



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-32

รายงานการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือน
ของรอยเลื่อนในหินแกรนิตชุตากด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

(Experimental Assessment of Effects of Temperature and
Shear Velocity on Strength of Fault in Tak Granite Using
Laboratory Test Model)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-32

รายงานการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือน
ของรอยเลื่อนในหินแกรนิตชุดตากด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

(Experimental Assessment of Effects of Temperature and
Shear Velocity on Strength of Fault in Tak Granite Using
Laboratory Test Model)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและ พิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นในหินแกรนิตชุดตาก ใน การศึกษานี้ได้ผันแปรอุณหภูมิจาก 303 ถึง 473 เคลวิน ความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 303 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 473 เคลวิน โดยใช้โครงกวด ทดสอบแบบหลายแกนในการให้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิต่อ ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $50 \times 50 \times 87$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ระบายของรอยแตก ที่ถูกจำลองขึ้นทำมุมเอียง 59.1 องศา กับแนวความเค้นหลัก ผลจากการทดสอบระบุว่าค่ากำลังเฉือน สูงสุดบนรอยแตกผิวขรุขระของหินแกรนิตชุดตากมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนลดลง และอุณหภูมิส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนสูงสุดลดลง ผลการทดสอบสามารถนำมาพัฒนาและสร้างเกณฑ์การ แตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิ โดยเกณฑ์ดังกล่าว สามารถคาดคะเนกำลังเฉือนของรอยแตกในหินที่อยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัว และอุณหภูมิที่ต่างจากการศึกษานี้

Abstract

The objective of this study is to laboratory determine the effects of confining pressures, shear velocity and temperatures on the peak shear strengths of tension-induced fractures in Tak granite. The applied axial displacement rates vary from 10^{-5} , 10^{-4} 10^{-3} to 10^{-2} mm/s at 303 kelvin and 10^{-4} 10^{-3} to 10^{-2} mm/s at 473 kelvin with the confining pressures varying from 1,3,7,12 to 18 MPa. A polyaxial load frame is used to apply confining pressures, displacement velocity and temperatures to the $50 \times 50 \times 87$ mm³ rectangular block specimens. The normal of the fracture plane makes an angle of 59.1° with the axial (major principal) stress. The results indicate that the peak shear strengths proportionally decrease with shear velocity. For the elevated temperature testing, the results indicate that the shear strengths decrease with increasing temperatures. An empirical shear strength criterion is derived to explicitly incorporate the effects of confining pressure, shear velocity and temperature. The criterion is useful for predicting the shear strengths of rock fractures under confining pressures, displacement velocities and temperatures beyond those used in this study.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 เกณฑ์พื้นฐานของกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก.....	9
2.2 การศึกษาผลกระทบและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและแผ่นดินไหว.....	11
2.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก (Joint shear strength testing).....	11
2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อรอยแตก (Effect of temperature on joint).....	14
2.2.3 ผลกระทบของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Effect of shear velocity).....	17
2.2.4 ข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Earthquake in Thailand).....	20
2.3 การศึกษาแบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อน.....	24
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างหิน.....	27
3.1 วัตถุประสงค์.....	27
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	33
4.1 วัตถุประสงค์.....	33
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	33
4.3 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง.....	35
4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตตากก่อนการทดสอบ.....	37
4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินแกรนิตตากในโครงทดสอบ.....	37
4.3.3 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว ³⁷	
บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	39
บทที่ 6 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	47
6.1 การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือน และค่าความเค้นตั้งฉาก.....	47
6.2 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	47
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....	51
บรรณานุกรม.....	53
ประวัตินักวิจัย.....	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่ากำลังรับแรงกดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินแกรนิตที่อุณหภูมิต่างๆ	16
2.2 ความรุนแรง ขนาด และลักษณะความรุนแรงของแผ่นดินไหว.....	22
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิตตก สำหรับการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตก.....	30
5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที.....	40
5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที.....	41

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกน.....	3
1.2 การติดตั้งเบ้ากวดความร้อนและการตรวจวัดอุณหภูมิ.....	5
2.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o).....	12
2.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลอง.....	13
2.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต.....	15
2.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิต.....	15
2.5 ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ.....	16
2.6 ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ.....	16
2.7 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราความเครียดที่สภาวะเปียกและสภาวะแห้ง...	19
2.8 ความแปรปรวนของความเสียหายกับเวลาของหินแกรนิต.....	19
2.9 ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความเสียหายกับจำนวนการถูของหินทราย.....	20
2.10 แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย.....	21
2.11 หน้าผาสามเหลี่ยมเป็นลักษณะบ่งชี้ถึงการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนปกติ.....	24
3.1 ตัวอย่างหินแกรนิตตากที่ใช้ในการทดสอบ.....	28
3.2 ตัวอย่างการกวดหินแกรนิตตากให้แตกด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น.....	28
3.3 ตัวอย่างหินแกรนิตตากที่ใช้ในการทดสอบหลังจากการให้แรงดึงแบบแนวเส้น และตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ.....	29
3.4 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากหินแกรนิตตากบางส่วนที่สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ.....	29
4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง.....	34
4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง.....	34
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียหายด้านข้างที่เกิดจาก σ_3 โดยใช้ Electronic load cell.....	35
4.4 การติดตั้งเบ้ากวดความร้อนและการตรวจวัดอุณหภูมิ.....	36

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนสำหรับหินแกรนิต ตากลางส่วนที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน.....	42
5.2 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนสำหรับหินแกรนิต ตากลางส่วนที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน.....	43
5.3 การเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก (d_n) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินแกรนิตตากลางส่วน (ซ้าย) 303 เคลวิน (ขวา) 473 เคลวิน.....	44
5.4 ค่าความเค้นหลักในแนวแกนในรูปแบบของค่าความเค้นล้อมรอบบนรอยแตก.....	45
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และ 473 เคลวิน.....	45
6.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และ 473 เคลวิน.....	49
6.2 ตัวอย่างความขรุขระของรอยแตกหินแกรนิตชุดตากลางที่สร้างขึ้นจากการตรวจวัดด้วยเลเซอร์.....	49
6.3 ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับ แรงเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากภายใต้อุณหภูมิ 303 เคลวิน และ 473 เคลวิน.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

แผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาล ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะไม่ได้อยู่ในบริเวณแผ่นดินไหวใหญ่ของโลก แต่จากการเกิดแผ่นดินไหวขึ้นหลายครั้ง ก็ส่งผลให้อาคารสถานที่ ทั้งโบราณสถาน เส้นทางคมนาคมและบ้านเรือนประชาชนเกิดความเสียหาย

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลกระทบจากภัยพิบัติแผ่นดินไหว การศึกษาดำเนินการในหลายรูปแบบ อาทิ การคาดคะเนผลกระทบต่ออาคารที่อยู่อาศัย การคาดคะเนความรุนแรงที่อาจจะเกิดขึ้น และการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ๆ เช่น เขื่อนและอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น แต่การศึกษาการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่มีผลต่อโครงสร้างทางธรณีวิทยายังไม่มีการดำเนินการอย่างจริงจัง เนื่องจากลักษณะการเคลื่อนตัว ระยะการเคลื่อนตัว และระดับความลึกดังกล่าวมีความซับซ้อนและยังไม่สามารถคำนวณหรือประเมินได้อย่างเป็นรูปธรรม ประกอบกับองค์ความรู้ที่มีเกี่ยวกับรอยเลื่อนและการเคลื่อนตัวที่อาจจะก่อให้เกิดแผ่นดินไหวยังคงค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย

จากผลการศึกษาการเกิดแผ่นดินไหวและการเคลื่อนตัวในอดีตของแนวรอยเลื่อนต่างๆ เช่น กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ เคยเกิดแผ่นดินไหวครั้งสุดท้ายมีขนาด 6.3 ริคเตอร์ เมื่อประมาณ 5,800 ล้านปี และมีอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน (รอยเลื่อนเจ้าแฉกร) ประมาณ 0.67 มิลลิเมตรต่อปี กลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ พบว่าเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาแล้วหลายครั้ง โดยครั้งสุดท้ายเกิดในบริเวณแถบรอยเลื่อนของกาเลีย ในเขตอำเภอสังขละบุรีเมื่อประมาณ 5,000-2,000 ล้านปี และมีอัตราการเคลื่อนตัวตั้งแต่ 0.22-0.50 มิลลิเมตรต่อปี เป็นต้น (ปัญหา จารุศิริ และคณะ, 2547)

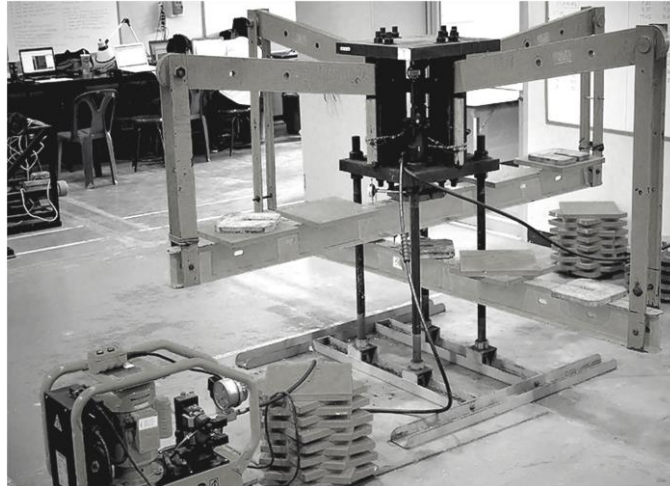
ด้วยเหตุนี้การศึกษาข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทย จะทำให้ทราบถึงภูมิหลังและลักษณะการเกิดแผ่นดินไหว อัตราการเคลื่อนตัว และผลกระทบต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะก่อให้เกิดแผ่นดินไหว ดังนั้น หากจะศึกษาและพิจารณาผลกระทบของการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบรูปแบบการทดสอบพฤติกรรมของรอยเลื่อนในประเด็นต่อไปนี้คือ อัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่อกำลังเฉือน อุณหภูมิบริเวณที่เกิดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและพฤติกรรมของรอยเลื่อน ซึ่งการเข้าใจถึงรายละเอียดข้างต้นมีจุดมุ่งหวังเพื่อที่จะเพิ่มพูนความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่อความรุนแรงของแผ่นดินไหวในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น และเป็นความก้าวหน้าขององค์ความรู้ใหม่ทางด้านธรณีเทคนิคประยุกต์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงและเกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในมวลหินด้วยการจำลองในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิ
- 2) เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อแสดงกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหินให้อยู่ในฟังก์ชันของอัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ
- 3) สามารถสอบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนของรอยแตกในห้องปฏิบัติการและการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่มีอยู่ในประเทศไทยต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการโดยใช้หินแกรนิตชุดตาก
- 2) ตัวอย่างหินจะถูกตัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $50 \times 50 \times 87$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวรอยแตกขนาด 50×100 ตารางมิลลิเมตร
- 3) รอยแตกในมวลหินจะถูกสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension-Induce fracture) และมีพื้นที่ผิวรอยแตกขนาด 50×100 ตารางมิลลิเมตร
- 4) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกน (Triaxial test) ภายใต้ค่าความเค้นรอบข้างมีค่าคงที่ โดยใช้โครงกดในสามแกน (รูปที่ 1.1)
- 5) ตัวแปรในการศึกษาจะรวมผลกระทบของอัตราการเฉือน อุณหภูมิ ความเค้นล้อมรอบ และความเค้นในที่เกิดจากแผ่นดินไหว
- 6) ความเค้นล้อมรอบผันแปรจาก 10, 20, 30, 40 และ 50 เมกะปาสคาล อัตราการเคลื่อนตัวผันแปรจาก 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรต่อวินาที (3.15 เซนติเมตรต่อปี 31.54 เซนติเมตรต่อปี 3.15 เมตรต่อปี และ 31.54 เมตรต่อปี ตามลำดับ) และอุณหภูมิผันแปรตั้งแต่ 303 ถึง 473 เคลวิน
- 7) ในงานวิจัยนี้จะไม่มีการทดสอบและสำรวจในภาคสนาม
- 8) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกน (Kapang et al., 2012)

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กรมทรัพยากรธรณีได้สำรวจรอยเลื่อนมีพลังพบว่า ประเทศไทยมีแนวรอยเลื่อนใหญ่ๆ อยู่หลายแนว สามารถจัดกลุ่มรอยเลื่อนโดยอาศัยทิศทางการวางตัวและการเคลื่อนที่ได้ 3 แนว คือ กลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ กลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และกลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวอยู่ในทิศเหนือ-ใต้ จำนวนทั้งสิ้น 14 กลุ่มรอยเลื่อน ดังนี้ รอยเลื่อนแม่จัน รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน รอยเลื่อนพะเยา รอยเลื่อนแม่ทา รอยเลื่อนปัว รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน รอยเลื่อนเถิน รอยเลื่อนอุตรดิตถ์ รอยเลื่อนเพชรบูรณ์ รอยเลื่อนเมย รอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ รอยเลื่อนระนอง และรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 21 จังหวัดของประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2555) ซึ่งรอยเลื่อนเหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัว ตลอดจนโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวซ้ำอีก โดยที่สถิติแผ่นดินไหวที่เกิดในประเทศไทย เช่น แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2518 ขนาด 5.6 ริกเตอร์ ที่จังหวัดตาก เมื่อวันที่ 22 เมษายน 2526 ขนาด 5.9 ริกเตอร์ ที่จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อวันที่ 11 กันยายน 2537 ขนาด 5.1 ริกเตอร์ ที่จังหวัดเชียงราย และครั้งล่าสุดแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ขนาด 6.3 ริกเตอร์ ที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ส่วนใหญ่บริเวณที่มีรอยเลื่อนพาดผ่านจะอยู่ในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งลักษณะภูมิประเทศที่เป็นเทือกเขาสลับซับซ้อน พบว่ามีหินแกรนิตกระจายตัวอยู่มาก โดยหินแกรนิตเป็นหินอัคนีแทรกซอนอยู่ใต้พื้นดินในระดับลึกซึ่งเป็นบริเวณที่มีรอยเลื่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกหินแกรนิตมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกที่มีการผันแปรอัตราการเคลื่อนตัวเพื่อใช้เป็นตัวแทนของหินที่อยู่ใกล้เคียงกับรอยเลื่อนที่มีพลังดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีผลกระทบที่เกิดจากความร้อนใต้พิภพที่อาจส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกอีกด้วย

การศึกษาผลกระทบของอัตราการให้แรงเฉือนต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในสามแกน ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรอยแตกของหินแกรนิตนั้น สามารถนำมาประเมินหรือ คาคคเนขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและยังสามารถนำไปประเมินความ รุนแรงของแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นได้

ดังนั้น ในการทดสอบกำลังเฉือนในรอยแตกของหินแกรนิตจะทำการทดสอบเพื่อหา ผลกระทบของค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดต่ออัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ โดยตัวอย่าง หินแกรนิตจะถูกกดด้วยโครงกดทดสอบในสามแกนในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 1.1) ซึ่งจะมีการผันแปร อัตราการเคลื่อนตัวตั้งแต่ 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรต่อวินาที (3.15 เซนติเมตรต่อปี 31.54 เซนติเมตรต่อปี 3.15 เมตรต่อปี และ 31.54 เมตรต่อปี ตามลำดับ) มีการผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 เมกะปาสคาล และอุณหภูมิผันแปรตั้งแต่ 303 ถึง 473 เคลวิน ซึ่งผลสัมฤทธิ์ ของงานวิจัยนี้คือ สามารถนำเอาผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับอัตราการเคลื่อนตัว ของรอยเลื่อนที่มีอยู่ในประเทศไทย และสามารถประเมินหรือคาคคเนความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่จะ เกิดขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

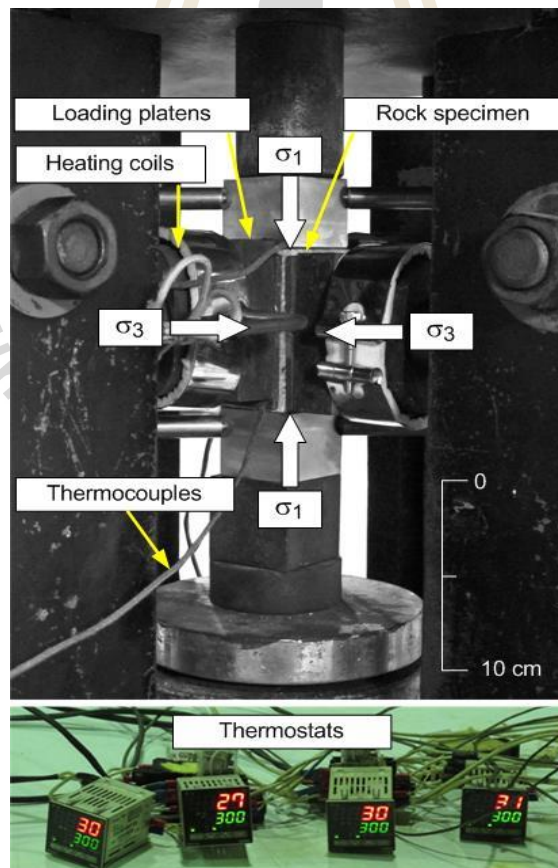
วารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้นำมาทบทวนและสรุปใจความ สำคัญ ซึ่งจะรวมไปถึง (1) การศึกษาทฤษฎีการพังแบบเฉือนที่ใช้อยู่ในระดับสากล และที่นิยมใช้กัน อยู่ปัจจุบัน เช่น กฎของ Coulomb กฎของ Barton เป็นต้น (2) การศึกษาผลกระทบและปัจจัยต่างๆ ที่ มีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว (3) การศึกษาแบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อน

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

แท่งตัวอย่างหินแกรนิตถูกจัดเตรียมผิวสัมผัสของรอยแตกให้มีลักษณะคล้ายกับผิวยรอย แตกที่เกิดในธรรมชาติ โดยการกดตัวอย่างหินให้แตกในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น และให้แรงกดมีลักษณะเป็นเส้น (Line load) ตามแนวที่ต้องการสร้างผิวยรอยแตกจนกระทั่งตัวอย่างหิน แตกออกจากกัน จากนั้นนำตัวอย่างหินไปตัดให้มีขนาด $50 \times 50 \times 87$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวย รอยแตกขนาด 50×100 ตารางมิลลิเมตร รอยแตกที่ได้จะมีลักษณะของผิวที่แตกต่างกันและจะถูก ประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (JRC) โดยใช้เลเซอร์สแกนตามทิศทางการเฉือน ซึ่งสามารถอ่าน ค่าความขรุขระได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของผิวยรอยแตกเพื่อ นำไปสอบเทียบ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบได้ผันแปรอุณหภูมิที่ 303 ถึง 473 เคลวิน ความเค้นล้อมรอบที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 เมกะปาสคาล และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรต่อวินาที (3.15 เซนติเมตรต่อปี 31.54 เซนติเมตรต่อปี 3.15 เมตรต่อปี และ 31.54 เมตรต่อปี ตามลำดับ) นำตัวอย่างหินแกรนิตที่มีรอยแตกติดตั้งในโครงทดสอบ โดยใช้เบ้ากดความร้อนและให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่มีรอยแตกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ รูปที่ 1.2 แสดงอุปกรณ์ให้ความร้อนบนตัวอย่างหินประกอบด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เบ้ากดให้ความร้อน (Loading platen) และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) ซึ่งชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตให้คงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักเพื่อเพิ่มความเค้นล้อมรอบ (σ_3) ให้กับตัวอย่างหินแกรนิต ในขณะเดียวกันก็ได้เพิ่มความเค้นในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างหินแกรนิตอยู่ในสภาวะความเค้นตั้งฉากเท่ากับศูนย์ (ความเค้นล้อมรอบเท่ากันทุกทิศทาง) จากนั้นเพิ่มความเค้นในแนวแกนและตรวจวัดพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของรอยแตกระหว่างการทดสอบทั้งสามทิศทาง โดยกำหนดให้อัตราการเคลื่อนตัวคงที่ จนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนและหลังการทดสอบจะมีค่าไม่เกิน 5 เคลวิน



รูปที่ 1.2 การติดตั้งเบ้ากดความร้อนและการตรวจวัดอุณหภูมิ (Naphudsa et al., 2013)

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

นำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่มีอยู่ในประเทศไทย และสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อแสดงกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหินให้อยู่ในฟังก์ชันของอัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมฐานราก ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐ และเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐ และเอกชน รวมไปถึงสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา ได้แก่

- 1) หน่วยงานในภาครัฐ ประกอบด้วย หน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน ถนน ทางรถไฟ สะพานและตึกขนาดใหญ่ที่มีฐานรากอยู่ในหิน หน่วยงานเหล่านี้ คือ กรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิต เป็นต้น
- 2) หน่วยงานในภาคเอกชน ประกอบด้วย บริษัทที่ประกอบการทางด้านการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น บริษัทที่ปรึกษา บริษัทผู้รับเหมา บริษัทผู้ออกแบบและบริษัทที่ให้บริการด้านการทดสอบคุณสมบัติของหิน

- 3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และ วิศวกรรมโยธา สามารถนำข้อเสนอทางด้านทฤษฎีใหม่นี้ไปใช้ได้โดยตรง โดยนำไป ทำการศึกษาต่อ หรือทำการปรับปรุงเพื่อให้มีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น หรือ นำไปประยุกต์ให้มีข้อจำกัดของทฤษฎีน้อยลง



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยประกอบด้วยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง คือ เกณฑ์พื้นฐานของกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก ผลกระทบของอุณหภูมิต่อรอยแตก ผลกระทบของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทย ดังนี้

2.1 เกณฑ์พื้นฐานของกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก (Fundamentals of joint shear strength criteria)

กำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 5 กฎเกณฑ์ คือ Coulomb, Patton, Fairhurst, Barton และกฎของ Ladanyi and Archambault ซึ่งกฎเกณฑ์ดังกล่าวมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ในส่วนของกฎที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตก กฎของ Coulomb นิยมใช้มาก มีรูปสมการคือ

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (2.1)$$

โดยที่ τ คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตก (Joint Shear Strength)
 σ_n คือ ค่าความเค้นอัดฉากบนระนาบผิวรอยแตก (Normal Stress)
 C คือ ค่าความเค้นยึดติด (Cohesion)
 ϕ คือ ค่ามุมเสียดทานของผิวรอยแตก

ตัวแปรเหล่านี้จะได้รับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมหิน และจะใช้ได้ไม่ดีนักกับค่าความเค้นอัดฉากบนระนาบผิวรอยแตกที่มีค่าสูง เพราะกฎของ Coulomb ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ σ_n เป็นเส้นตรง แต่ความสัมพันธ์ที่แท้จริงจะเป็นเส้นโค้ง

กฎของ Patton ได้พัฒนามาจากสมการของ Coulomb มีรูปสมการ คือ

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_B + i) \quad (2.2)$$

โดยที่ ϕ_B คือ ค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน (ของรอยแตกผิวเรียบ)
 i คือ ค่ามุมของความขรุขระพื้นผิว (Surface roughness)

ซึ่งใช้ได้ดีกับหินแข็ง อย่างไรก็ตามเส้นแสดงพฤติกรรมของหินในสมการ Patton ก็ยังไม่คล้ายคลึงกับพฤติกรรมความเสียหายของรอยแตกในหินที่แท้จริง กล่าวคือ ยังมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงจึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมหินในบางกรณี อีกทั้งวิธีการที่จะได้มาซึ่งค่ามุมของความขรุขระพื้นผิวก็มีความยุ่งยากซึ่งจะต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

กฎของ Fairhurst มีรูปสมการ คือ

$$\tau = \sigma_j \frac{\sqrt{(1+n)} - 1}{n} \left(1 + n \frac{\sigma}{\sigma_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

โดยที่ σ_j คือ ค่าความเค้นอัดของรอยแตก

N คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นอัดกับค่าความเค้นดึงของหิน (σ_c/σ_t)

เป็นกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Intact rock มีลักษณะเส้นแสดงพฤติกรรมคล้ายกับของ Ladanyi and Archambault (1970, 1972) ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมของหิน แต่มีข้อเสียคือ ในทางปฏิบัติต้องอาศัยค่าตัวแปรและค่าคงที่จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง

กฎของ Barton มีรูปสมการ คือ

$$\tau = \sigma_n \tan \{ \phi_B + JRC \log_{10} (\sigma_j / \sigma_n) \} \quad (2.4)$$

เป็นกฎเกณฑ์ที่นิยมใช้ เนื่องจากมีความเหมาะสมกับการใช้งานทางด้านวิศวกรรมหิน ง่ายต่อความเข้าใจและการคำนวณ และสามารถมองเห็นลักษณะทางกายภาพของรอยแตก แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ ใช้ได้ดีกับความเค้นอัดฉากบนระนาบผิวย่อยแตกที่มีค่าต่ำ โดยถ้าความเค้นอัดฉากบนระนาบผิวย่อยแตกมีค่าสูง เส้นแสดงพฤติกรรมของหินก็จะเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งไม่ใช่พฤติกรรมของหินอย่างแท้จริง ตัวแปรทุกตัวไม่สามารถหาได้ในภาคสนาม แต่จะต้องมีการทดสอบหาค่าในห้องปฏิบัติการ และมีค่าใช้จ่ายสูงเช่นเดียวกับวิธีของกรณีอื่นๆ

กฎของ Ladanyi and Archambault (1970, 1972) มีรูปสมการ คือ

$$\tau = \frac{\sigma_n (1 - a_s) (\dot{\nu} + \tan \phi_B) + a_s \cdot \tau}{1 - (1 - a_s) \dot{\nu} \tan \phi_B} \quad (2.5)$$

โดยที่ a_s คือ สัดส่วนระหว่างพื้นผิวของรอยแตกทั้งหมดกับพื้นผิวของรอยแตกที่โดนเฉือนออกไป
 \dot{V} คือ ค่า Dilation rate ที่แรงเฉือนสูงสุด

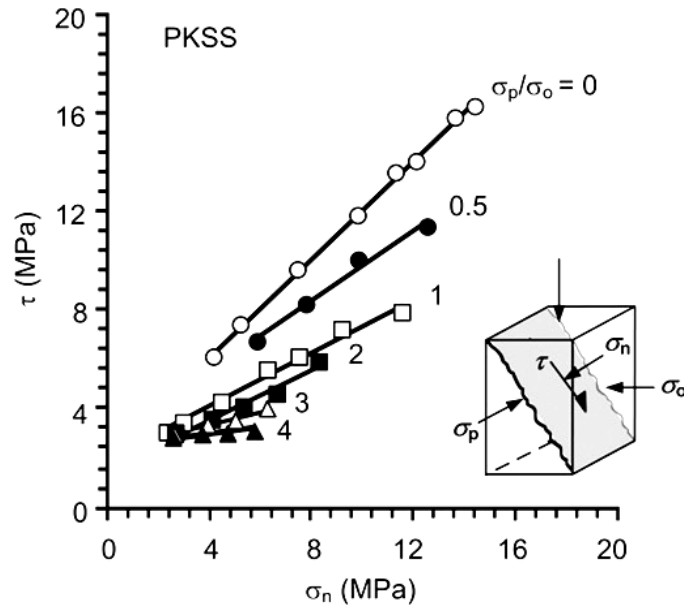
เป็นวิธีการที่ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริง และมีเส้นแสดงพฤติกรรมคล้ายกับพฤติกรรมของหินมากที่สุด แต่ก็มีข้อเสียคือ ค่าตัวแปรบางตัวจะหาได้ยาก แม้จะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบเหล่านี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความซับซ้อน วิธีนี้จึงไม่ได้รับความนิยมมากนัก

2.2 การศึกษาผลกระทบและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและแผ่นดินไหว

2.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตก (Joint shear strength testing)

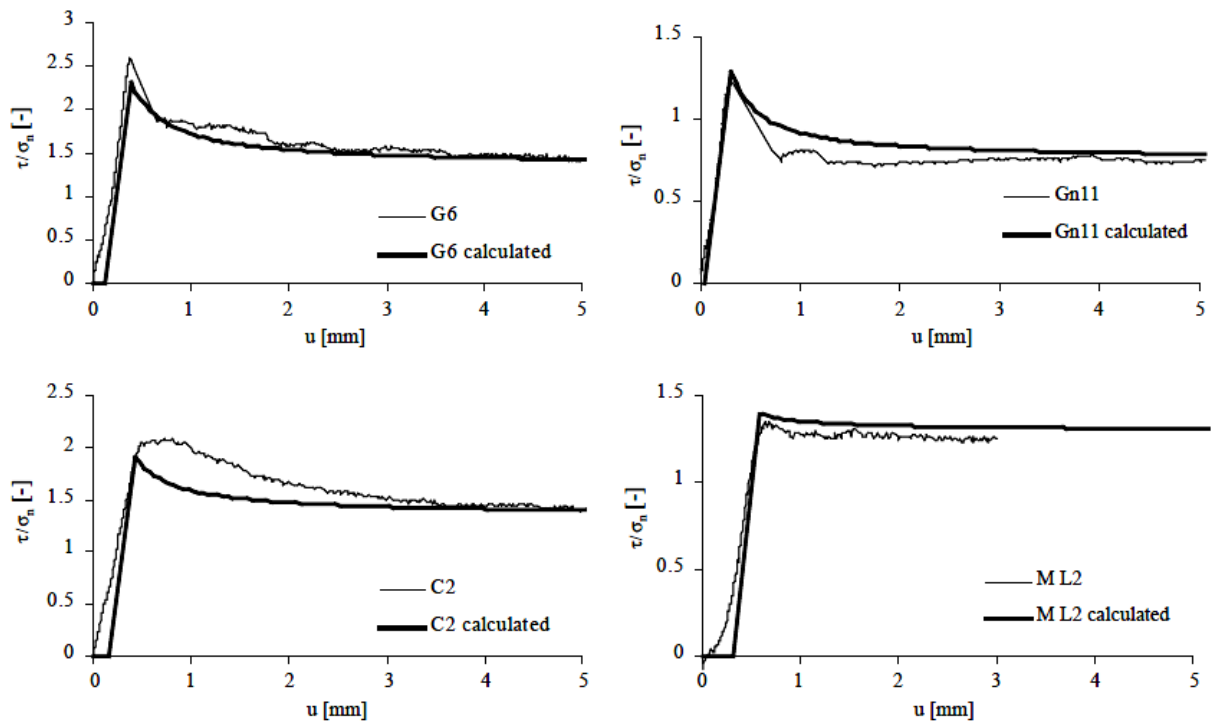
Kapang et al. (2012) ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงเพื่อตรวจสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นในหินทรายสามชนิดในประเทศไทยด้วยการใช้โครงกดทดสอบแบบหลายแกนเพื่อให้ความเค้นล้อมรอบ (σ_p และ σ_o) ต่อตัวอย่างหิน ระบายของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นทำมุมเอียง 59.1 องศากับความเค้นหลักในแนวแกน ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกสามารถลดกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกได้ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเดียวกันรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่มีค่าต่ำ (รูปที่ 2.1) จากเกณฑ์ของคูมอมบ์ค่ามุมเสียดทานลดลงในเชิงเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o) และค่าความเค้นยึดติดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตก ค่าความเค้นล้อมรอบ σ_p จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานพื้นฐานของรอยแตกพื้นผิวเรียบ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้ $\sigma_p=0$ จะมีความสัมพันธ์กันอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ซึ่งระบุว่าเมื่อมีการให้แรงด้านข้างในทิศทางที่ขนานกับระนาบรอยแตก (σ_p) จะเกิดความเครียดภายในพื้นผิวรอยแตกคือมีการบวมตัวของผนังรอยแตกเข้าไปในรอยเปิดเผย ดังนั้น จึงเป็นผลให้เกิดการเฉือนหรือการเลื่อนไถลได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ

Fuenkajorn and Kemthong (2007) ได้ทำการศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการที่ใช้ในภาคสนามสำหรับกำหนดค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน (b) ค่ากำลังกดในแกนเดียว (UCS หรือความแข็งของผนังรอยแตก) และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (JRC) ที่ต่างกันในตัวอย่งหินที่ตัดให้มีผิวเรียบพบว่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณได้จากกฎของ Barton จะอ่อนไหวต่อค่า b มากกว่าค่า UCS ส่วนค่า JRC สามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระได้ดีสำหรับหินอ่อนและหินทราย แต่ไม่สามารถอธิบายกำลังเฉือนของรอยแตกในตัวอย่งหินแกรนิตได้ ซึ่งอาจเกิดจากผิวตัดเรียบของหินที่มีขนาดผลึกแร่ใหญ่และมีความแข็งมาก



รูปที่ 2.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o) (Kapang et al., 2012)

Grasselli and Egger (2003) ได้เสนอ Constitutive criterion ใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับความเค้นและการเคลื่อนตัว โดยแบบจำลองที่เสนอเป็นความต้านทานแรงเฉือนของรอยแตกที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความเค้นตั้งฉากคงที่ และอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีหรือคำอธิบายจากการทดสอบของพื้นผิวจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงที่มีการผันแปรค่าความเค้นตั้งฉากมากกว่า 50 ค่า ซึ่งได้จากการสร้างแบบจำลองของรอยแยกแบบตึงและการทำให้เกิดรอยแตกจำลองบนตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบทั้ง 7 ชนิด แบบจำลองประกอบ (Constitutive model) สามารถใช้เพื่ออธิบายการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ โดยตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองนี้สามารถทำการตรวจวัดได้ง่ายจากการทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ เกณฑ์ที่เสนอนี้จะถูกใช้เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Joint roughness coefficient : JRC) ค่าจากการคาดการณ์ที่เป็นผลสำเร็จจะมีความสัมพันธ์กับค่า JRC ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลอง (Grasselli and Egger, 2003)

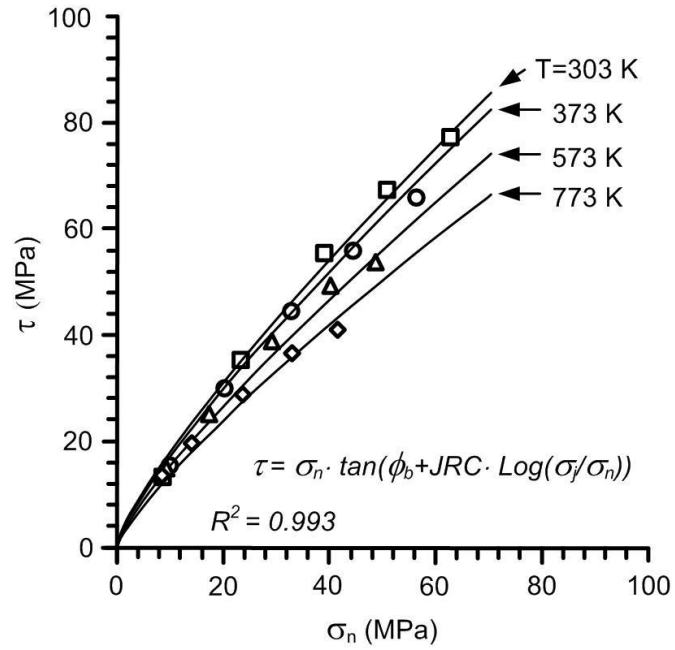
Zhao (1997) ได้ศึกษาการแนบกันของพื้นผิวย่อยแตกและกำลังรับแรงเฉือนด้วยเกณฑ์ JRC-JMC ได้ข้อสรุปว่า เมื่อเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือน JRC-JCS ของ Barton ถูกใช้สำหรับการตีความและการคาดการณ์ของกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกตามธรรมชาติ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง JRC-JCS มีแนวโน้มที่จะคาดการณ์สูงกว่าความเป็นจริงสำหรับรอยแตกตามธรรมชาติกับพื้นผิวที่ไม่แนบกัน จึงได้สร้างเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือน JRC-JMC ใหม่ที่จะรวมผลกระทบของความขรุขระของพื้นผิวย่อยแตกและการแนบกันของรอยแตกในรูปแบบของ $\tau = \sigma_n \cdot \tan [JRC \cdot JMC \cdot \log_{10} (JCS / \sigma_n) + \phi]$ โดยกำหนดค่า $JMC = 0.3$ สำหรับ JMC ที่ได้ทำการตรวจวัดแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 0.3 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนเกณฑ์ของ JRC-JCS ที่มีอยู่แล้ว แบบจำลอง JRC-JMC ใหม่นี้จะให้การสอบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนกับการผันแปรรอยแตกเมื่อพื้นผิวมีมุมที่แตกต่างกันได้เหมาะสมทั้งด้านความขรุขระและการแนบกัน นอกจากนี้ยังช่วยให้การแปรความและคาดการณ์ได้แม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับรอยแตกในธรรมชาติที่ไม่มีพื้นผิวแนบกันอย่างสมบูรณ์

2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อรอยแตก (Effect of temperature on joint)

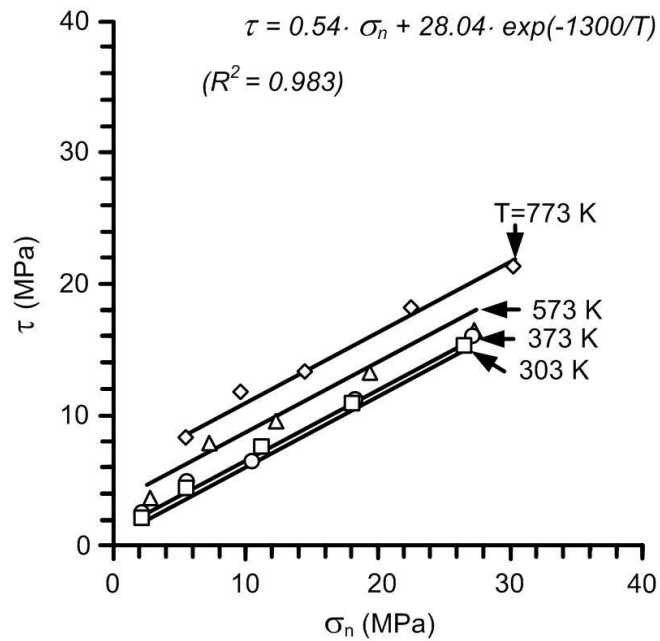
Naphudsra et al. (2013) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินแกรนิตชุดตาก การทดสอบดังกล่าวได้ใช้โครงทดสอบในสามแกนจริง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ และการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบภายใต้อุณหภูมิ 303 (อุณหภูมิห้อง) 373, 573 และ 773 เคลวิน และความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล จากนั้นนำผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิมาสร้างเกณฑ์การแตกด้วยสมการของ Barton ซึ่งสามารถใช้คาดคะเนกำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างหินได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยรอยแตกผิวขรุขระมีค่ากำลังเฉือนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูปที่ 2.3) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างรอยแตกผิวเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 373 เคลวิน (รูปที่ 2.4) เนื่องจากกระบวนการกระตุกของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และได้นำเกณฑ์มาเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลระบุว่าข้อมูลจากการทดสอบและข้อมูลจากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการที่ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า สามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้คาดคะเนค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกของหินแกรนิตในระดับลึกได้

Xu et al. (2009) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อลักษณะทางกลศาสตร์และพฤติกรรมของหินแกรนิต ทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) การเลี้ยวเบนของรังสี x การปล่อยคลื่นเสียง และกลไกระดับเล็กของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเปราะและความเป็นพลาสติกของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง นำตัวอย่างหินมาให้ความร้อนระหว่าง 25 ถึง 1300 องศาเซลเซียส การพังของหินแกรนิตเปลี่ยนแปลงจากการแตกแบบเปราะไปเป็นการแตกแบบเฉือนกึ่งเปราะเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ค่ากำลังรับแรงกดและค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

Dwivedi et al. (2008) ศึกษาผลกระทบด้านอุณหภูมิของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างหินมาทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล รูปที่ 2.5 แสดงความแปรปรวนของค่ากำลังกดในแกนเดียวของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ รูปที่ 2.6 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังดึงแบบบราซิลของหินแกรนิตมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของหินแกรนิตมีค่าสูงขึ้น



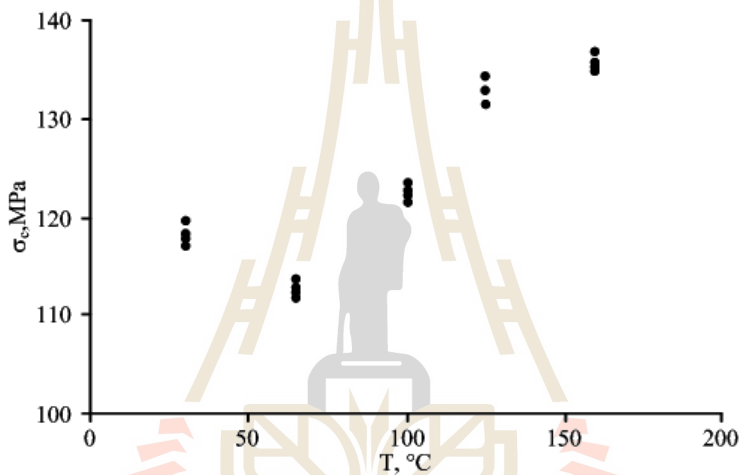
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต



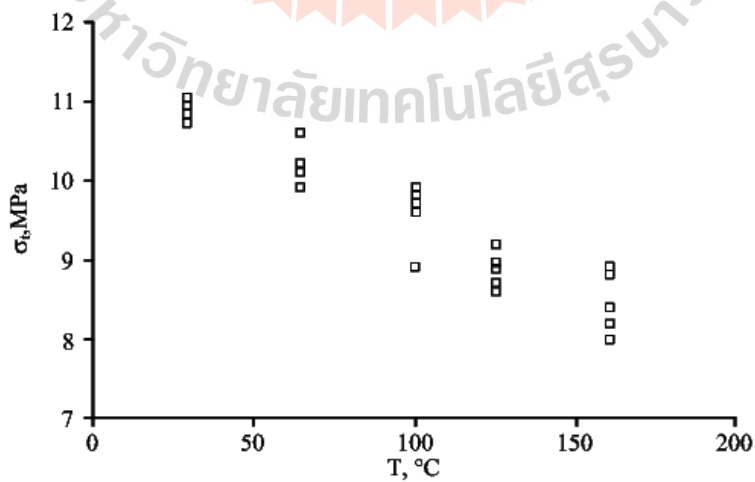
รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิต

ตารางที่ 2.1 ค่ากำลังรับแรงกดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินแกรนิตที่อุณหภูมิต่างๆ (Xu et al., 2009)

คุณสมบัติหิน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)							
	25	200	500	800	900	1000	1100	1200
ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (เมกะปาสคาล)	191.9	135.96	151.9	185.22	89.94	71.61	77.98	36.09
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (จิกะปาสคาล)	38.57	28.68	31.25	25.11	11.02	8.39	6.61	2.87



รูปที่ 2.5 ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ (Dwivedi et al., 2008)



รูปที่ 2.6 ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ (Dwivedi et al., 2008)

Rong-Qiang and Shao-Xian (2006) ศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิ และ อัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงของหินที่มีรอยแตกแบบเปราะของหินในชั้นเปลือกโลก ผลกระทบของความเค้นล้อมรอบ ขนาดของตัวอย่างหิน อุณหภูมิ และอัตราความเครียดได้ถูกนำมาพิจารณาในสูตรด้วย พบว่าค่ากำลังรับแรงมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากได้พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดด้วย อย่างไรก็ตามอัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-2} ต่อวินาที ในขณะที่อัตราความเครียดที่ชั้นเปลือกโลกสามารถไปถึง 10^{-16} ต่อวินาที ซึ่งสูตรที่ได้จากการทดสอบสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_b = B_0 \left[1 + K \left(\frac{\sigma_c}{B_0} \right) \right]^n \left[1 + \alpha \left(\log \frac{T}{T_0} \right)^\beta \right] \left[1 + \gamma \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \quad (2.6)$$

โดยที่ B_0 คือ ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว
 σ_c คือ ค่าความเค้นล้อมรอบ
 T_0 คือ อุณหภูมิห้อง
 T คือ อุณหภูมิ
 $\dot{\epsilon}$ คือ อัตราความเครียด
 $\dot{\epsilon}_0$ คือ อัตราความเครียดอ้างอิง (10^{-5} /s)
 $K, n, \beta, \gamma, \alpha$ คือ ค่าคงที่

2.2.3 ผลกระทบของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Effect of shear velocity)

Crawford and Curran (1981) ทำการศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราการเคลื่อนตัวของรอยแตกในหิน ด้วยการทดสอบการรับแรงเฉือนโดยตรง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงเสียดทานของรอยแตกในหินขึ้นอยู่กับอัตราการเคลื่อนตัว และขนาดของผลกระทบจะมีมากและค่อนข้างที่จะมีความแปรปรวน ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับชนิดของหินและขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก โดยทั่วไปแล้วในหินแข็ง จะมีความต้านทานแรงเสียดทานลดลงเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนเพิ่มขึ้นมากกว่าการผันแปรความเร็วที่จุดวิกฤติ ในทางตรงกันข้ามในหินที่อ่อนพบว่าค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนเพิ่มขึ้นไปจนถึงอัตราการเคลื่อนตัววิกฤติ และหลังจากนั้นก็

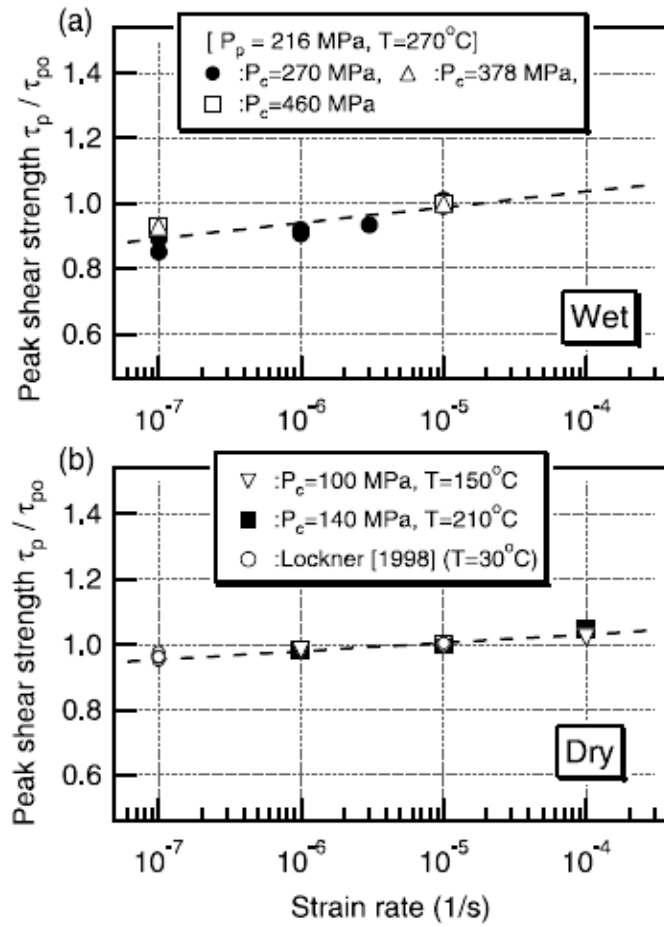
จะคงที่
 Li et al. (2012) ดำเนินการทดสอบการเฉือนซ้ำในตัวอย่างหินที่มีรอยแตกด้วยความเร็วในการเฉือนตั้งแต่ 0.5 ถึง 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อประเมินผลกระทบความขรุขระของความเร็วในการเฉือนและรอยแตกเดิมต่อพฤติกรรมการเฉือนของหินที่มีรอยแตก โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่มี

ความเค้นกดตั้งฉากคงที่ (Constant Normal Load, CNL) ที่ผันแปรความเค้นตั้งฉาก 3 อัตรา คือ 1, 2 และ 4 เมกะปาสคาล และทำการเลื่อนซ้ำโดยเพิ่มอัตราการเลื่อนในแต่ละรอบเป็น 0.5, 5, 10, 20 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยระยะการเคลื่อนที่ในแนวเลื่อนสูงสุดคือ 20 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าความเค้นเลื่อนสูงสุดมีความสัมพันธ์อย่างไม่ชัดเจนกับความเร็วในการเลื่อนเนื่องจากรูปแบบการพังที่ซับซ้อน และต่อมาความเค้นเลื่อนมีค่ามากขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากลดลงเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการเลื่อน

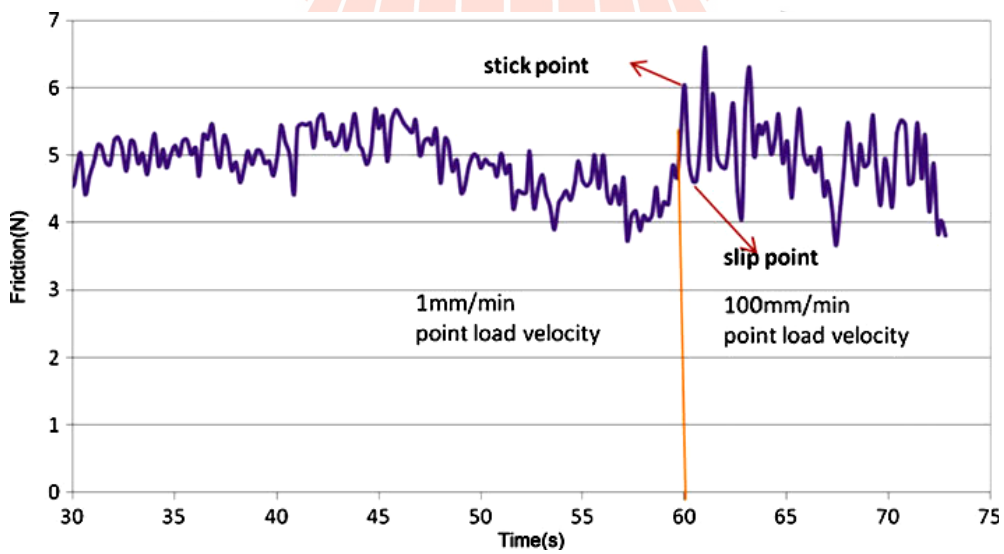
Kato et al. (2003) ทำการพิจารณาตัวแปรที่กำหนดขึ้นจากกฎการเลื่อนสำหรับการพังแบบเลื่อนของหินที่ไม่มีรอยแตก ซึ่งได้รับผลกระทบจากอัตราความเครียด โดยดำเนินการภายใต้การทดสอบในสามแกนและผันแปรอัตราความเครียดจาก 10^{-5} ถึง 10^{-7} ต่อวินาที เพื่อจำลองบริเวณที่มีแผ่นดินไหวด้วยการใช้ตัวอย่างหินแกรนิต จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเครียดลดลงแบบลอการิทึม (รูปที่ 2.7) ซึ่งการลดลงของอัตราความเครียดภายใต้สภาวะเปียกมีผลมากกว่าในสภาวะแห้ง และภายใต้สภาวะเปียกยังพบว่าอัตราการเลื่อนสูงสุดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกของความไม่มีเสถียรภาพของกระบวนการพังแบบเลื่อนมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

Singh et al. (2011) ศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดต่อความเสียหาย ได้ดำเนินการตรวจสอบด้วยความสัมพันธ์ของพฤติกรรมกลไกลภายใต้ความเค้นตั้งฉาก โดยศึกษาปรากฏการณ์ Stick-slip ของหินแกรนิตและหินทรายภายใต้อัตราความเครียดคงที่และความเค้นตั้งฉากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่ผิวสัมผัสของหินถูกพัฒนาขึ้นจากการเพิ่มความเครียดเฉือนด้วยการให้อัตราเร็วคงที่ สำหรับหินทรายพบว่าตัวแปรที่กำหนดขึ้น (a และ b) เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาค่าความเสียหายและความขรุขระของผิวสัมผัส ค่าของตัวแปร b ที่สูงในหินทรายอาจจะเกิดจากพื้นผิวของหินมีค่าความขรุขระอย่างชัดเจนมากกว่า และการถูระหว่างพื้นผิวสัมผัสของหินไม่ได้ทำให้พื้นผิวเรียบขึ้น ซึ่งนั่นเป็นผลจากความแปรปรวนของความเสียหายระหว่างพื้นผิวสัมผัสของหิน (รูปที่ 2.9)

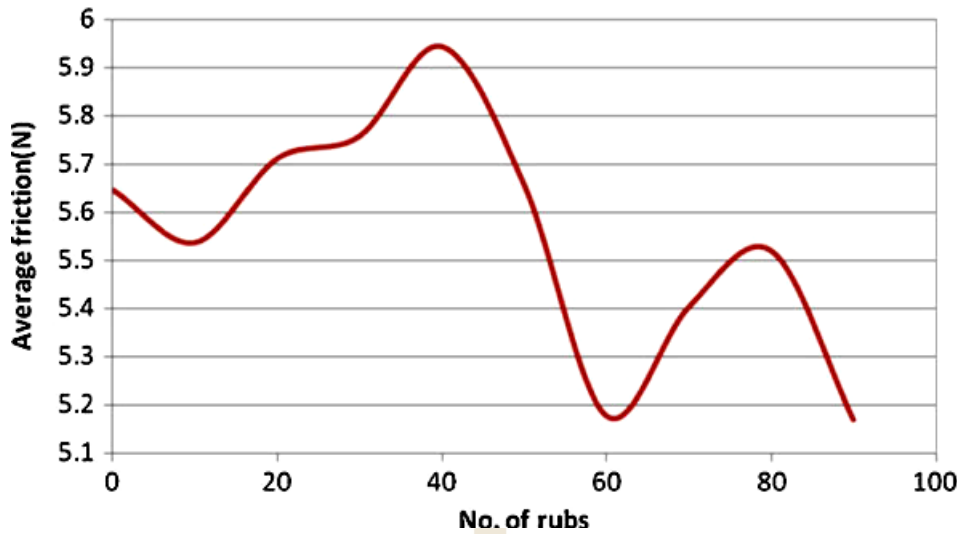
Curran and Leong (1983) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการเคลื่อนที่ในแนวเลื่อนต่อความต้านทานแรงเสียดทานของมวลหิน โดยทำการทดสอบด้วยการใช้ตัวอย่างหินที่มีรอยแตกจำนวน 3 ชนิด ภายใต้การทดสอบการเลื่อนโดยตรงแบบไดนามิก ซึ่งพิจารณาทั้งความขรุขระ พื้นผิวสัมผัส ระดับของความเค้นตั้งฉาก และวัสดุอุดของรอยแตก จากการทดสอบอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่า ความต้านทานแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนตัวในแนวเลื่อน โดยทำการตรวจวัดอัตราความเร็วของการเคลื่อนตัวตั้งแต่ระดับความเร็วต่ำไปถึงความเร็วสูง ซึ่งพบว่าความต้านทานต่อแรงเสียดทานเป็นส่วนสำคัญต่ออัตราการเคลื่อนที่ในแนวเลื่อน



รูปที่ 2.7 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราความเครียด (a) คือสถานะเปียก (b) คือสถานะแห้ง เส้นประแสดงการสอบเทียบข้อมูลจากการทดสอบ (Kato et al., 2003)



รูปที่ 2.8 ความแปรปรวนของความเสียดทานกับเวลาของหินแกรนิต (Singh et al., 2011)

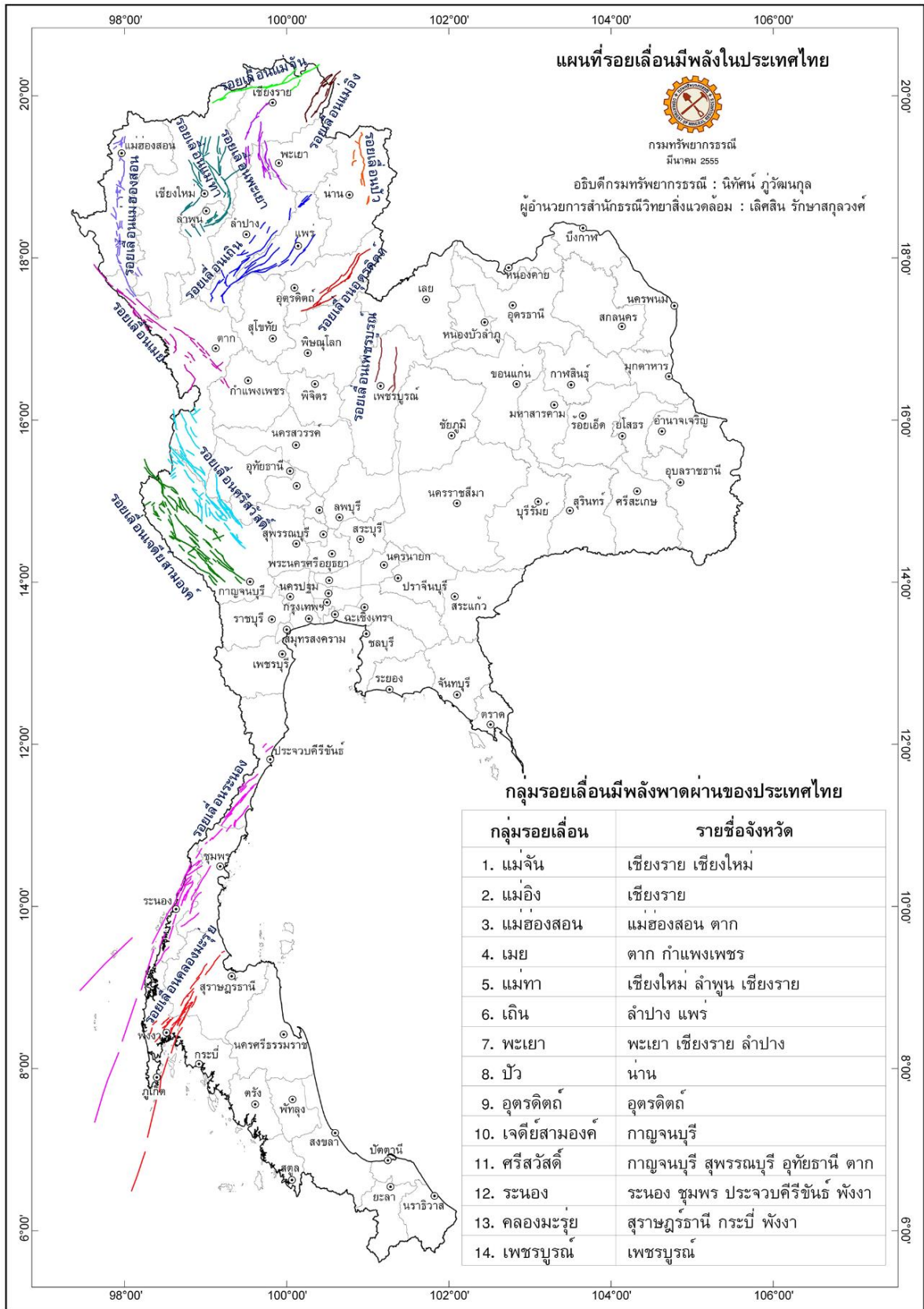


รูปที่ 2.9 ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความเสียดทานกับจำนวนการถูของหินทราย (Singh et al., 2011)

2.2.4 ข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Earthquake in Thailand)

สุมาลี ประจวบ (2538) กล่าวว่า จากข้อมูลแผ่นดินไหวที่ปรากฏในอดีตที่ผ่านมา แนวของศูนย์กลางแผ่นดินไหวส่วนใหญ่จะอยู่นอกประเทศ เช่น บริเวณตอนใต้ของประเทศจีน พรมแดนไทย-พม่า สหภาพพม่า สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ทะเลอันดามันและตอนเหนือของหมู่เกาะสุมาตรา ซึ่งบริเวณเหล่านี้มักจะเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่อยู่เป็นประจำ แม้ว่าจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวจะค่อนข้างไกล แต่เนื่องจากมีขนาดใหญ่จึงส่งแรงสั่นสะเทือนและผลกระทบมายังประเทศไทย

นอกจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นนอกประเทศแล้ว ยังมีแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยเลื่อนมีพลังในประเทศ (รูปที่ 2.10) รอยเลื่อนเหล่านี้ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศ เช่น แผ่นดินไหวขนาด 5.9 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 22 เมษายน 2526 ที่ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี เกิดจากรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ แผ่นดินไหวขนาด 5.6 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2518 ที่ อ.ท่าสองยาง จ.ตาก เกิดจากรอยเลื่อนเมย-อุทัยธานี แผ่นดินไหวขนาด 5.3 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 2 ตุลาคม 2532 ที่พรมแดนไทย-พม่า เกิดจากรอยเลื่อนเชียงแสน และแผ่นดินไหวขนาด 5.1 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 11 กันยายน 2537 ที่ อ.พาน จ.เชียงราย สำหรับขนาดแผ่นดินไหวที่มีศูนย์กลางในประเทศ ระดับ 5-6 ริคเตอร์ จะเกิดขึ้นประมาณ 6-8 ครั้งต่อปี แต่แผ่นดินไหวระดับ 3-5 ริคเตอร์ จะเกิดขึ้นทุกปีเฉลี่ยประมาณปีละ 4-5 ครั้ง ซึ่งแผ่นดินไหวระดับ 3-5 ริคเตอร์ จะรู้สึกได้โดยทั่วไปสำหรับผู้ที่อยู่ใกล้ศูนย์กลาง แต่ไม่ทำความเสียหายให้แก่อาคาร ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระดับความรุนแรง ขนาด และลักษณะความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร และโครงสร้างต่างๆ



รูปที่ 2.10 แผนที่รอยลุ่มน้ำพลังในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2555)

ตารางที่ 2.2 ความรุนแรง ขนาด และลักษณะความรุนแรงของแผ่นดินไหว

อันดับ ความรุนแรง	ขนาด (ริกเตอร์)	ลักษณะความรุนแรงของแผ่นดินไหว
I	<1	ไม่รู้สึกลึ้นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	1-1.9	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว
III	2-2.9	ผู้คนในอาคารรู้สึก โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
IV	3-3.9	ในเวลากลางวันผู้คนที่อยู่ในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้ที่ยอยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน เกิดการสั่นของงาน หน้าต่าง ประตู คล้ายรถบรรทุกชนอาคาร
V	4-4.4	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้แกว่งไกว
VI	4.5-4.9	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	5-5.9	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เกิดความเสียหาย จะเกิดความเสียหายเล็กน้อยถึงปานกลางกับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดาเสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ช้บรณรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
VIII	6-6.9	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	7-7.9	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงของสิ่งก่อสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมากกับอาคารและบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากฐานราก พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	8-8.9	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดีเสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งขึ้นจากพื้นดิน
XI	9-9.9	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก
XII	10	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นในอากาศ

ปัญญา จารุศิริ และคณะ (2547) ทำการศึกษารอยเลื่อนมีพลังในเขตจังหวัดกาญจนบุรี และลำปาง-แพร่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตำแหน่งแนวรอยเลื่อนมีพลัง ทิศทางการวางตัว และลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนมีพลัง ตลอดจนช่วงเวลาของการเลื่อนตัว จากผลการศึกษาวิจัย

กิจการ พรหมมา (2555) กล่าวว่า แผ่นดินไหวในประเทศไทยส่วนมากจะอยู่ในภาคเหนือ และภาคตะวันตก แผ่นดินไหวขนาดเล็กเกิดบ่อยกว่าแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ แผ่นดินไหวในประเทศไทยส่วนมากมีขนาดไม่เกิน 6 ริกเตอร์ พบมากในเขตรอยเลื่อนเถิน แม่ทา และแม่จัน การเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กแต่บ่อยครั้งทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาที่ละน้อยและลดโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงสำหรับแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ พบมากตลอดแม่น้ำสาละวินที่ไหลผ่านชายแดนไทย-พม่า ในประเทศพม่าพบมากในเขตรอยเลื่อนสะเกียง ตามแนวเมืองย่างกุ้ง-หงสาวดี-แปร-อังวะ ซึ่งแผ่นดินไหวเหล่านี้สั้นสะเทือนมาถึงประเทศไทย พบว่า แนวรอยเลื่อนมีพลังในเขตจังหวัดกาญจนบุรี สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ และกลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ ส่วนในเขตพื้นที่จังหวัดลำปาง-แพร่ พบว่าแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรอยเลื่อนลำปาง และกลุ่มรอยเลื่อนแพร่ สำหรับกลุ่มรอยเลื่อนด้านเจดีย์สามองค์ ประกอบด้วยรอยเลื่อนย่อยหลายแนวที่มีการวางตัวต่อเนื่องกัน มีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาแล้วหลายครั้งในอดีต โดยครั้งสุดท้ายเกิดในบริเวณแถบรอยเลื่อนย่อยของกาเลีย ในเขตอำเภอสังขละบุรี เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 2,200 ถึง 5,000 ปี มีอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนตั้งแต่ 0.22-0.50 มิลลิเมตรต่อปี และมีขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวประมาณ 7.2 ริกเตอร์ กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ประกอบด้วยรอยเลื่อนย่อยที่มีความยาวตั้งแต่ 8 ถึง 80 กิโลเมตร พบว่าได้เคยเกิดแผ่นดินไหวครั้งสุดท้ายขนาด 6.3 ริกเตอร์ เมื่อประมาณ 5,800 ปี และมีอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนประมาณ 0.67 มิลลิเมตรต่อปี สำหรับรอยเลื่อนในเขตพื้นที่จังหวัดลำปางพบว่ามีรอยเลื่อนย่อย 6 รอยเลื่อน กลุ่มรอยเลื่อนลำปางเคยมีการเลื่อนตัวเหลื่อมข้างแบบซ้ายเข้าและเลื่อนตัวในแนวตั้ง ได้เคยเกิดแผ่นดินไหวในอดีตครั้งสุดท้าย มีอายุประมาณ 2,000 ปี โดยมีขนาดแผ่นดินไหวประมาณ 7 ริกเตอร์ และมีอัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 0.83 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนรอยเลื่อนในพื้นที่จังหวัดแพร่ ประกอบด้วย 5 รอยเลื่อนย่อย ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนตัวและการวางตัวคล้ายกับรอยเลื่อนในจังหวัดลำปาง เคยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 7 ริกเตอร์ อย่างน้อย 2 ครั้ง ในช่วงประมาณ 0.9 ถึง 1.0 ล้านปี และที่ผ่านมาในช่วง 0.05 ถึง 0.2 ล้านปีที่ผ่านมา และมีอัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อปี

Fenton et al. (2003) กล่าวว่าจากการสำรวจล่าสุดสามารถระบุจำนวนของรอยเลื่อนมีพลังที่อยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งจะแสดงลักษณะทางภูมิประเทศที่สัมพันธ์กับรอยเลื่อน เช่น หน้าผาสามเหลี่ยม หุบเขาและแอ่ง เป็นต้น (รูปที่ 2.11) รอยเลื่อนในภาคเหนือของประเทศมีอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยระหว่าง 0.1 ถึง 0.8 มิลลิเมตรต่อปี ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งจะอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.5 เมตร ซึ่งรอยเลื่อนเหล่านี้มีลักษณะของคาบการเกิดซ้ำนับหมื่นปี และอาจเกิดแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงมากถึง 7.0 ริกเตอร์ หรือมากกว่านั้น แนวรอยเลื่อนเหลื่อมข้าง (Strike-



รูปที่ 2.11 หน้าผาสามเหลี่ยมเป็นลักษณะบ่งชี้ถึงการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนปกติ (Fenton et al., 2003)

slip fault) ยาวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงลักษณะทางภูมิประเทศ เช่น สันขวางกั้น และทางน้ำหัก มีอัตราการเคลื่อนตัวคือ 3 มิลลิเมตรต่อปี หรือน้อยกว่านั้น ส่วนในภาคตะวันตกของประเทศจะมีลักษณะเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนที่มีความสัมพันธ์กับรอยเลื่อนซาเกียง (Sagaying fault) ในประเทศพม่า ซึ่งเป็นรอยเลื่อนเหลื่อมข้าง (Strike-slip fault) ซึ่งแสดงกิจกรรมน้อยกว่ารอยเลื่อนอื่นๆ ที่ใกล้เคียง แต่รอยเลื่อนนี้ได้ทิ้งหลักฐานการเคลื่อนที่ในยุคควอเทอร์นารีอย่างมาก อาทิ สันขวางกั้น (Shutter ridge) หลุมยุบ (Sag pond) และทางน้ำเบี่ยงแนว (Offset stream) อัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนนี้ประมาณ 0.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งรอยเลื่อนนี้มีความสามารถที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้มากที่สุดถึง 7.5 ริกเตอร์

2.3 การศึกษาแบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อน (Physical model of fault fracture)

Barbot et al (2012) ได้ทำการศึกษารลดอันตรายจากธรรมชาติเนื่องจากแผ่นดินไหว สึนามิและระดับน้ำทะเลด้วยการใช้แบบจำลองทางกายภาพเชิงวัฏจักรแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนที่มีขนาดใหญ่ เช่น Sunda Thrust ในเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย และข้อมูลจากการชนกันระหว่างแผ่นอินเดียและแผ่นยูเรเชีย ซึ่งแบบจำลองนี้จะรวบรวมข้อมูลของรอยเลื่อนจากข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์ การวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา Geodetic และ Seismological ซึ่งแผ่นดินไหวอาจทำให้เกิดการทำลายอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งมักเกิดจากคลื่นสึนามิที่รุนแรง แต่การคาดการณ์การ

เกิดแผ่นดินไหวนั้นยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน เนื่องจากในอดีตยังไม่มีการบันทึกข้อมูลของแรงเสียดทานของรอยเลื่อนไว้อย่างชัดเจน แต่จากการรวบรวมสถิติที่ผ่านมาจะสามารถทำให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ และพฤติกรรมระยะยาวของรอยเลื่อนที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว ซึ่งต้องคำนึงถึงแรงเสียดทานของรอยเลื่อนและการเปลี่ยนแปลงลักษณะของรอยเลื่อนด้วย

สนธยา โชคเศรษฐกิจ (2547) ได้ศึกษาแบบจำลอง 3 มิติ ในการแสดงผลข้อมูลธรณีวิทยา ซึ่งสามารถสื่อให้นักธรณีวิทยามีความเข้าใจลักษณะของชั้นหินและโครงสร้างธรณีวิทยาได้ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะมิติที่ 3 ปัจจุบันโปรแกรมทางด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีขีดความสามารถในการแสดงผล 3 มิติ ได้เป็นอย่างดี นอกเหนือจากการบริหารจัดการข้อมูลธรณีวิทยาแล้ว ยังสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อการแสดงผลได้ด้วย ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาขั้นตอนการสร้างแบบจำลองธรณีวิทยา โดยใช้กรณีศึกษาของชั้นหินตะกอนและหินแปรด้วยโปรแกรมอาร์คิว 8.1 และโมดูล 3D Analyst 1.0 ซึ่งได้พัฒนา 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นเพื่อจัดรูปแบบข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และโปรแกรมสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างธรณีวิทยาและการลำดับชั้นหิน ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงผลเป็นภาพตัดขวางธรณีวิทยาและพื้นผิว TIN (Triangulated Irregular Network) ของระนาบชั้นหินและรอยเลื่อน กระบวนการส่วนแรกของโปรแกรมประกอบด้วยขั้นตอน การวิเคราะห์โครงสร้างธรณีวิทยา การจัดกลุ่มหินตามโครงสร้างธรณีวิทยา การเรียงลำดับอายุของกลุ่มหินและหมวดหิน ซึ่งได้ให้ข้อมูลเส้นลำดับอายุที่ประกอบด้วยข้อมูลขอบเขต รอยเลื่อน และเส้นสัมผัสหมวดหิน กระบวนการส่วนที่ 2 คือการนำไปสร้างแบบจำลองธรณีวิทยา ด้วยการนำข้อมูลเส้นลำดับอายุมาขยายเป็นการวางตัวที่แตกต่างกันตามโครงสร้างทางธรณีวิทยาและสร้างพื้นผิว TIN ของชั้นหิน การสร้างภาพตัดขวางทำได้ด้วยการดึงข้อมูลเส้นหน้าตัดบนพื้นผิว TIN ทุกพื้นผิวที่อยู่ในแนวตัดขวางออกมา เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาหาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหินและรอยเลื่อน ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำลองจะได้ภาพตัดขวางธรณีวิทยาที่มีค่าพิกัดแบบ 3 มิติ

Zhang et al (2016) ได้เสนอวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อภายใต้รอยเลื่อนตามแนวระดับ โดยวัตถุประสงค์ของแบบจำลองเพื่อยืนยันและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ โดยมีค่าการเบี่ยงเบนไม่เกิน 4.34 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกันผลกระทบของอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ระยะเลื่อนของรอยเลื่อน และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อจะได้รับการตรวจวัด โดยพบว่าแนวโน้มการวิบัติแบบการดึงจะเกิดกับรอยเลื่อนที่มีอัตราการเคลื่อนตัวสูง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีประโยชน์ต่อค่าความปลอดภัย

จักรุช ต้นสกุล และคณะ (2559) ได้นำเสนอแนวคิด หลักการ และรายละเอียดของการพัฒนาชุดทดสอบแบบย่อส่วนเพื่อติดตามการวิบัติของมวลหินโดยรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันสูงแบบ 1g ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาและประเมินเสถียรภาพของถ้ำเก็บแก๊สใต้ดิน บทความอธิบายถึง

องค์ประกอบหลักของระบบชุดทดสอบที่ประกอบด้วยระบบให้แรงดัน หินจำลอง อุปกรณ์รับแรง วิธีการติดตามผลตอบสนอง และเทคนิคการจำลองรอยเลื่อน ชุดเครื่องมือทดสอบได้ออกแบบให้ครอบคลุมทั้งอุโมงค์รูปทรงแคบซูลและอุโมงค์แนวราบหน้าตัดวงกลมของมวลหินที่มีความต่อเนื่องแบบไม่มีรอยเลื่อน และมีรอยเลื่อน ในแต่ละองค์ประกอบได้อธิบายถึงความจำเป็น แนวคิดหลัก เทคนิค และการพัฒนา นอกจากนี้ยังได้แสดงตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้จากการใช้ชุดเครื่องมือนี้ การติดตามการวิบัติ (จุดเริ่มการวิบัติและแนวการวิบัติ) ที่เกิดขึ้นสามารถติดตามจากความหนาแน่นของความเครียดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย และมีความสอดคล้องกับแนวรอยแตกที่เกิดขึ้นหลังจากถอดชุดทดสอบ ออกแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเพียงพอของระบบที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาที่ได้จากชุดทดสอบที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์และความจำเป็นของชุดทดสอบในการศึกษาเรื่องนี้ โดยเฉพาะความเข้าใจใหม่ถึงรูปแบบพฤติกรรมการวิบัติเพื่อปรับปรุงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขต่อไป

Bois et al (2008) ศึกษาอิทธิพลของรอยเลื่อนที่มีมาก่อนและกระบวนการวิบัติของรูปร่างเรขาคณิตของรอยเลื่อนต่อแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งพิจารณาจากค่าทางสถิติในพื้นที่ La Clapiere ทางตอนใต้ของฝรั่งเศส การทดสอบได้ใช้วัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันกับลักษณะทางเรขาคณิตของรอยเลื่อน ผลการศึกษายืนยันสมมติฐานที่ว่ารอยเลื่อนในระดับต้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง นอกจากนี้ยังมีการทดสอบกับองค์ประกอบที่หลากหลายเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่อ La Clapiere โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ารูปร่างเรขาคณิตของรอยเลื่อนที่ระดับต้นมีบทบาทสำคัญในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงแรงโน้มถ่วงของโลก โดยลักษณะเฉพาะในกรณีของ La Clapiere ผลลัพธ์จะให้ข้อมูลใหม่เชิงลึกเกี่ยวกับรูปร่างของรอยเลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อรูปร่างของเทือกเขาในระดับความลึกต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรอยเลื่อนปกติที่ในระดับต้นเทียบกับรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในระดับลึก

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

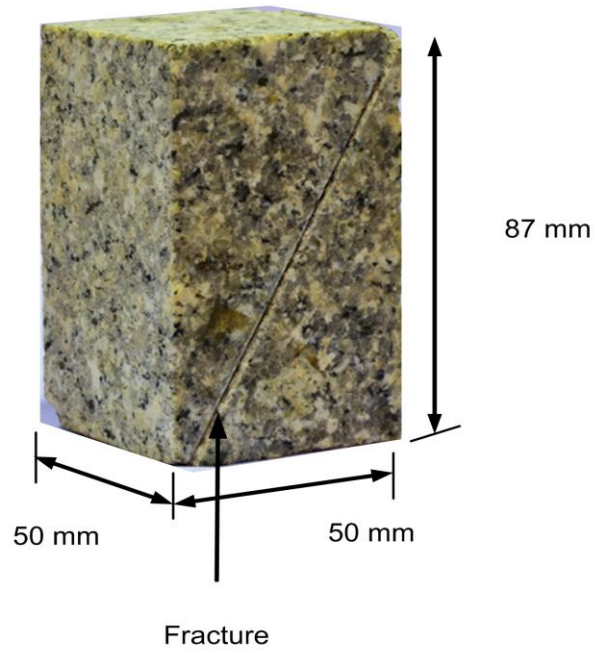
3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตตากเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตาก

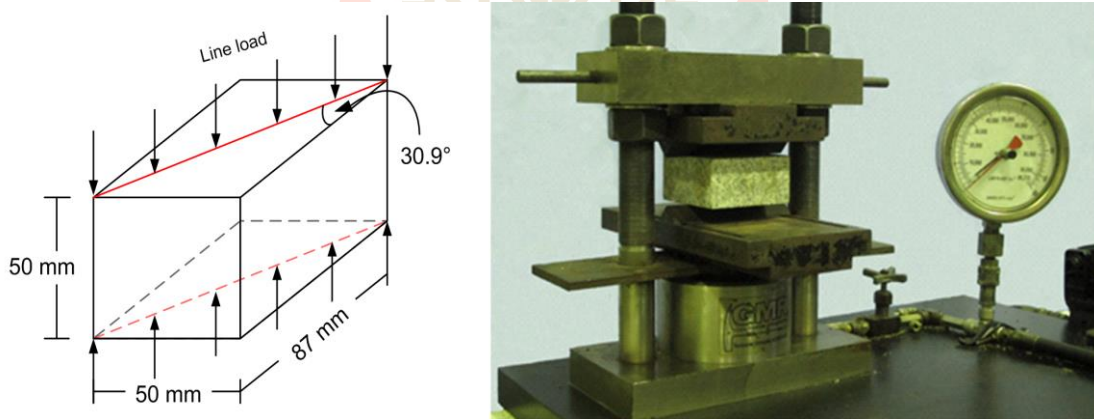
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการศึกษานี้คือ หินแกรนิตตาก ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงและไม่มียอยแตกในเนื้อหิน เพื่อควบคุมความแปรปรวนของการสร้างรอยแตกของหินแสดงในรูปที่ 3.1 แท่งตัวอย่างหินแกรนิตถูกจัดเตรียมผิวสัมผัสของรอยแตกให้มีลักษณะคล้ายกับผิวรอยแตกที่เกิดตามธรรมชาติ โดยการกดตัวอย่างหินให้แตกในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension-induced fracture) และให้แรงกดมีลักษณะเป็นเส้น (Line load) ตามแนวที่ต้องการสร้างผิวรอยแตกจนกระทั่งตัวอย่างหินแตกออกจากกัน แสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นนำตัวอย่างหินไปตัดให้มีขนาด $50 \times 50 \times 87$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวรอยแตกขนาด 50×100 ตารางมิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.3 รอยแตกที่ได้จะมีลักษณะของผิวที่แตกต่างกันและจะถูกประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (JRC) โดยใช้เลเซอร์สแกนตามทิศทางการเฉือนดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถอ่านค่าความขรุขระได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของผิวรอยแตกเพื่อนำไปสอบเทียบต่อไป

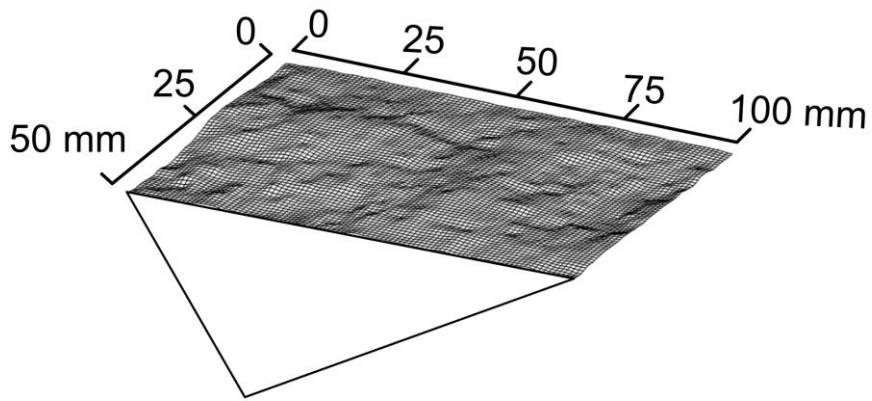
การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตากได้ดำเนินการโดยใช้โครงทดสอบแบบหลายแกน (Polyaxial load frame) โดยในการทดสอบได้ผันแปรอุณหภูมิที่ 303 ถึง 473 เคลวิน ความเค้นล้อมรอบที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 เมกะปาสคาล อัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรต่อวินาที และได้ใช้หินแกรนิตตากทั้งหมด 60 ก้อน และตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตาก



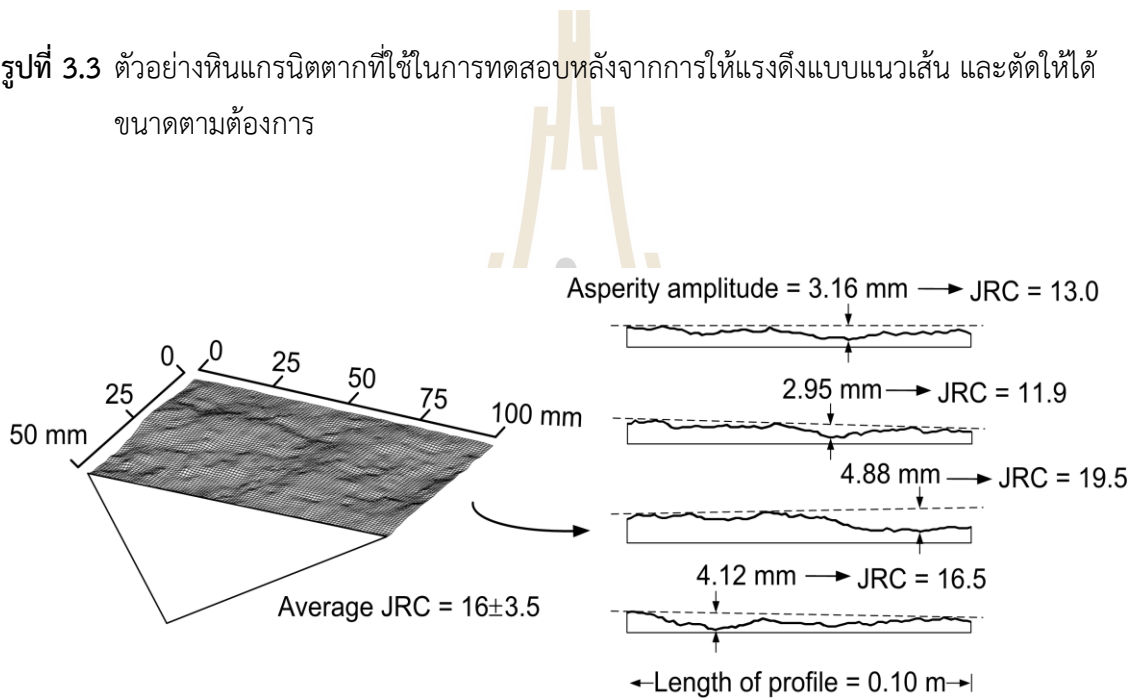
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินแกรนิตตากที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการกดหินแกรนิตตากให้แตกด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างหินแกรนิตตากที่ใช้ในการทดสอบหลังจากการให้แรงดึงแบบแนวเส้น และตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากหินแกรนิตตากบางส่วนที่สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Barton, 1982)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิตตาก สำหรับการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตาก

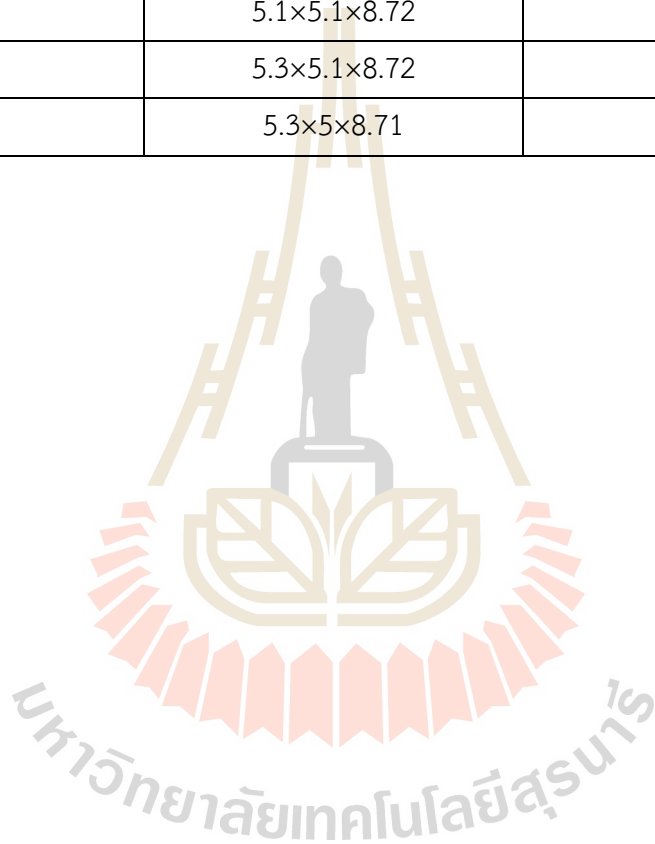
Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GR-01	5.2×5.1×8.71	2.75
GR-02	5×5×8.71	2.73
GR-03	5.1×5.1×8.72	2.75
GR-04	5.2×5.2×8.7	2.75
GR-05	5×5.1×8.7	2.73
GR-06	5×4.99×8.69	2.74
GR-07	5×5×8.7	2.76
GR-08	5.2×5.2×8.72	2.72
GR-09	5.1×5×8.7	2.74
GR-10	5.1×5.1×8.7	2.73
GR-11	5×5×8.7	2.72
GR-12	5.1×5.1×8.72	2.73
GR-13	5.1×5.1×8.71	2.76
GR-14	5.1×5.1×8.72	2.72
GR-15	5×5×8.7	2.72
GR-16	5.1×5.2×8.73	2.74
GR-17	5.3×5.1×8.7	2.74
GR-18	5×5×8.7	2.73
GR-19	5.1×5.1×8.72	2.74
GR-20	5.3×5.2×8.71	2.75
GR-21	5.1×5.1×8.72	2.75
GR-22	5×5×8.71	2.73
GR-23	5.1×5.2×8.73	2.73
GR-24	5.2×5.3×8.72	2.74
GR-25	5.1×5.2×8.74	2.71
GR-26	5.1×5.1×8.72	2.71
GR-27	5.3×5.1×8.7	2.75

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิตตาก สำหรับการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตาก (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GR-28	5.1×5.1×8.72	2.73
GR-29	5×5×8.72	2.75
GR-30	5.2×5.3×8.74	2.75
GR-31	5.1×5.2×8.71	2.72
GR_32	5.1×5.2×8.72	2.73
GR-33	5.1×5.1×8.72	2.73
GR-34	5.2×5.3×8.72	2.69
GR-35	5×5.1×8.72	2.66
GR-36	5.2×5.1×8.74	2.74
GR-37	5.1×5.3×8.71	2.74
GR-38	5.1×5.1×8.72	2.74
GR-39	5.3×5.3×8.71	2.75
GR-40	5.2×5.3×8.73	2.75
GR-41	5.2×5.2×8.74	2.72
GR-42	5.2×5.2×8.73	2.69
GR-43	5.1×5×8.7	2.68
GR-44	5.2×5.2×8.72	2.74
GR-45	5.1×5×8.73	2.74
GR-46	5.1×5.1×8.71	2.71
GR-47	5.3×5.1×8.7	2.72
GR-48	5.1×5.1×8.72	2.67
GR-49	5×5.2×8.74	2.66
GR-50	5.1×5.1×8.72	2.72
GR-51	5.1×5.1×8.7	2.75
GR-52	5.4×5.4×8.74	2.73
GR-53	5.1×5.3×8.72	2.69

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิตตาก สำหรับการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตาก (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GR-54	5×5×8.73	2.72
GR-55	5.3×5.2×8.74	2.74
GR-56	5.1×5×8.71	2.73
GR-57	5.1×5.1×8.72	2.68
GR-58	5.1×5.1×8.72	2.71
GR-59	5.3×5.1×8.72	2.73
GR-60	5.3×5×8.71	2.73



บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

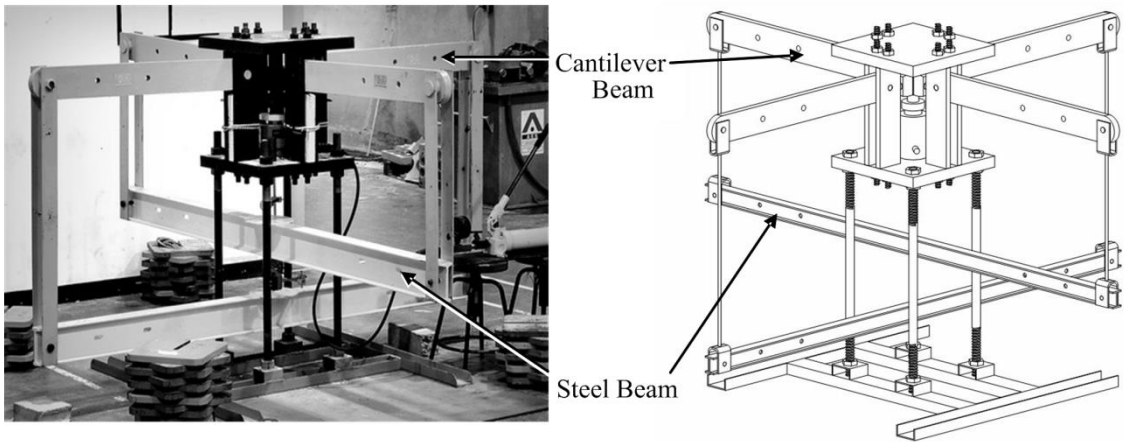
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบหาผลกระทบของ อุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตก โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี

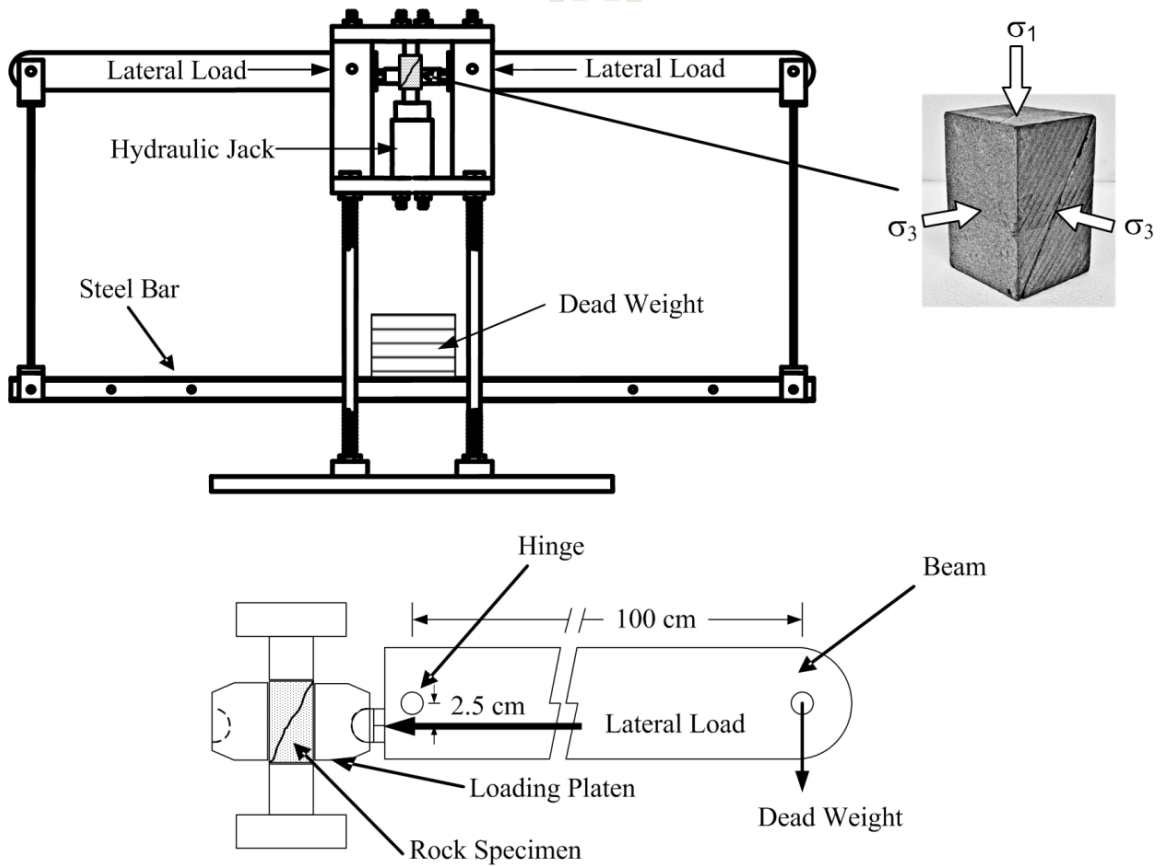
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

โครงกทดสอบในสามแกนจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นฐานการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 54 มิลลิเมตร) และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

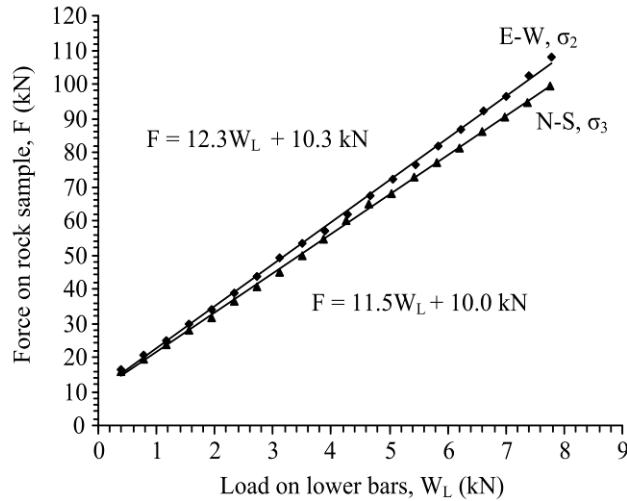
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแวนตุน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุน้ำหนัก เพื่อใช้ใส่ตุน้ำหนักในการดึงแขนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาที่ยึดติดกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแวนตุน้ำหนักที่ใช้แวนคานรับตุน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 เท่า ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) และ 11.5 เท่า ในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งได้ทำการสอบเทียบด้วยการใช้ Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 เมกะปาสคาล และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นที่กระทำในแนวตั้ง (σ_1) ซึ่งสามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 เมกะปาสคาล โครงกทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ 2.5×2.5×2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง 10×10×20 ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง



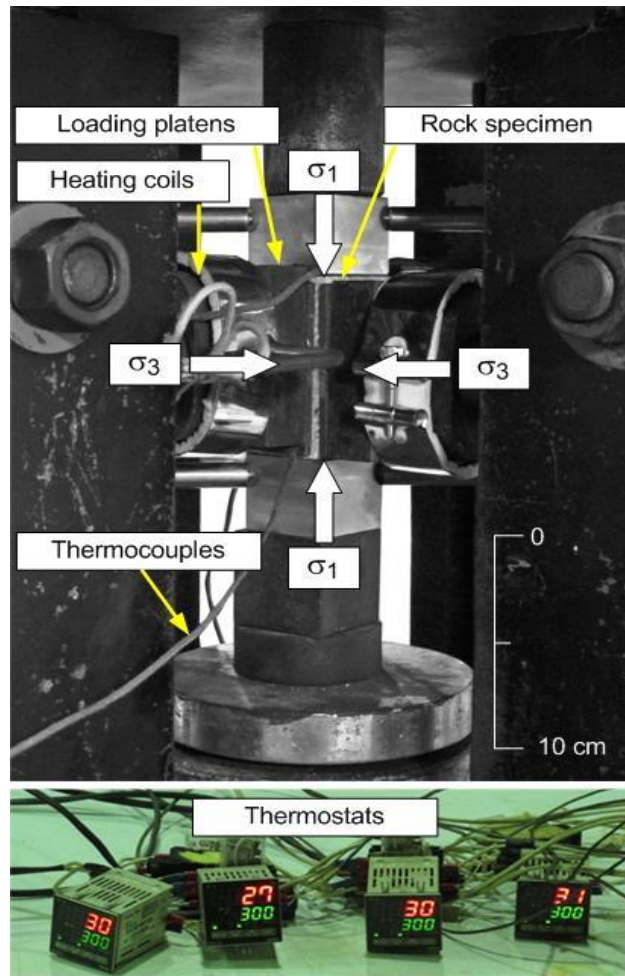
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดจาก σ_3 โดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณแก้ไขค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.3 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง

การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวต่อกำลังเฉือนของรอยเลื่อนในหินแกรนิตตก ในการทดสอบได้ผันแปรอุณหภูมิที่ 303 ถึง 473 เคลวิน ความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-5} , 10^{-4} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 303 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 473 เคลวิน ซึ่งแตกต่างจากข้อเสนอโครงการเนื่องมาจากเพื่อให้การทดสอบใกล้เคียงและครอบคลุมสถานะจริงมากที่สุด ทั้งในประเด็นของความเค้นล้อมรอบและอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่มีอยู่ในประเทศไทยและด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ให้ความร้อนบนตัวอย่างหินที่ไม่สามารถทนความร้อนได้นานเกินกว่าอัตราการเคลื่อนตัวที่ 10^{-5} มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการทดสอบจะนำตัวอย่างหินแกรนิตที่มีรอยแตกติดตั้งในโครงทดสอบด้วยการใช้เบ้ากดความร้อนและให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่มีรอยแตกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์ให้ความร้อนบนตัวอย่างหินประกอบด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เบ้ากดให้ความร้อน (Loading platen) และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) ซึ่งชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตให้คงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักเพื่อเพิ่มความเค้นล้อมรอบ (σ_3) ให้กับตัวอย่างหินแกรนิต ในขณะที่เดียวกันก็ได้เพิ่มความเค้นในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างหินแกรนิตอยู่ในสถานะความเค้นตั้งฉากเท่ากับศูนย์ (ความเค้นล้อมรอบเท่ากันทุกทิศทาง) จากนั้นเพิ่มความเค้นในแนวแกนและตรวจวัดพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยแตกระหว่างการทดสอบทั้งสามทิศทาง โดยกำหนดให้อัตราการเคลื่อนตัวคงที่ได้กำหนด จนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนและหลังการทดสอบจะมีค่าไม่เกิน 5 เคลวิน



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเข้ากวดความร้อนและการตรวจวัดอุณหภูมิ (Naphudsa et al., 2013)

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตตากก่อนการทดสอบ

ตัวอย่างหินแกรนิตตากที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงเมื่อถูกสร้างรอยแตกในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้นแล้ว จากนั้นต้องนำตัวอย่างหินแกรนิตมาประกบกัน

4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินแกรนิตตากในโครงกดทดสอบ

การติดตั้งตัวอย่างหินแกรนิตตากเพื่อทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง (ผิวขรุขระ) มีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) จัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตตากพร้อมผู้ช่วยเพื่อยกคานทั้ง 4 ด้าน
- (2) ยกคานในแนวตะวันตก-ตะวันออกขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างหินแกรนิตตากเข้าไปในแท่นกดทดสอบ โดยใช้เบ้ากดความร้อน แล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างหินแกรนิตตาก จากนั้นยกคานด้านเหนือ-ใต้ขึ้น ใส่แท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างหินแกรนิตตากสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นล้อมรอบ
- (3) ติดตั้งหัวกดให้แรงด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่มีรอยแตกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ ซึ่งชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตตากให้คงที่ตลอดการทดสอบ
- (4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อเพิ่มความเค้นล้อมรอบให้กับตัวอย่างหิน จากนั้นเพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้
- (5) กดตัวอย่างหินแกรนิตตากด้วยปั๊มไฮดรอลิก ตรวจสอบพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของรอยแตกระหว่างการทดสอบทั้งสามทิศทาง โดยกำหนดให้อัตราการเคลื่อนตัวคงที่จนกระทั่งสังเกตเห็นค่ากำลังเฉือนสูงสุด และกดตัวอย่างหินแกรนิตตากต่อไปเพื่อบันทึกค่าความเค้นเฉือนคงค้าง
- (6) ความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนและหลังการทดสอบจะมีค่าไม่เกิน 5 เคลวิน

4.3.3 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว

ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินแกรนิตตากในแต่ละแนวแกนด้วยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบ ในขณะที่ตัวอย่างหินแกรนิตตากับแรงกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งถึงค่ากำลังเฉือนสูงสุด

บทที่ 5

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ โดยการทดสอบได้ใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและอุณหภูมิ

ในการทดสอบได้ผันแปรอุณหภูมิที่ 303 ถึง 473 เคลวิน ความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และที่อัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบของค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินแกรนิตชุดตกที่อุณหภูมิ 303 และ 473 เคลวิน รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงค่ากำลังเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินแกรนิตบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตก (d_n) และค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน

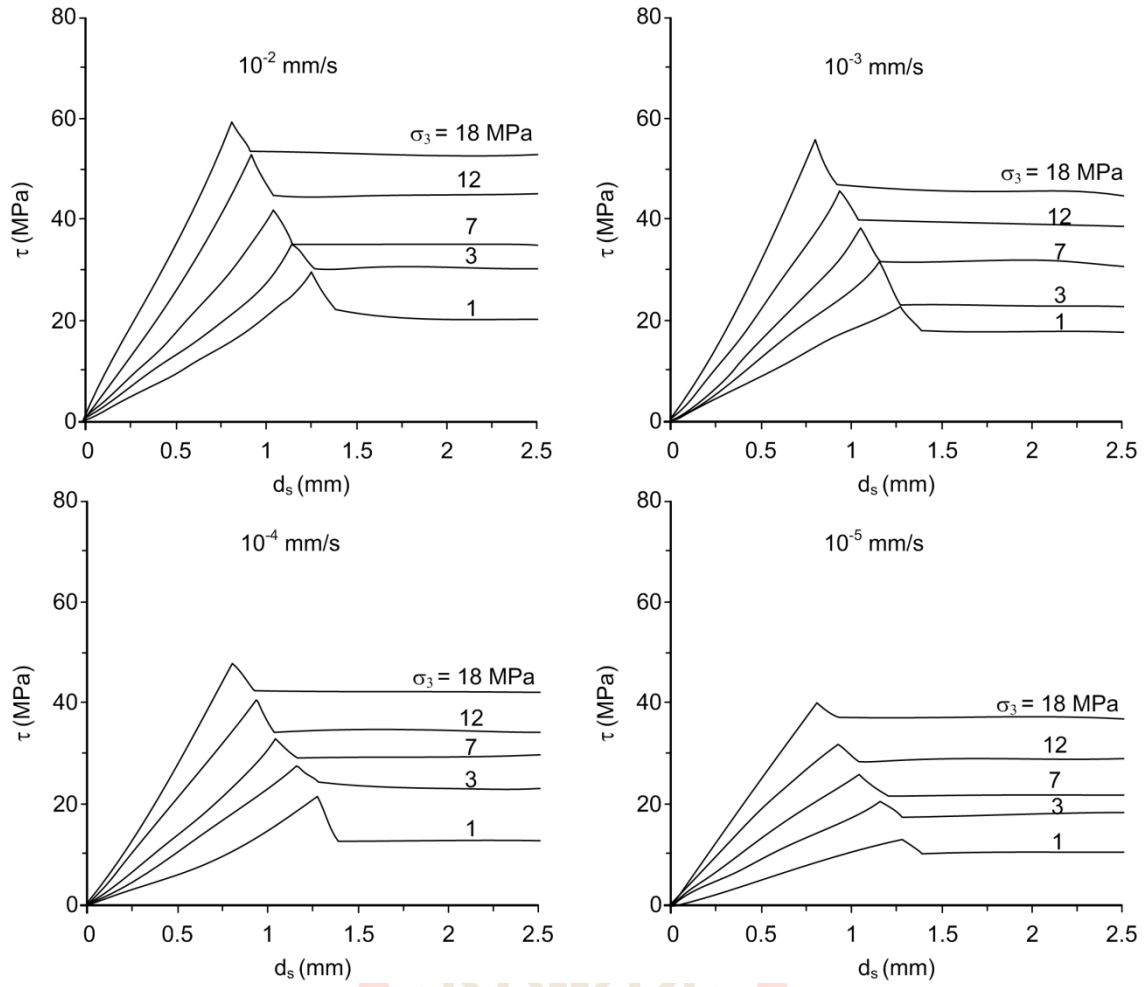
ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นล้อมรอบบนรอยแตก (รูปที่ 5.4) กับค่าความเค้นหลักในแนวแกน (รูปที่ 5.4) มาคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปสู่การพัฒนาสมการต่อไป

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที

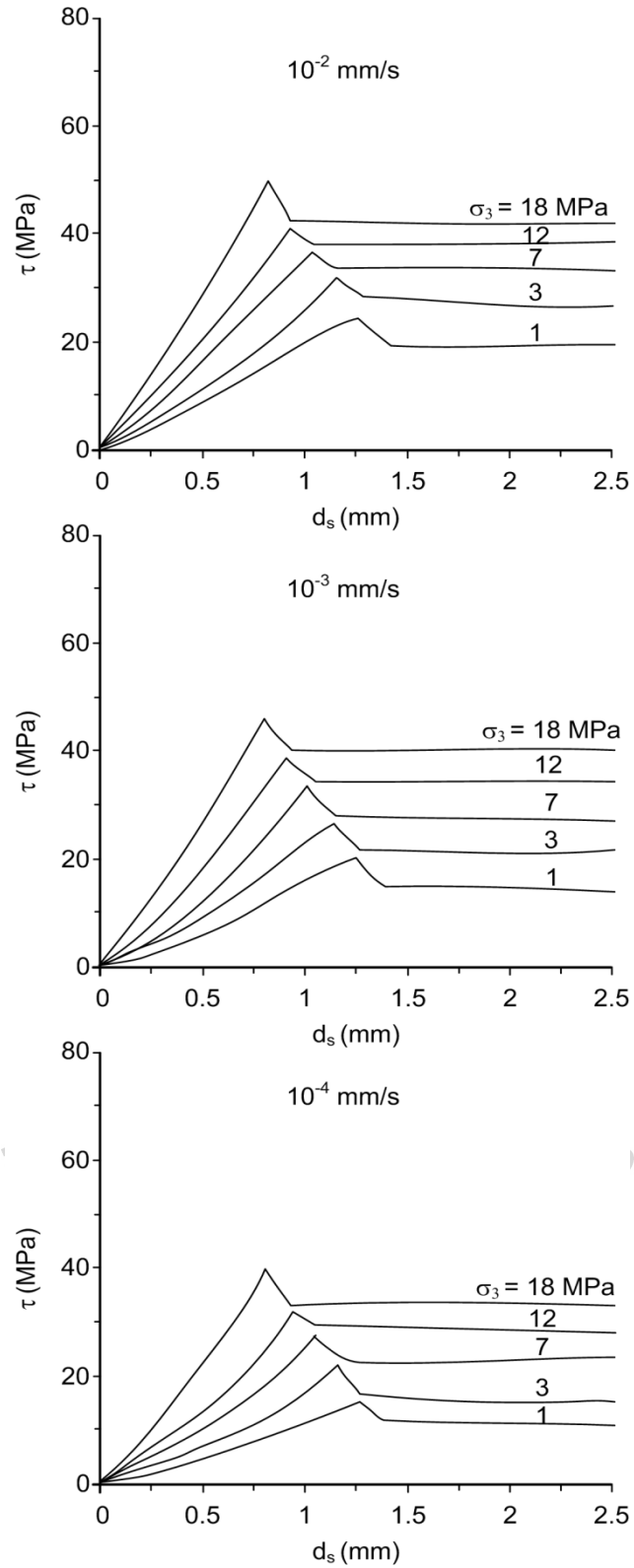
Rate (mm/s)	σ_3 (MPa)	Tak Granite		
		σ_0 (MPa)	σ_n (MPa)	σ_p (MPa)
10^{-2}	1	71.26	18.57	30.42
	3	85.85	23.71	35.87
	7	103.64	31.22	41.95
	12	130.89	41.71	51.46
	18	156.67	52.67	60.05
10^{-3}	1	53.55	14.14	22.75
	3	75.30	21.07	31.31
	7	98.20	29.8	39.49
	12	116.59	38.15	45.29
	18	146.5	50.12	55.64
10^{-4}	1	49.64	13.16	21.06
	3	65.79	18.70	27.19
	7	81.86	25.71	32.41
	12	105.74	35.44	40.59
	18	127.18	45.26	47.21
10^{-5}	1	31.18	8.54	13.07
	3	49.87	14.74	20.32
	7	66.03	21.76	25.56
	12	87.87	30.96	32.83
	18	117.02	42.76	42.88

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน และอัตราการเคลื่อนตัวจาก 10^{-4} , 10^{-3} ถึง 10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที

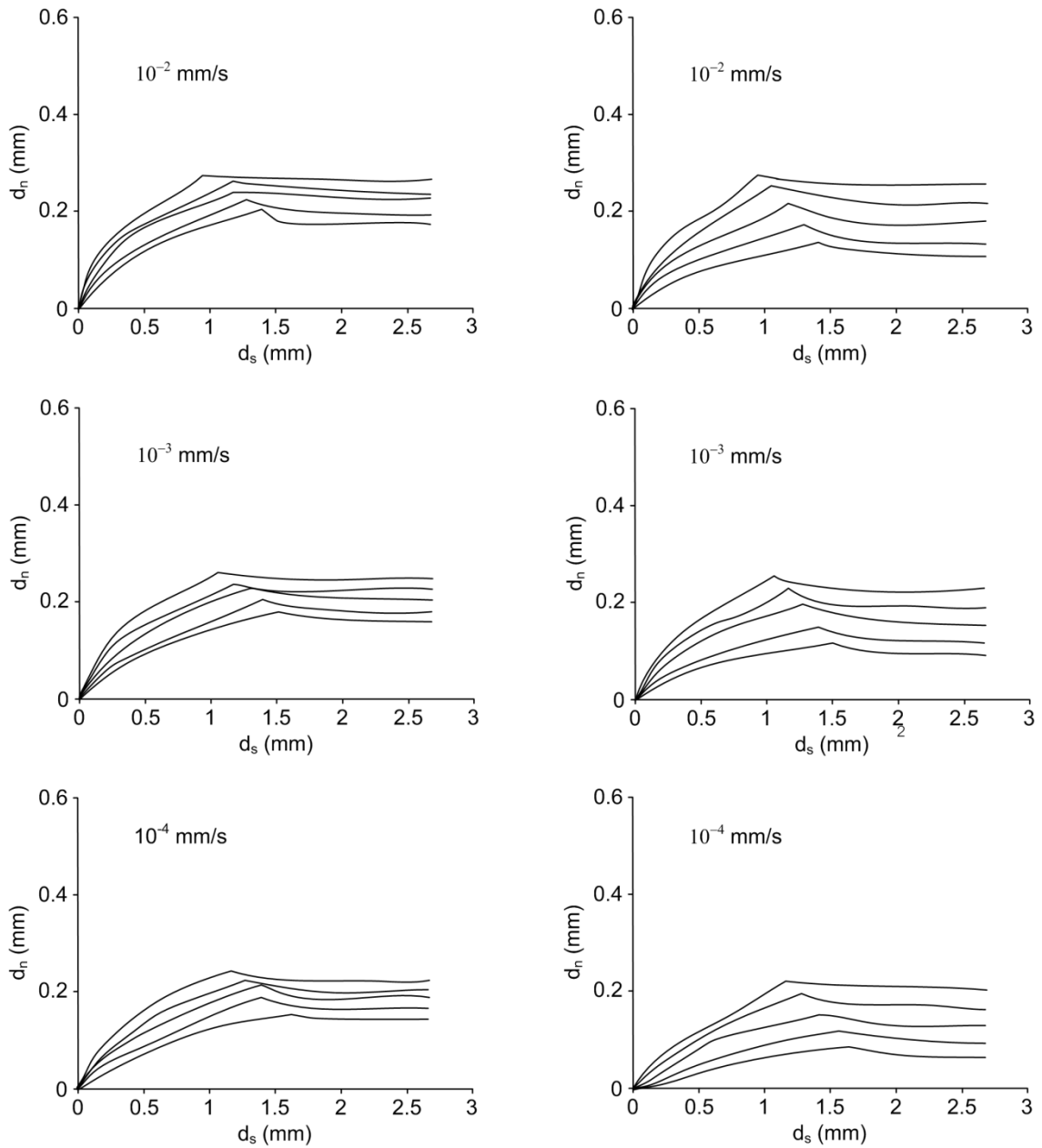
Rate (mm/s)	σ_3 (MPa)	Tak Granite		
		σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	σ_p (MPa)
10^{-2}	1	55.87	14.71	23.74
	3	74.88	20.95	31.09
	7	90.61	27.88	36.17
	12	113.29	37.26	43.76
	18	128.74	45.66	47.92
10^{-3}	1	48.43	12.84	20.50
	3	67.18	19.05	27.79
	7	86.55	26.89	34.44
	12	103.39	34.34	38.71
	18	122.54	44.13	45.27
10^{-4}	1	37.82	10.21	15.95
	3	56.32	16.30	23.04
	7	74.22	23.81	29.11
	12	87.19	30.80	32.57
	18	107.85	40.46	38.91



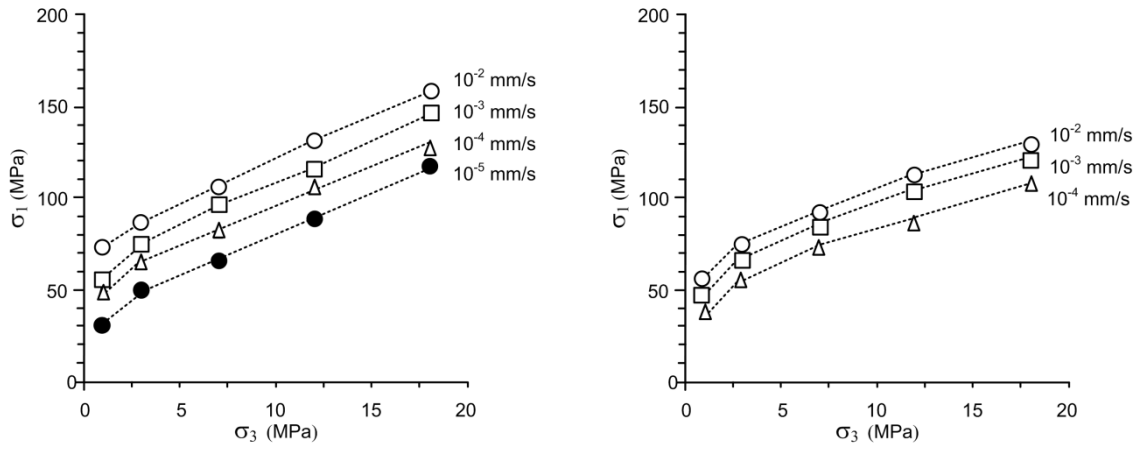
รูปที่ 5.1 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนสำหรับหินแกรนิต ตากบางส่วนที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน



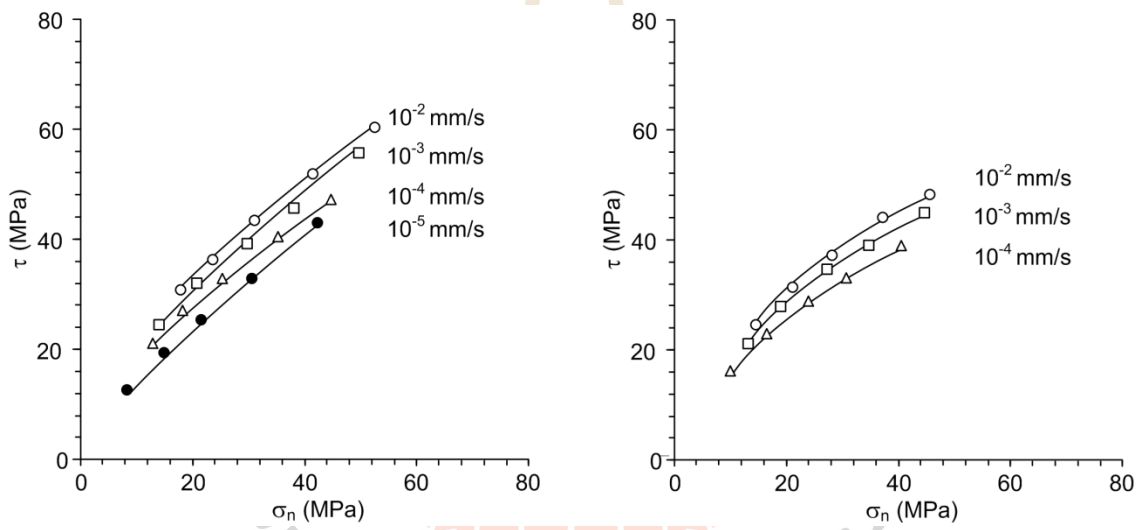
รูปที่ 5.2 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนสำหรับหินแกรนิต ตากบางส่วนที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน



รูปที่ 5.3 การเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก (d_n) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินแกรนิตตากบางส่วน (ซ้าย) 303 เคลวิน (ขวา) 473 เคลวิน



รูปที่ 5.4 ค่าความเค้นหลักในแนวแกนในรูปแบบของค่าความเค้นล้อมรอบบนรอยแตก



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน (ซ้าย) และ 473 เคลวิน (ขวา)

บทที่ 6

การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายการพัฒนาสมการและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าความเค้นหลักและค่าความเค้นล้อมรอบ ค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉาก โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะนำไปสู่การพัฒนาเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนใหม่ที่ได้คำนึงถึงผลกระทบของความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิ

6.1 การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือน และค่าความเค้นตั้งฉาก

การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงสามารถคำนวณค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Jaeger et al., 2007)

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\beta \quad (6.1)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\beta \quad (6.2)$$

โดยที่ σ_1 คือ ความเค้นหลักในแนวแกน
 σ_2 คือ ความเค้นล้อมรอบ
 β คือ มุมระหว่างความเค้นหลักในแนวแกนกับความเค้นตั้งฉาก

โดยตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามุมเท่ากับ 59.1 องศา ทุกตัวอย่าง

6.2 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

การทดสอบนี้สามารถคำนวณค่ากำลังเฉือนสูงสุดจากค่าความเค้นล้อมรอบจาก 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 303 และ 473 เคลวิน สำหรับการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) และการเคลื่อนตัวของรอยแตก (d_n) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Klempmek et al., 2016)

$$d_s = d_1 / \sin 2\beta \quad (6.3)$$

$$d_n = (d_{3,m} - d_{3,c}) \sin \beta \quad (6.4)$$

$$d_{3,c} = \tan(90-\beta) \cdot d_1 \quad (6.5)$$

- โดยที่ d_1 คือ การเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ตรวจวัดขณะทำการทดสอบ
 $d_{3,m}$ คือ การเคลื่อนตัวรวมในทิศทางด้านข้างที่ตรวจวัดขณะทำการทดสอบ
 $d_{3,c}$ คือ การเคลื่อนตัวด้านข้างจากการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับรอยแตก

ค่าความเค้นหลักในแนวแกนมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และสามารถแสดงผลในรูปแบบของความเค้นตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยยึดเกณฑ์ของบาร์ตัน (Wyllie and Mah, 2004) เกี่ยวกับความสัมพันธ์เชิงเส้นที่เสนอไว้เพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่ากำลังเฉือนสูงสุดภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_b + JRC \cdot \text{Log}(\sigma_j / \sigma_n)) \quad (6.6)$$

- โดยที่ σ_j คือ ค่ากำลังกดสูงสุดของหินที่เป็นผนังของรอยแตก (Joint wall compressive strength)
 JRC คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Joint roughness coefficient)
 ϕ_b คือ ค่ามุมของความเสียดทานพื้นฐาน (Basic friction angle)

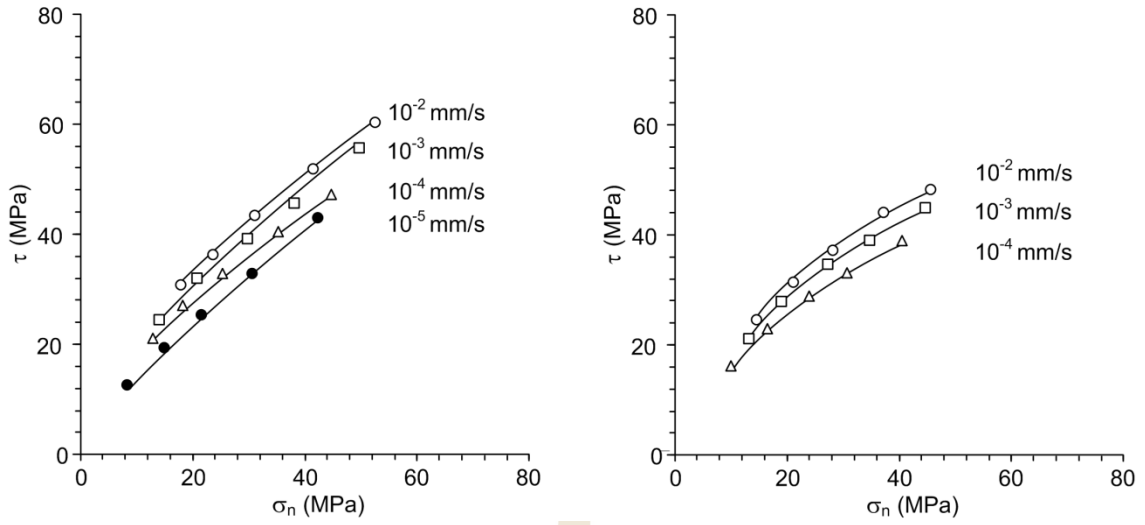
ในการทดสอบนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระได้จากการตรวจวัดด้วยเลเซอร์สแกนตามทิศทางการเฉือน ซึ่งสามารถอ่านค่าความขรุขระได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร จากนั้นเปรียบเทียบกับพื้นผิวความขรุขระดังกล่าวกับ Barton's Chart (Barton, 1982) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13 ดังแสดงในรูปที่ 6.2

โดยสมการที่ 6.6 ใช้สำหรับพิตข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในรูปแบบของค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉาก ในรูปสมการความสัมพันธ์ของบาร์ตันมาวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) (Wendai, 2000) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

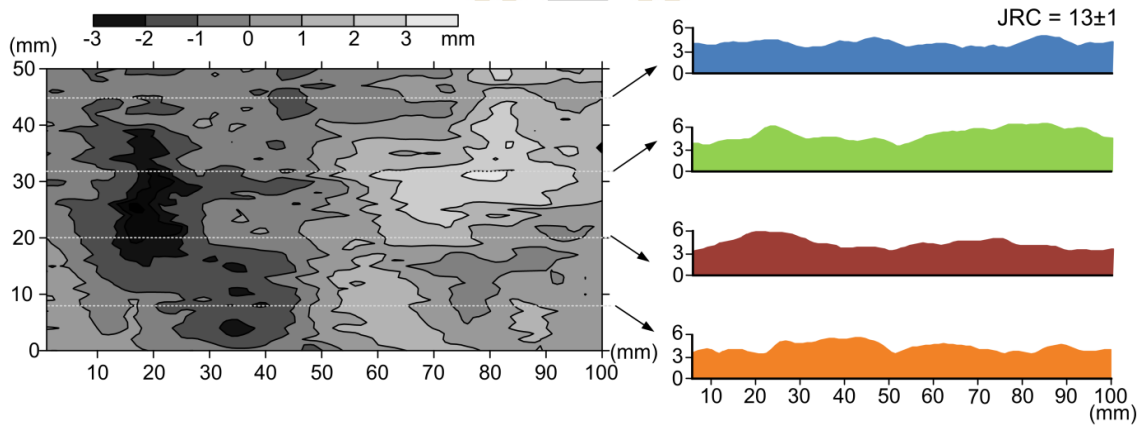
$$\tau = \sigma_n \tan \left[\theta_b + JRC \log \left(\frac{(\beta \ln(d_s) + \kappa) e^{-\lambda \sigma_s}}{\sigma} \right) \right] \quad (6.7)$$

- โดยที่ β , λ และ κ คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบในแต่ละอุณหภูมิ

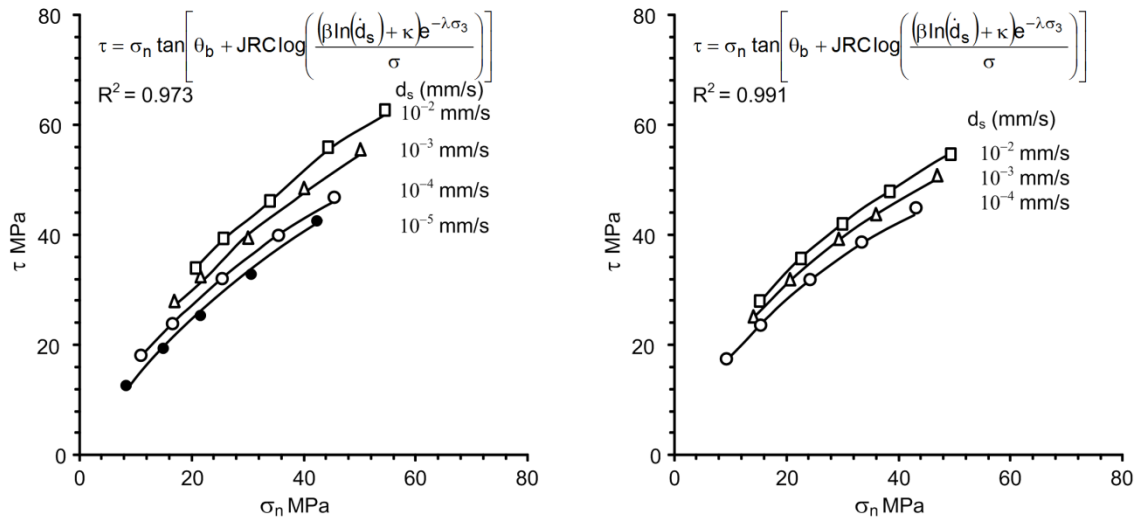
โดยสมการที่ 6.7 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมของกำลังเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิที่ต้องอยู่ในช่วงของการทดสอบเท่านั้น (รูปที่ 6.3) ซึ่งต้องตระหนักและพึงระวังในการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าว



รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน (ซ้าย) และ 473 เคลวิน (ขวา)



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างความขรุขระของรอยแตกหินแกรนิตชุดตึกที่สร้างขึ้นจากการตรวจวัดด้วยเลเซอร์



รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากภายใต้อุณหภูมิ 303 เคลวิน (ซ้าย) และ 473 เคลวิน (ขวา)



บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัย

ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ค่ากำลังเฉือนสูงสุดบนรอยแตกผิวขรุขระของหินแกรนิตชุดตากจะลดลงเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kleepmek และคณะ (2016) โดยผลกระทบของความเร็วในการเฉือนจะปรากฏเด่นชัดสำหรับรอยแตกที่มีความขรุขระมาก ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเห็นได้จากค่ากำลังเฉือนที่สูงสุด และผลกระทบของอุณหภูมิจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงเคมีของแร่ที่เป็นองค์ประกอบในหินนั้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และอุณหภูมิที่ 473 เคลวิน ยังส่งผลต่อความพรุนในเนื้อหิน คือทำให้น้ำที่อยู่ในเนื้อหินระเหยออกไป เนื้อหินจึงมีช่องว่างเพิ่มมากขึ้น (Chaki et al., 2008) ส่งผลให้หินนั้นๆ มีค่าความแข็งลดลง ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิจะทำให้ค่ากำลังเฉือนสูงสุดลดลง และระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่จุดกำลังเฉือนสูงสุดมีค่ามากขึ้น สำหรับการลดลงของค่ากำลังเฉือนภายใต้อุณหภูมิสูงในการศึกษานี้ยังขึ้นกับความเค้นล้อมรอบด้วย โดยที่ความเค้นล้อมรอบต่ำอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเฉือนมากนัก แต่เมื่อความเค้นล้อมรอบสูงขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้วยการทำให้ค่ากำลังเฉือนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fuenkajorn และ Naphudsa (2014) และ Stesky และคณะ (1974)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิ ได้นำผลการทดสอบดังกล่าวมาพัฒนาและสร้างเกณฑ์การแตกด้วยสมการบาร์ตัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ในสมการ ซึ่งสามารถใช้คาดคะเนกำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างหินได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และพบว่าค่ากำลังเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระขึ้นอยู่กับค่ากำลังกดสูงสุดของหินภายใต้อุณหภูมิต่างๆ โดยเกณฑ์นี้มีประโยชน์ในการคาดคะเนกำลังเฉือนของรอยแตกในหินที่มีความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัว และอุณหภูมิที่ต่างไปจากการศึกษานี้

จึงสรุปได้ว่าสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้คาดคะเนกำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวและอุณหภูมิของหินแกรนิตในระดับลึก โดยช่วงอุณหภูมิได้พิภพของมวลหินแกรนิตชุดตากที่ระดับความลึก 100 เมตร มีค่าเพียง 239 เคลวิน (Barr, 1979)

ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งนี้ คือเนื่องจากพื้นที่ผิวรอยแตกในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดค่อนข้างเล็ก (50×100 ตารางมิลลิเมตร) ถึงแม้ว่าจะได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานและมีแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล แต่การทดสอบในพื้นที่ผิวรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลดีมากขึ้นในการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้น และควรมีการทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่สูงมากกว่า 18 เมกะปาสคาล เนื่องจากในสภาวะจริงที่ระดับความลึกของรอยเลื่อนที่มีพลัง

ในประเทศไทยจะอยู่ลึกลงไปประมาณ 5 กิโลเมตร หรือมีค่าประมาณ 100 เมกะปาสคาล แต่ความเค้นล้อมรอบในการทดสอบครั้งนี้สูงสุดที่ 18 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าเท่ากับความลึกระดับใต้ดินประมาณ 1 กิโลเมตร จึงเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดสอบในครั้งนี้ทำให้ไม่สามารถทดสอบได้ใกล้เคียงกับสภาวะจริง นอกจากนี้ควรจะศึกษาผลกระทบของความขรุขระและขนาดรอยแตกต่อกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นล้อมรอบ อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน และอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษานี้

ผลการทดสอบจะมีค่าความแม่นยำมากยิ่งขึ้น หากมีการทดสอบภายใต้อัตราการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนที่ต่ำลงอย่างน้อย 1-2 เท่า ของค่าความเร็วเฉือนที่ทดสอบนี้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบยังไม่ใกล้เคียงกับสภาวะจริง เนื่องจากอัตราการเฉือนต่ำสุดในการทดสอบมีค่าประมาณ 360 มิลลิเมตรต่อปี อัตราความเร็วในการเฉือนควรจะมีค่าประมาณ 200 วัน แต่ใช้เวลาในการทดสอบเพียง 2 วัน ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวภายใต้ระยะเวลานานได้ เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดสอบที่ได้ไปเทียบเคียงกับรอยเลื่อนจริงทางภาคเหนือของประเทศไทยที่มีอัตราการเคลื่อนตัว 0.17-0.73 มิลลิเมตรต่อปี (Wiwegwin et al., 2014)



บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี (2555). **แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย**, กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี.
- กิจการ พรหมมา (2555). **ธรณีวิทยาสำหรับวิศวกร**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 551 หน้า.
- ปัญญา จารุศิริ และคณะ (2547). **การสำรวจรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault) ในเขตพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีและลำปาง-แพร่**, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ชุดโครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 1) สัญญาเลขที่ RDG4530030, สนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- สุมาลี ประจวบ (2538). ข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทย. **โยธาสาร** ปีที่ 7 ฉบับที่ 4 เมษายน 2538 หน้า 49-54.
- Barr, S. M. (1979). Hot springs and geothermal gradients in northern Thailand **Geothermics**, Vol. 8, no. 2.
- Barton, N. (1982). Shear strength investigations for surface mining. **Proceeding of the 3rd International Conference on surface mining**. pp.171-196.
- Crawford, A.M. and Curran, J.H. (1981). The influence of shear velocity in the frictional resistance of rock discontinuities. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 16: 505-515.
- Curran, J.H. and Leong, P. K. (1983). Influence of shear velocity on rock joint strength. **Proceeding of the International Congress on Rock Mechanics 5th 1983**, Melbourne, Australia.
- Dwivedi, R. D., Goel, R. K., Prasad, V. V. R., Amalendu, S. (2008). Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 45(3): 303-315.
- Fenton, C.H., Charusiri, P. and Wood, S.H. (2003). Recent paleoseismic investigations in Northern and Western Thailand. **Annals of Geophysics** 46(5): 957-981.
- Fuenkajorn, K. and Kemthong, R. (2007). Prediction of joint shear strengths of ten rock types using field-identified parameters. **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics**. September 13-14, 2007, Nakhonratchasima Thailand. pp. 195-210.

- Fuenkajorn, K. and Naphudsa, P. (2014). Effect of temperatures on shear strength of fractures in granite. *The journal of KMUTNB*. Vol. 24, No. 2, May-Aug.
- Grasselli, G. and Egger, P. (2003). Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 40(1): 25-40
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and Zimmerman, R. W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics** (4th. Edn.). Malden, Blackwell Publishing, 475 p.
- Kapang, P., Walsri, C., Sriapai, T., Fuenkajorn, K. (2012). Shear strengths of sandstone fractures under true triaxial stresses. **Journal of Structural Geology** 48: 57-71.
- Kato, A., Ohnaka, M., Shinogo, Y. and Hiromine, M. (2003). Effect of strain rate on constitutive properties for the shear failure of intact granite in seismogenic environment. **Geophysical research letters** 30(21): 1-4.
- Kleepmek, M., Khamrat, S., Thongprapha, T. and Fuenkajorn, K. (2016). Displacement velocity effects on rock fracture shear strengths. **Journal of Structural Geology** 90: 48-60.
- Ladanyi, B. and Archambault, G. (1970). Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. **Proceedings of the 11th Symposium of Rock Mechanics**. AIME, NewYork. pp. 105-125.
- Landanyi, B. and Archambault, G. (1972). Evaluation de la resistance au cisaillement d' un massif rocheux fragmente. **Proceedings of the 24th International Geological Congress** (pp. 249-260). Montreal.
- Li, B. and Jiang, Y. (2012). Evaluation of shear velocity of rock fractures by using repeated shear tests. **Proceedings of the Harmonising Rock Engineering and the Environment**. pp. 699-702.
- Naphudsa, P, Tepnarong, P. and Fuenkajorn, K. (2013). Effect of elevated temperatures on shear strength of fractures in granite. **Proceeding of the EIT-JSCE Joint International Symposium on International Human Resource Development for Disaster- Resilient Countries 2013**, September 12- 13, 2013, Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand.
- Rong-Qiang, W. and Shao-Xian, Z. (2006). Effects of temperature and strain rate on fracture strength of rocks and their influence on rheological structure of the lithosphere. **Chinese Journal of Geophysics** 49(6): 1576-1574.

- Singh, T.N., Verma, A.K., Kumar, T. and Dutt, A. (2011). Influence of shear velocity on frictional characteristics of rock surface. **Journal of Earth System Science** 120(1): 183-191.
- Stesky, R.M., Brace, W.F., Riley, D.K. and Robin, P.Y.F. (1974). Friction in faulted rock at high temperature and pressure. *Tectonophysics*, Vol. 23, pp.177-203.
- Wendai, L. (2000). Regression analysis, linear regression and probit regression In 13 chapters. *SPSS for windows: statistical analysis*, Beijing: Publishing House of Electronics Industry.
- Wiwegwin, W., Hisada, K.I., Charusiri, P., Kosuwan, S., Pailoplee, S., Saithong, P., Khaowiset, K. and Won-in, K. (2014). Paleoearthquake investigations of the Mae Hong Son Fault, Mae Hong Son region, Northeast Thailand. *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol.8, No.2, 1450007 (35 page).
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W. (2004). *Rock slope Engineering: civil and mining*, 4th Edition, New York: Spon Press, Madison.
- Xu, X., Kang, Z., Ming, j., Ge, W. and Jing, C. (2009). Research of microcosmic mechanism of brittle-plastic transition for granite under high temperature. **Procedia Earth and Planetary Science** 1(1): 432-437.
- Zhao, J. (1997). Joint surface matching and shear strength part b: JRC-JMC shear strength criterion. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34(2): 179-185.

ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering เมื่อปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows เมื่อปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์หินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 20 โครงการ ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีผลงานตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งสารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co., และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEACH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co., ในประเทศเนเธอร์แลนด์