

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

6.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินแกรนิต ภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ โดยอาศัยแนวคิดของการกักเก็บพลังงาน ความเครียดในตัวอย่างหินแกรนิตก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งพลังงานความเครียดนี้จะพิจารณาทั้ง พลังงานกล (ความเค้นล้อมรอบที่ให้กับตัวอย่างหินแกรนิต) และพลังงานความร้อน

6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของหินแกรนิต

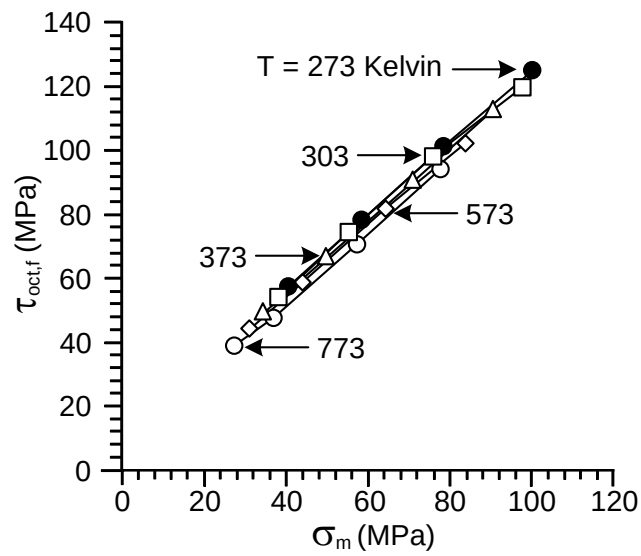
ตารางที่ 6.1 เสนอผลการทดสอบในรูปของค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ ค่าความเค้นเฉลี่ย ค่าปัจจัยความยืดหยุ่น พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน และพลังงานความเครียดเฉลี่ย ซึ่งค่าทั้งหมดนี้คำนวณจากค่าความเค้นและความเครียดที่จุดวิบัติในแต่ละตัวอย่าง รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนในสามมิติและความเค้นเฉลี่ย ผลระบุว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นเฉือนในสามมิติที่ทำให้หินแกรนิตเกิดการวิบัติจะมีค่าลดลง สำหรับค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) ผลที่ได้ระบุว่าค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.2

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 สามารถคำนวณค่าปัจจัยความยืดหยุ่นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามแกนโดยผลที่ได้ระบุว่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (G) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบก้อน (K) จะมีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.3

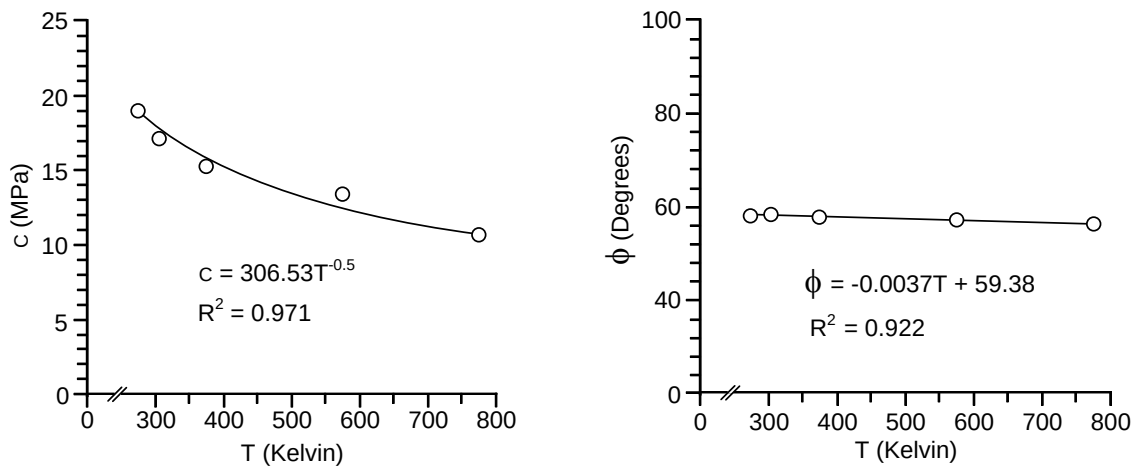
ความเค้นเฉือนที่จุดวิบัติ ความเค้นเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังกล่าวข้างต้นที่สัมพันธ์กับการผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบจะนำมาใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต

ตารางที่ 6.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและพลังงานความเครียดของหินแกรนิตที่จุดแตก

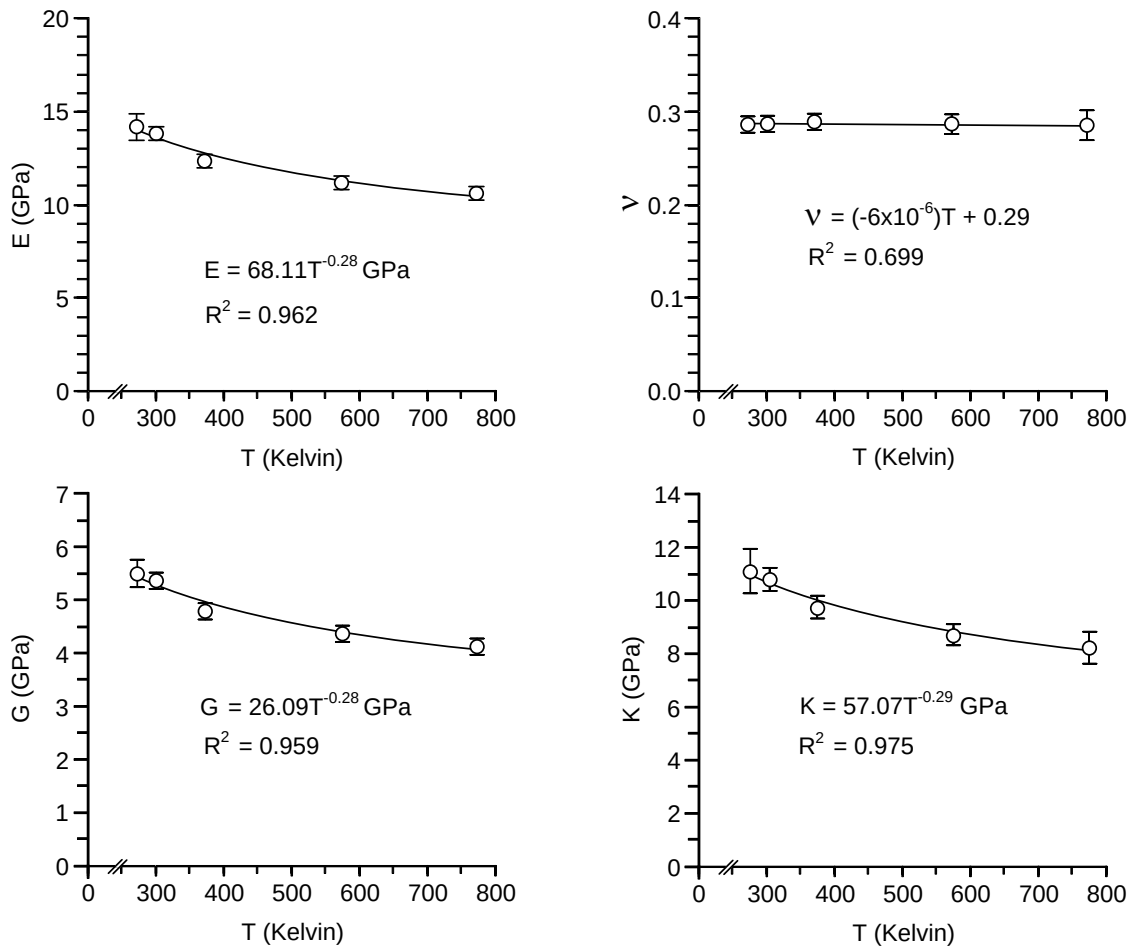
T (K)	σ_m (MPa)	τ (MPa)	E (GPa)	ν	G (GPa)	K (GPa)	W_d (MPa)	W_m (MPa)
273	43.67	61.79	13.35	0.28	5.17	10.41	0.55	0.09
273	58.67	78.37	14.05	0.28	5.47	10.81	0.84	0.16
273	78.67	101.45	14.87	0.29	5.72	12.34	1.35	0.25
273	100.33	125.28	14.53	0.28	5.68	10.94	2.07	0.46
273	Mean $\pm$ SD		14.19 $\pm$ 0.68	0.29 $\pm$ 0.01	5.51 $\pm$ 0.25	11.13 $\pm$ 0.84	–	–
303	39.67	56.01	13.63	0.28	5.33	10.23	0.44	0.08
303	55.67	74.54	13.93	0.28	5.44	10.55	0.77	0.15
303	76.33	98.12	13.92	0.29	5.39	11.15	1.34	0.26
303	98.00	120.00	13.74	0.29	5.31	11.12	2.03	0.43
303	Mean $\pm$ SD		13.81 $\pm$ 0.15	0.29 $\pm$ 0.01	5.37 $\pm$ 0.06	10.76 $\pm$ 0.45	–	–
373	34.67	49.06	12.41	0.28	4.85	9.36	0.37	0.06
373	50.00	66.18	12.24	0.28	4.77	9.36	0.69	0.13
373	71.33	90.28	12.33	0.30	4.76	10.02	1.28	0.25
373	91.00	112.49	12.38	0.30	4.78	10.11	1.99	0.41
373	Mean $\pm$ SD		12.34 $\pm$ 0.07	0.29 $\pm$ 0.01	4.79 $\pm$ 0.04	9.71 $\pm$ 0.41	–	–
573	30.00	42.63	11.00	0.28	4.29	8.46	0.32	0.05
573	44.33	58.77	11.40	0.27	4.48	8.37	0.58	0.12
573	64.67	81.62	11.35	0.29	4.42	8.80	1.13	0.24
573	84.33	102.04	11.00	0.30	4.23	9.17	1.85	0.39
573	Mean $\pm$ SD		11.19 $\pm$ 0.22	0.29 $\pm$ 0.01	4.35 $\pm$ 0.11	8.70 $\pm$ 0.36	–	–
773	24.33	39.00	10.67	0.28	4.17	8.08	0.27	0.04
773	37.00	47.68	10.62	0.26	4.20	7.47	0.41	0.09
773	57.67	71.14	10.60	0.30	4.08	8.79	0.93	0.19
773	78.00	94.13	10.61	0.29	4.10	8.54	1.62	0.36
773	Mean $\pm$ SD		10.63 $\pm$ 0.03	0.28 $\pm$ 0.01	4.14 $\pm$ 0.06	8.22 $\pm$ 0.58	–	–



รูปที่ 6.1 ความเค้นเฉือนในสามมิติที่จุดวิกฤติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ย



รูปที่ 6.2 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในในฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 6.3 ค่าปัจจัยความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของอุณหภูมิ

6.3 การพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต

งานวิจัยนี้ได้นำกฎของพลังงานความเครียดมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปร โดยสมมติว่าภายใต้พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง พลังงานความเครียดเปี่ยงเบนจะมีค่าคงที่ ผลจากการคำนวณเชิงสถิติระบุว่าพลังงานความเครียดเปี่ยงเบน (W_d) จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ดังสมการ

$$W_d = A \cdot W_m + B \quad (6.1)$$

ค่าคงที่ A และ B จะขึ้นกับความแข็งและความเค้นยึดติดของหินแกรนิตในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติของผลการทดสอบ เป็นที่น่าสังเกตว่าความสัมพันธ์ระหว่าง W_d และ W_m มีความคล้ายคลึงกันในประเด็นอัตราการเพิ่มของค่า W_d ต่อค่า W_m (ความชื้น) ที่พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนมีค่าลดลง ความแตกต่างของเส้นพลังงานความเครียดในแต่ละอุณหภูมิสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของพลังงานความร้อนของตัวอย่างหินแกรนิตนั่นเอง

ถ้าสมมติให้หินแกรนิตมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงก่อนเกิดการวิบัติค่า W_d และ W_m สามารถคำนวณจากผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างหินได้ดังสมการ

$$W_d = \frac{3}{4} \left(\frac{T_{oct}^2}{G} \right) \quad (6.2)$$

$$W_m = \left(\frac{\sigma_m^2}{2K} \right) \quad (6.3)$$

โดยที่คุณสมบัติเชิงยืดหยุ่น G และ K สามารถคำนวณในฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ดังนั้น ความแข็งของหินแกรนิตในรูปของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจึงสามารถนำมาสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่ต่างกันได้ จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงยืดหยุ่นต่างๆ กับการผันแปรของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E = 68.17 \cdot T^{-0.28} \quad (6.4)$$

$$G = 26.09 \cdot T^{-0.28} \quad (6.5)$$

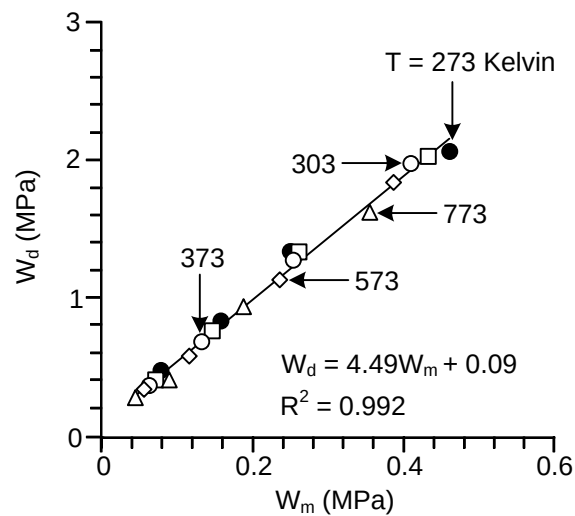
$$K = 54.07 \cdot T^{-0.29} \quad (6.6)$$

$$v = (-6 \cdot 10^{-6}) \cdot T + 0.29 \quad (6.7)$$

โดยการแทนค่าสมการ (6.4) ถึงสมการ (6.7) ลงในสมการ (6.2) และ (6.3) ซึ่งค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดวิบัติควรจะคำนึงถึงผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์การแตก หลังจากแทนค่าดังกล่าวข้างต้นค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่ได้รวมทั้งผลกระทบของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบสามารถแสดงอยู่ในสมการเดียวคือ

$$W_d = A_{Th} \cdot W_m + B_{Th} \quad (6.8)$$

โดยที่ค่า A_{Th} และ B_{Th} เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความแข็งแรงและการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ผันแปรของหินแกรนิต สำหรับหินแกรนิตที่มีค่า $A_{Th} = 4.49$ และค่า $B_{Th} = 0.09$ MPa เมื่อนำสมการดังกล่าวมาเทียบเคียงกับผลการทดสอบจะมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ $R^2 = 0.992$ ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 พลังงานความเครียดเปื่อยเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย