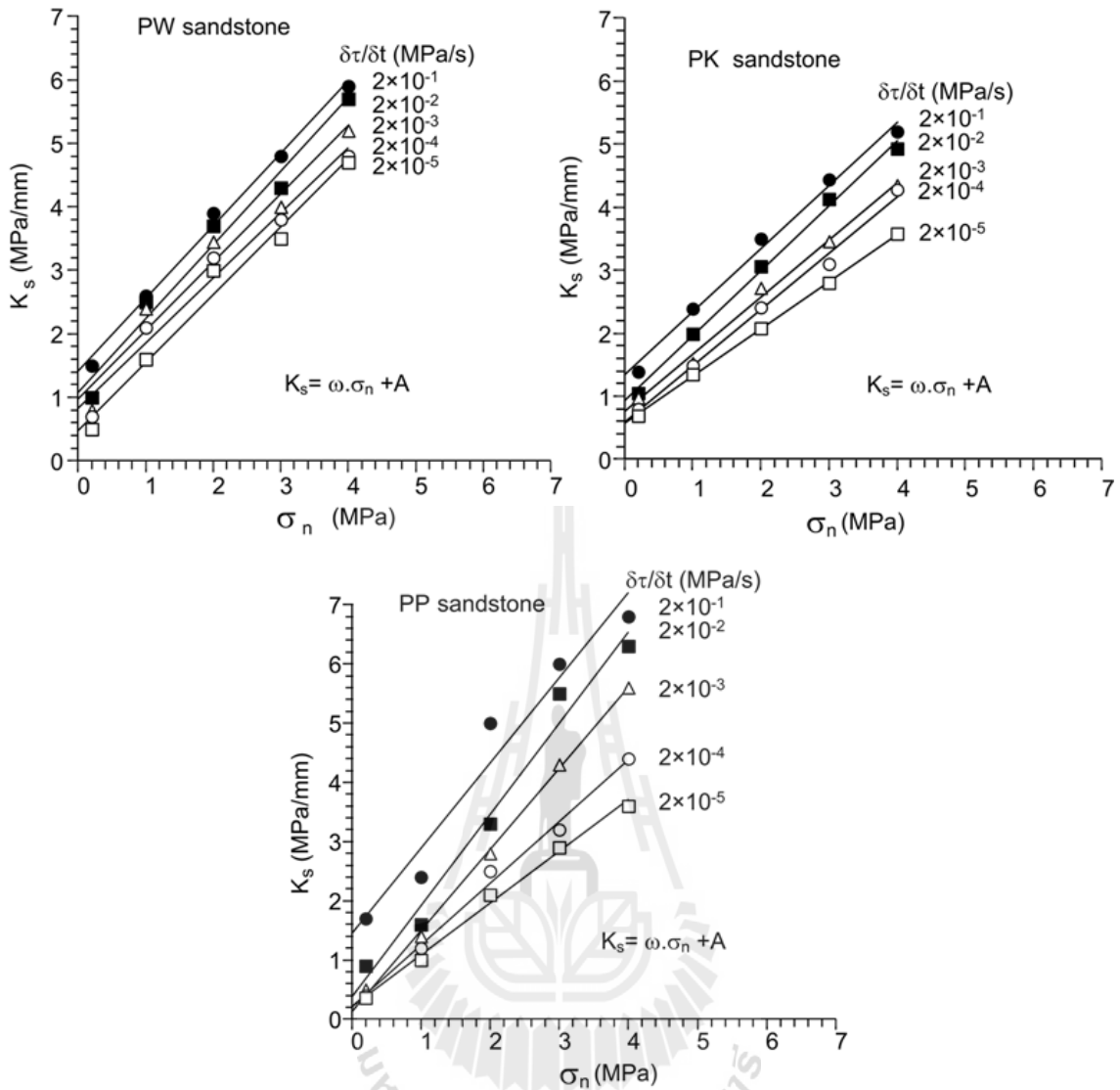
1) **รอยแตกผิวขรุขระ** จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกผันแปรโดยตรงต่ออัตราการเฉือน รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกได้รับผลกระทบจากอัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉาก โดยพบว่าเมื่ออัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉากมากขึ้น ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกหินจะมากขึ้นด้วย เนื่องจากค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกหาได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งผันแปรโดยตรงกับค่าความเค้นเฉือน ดังนั้นจึงเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกผันแปรโดยตรงกับอัตราการเฉือนด้วยเช่นกัน ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนของหินทั้ง 3 ชนิด ในอัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉากที่ผันแปร

2) **รอยแตกผิวเรียบ** ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัว จากผลการทดสอบอัตราการเฉือนที่แตกต่างกันภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากเดียวกันให้ค่าความชันของกราฟที่ใกล้เคียงจนเกือบเท่ากัน แต่เมื่อผันแปรความเค้นกดในแนวตั้งค่าความแข็งแรงเฉือนจะผันแปรโดยตรง กล่าวคือ เมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากสูงขึ้นค่าความชันของกราฟหรือค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกจะสูงขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11

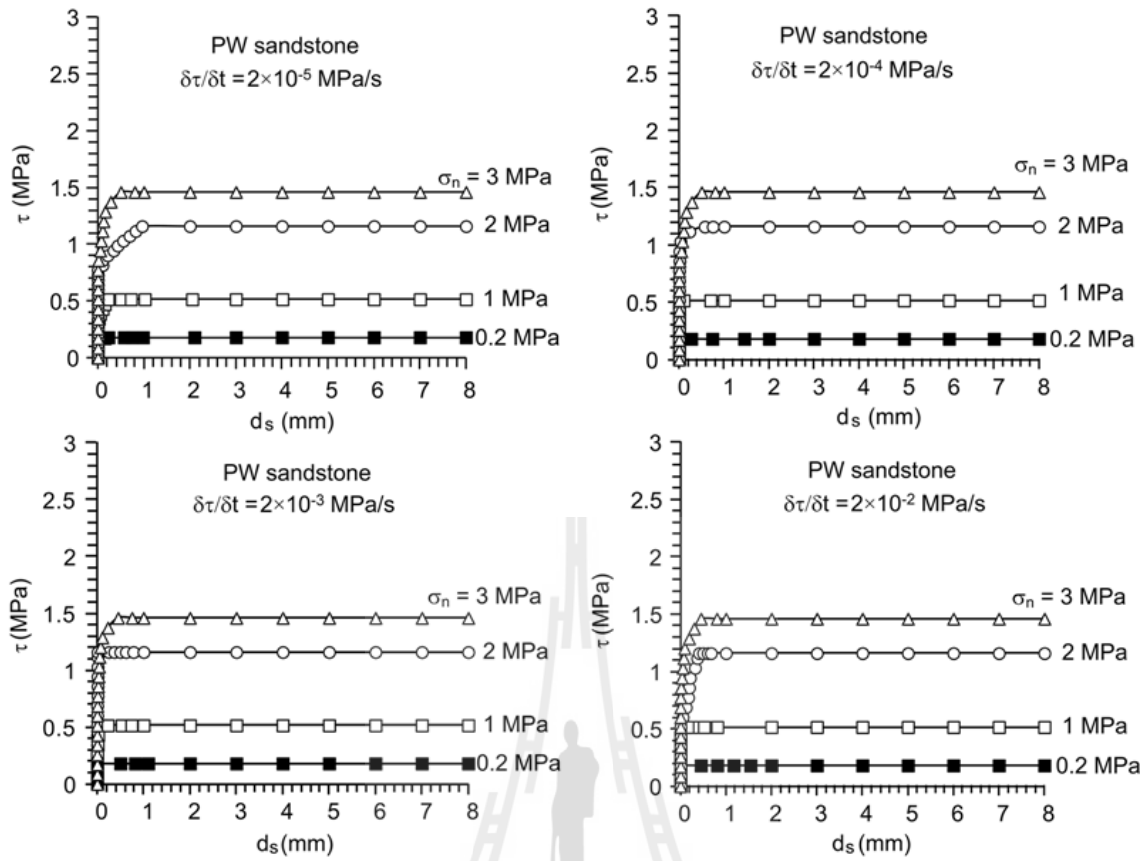
#### 4.4.3 ค่าการกระดก อัตราการกระดก และค่าการยุบตัวของรอยแตก

1) **รอยแตกผิวขรุขระ** ค่าการยกกระดกของรอยแตก (Dilation,  $d_n$ ) ที่วัดได้ (รูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14) พบว่ามีการแปรผกผันกับค่าความเค้นในแนวตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากสูงขึ้นค่าการกระดกของรอยแตกจะต่ำลง ซึ่งค่าการยกกระดกของรอยแตกที่วัดได้โดยตรงจากการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการหาอัตราการกระดก (Dilation rate,  $\Delta d_n / \Delta d_s$ ) ของรอยแตก ซึ่งพบว่าอัตราการกระดกจะต่ำลงเมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากสูงทำให้รอยแตกของหินปิดทับกันสนิทยิ่งขึ้น ส่งผลให้การยกกระดกของรอยแตกเกิดได้ยากขึ้นดังรูปที่ 4.15 จากรูปพบว่าข้อมูลก่อนข้างกระจายตัว ซึ่งเป็นผล

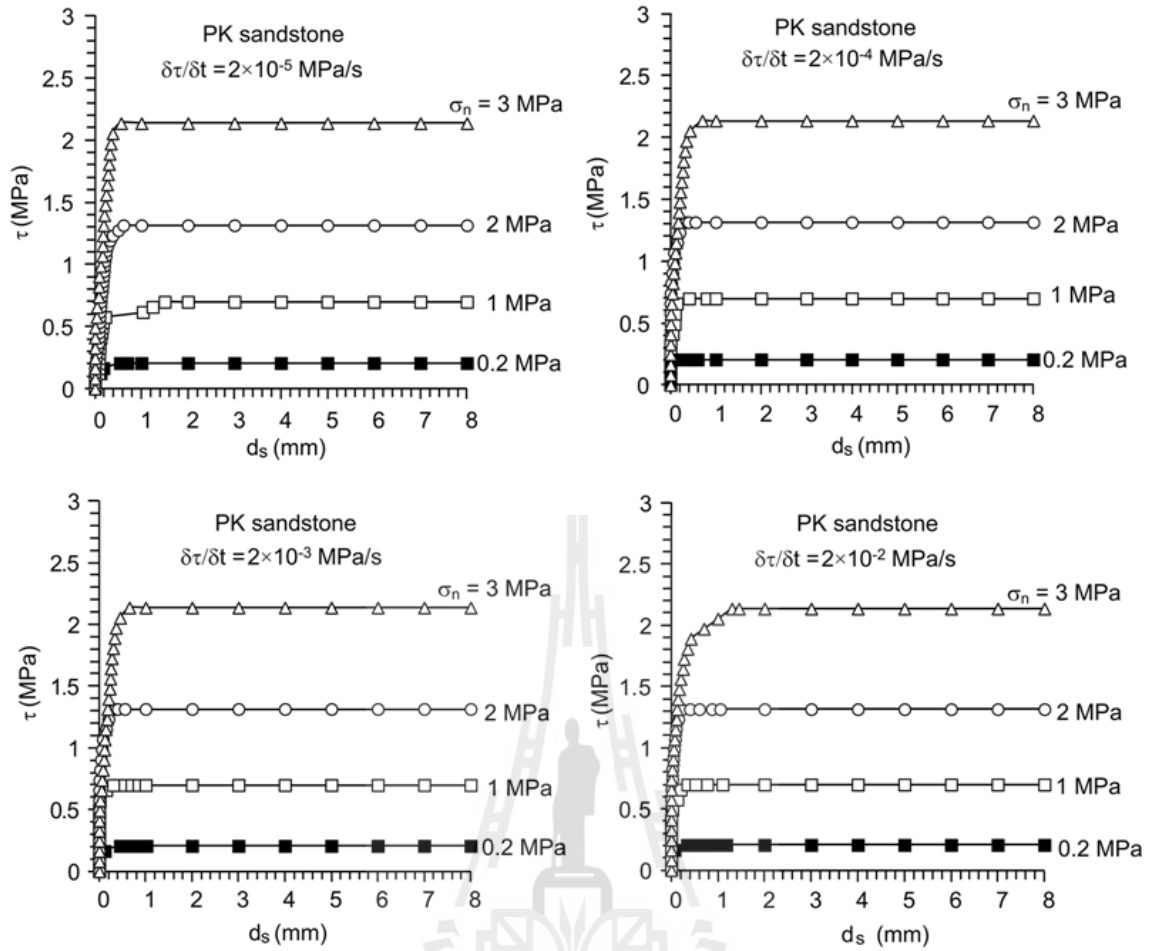




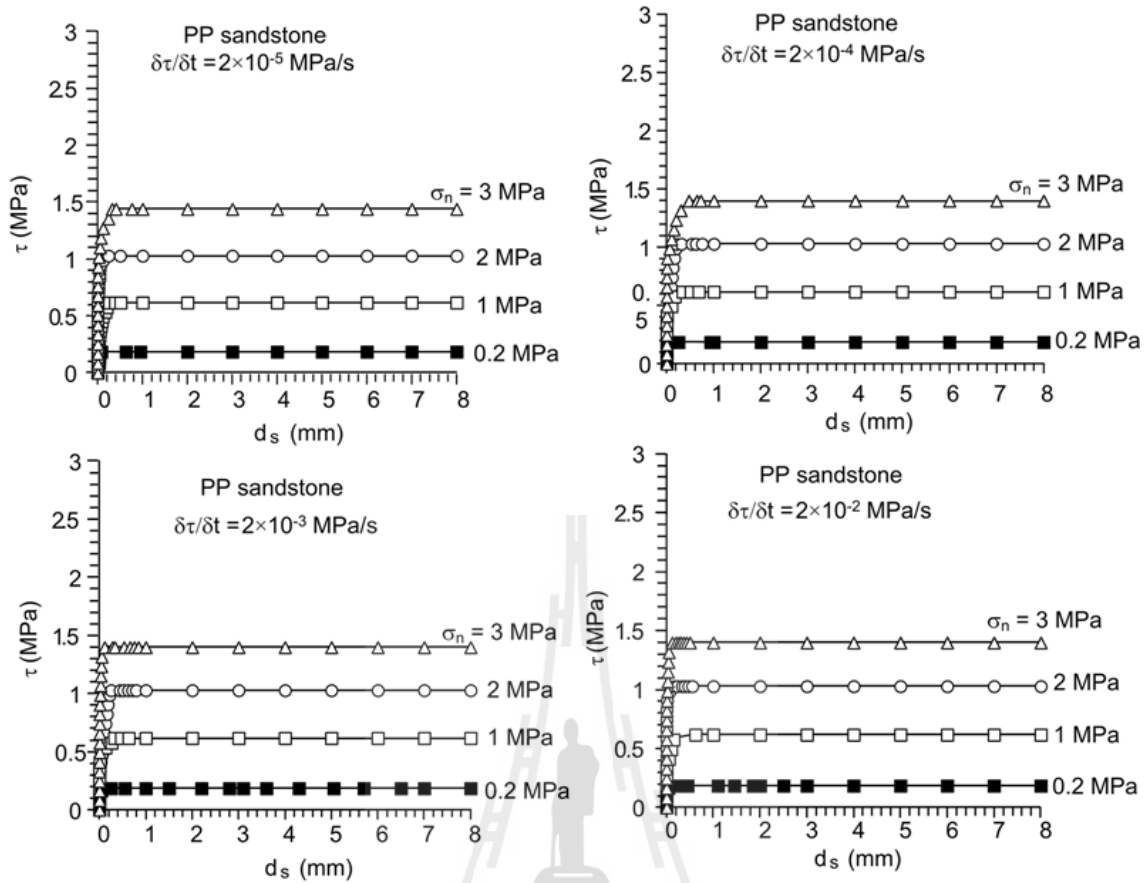
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉือนของรอยแตกกับความเค้นตั้งฉากของรอยแตกในตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด



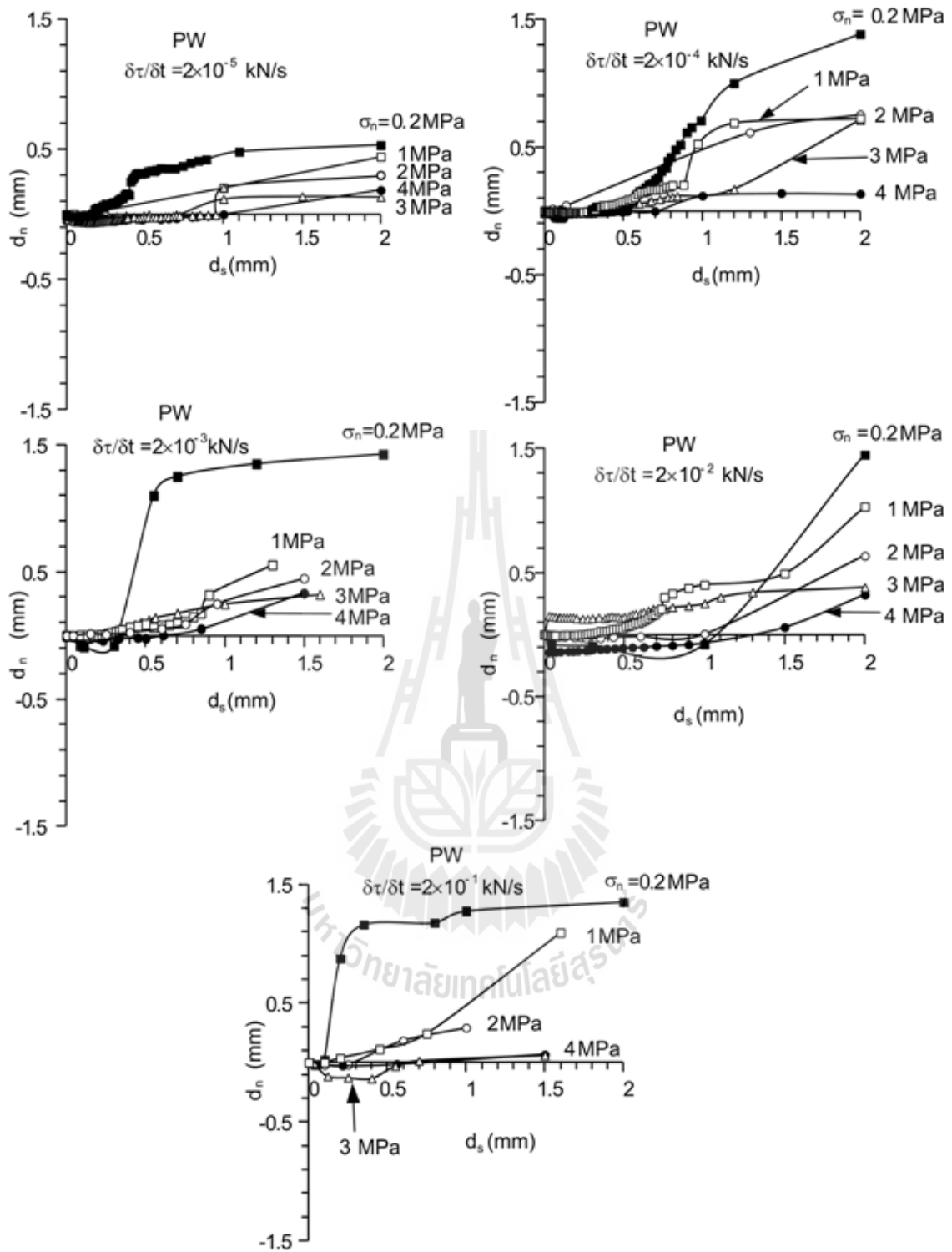
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



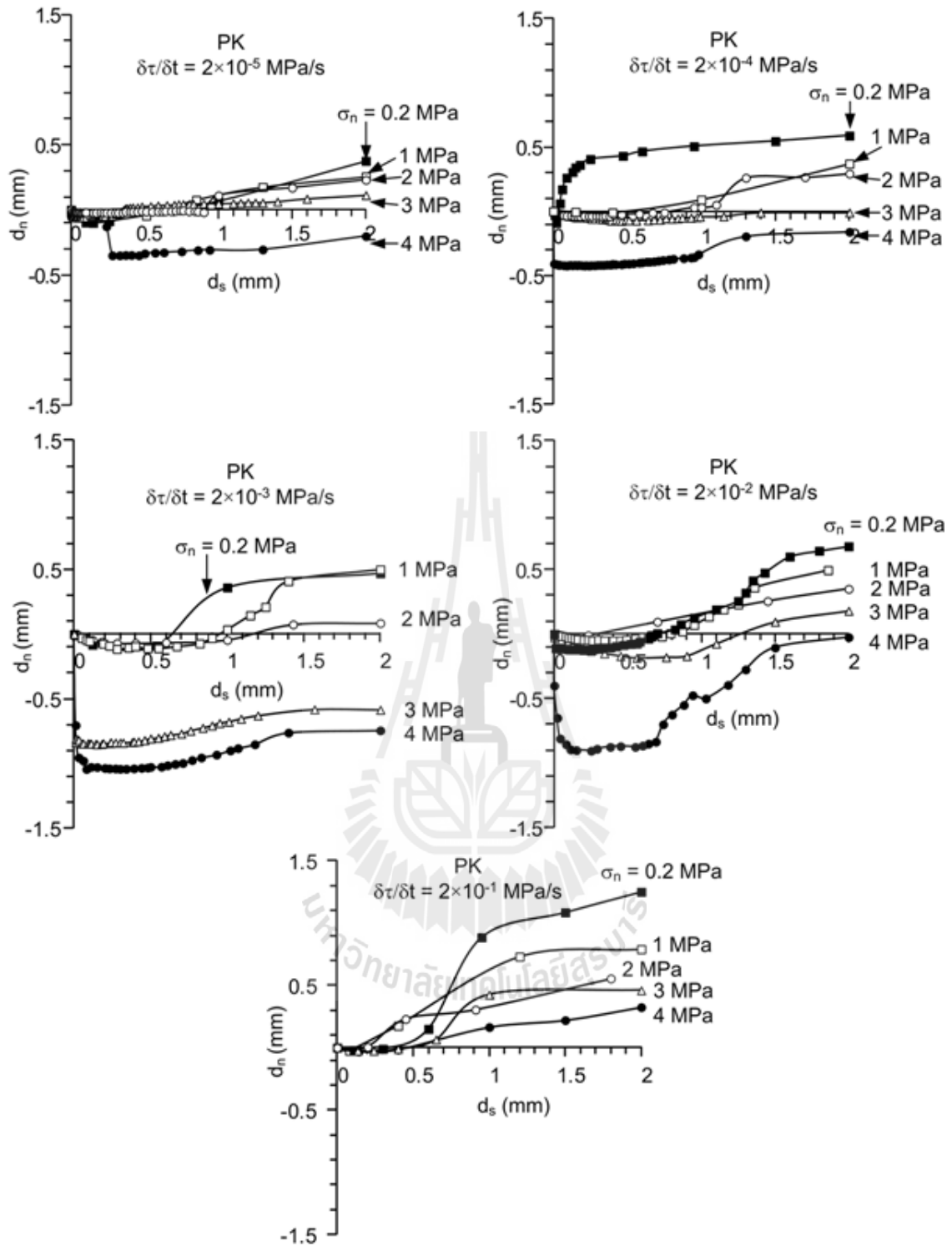
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



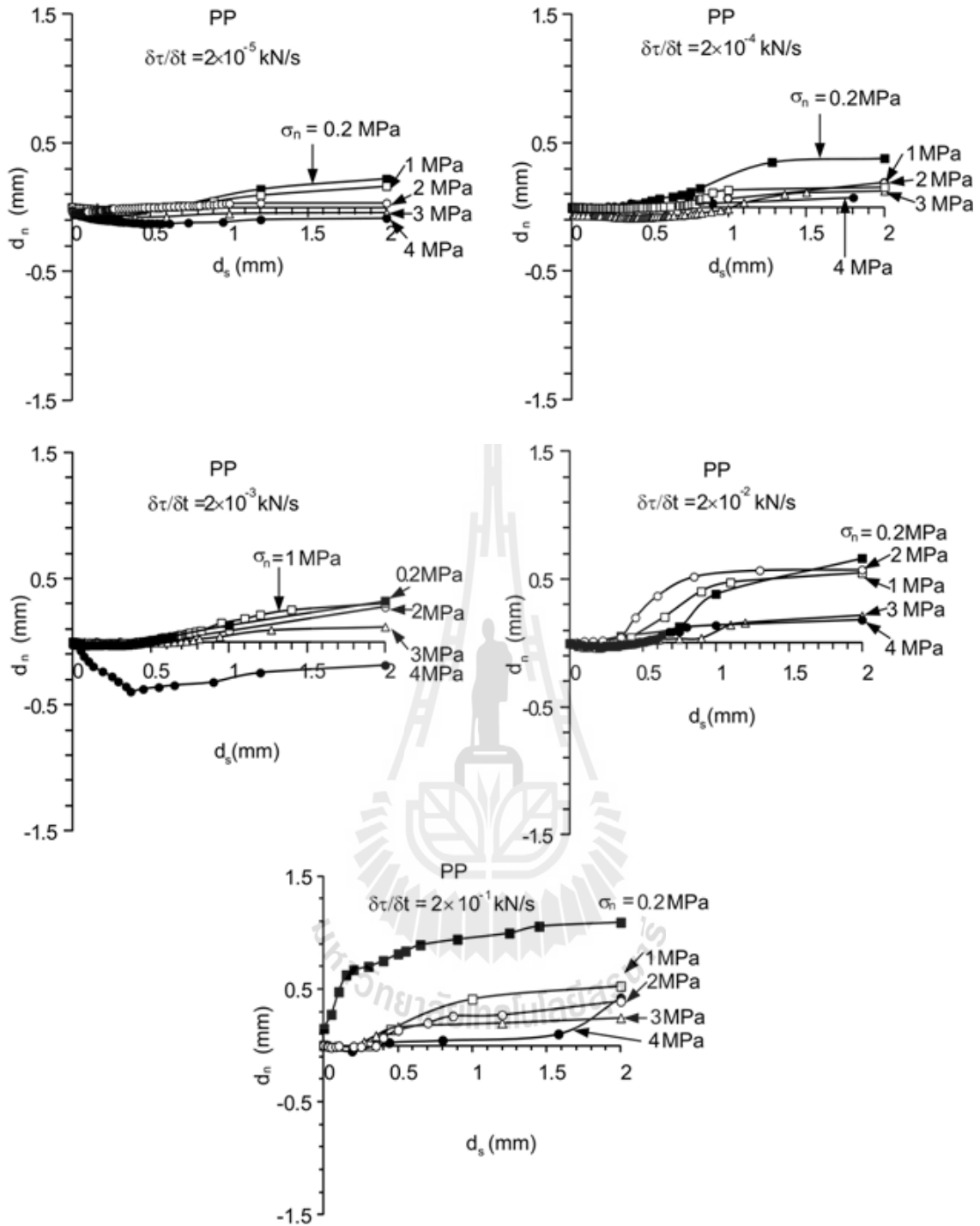
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนของรอยแตกผิวเรียบของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



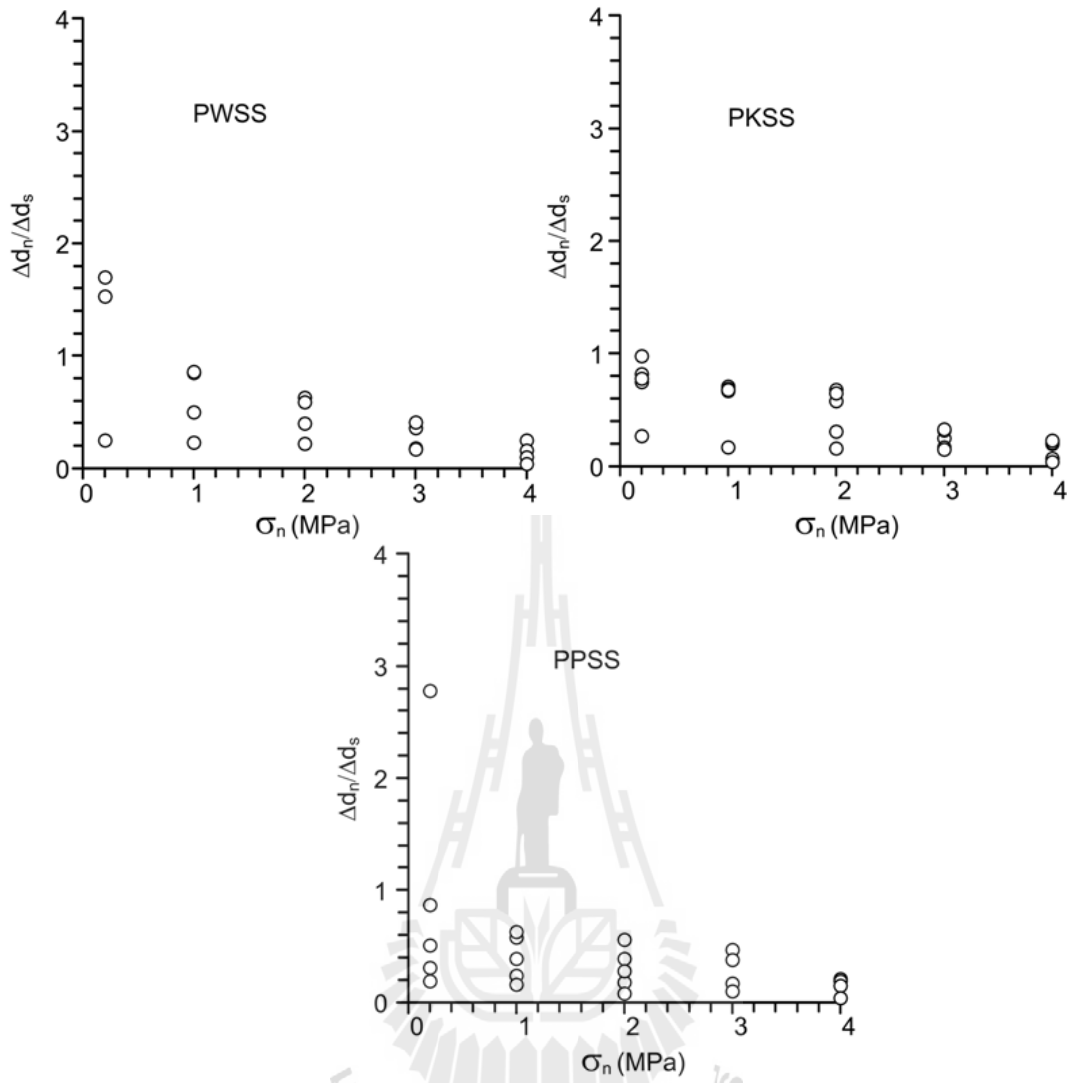
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



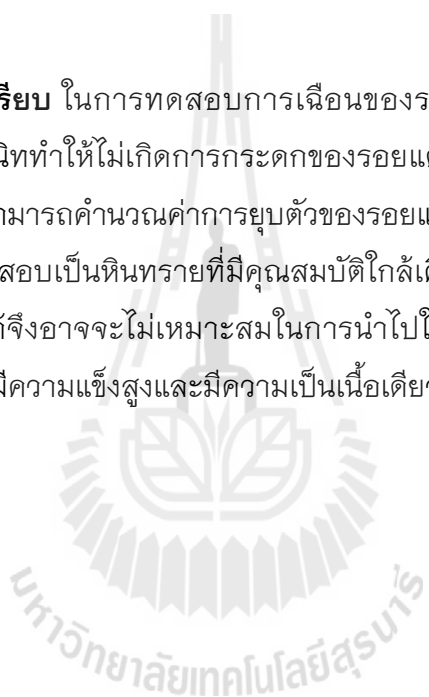
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกระดกของรอยแตกกับความเค้นในแนวตั้งฉากของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด

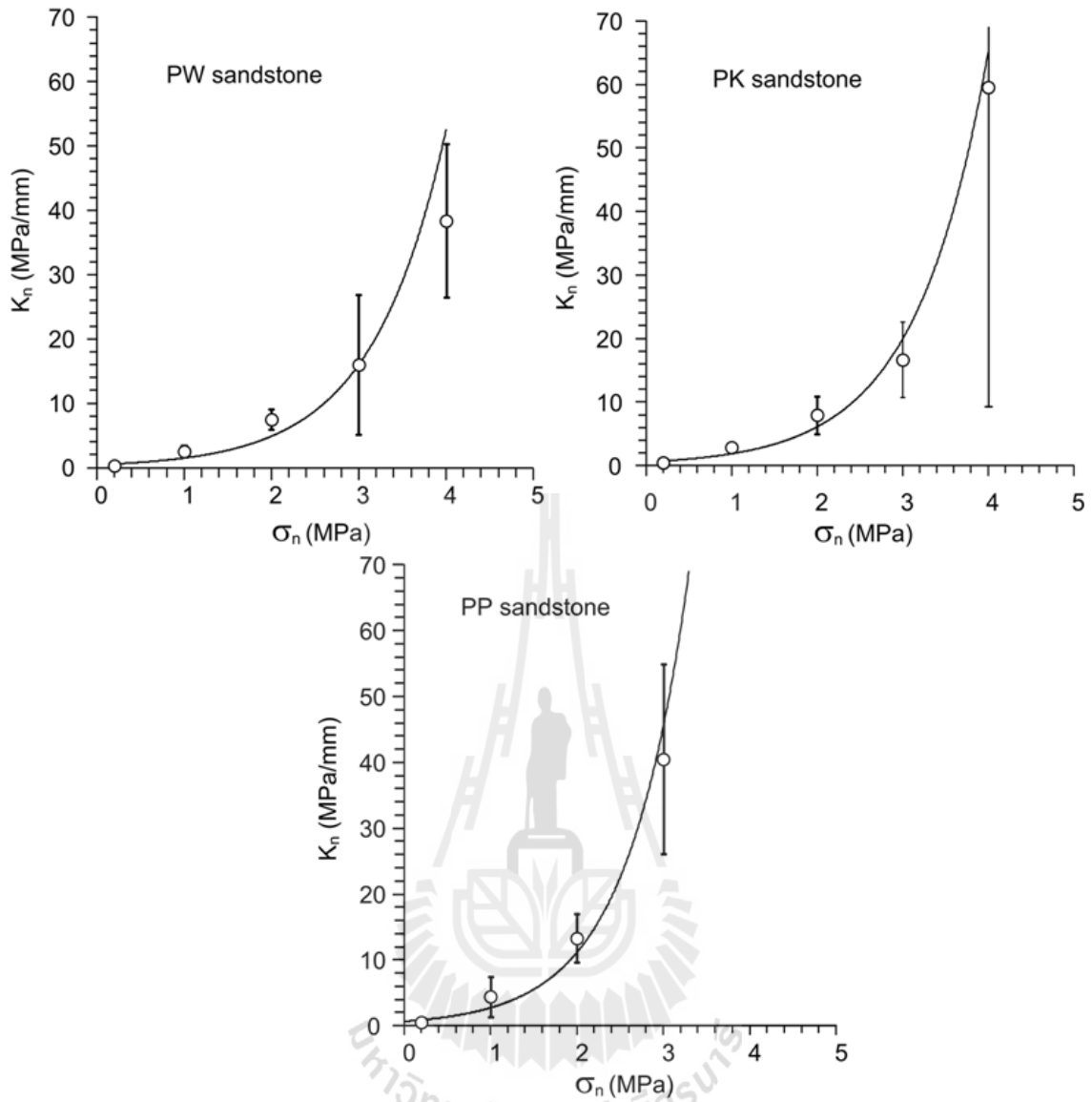


มาจากรอยแตกของหินที่ใช้ทำการทดสอบแต่ละก้อนมีความขรุขระที่แตกต่างกันทำให้ข้อมูลค่อนข้างแปรปรวน ค่าการยุบตัวของรอยแตก (Joint normal stiffness,  $K_n$ ) ของหินทั้ง 3 ชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 จากสมการพบว่าค่าการยุบตัวของรอยแตกผันแปรโดยตรงกับความเค้นตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นค่าการยุบตัวของรอยแตกจะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากกับรอยแตกสูงขึ้นการเปิดของรอยแตกจะถูกปิดมากขึ้น จนกระทั่งอาจจะปิดสนิท นั่นคือ  $\Delta e$  ในสมการจะมีค่าน้อยมาก ดังรูปที่ 4.16 ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาของ Obcheoy et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาความซึมผ่านของน้ำบนรอยแตกของหินภายใต้การเลื่อนพบว่าค่าการเปิดของรอยแตก ( $e_n$ ) มีการลดลงเมื่อค่าความเค้นตั้งฉากเพิ่มขึ้น

**2) รอยแตกผิวเรียบ** ในการทดสอบการเลื่อนของรอยแตกผิวเรียบ บริเวณหน้าพื้นผิวของรอยแตกที่ปิดกันสนิททำให้ไม่เกิดการกระดกของรอยแตก (ค่า  $\Delta e$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก) ทำให้สมการที่ 4.3 ไม่สามารถคำนวณค่าการยุบตัวของรอยแตกได้

หินที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินทรายที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน มีลักษณะเป็นเม็ดและมีความแข็งปานกลาง ผลที่ได้จึงอาจจะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้กับหินชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมากเช่นหินอ่อนที่มีความแข็งสูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน





รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของรอยแตกกับความดันในแนวตั้งฉากของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด

## บทที่ 5

### การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้ได้อธิบายถึงการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- 1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน
- 2) สมการความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉือนกับอัตราการเฉือน
- 3) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก

#### 5.1 ค่าความเค้นเฉือน

เนื้อหาที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 พบว่าค่าความเค้นเฉือนมีความสัมพันธ์กับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก จะเห็นได้ว่ากฎของ Coulomb มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบในขั้นตอนนี้นำการเคลื่อนตัวของรอยแตกในสองมิติมาวิเคราะห์ได้อย่างง่าย โดยสมมติว่ากฎเกณฑ์ของการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกฎของ Coulomb กล่าวคือ

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (5.1)$$

โดยที่

- $\sigma_n$  คือความเค้นกดในแนวตั้งฉาก
- $c$  คือค่าความเค้นยึดติดของหิน
- $\phi$  คือมุมเสียดทานของรอยแตก

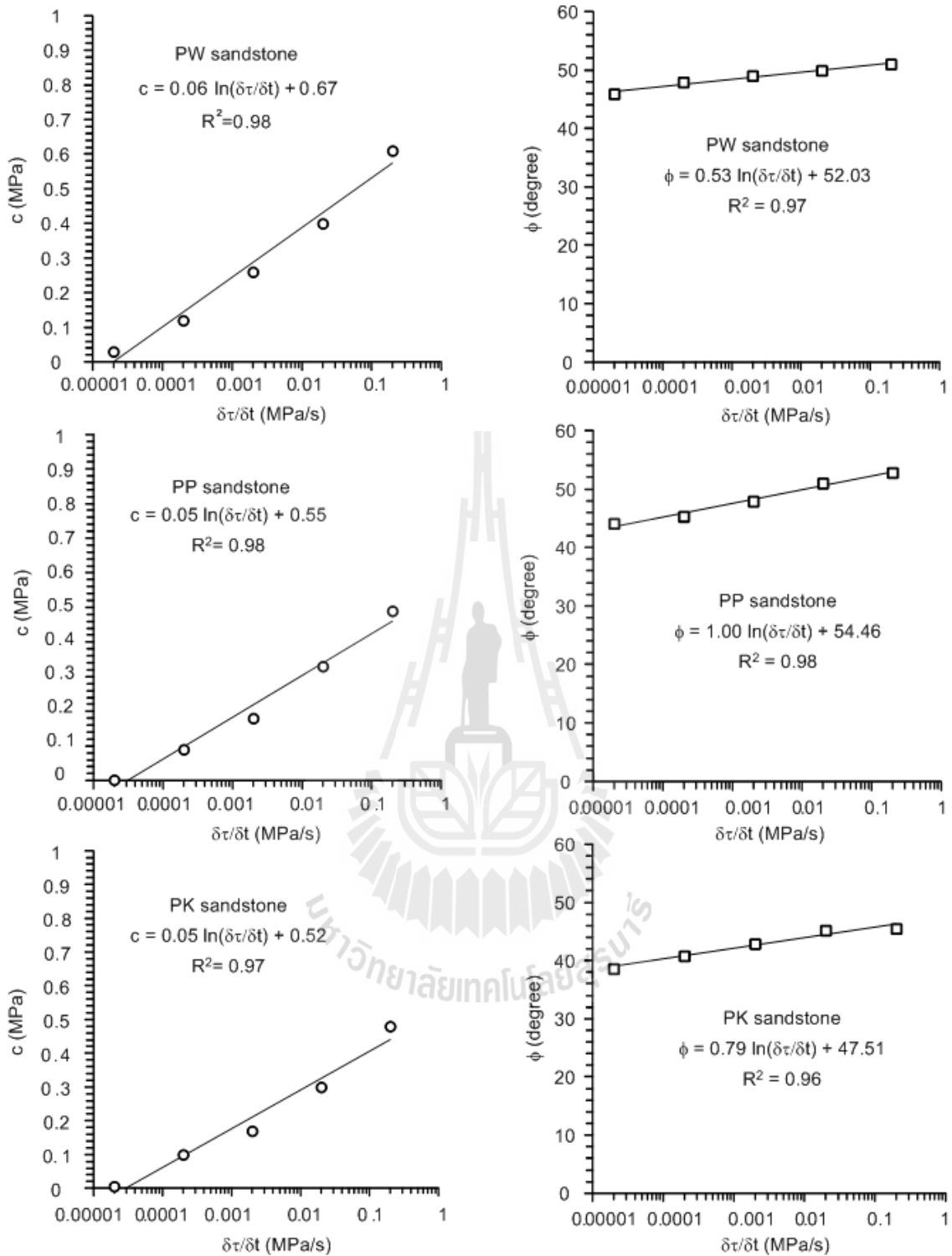
ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิดได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งสามารถนำข้อมูลจากตารางนี้ไปใช้ในการสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อให้ได้มาซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้แรงกับมุมเสียดทานและความเค้นยึดติดดังรูปที่ 5.1 สมการความสัมพันธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานขึ้นกับอัตราการเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$c = X \cdot \ln(\delta\tau/\delta t) + Y \quad (5.2)$$

$$\phi = Z \cdot \ln(\delta\tau/\delta t) + B \quad (5.3)$$

ตารางที่ 5.1 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของรอยแตกของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด

Shear stress	$\delta\tau/\delta t$ (MPa/s)	PW sandstone			PP sandstone			PK sandstone		
		c (MPa)	$\phi$ (Degrees)	$R^2$	c (MPa)	$\phi$ (Degrees)	$R^2$	c (MPa)	$\phi$ (Degrees)	$R^2$
$\tau_{peak}$	$2 \times 10^{-1}$	0.61	51.0	0.99	0.49	52.8	0.99	0.48	45.5	0.99
	$2 \times 10^{-2}$	0.40	49.9	0.99	0.33	51.0	0.99	0.30	45.2	0.99
	$2 \times 10^{-3}$	0.26	49.0	0.99	0.18	47.9	0.99	0.17	42.9	0.99
	$2 \times 10^{-4}$	0.12	47.9	0.99	0.09	45.3	0.99	0.10	40.8	0.99
	$2 \times 10^{-5}$	0.03	45.9	0.99	0.002	44.1	0.99	0.006	38.6	0.99
$\tau_{residual}$	$2 \times 10^{-1}$	0.27	47.5	0.99	0.30	47.1	0.99	0.28	37.0	0.98
	$2 \times 10^{-2}$	0.09	47.3	0.99	0.20	46.3	0.99	0.19	36.0	0.99
	$2 \times 10^{-3}$	0.03	44.9	0.99	0.11	43.0	0.99	0.16	33.8	0.99
	$2 \times 10^{-4}$	0.01	41.9	0.99	0.07	40.5	0.98	0.06	33.5	0.98
	$2 \times 10^{-5}$	0.02	39.1	0.98	0.001	38.0	0.99	0.001	32.1	0.99



**รูปที่ 5.1** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติดของหิน (c) ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) และอัตราการให้แรงเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

แทนค่าสมการ (5.2) และ (5.3) ลงในสมการ (5.1) จะได้

$$\tau = [ X \cdot \ln (\delta\tau/\delta t) + Y ] + \sigma_n \tan [ Z \cdot \ln (\delta\tau/\delta t) + B ] \quad (5.4)$$

โดย X, Y, Z และ B คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (ตารางที่ 5.2)

## 5.2 ค่าความแข็งเฉือนของรอยแตก

ผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งเฉือนของรอยแตก ( $K_s$ ) ขึ้นกับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบของแต่ละอัตราการให้แรงเฉือน กราฟแสดงแนวโน้มของค่าความเค้นตั้งฉากที่สูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งเฉือนของรอยแตกสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K_s = \omega \cdot \sigma_n + A \quad (5.5)$$

โดย  $\omega$  และ A คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบ

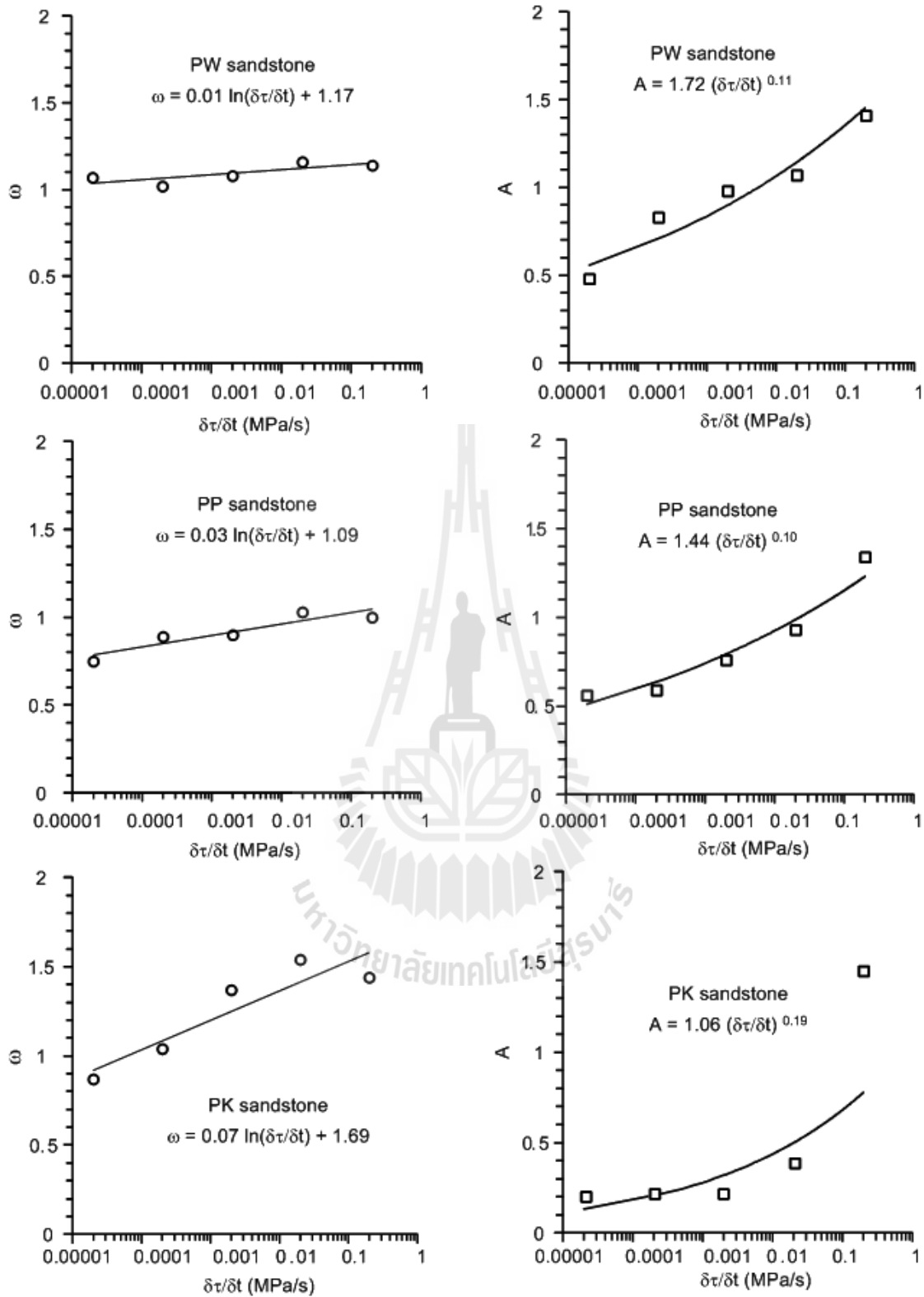
เมื่อนำค่าตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบในสมการ (5.5) มาพัฒนาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นในฟังก์ชันของอัตราการเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ดังรูปที่ 5.2 สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์เชิงเส้นที่แสดงในรูปได้ดังต่อไปนี้

$$\omega = \alpha \cdot \ln(\delta\tau/\delta t) + L \quad (5.6)$$

$$A = \beta \cdot (\delta\tau/\delta t)^k \quad (5.7)$$

ตารางที่ 5.2 ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

Rock type	X	Y	R <sup>2</sup>	Z	B	R <sup>2</sup>
PW sandstone	0.06	0.67	0.98	0.53	52.03	0.97
PP sandstone	0.05	0.55	0.98	1.00	54.46	0.98
PK sandstone	0.05	0.52	0.97	0.79	47.51	0.96



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\omega$  ตัวแปร  $A$  และอัตราการให้แรงเฉือน ( $\delta\tau/\delta t$ ) ของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

โดย  $\alpha$ ,  $L$ ,  $\beta$  และ  $\kappa$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (ตารางที่ 5.3)

เมื่อแทนค่าสมการ (5.6) และ (5.7) ลงในสมการ (5.5) จะได้

$$K_s = [\alpha \cdot \ln(\delta\tau/\delta t) + L] \cdot \sigma_n + [\beta \cdot (\delta\tau/\delta t)^\kappa] \quad (5.8)$$

จากสมการที่ 5.8 ค่าความแข็งเฉือนของรอยแตกขึ้นกับอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉากกล่าวคือ เมื่อทำการทดสอบโดยให้อัตราการเฉือนสูงจะทำให้ค่าความแข็งเฉือนบนรอยแตกของหินทรายทั้ง 3 ชนิด สูงตามไปด้วย สามารถเห็นได้ชัดเจนในสภาวะการให้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากสูง

### 5.3 ค่าการยุบตัวของรอยแตก

ในบทที่ 4 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับความเค้นในแนวตั้งฉากของรอยแตกด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้ได้ค่าการยุบตัวของรอยแตกที่สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ดังสมการ

$$K_n = n \cdot \exp^{(H \cdot \sigma_n)} \quad (5.9)$$

โดย  $n$  และ  $H$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (ตารางที่ 5.4)

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

Rock type	$\alpha$	$L$	$R^2$	$\beta$	$\kappa$	$R^2$
PW sandstone	0.01	1.17	0.62	1.72	0.11	0.91
PP sandstone	0.03	1.09	0.84	1.44	0.10	0.95
PK sandstone	0.07	1.69	0.83	0.06	0.19	0.57

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

Rock type	$m$	$H$	$R^2$
PW sandstone	0.45	1.19	0.96
PP sandstone	0.67	1.41	0.93
PK sandstone	0.57	1.18	0.97



สามารถสรุปได้ว่าอัตราการเฉือนมีอิทธิพลต่อค่าความเค้นที่ต้านในทิศทางการเฉือนของรอยแตก โดยเมื่อทำการทดสอบด้วยอัตราการเฉือนที่สูง ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จะสูงตามไปด้วย จะเห็นได้ชัดเจนในการทดสอบภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากที่สูงขึ้น และจากบทที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังเฉือนของหินทรายทั้ง 3 ชนิด แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุด และค่าความเค้นเฉือนคงเหลือจะขึ้นกับอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉาก

ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกแปรผันโดยตรงต่ออัตราการเฉือน จากสมการ (5.8) แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกได้รับผลกระทบจากอัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉาก โดยพบว่าเมื่ออัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉากมากขึ้นค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตกหินจะมากขึ้น

ค่าการยุบตัวของรอยแตก (Joint normal stiffness,  $K_n$ ) ของหินทั้ง 3 ชนิด จากสมการ (5.9) พบว่าค่าการยุบตัวของรอยแตกแปรผันโดยตรงกับความเค้นตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นค่าการยุบตัวของรอยแตกจะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความเค้นกดในแนวตั้งฉากกับรอยแตกสูงขึ้น การเปิดของรอยแตกจะถูกปิดลงมากขึ้นจนกระทั่งอาจจะปิดสนิท สมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์นี้จึงสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนค่าความเค้นเฉือน ค่าความแข็งแรงเฉือน และค่าการยุบตัวของรอยแตกเพื่อประเมินเสถียรภาพทางวิศวกรรมในรอยแตกของหินได้



## บทที่ 6

### การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

#### 6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ FLAC 4.0 (Itasca, 1994) เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดชันโดยเปรียบเทียบค่าความปลอดภัย (Factor of safety) จากผลการทดสอบของอัตราการเฉือนที่มีความแตกต่างกัน ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะสามารถยืนยันได้ว่าอัตราการเฉือนมีผลต่อคุณสมบัติของหิน

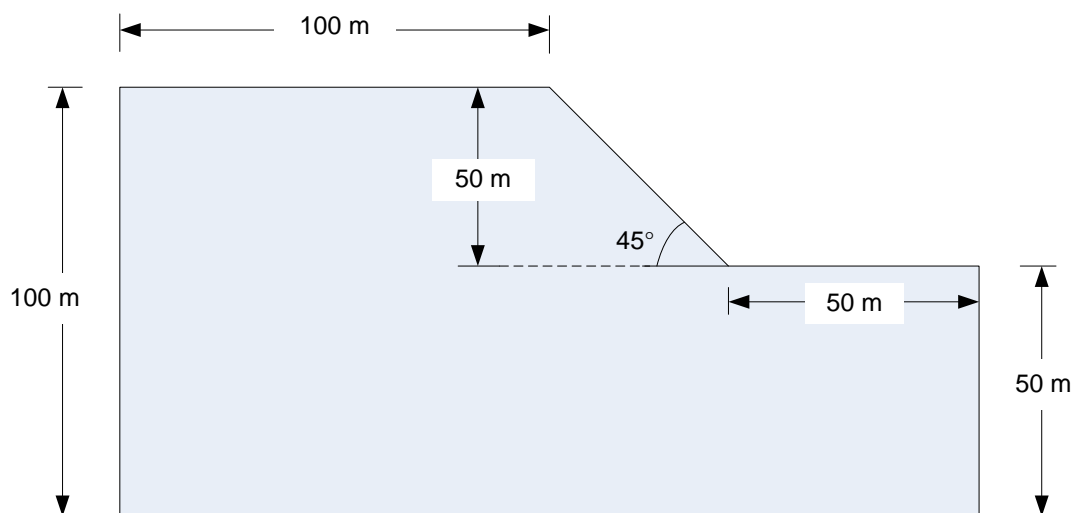
#### 6.2 การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตัวแปรที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของการออกแบบความลาดชันมวลหินที่จะใช้กับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ได้แก่ค่าความหนาแน่น ค่าความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทานของหิน ขนาดและรูปร่างของความลาดชัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความสูงของความลาดชันเท่ากับ 50 เมตร มุมของความลาดชันเท่ากับ 45 องศา และทำการจำลองความลาดชันเพียงหนึ่งชั้นดังรูปที่ 6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความหนาแน่น ( $\gamma$ ) ความเค้นยึดติด ( $c$ ) และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1

#### 6.3 เสถียรภาพของความลาดชัน

จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าเมื่อความต้านแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) ที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง เสถียรภาพความปลอดภัยของความลาดชันที่ได้จะสูงกว่าที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ และที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual shear strength) ในอัตราการเฉือนเดียวกัน

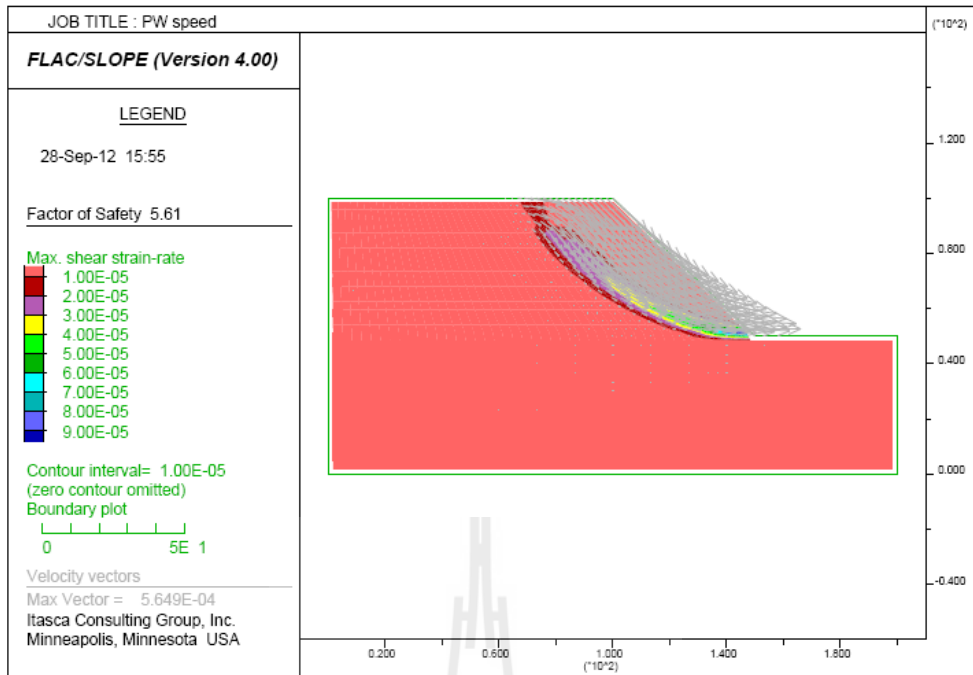
การจำลองเสถียรภาพความลาดชันในหินทรายชุดพระวิหารได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.4 ซึ่งรูปที่ 6.2 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนสูง ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 5.61 รูปที่ 6.3 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนต่ำ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 0.89 รูปที่ 6.4 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 0.83



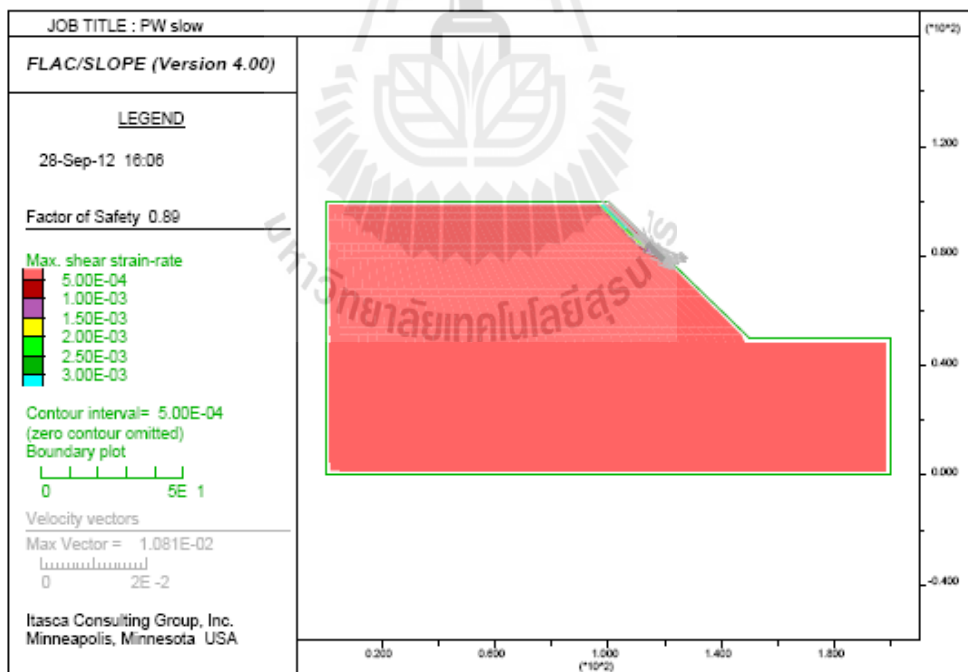
รูปที่ 6.1 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ใช้ในแบบจำลอง

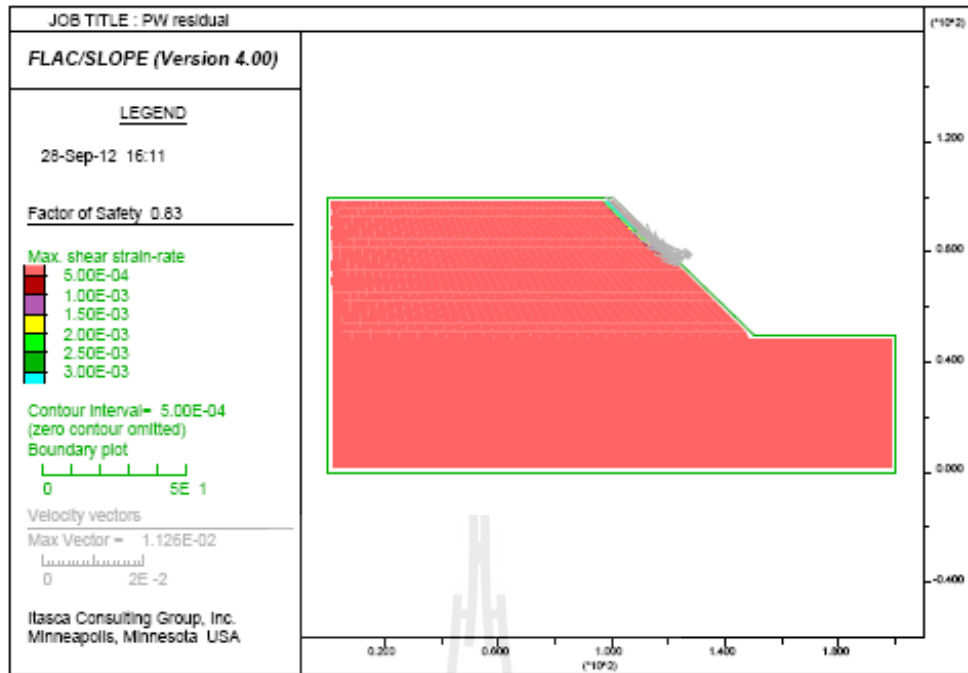
ชนิดหิน	ความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	ความเค้นยึดติด (MPa)			มุดเสียดทาน (องศา)		
		Rate $2 \times 10^{-1}$ (MPa/s)	Rate $2 \times 10^{-5}$ (MPa/s)	residual	Rate $2 \times 10^{-1}$ (MPa/s)	Rate $2 \times 10^{-5}$ (MPa/s)	residual
หินทรายชุด พระวิหาร	2,250	0.61	0.003	0.002	51	45	39
หินทรายชุด ภูกระดึง	2,530	0.48	0.002	0.001	46	38	38
หินทรายชุด ภูพาน	2,410	0.49	0.006	0.001	53	44	32



รูปที่ 6.2 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง



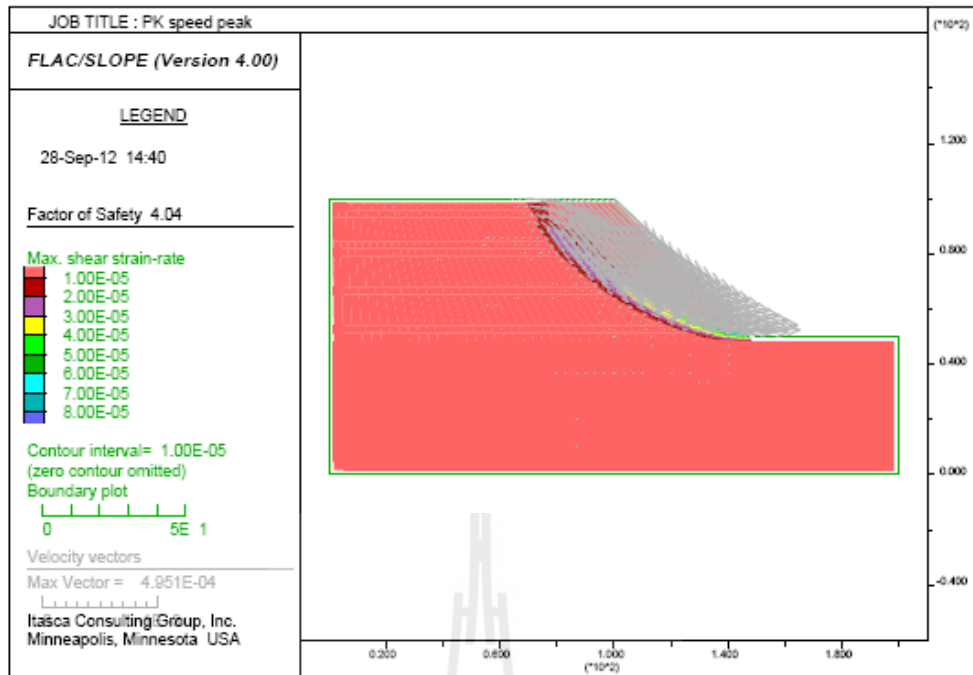
รูปที่ 6.3 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ



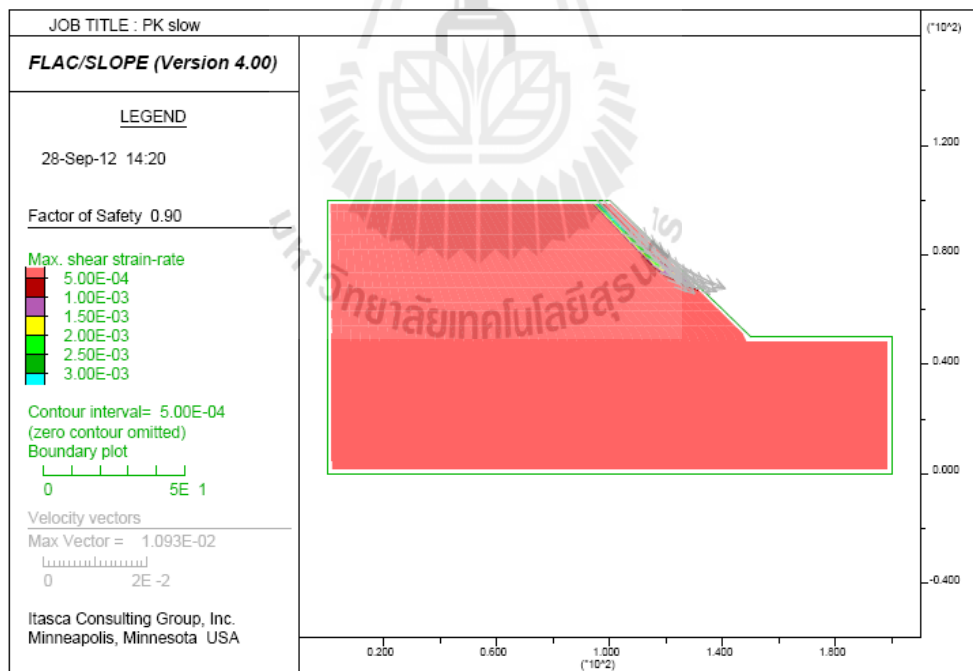
รูปที่ 6.4 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดพระวิหารที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ

การจำลองเสถียรภาพความลาดชันในหินทรายชุดภูกระดึงได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 ถึงรูปที่ 6.7 ซึ่งรูปที่ 6.5 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนสูง ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 4.04 รูปที่ 6.6 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนต่ำ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 0.90 รูปที่ 6.7 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 0.74

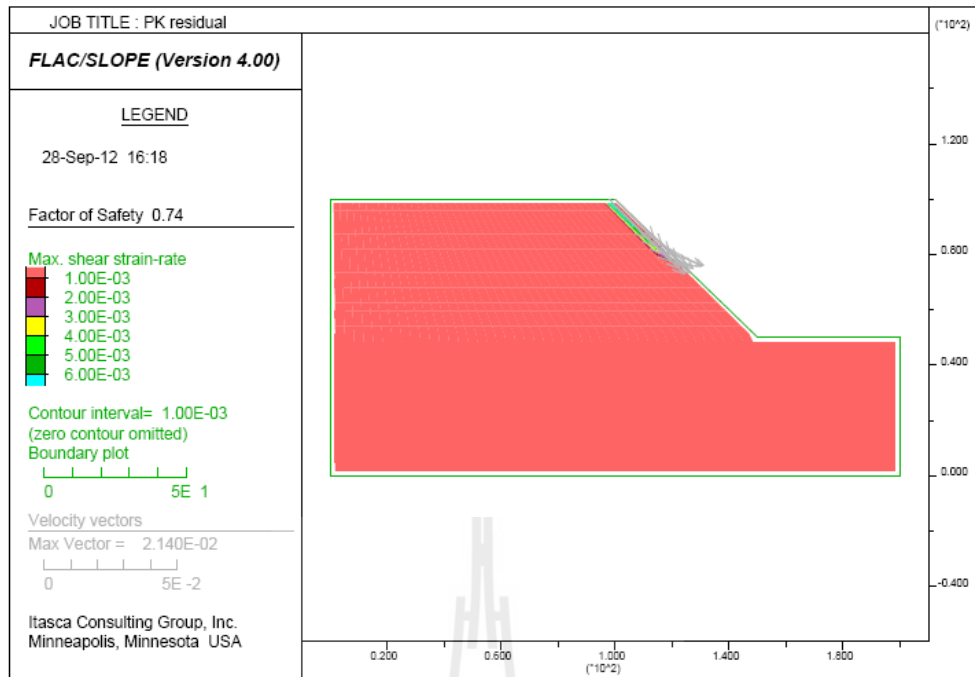
การจำลองเสถียรภาพของความลาดชันในหินทรายชุดภูพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.8 ถึงรูปที่ 6.10 ซึ่งรูปที่ 6.8 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนสูง ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 4.85 รูปที่ 6.9 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบในอัตราการเฉือนต่ำ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ 0.97 รูปที่ 6.10 แสดงการจำลองความลาดชันโดยใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ได้จากการทดสอบที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ ค่าความปลอดภัยที่ได้คือ ส่วน 0.81 ส่วนค่าความปลอดภัยที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 6.2



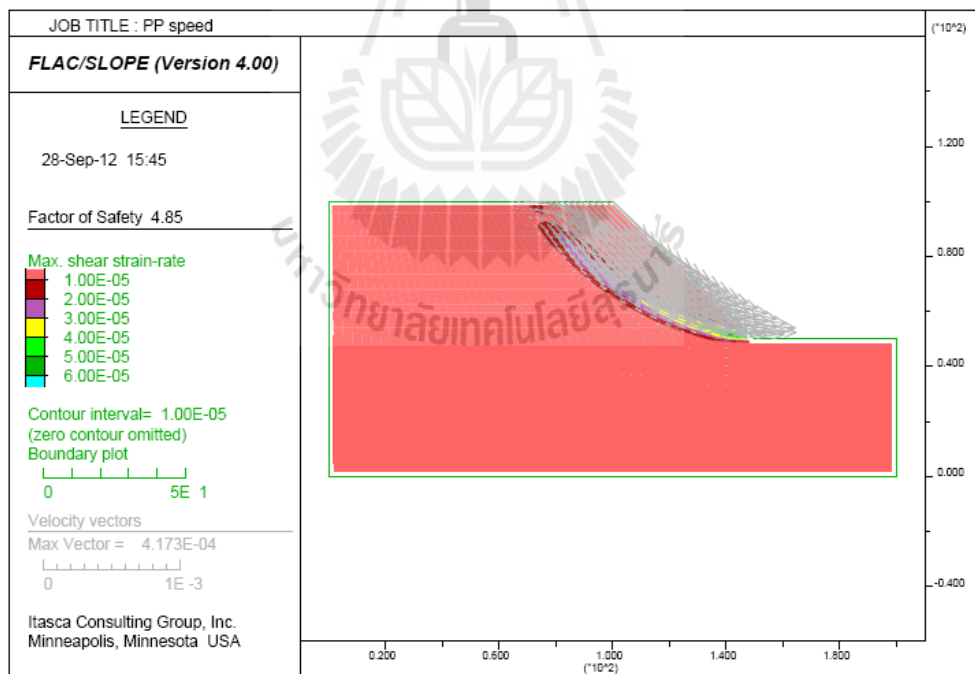
รูปที่ 6.5 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง



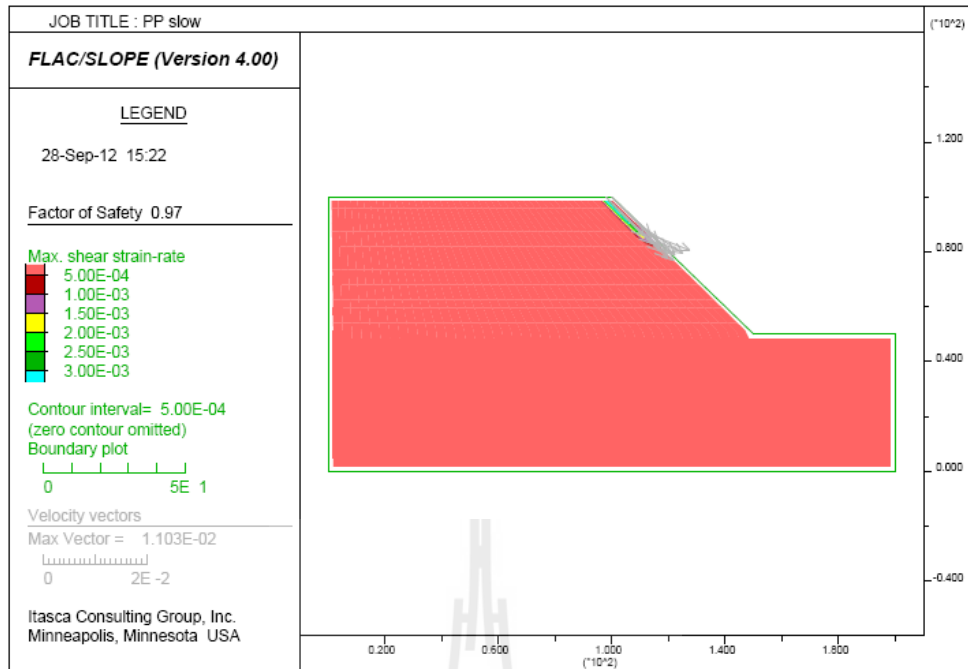
รูปที่ 6.6 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ



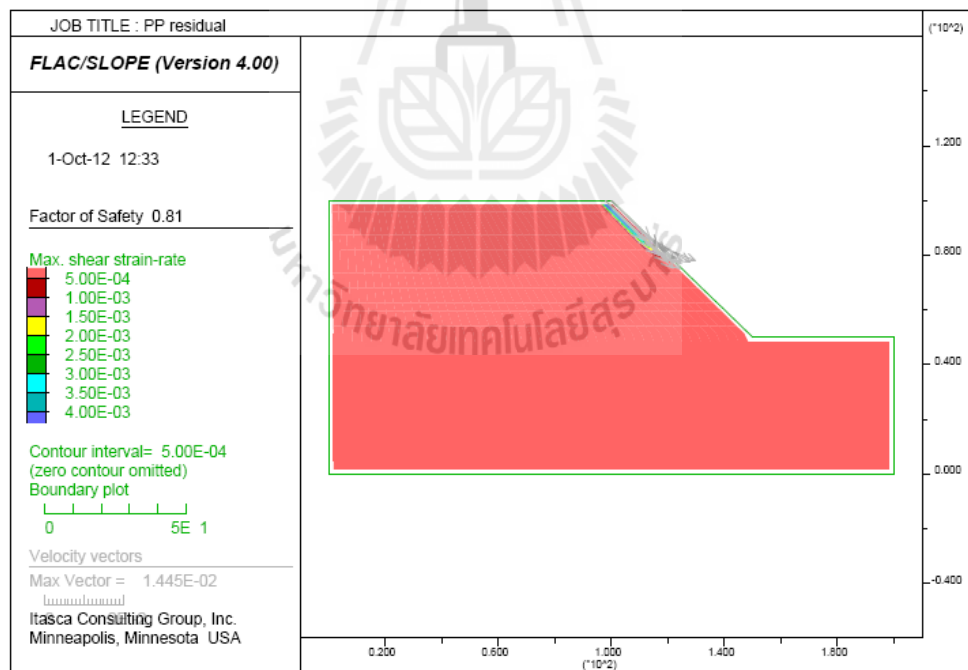
รูปที่ 6.7 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูกระดึงที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ



รูปที่ 6.8 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนสูง



รูปที่ 6.9 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่มีความเร็วของอัตราการเฉือนต่ำ



รูปที่ 6.10 แบบจำลองความลาดชันของหินทรายชุดภูพานที่ความต้านแรงเฉือนคงเหลือ



ตารางที่ 6.2 ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ชนิดหิน	ค่าความปลอดภัย (F.S)		
	Rate $2 \times 10^{-1}$ (MPa/s)	Rate $2 \times 10^{-5}$ (MPa/s)	residual
หินทรายชุดพระวิหาร	5.61	0.99	0.83
หินทรายชุดภูกระดึง	4.04	0.90	0.74
หินทรายชุดภูพาน	4.85	0.97	0.81



## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

#### 7.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ซึ่งมีการผันแปรอัตราการเฉือนและความเค้นกดในแนวตั้งฉากระบุว่า ค่าความเค้นที่ต้านในทิศทางการเฉือน ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก และค่าการยุบตัวของรอยแตกแปรผันโดยตรงกับความเค้นตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นค่าเหล่านี้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าอัตราการกระดกจะแปรผกผันกับความเค้นตั้งฉาก คือเมื่อความเค้นตั้งฉากมากขึ้นอัตราการกระดกของรอยแตกจะยิ่งน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงกดที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับรอยแตกมีมากเป็นสาเหตุให้รอยแตกประกบกันได้สนิทยิ่งขึ้น ทำให้ยากต่อการเคลื่อนออก ส่วนค่าที่มีการผันแปรโดยตรงกับอัตราการเฉือนได้แก่ ค่าความเค้นเฉือนและค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยแตก จากผลการทดสอบกำลังเฉือนของหินทรายทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นเฉือนคงเหลือจะขึ้นกับอัตราการให้แรงเฉือนและความเค้นตั้งฉาก กลไกที่ทำให้เกิดการผันแปรกับอัตราการเฉือนหรือเวลา คือกลไกการร้าวของเม็ดหินในรอยแตก เมื่อทำการทดสอบที่อัตราการเฉือนสูง เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนตัวจะรวดเร็ว รอยแตกที่มีความขรุขระจะประกบกันเมื่อถูกให้แรงผลักในเวลาที่รวดเร็ว ทำให้ไม่มีเวลาในการร้าวของเม็ดหินจึงเกิดการบดอัดอย่างแรงคล้ายกับการทดสอบการกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength) ทำให้ได้กำลังเฉือนของรอยแตกสูง ส่วนที่อัตราการเฉือนต่ำจะใช้เวลาในการเคลื่อนตัวช้า ทำให้เกิดการบดอัดระหว่างผิวของรอยแตกที่ละน้อย เม็ดหินของรอยแตกจึงมีเวลาในการร้าวและค่อยๆ พัฒนาการร้าวที่ละน้อย เมื่อถึงเวลาที่เม็ดหินร้าวมากจนกระทั่งรับแรงไม่ไหวจึงเกิดการเคลื่อนตัวในที่สุด ค่ากำลังเฉือนที่ได้จึงต่ำกว่าที่อัตราการเคลื่อนตัวสูง

#### 7.2 สรุปผลการทดสอบ

อัตราการเฉือนมีผลกระทบโดยตรงต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตก ค่าความเค้นยึดติด ค่ามุมเสียดทาน และความแข็งแรงเฉือนในรอยแตกของหินที่มีความขรุขระ โดยเมื่อให้อัตราการเฉือนมากขึ้นค่ากำลังเฉือนของรอยแตก ค่าความเค้นยึดติด ค่ามุมเสียดทาน และค่าความแข็งแรงเฉือนที่ได้จะมากขึ้นตามไปด้วย สังเกตได้จากเมื่อให้ความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นจะไม่มีผลกระทบกับรอยแตกของหินที่มีผิวเรียบ เนื่องจากรอยแตกของหินที่มีความขรุขระที่อัตราการเฉือนต่ำจะมีเวลาในการร้าวของผนังรอยแตกมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังเฉือนของรอยแตกที่ได้น้อยกว่าอัตราการเฉือนที่สูงกว่า สามารถสรุปได้ว่าค่ากำลังเฉือน ค่าความเค้นยึดติด ค่ามุมเสียดทาน และค่าความ

แข็งเนียนของรอยแตกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเค้นตึงฉาก และอัตราการเนียนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวของรอยแตกและอัตราการกระดกจะไม่ขึ้นกับอัตราการเนียนแต่จะขึ้นกับความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตกเท่านั้น

### 7.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

สำหรับการวิจัยในอนาคตควรมีการเพิ่มชนิดหินที่ใช้ในการทดสอบให้หลากหลาย และเพิ่มการศึกษาอัตราการเนียนที่ไม่คงที่ โดยให้อัตราการเนียนหลายอัตราสลับกันต่อหินหนึ่งก้อน อาจทำการทดสอบได้ทั้งในสภาวะการอิมมิดด้วยน้ำ สภาวะแห้ง และในสภาวะอื่นๆ ที่เสมือนจริงในภาคสนาม ซึ่งจะทำได้กับสภาวะที่มีอยู่จริงในพื้นที่การทำงานแตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- Aubertin, M., Julien, M. R., Servant, S. and Gill, D. E. (1999). A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rock. *Canadian Geotechnical Journal* 36(4): 660–674.
- Bell, F. G. (1978). The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones Northumberland England. *Engineering Geology* 12: 1–29.
- Bieniawski, Z. T. (1981). Improved design of coal pillars for mining conditions. In *Proceedings of the First Annual Conference on the Ground Control in Mining*. West Virginia University, pp. 12–22.
- Brace, W. F. (1961). Dependence of fracture strength of on grain size. In *Proceedings of the Fourth Symposium on the Rock Mechanics*. Pennsylvania University, pp. 99–103.
- Chong, K. P., Harking, J. S., Kuruppu, M. D. and Lesknen, A. I. (1987). Strain rate dependent mechanical properties of western oil shale. In *Proceedings of the 28<sup>th</sup> US. Rock Mechanics Symposium*, Rotterdam: Balkema, pp. 157–164.
- Costin, L. S. (1987). Time-dependent deformation and failure. In: Atkinson, B.K. (editor). *Fracture Mechanics of rock*. London: Academic Press, 215 pp.
- Dobereiner, L., and De Freitas, M. H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstone. *Geotechnique* 36 (1): 79–94.
- Dyke, C. G., and Dobereiner, L. (1991). Evaluating the strength and deformability of sandstones. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 24: 123–134.
- Evans, I. (1961). The tensile strength of coal. *Colliery Engineering* 38: 428–434.
- Fahy, M. P., and Cuccione, M. J. (1979). Estimating strength sandstone using petrographic thin-section data. *Engineering Geology* 16: 467–485.
- Farmer, I. W. (1983). *Engineering Behavior of Rock*, 2nd edition. New York: Chapman and Hall, 208 pp.
- Fuenkajorn, K. and Kemthong, R. (2007). Prediction of joint shear strengths of ten rock types using field-identified parameters. In *Proceeding of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics*. September 13–14, 2007, The Greenery Resort, Khao Yai, Nakhonratchasima, Suranaree University of Technology, pp. 195–209

- Fuenkajorn, K. and Kenkhunthod, N. (2010). Influence of loading rate on deformability and compressive strength of three Thai sandstone. *Geotechnical and Geological Engineering* 28(5): 707–715.
- Fuenkajorn, K., and Daemen, J. J. K. (1992). An empirical strength criterion for heterogeneous tuff. *Engineering geology* 32: 209–223.
- Gehle, C. and Kutter, H.K. (2003). Breakage and Shear Behaviour of Intermittent Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40(5): 687–700.
- Griffith, A. A. (1924). Theory of rupture. In *Proceedings of the First Congress of the Applied Mechanics, Delft*. (Biezeno, C.B. and Burges, J.M., editors). Technische Boekhandel en Drukkerij. pp. 55–63.
- Gunsallus, K. L., and Kulhawy, F. H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 21: 233–248.
- Handin, J., and Hager, R. V. (1957). Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at room temperature on dry samples, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* 41, 1–50.
- Hoek, E. (1965). Rock fracture around mining excavations. *Proc. Fourth Int. Conf. on Strata Control and Rock Mechanics*. New York: Columbia University Press, pp. 335–348.
- Howarth, D. F., and Rowlands, J. C. (1986). Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal* 9: 169–179.
- Itasca (1994). *User Manual for FLAC–Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 4.0. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Chapman and Hall.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th edition, Australia: Blackwell Publishing, 475 p.
- Jafari, M.K., Hosseini, K.A., Pellet, F., Boulon M. and Buzzi, O. (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23(7): 619–630.

- Kohmura, Y. and Inada, Y. (2006). The effect of the loading rate on stress–strain characteristics of tuff. *Journal of the Society of Materials Science (Japan)* 55(3): 323–328.
- Lee, S.D., Lee, C.I. and Park, Y. (1997). Characterization of joint profiles and their roughness parameters. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 34(3–4): 174.
- Li, Y. and Xia, C. (2000). Time–dependent tests on intact rocks in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 37(3): 467–475.
- Moradian, Z. A., Ballivy, G., Rivard, P., Gravel, C. and Rousseau, B. (2010). Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emissions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47 (4): 590–598.
- Obcheoy, J. Aracheeploha, S. and Fuenkajorn, K. (2011). Fracture permeability under normal and shear stresses. In *Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics*, pp. 133–140.
- Onodera, T. F., and Asoka Kumara, H. M. (1980). Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bulletin of the International Association for Engineering Geology* 22: 173–177.
- Park, J.W. and Song, J.J. (2009). Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded–particle model. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46(8): 1315–1328.
- Shakoor, A., and Bonelli, R. E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstone. *Bulletin of the Association for Engineering Geology* 28: 55–71.
- Ulusay, R., Tureli, K., and Ider, M. H. (1994). Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology* 37: 135–157.
- Vásárhelyi, B. (1998). Shear failure in rock using different constant normal load. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.* 43 (2): 179–186.
- Vasarhelyi, B. (1999). Shear failure in rock using different constant normal load. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.* 43(2): 179–186.
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D. and Saluja, S. S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks (Vol. 1)*. Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.

## ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.เดโช เพ็ชร์ภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2543 จบการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชา-เทคโนโลยีธรณี 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

