

(51) 温度履歴を受けた花崗岩の力学特性

Mechanical Properties of Granite Undergone High Temperatures

高治一彦*・下河内隆文*・鈴木吉夫*・岩本 宏*

Kazuhiko TAKAJI, Takafumi SHIMOGOCHI, Yoshio SUZUKI and Hiroshi IWAMOTO

This paper shows the mechanical properties of unconfined Granite samples undergone high temperatures (100°C and 150°C) in the laboratory. The properties are mainly examined in view of existing microcracks, cracks through high temperatures and the growth of cracks under loading.

1. まえがき

岩盤が対象となる種々の地下利用が行われ、今後も新たな利用が計画されており、その中には温度に対する考慮が必要なものもある。例えば高レベル放射性廃棄物地層処分において、核種移行に対する天然バリアと位置づけられる岩盤は、掘削にともなう応力の再配分とともに、廃棄体による温度上昇の履歴を受け、特に掘削空洞周辺の岩盤はこれらの影響が大きい。

一般的に硬岩の場合、空洞周辺の岩盤は、一軸状態に近く力学的に脆性挙動を示す。硬岩の脆性的な変形・破壊挙動に関しては、多くの研究が行われている。Martin他¹⁾のまとめを例にとると、単一軸載荷時の岩石応力-ひずみ曲線は、既存微小クラックの閉合(領域Ⅰ)、線形で均質弾性体的挙動(領域Ⅱ)、載荷軸に平行なクラックの進展(領域Ⅲ)、不安定なクラックの進展(領域Ⅳ)、破壊以降(領域Ⅴ)に区分され、岩石内のクラックによりその挙動が説明されている。工藤他²⁾は、花崗岩に力学的異方性があり、これは主に石英内のクラックの配向性と直交性にあることを報告している。また、温度履歴による岩盤の構造変化として、温度の上昇にともない微小クラックが発生すると言われており³⁾、クラックにより支配されている岩盤の力学挙動及びその異方性に及ぼす温度履歴の影響を把握することは重要である。

本論文では、岩盤の力学挙動及びその異方性に及ぼす温度履歴の影響を調べる目的で、温度履歴を受けた岩石の無拘束下の物性と力学挙動に関する室内実験結果を示すとともに、初期潜在クラック、温度履歴により発生する微小クラック、載荷によるクラックの観点から考察を行った。

2. 供試体及び実験の概要

今回実験に用いた試料は、茨城県産の一般に稲田花崗岩と呼ばれているものである。本研究では工藤他²⁾に従い、最も割れやすい面をrift-plane(以下R面)、これと直交する2番目に割れやすい面をglain-plane(G面)、これらに垂直な面をhardway-plane(H面)とし、各面に垂直な方向をR軸、G軸、H軸と呼ぶことにした(図-1)。各軸方向に直径約50mm、長さ約100mmの円柱形供試体を作製し、これを常温、気乾状態で数日間保管し、パルス透過法による弾性波速度(縦波)を計測した後、プログラム制御可能なオープンで所定

* 正会員 (株)竹中工務店 技術研究所

の温度履歴を与えた。履歴を与えた温度は100°Cと150°Cである。本論文では割愛したが、ひずみゲージによる線膨張係数の測定を行ったため、昇温は多段階的に行い、室温から始め40°Cより20°Cおきに1時間保持した(図-2)。しかし、温度は供試体近傍で熱伝対により測定したため、高温になるにつれて保持したオープン制御温度とは若干のずれが生じている。昇温速度は熱衝撃の影響を与えないよう1°C/minとし、降温は自然冷却とした。

室温に戻ったところで再度弾性波速度を測定し、一軸圧縮試験を行った。载荷は最大軸荷重4500kNのMTS社製油圧サーボコントロール試験機を用い、ひずみの測定には軸方向、周方向の供試体接触型計測装置を用いた。制御方法は周方向の伸び一定制御($\dot{\epsilon} = 2.25 \times 10^{-6} / \text{sec}$)とした。

実験本数は各軸方向、各履歴温度水準で3本ずつの測定としたが、G軸方向、100°C履歴に関しては1本計測不備があったため2本の測定とした。

圧裂試験には、直径約50mm、長さ約50mmの円柱形に整形したH軸、G軸方向の供試体を用いた。実験に先立ち、1°C/minで100°C、150°Cまで上昇させて1時間保持した後、自然冷却させ、R、G、H面を圧裂面として実験を行った。载荷速度を0.1kN/secとし、試験本数は各温度履歴水準、各面方向で1本ずつである。

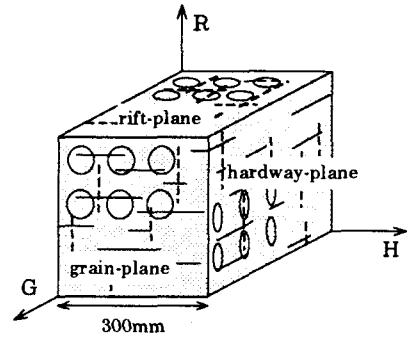


図-1 異方面とコアサンプリング

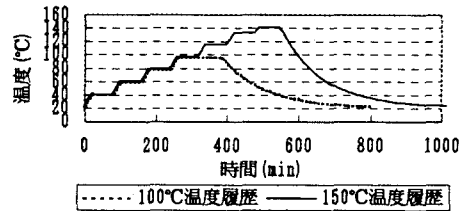


図-2 履歴温度と時間

3. 実験結果

3・1 非線形性とその領域区分

一軸圧縮試験結果により、载荷中の応力-ひずみ挙動の非線形性とその領域区分について検討を加えた。

図-3、4は破壊強度(q_u)までの応力(σ)を約5%ごとに区切り、各応力レベル±5%、計10%区間の応力増分を軸ひずみ増分で割った値をその応力レベルの軸変形係数、横ひずみ増分で割った値の絶対値を横変形係数とした一例である。なお、図-3には後述する弾性波速度相当と体積ひずみ最小時の応力レベルも併せて示している。図-3から軸方向に関しては、3つの領域に分かれ、①破壊応力の30%付近までは非線形で剛性が低く、②約30%~70%の間ではほぼ線形で弾性的であり、③70%を越えると非線形で剛性が低下していくことが分かる。図-4から横方向に関しては全応力レベルで非線形であるが、破壊応力の20%までと80%を越えた辺りから非線形性が大きくなり剛性が低下することが分かり、これはほぼ軸方向の領域①、③に対応する。これらは全てのケースでほぼ同様な傾向となり、応力-ひずみの定性的な非線形性の変化に初期潜在クラックの異方性及び温度履歴の影響はなかった。

载荷初期の段階では载荷方向に垂直な方向の微小クラックが閉塞する段階である。更に载荷を続けると弾

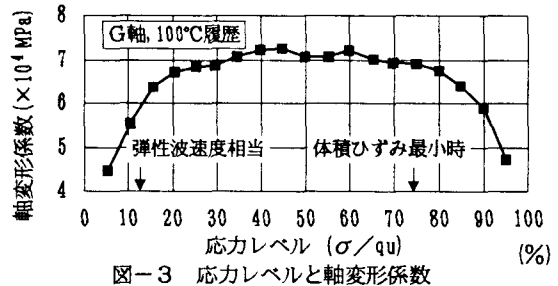


図-3 応力レベルと軸変形係数

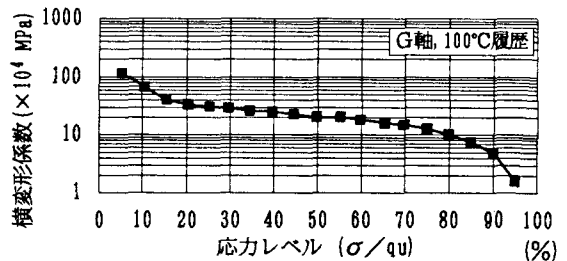


図-4 応力レベルと横変形係数

性変形のみとなる。Martin他¹⁾は、変形性が線形である領域の弾性係数を用いて載荷軸に平行なクラックの進展領域の開始点としてcrack-initiation stress (σ_{ci})を求めているが、今回の結果は全応力レベルで横方向の変形は非線形となり、全応力区間で軸方向にクラックが発生、進展し、破壊直前(破壊応力の約80%以上)では加速度的に進展すると言える。

次に、一軸圧縮試験結果から求めた弾性波速度の計算値が実測値に等しいときの応力レベル(弾性波速度相当)の平均値と、体積ひずみが最小となるときの応力レベルの平均値を表-1に示す。尚、弾性波速度の計算値は次式による。

$$V_p = (E/\rho)^{1/2}$$

表-1 弾性波速度相当と体積ひずみ最小時の応力レベル(%)

履歴温度	弾性波速度相当			体積ひずみ最小時		
	H軸	G軸	R軸	H軸	G軸	R軸
100°C	16.5	20.2	9.2	66.7	72.0	76.0
150°C	13.6	8.5	8.6	71.5	72.5	76.1

弾性波速度相当の応力レベルについては、8~20%の間にあり、領域①における変形の非線形性は初期構造に依存することを示唆している。最小体積ひずみの応力レベルは、約66~76%で、軸変形係数及び横変形係数の非線形性が顕著となる領域③の開始点にほぼ一致しており、これ以上の応力レベルが不安定なクラックの進展する領域という他の報告¹⁾と整合している。

3・2弾性波速度(Vp)

弾性波速度の計測は岩石内部のクラックの配向性に関し、非破壊的に情報を得る有効な手段である。温度履歴を与える前の各軸方向の初期潜在クラックに関する情報、温度履歴によるクラックの変化に関する情報を把握するため、弾性波速度の結果について検討した。

表-2 弾性波速度測定結果

弾性波速度 Vp (km/sec)	履歴温度	H軸方向	G軸方向	R軸方向
	履歴前	4.76	4.76	4.41
	100°C	4.40	4.28	4.11
	150°C	4.05	4.06	3.65

弾性波速度の測定結果を表-2に示す。履歴前の値は各軸方向6本の平均値、履歴後の値はその内の3本の平均値である。温度履歴を与える前においてH軸、G軸方向でほぼ同じ値をとり、R軸方向で他の2方向に対し約7%遅くなった。つまり、今回用いた供試体はH面、G面内の初期潜在クラック密度に大きな差が無く、R面に平行な初期潜在クラックが著しく発達していると言える。また、履歴温度の上昇にともない、全ての軸方向で履歴前に対し100°C履歴で7%以上、150°C履歴では15%以上減少した。これは、温度履歴による初期潜在クラックの拡大や、鉱物粒子間の線膨張係数の違いによる微小クラックの発生によるものと考えられ、その変化量は温度履歴を与える前の異方性による速度差よりも大きい結果となった。また、温度履歴が弾性波速度に与える影響はほぼ等方的であり(図-7参照)、温度履歴によりランダムにクラックが進展、発生すると考えられる。ただし、温度履歴を与える前の測定は気乾状態で行ったため、温度履歴を受けたものより含水比が大きく、その影響も含まれていると思われる。

3・3力学試験結果

力学試験の結果を表-3に示す。ここで割線弾性係数(E)は、原点と破壊時の割線弾性係数、体積ひずみ変化量($\Delta \epsilon_v$)は、体積ひずみの破壊時(ϵ_{vf})と最小値(ϵ_{vmin})の差をとったものである。一軸圧縮試験結果はG軸方向、100°C履歴のみ2本、その他は3本の平均値である。圧裂試験は1本づつの測定結果である。

表-3 力学試験結果

一軸圧縮試験	履歴温度	H軸	G軸	R軸
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	100°C	189	193	195
	150°C	203	218	203
破壊ひずみ ϵ_{af} ($\mu\text{mm/mm}$)	100°C	2920	3040	3090
	150°C	3280	3390	3270
割線弾性係数 $E = \epsilon_{af}/q_u$ (MPa)	100°C	64600	63600	63200
	150°C	61700	64200	62000
破壊時周ひずみ ϵ_{lf} ($\mu\text{mm/mm}$)	100°C	1900	2030	1570
	150°C	1790	1860	1390
体積ひずみ変化量 (MPa) $\Delta \epsilon_v = \epsilon_{vf} - \epsilon_{vmin}$	100°C	1890	2150	1270
	150°C	1280	1220	860
圧裂試験				
圧裂強度 σ_t (MPa)		H面	G面	R面
	100°C	9.22	8.30	6.12
	150°C	9.73	9.68	6.63

この結果を各温度履歴水準内における異方性軸の比較と各軸の履歴温度水準間の比較の2つの観点でまとめ、さらに一軸圧縮試験結果によ

り、前述した3つの線形・非線形領域について、各実験条件毎の結果を詳細に検討した。

(a) 各温度履歴水準内における載荷軸(面)間の比較

各軸、面方向による物性の異方性を調べるため、各履歴温度水準内のH軸、(圧裂はH面)に対する比をとったものが図-5、図-6である。

一軸圧縮強度(qu)、破壊ひずみ(ϵ_{af})、割線弾性係数については100°C履歴で±5%程度の差であり、また、150°C履歴では一軸圧縮強度がG軸で約7%大きくなった以外は、H軸とR軸でほとんど差が無く、異方性の影響は小さいと言える。つまり、軸方向の力学特性、変形特性は各履歴温度水準内で載荷軸によらずほぼ同じ挙動を示す。しかし、破壊近傍でのダイラタンシー特性の指標となる体積ひずみ変化量は、R軸はH軸に対し33%(100°C履歴)、46%(150°C履歴)小さな値となった。この現象に関する考察は詳細に後述する。また、圧裂強度(σ_t)も1本づつの結果ではあるが、R面はH面に対し34%(100°C履歴)、32%(150°C履歴)小さな値となった。

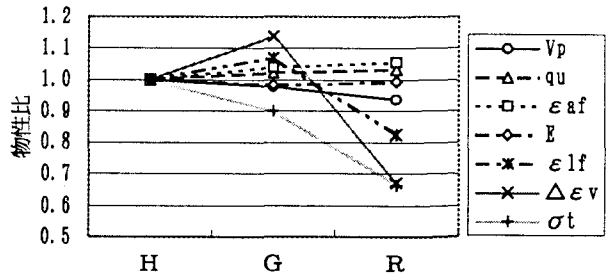


図-5 100°C履歴におけるH軸(面)に対する比

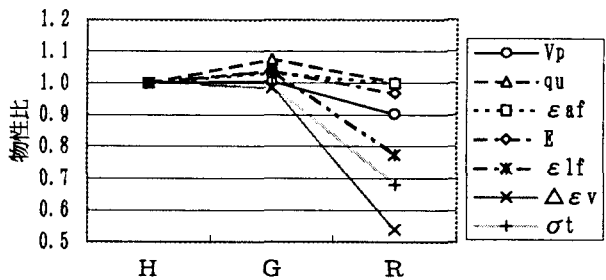


図-6 150°C履歴におけるH軸(面)に対する比

(b) 各軸の履歴温度水準間の比較

履歴温度水準の差が、物性に及ぼす影響を調べるため、各軸の100°C履歴に対する150°C履歴の比をとったものを図-7に示す。

一軸圧縮強度は100°C履歴に対し150°C履歴は7%(H軸)、13%(G軸)、4%(R軸)増加している。圧縮強度は弾性波速度などに比べ、構造に比較的鈍感な性質をもつ物性値であるが、すべての供試体で強度が増加した。花崗岩の高温下における一軸圧縮強度が常温より増加した例もあり⁴⁾、含水比の影響も含め検討課題である。圧裂強度についても、一軸圧縮強度と同様に6~17%増加した。破壊ひずみは、一軸圧縮強度の増加とほぼ同等な増加の傾向を示している。また、体積ひずみ変化量が一番大きな影響を受けており、150°C履歴は100°C履歴に対し18%(H軸)、28%(G軸)、33%(R軸)小さな値となった。

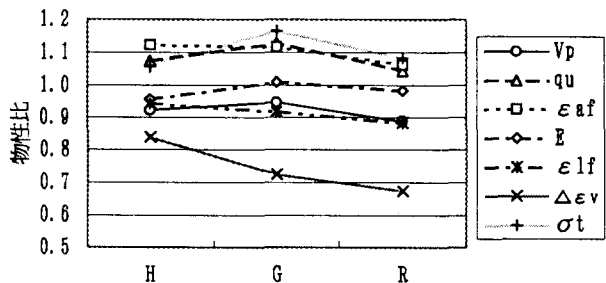


図-7 100°C履歴に対する150°C履歴の比

(c) 各実験条件毎の線形・非線形領域の比較

以上の載荷軸間、温度履歴水準間の比較で、ダイラタンシー特性の指標である体積ひずみ変化量が最も大きな影響を受けることが分かった。各実験条件で定量的な傾向の考察を含め、この結果を詳細

表-4 各応力範囲における変形係数の平均値 (MPa)

応力区間 %	履歴温度	軸変形係数			横変形係数		
		H軸	G軸	R軸	H軸	G軸	R軸
0~20% 領域①	100°C	52700	53900	52300	487000	579000	609000
	150°C	47100	52500	46100	736000	565000	602000
40~60% 領域②	100°C	73800	72900	72500	206000	217000	237000
	150°C	71700	72400	72800	205000	214000	234000
80~100% 領域③	100°C	60600	57300	55300	31100	28200	41200
	150°C	50400	50900	61200	37200	41500	55700

に検討するために、前述した3つの領域の代表値として、破壊強度の0~20% (領域①), 40~60% (領域②), 80~100% (領域③) の各区間応力増分を、軸ひずみ増分、横ひずみ増分で割った値を軸変形係数、横変形係数とし、まとめた(表-4)。

軸変形係数に関しては、載荷軸間において、割線弾性係数の比較を反映し、(G軸, 150°C履歴でやや大きな値となったが) ほぼ差がなかった。また、領域①において、温度履歴水準間では150°C履歴が100°C履歴より11% (H軸), 12% (R軸) 小さくなった。載荷初期における載荷方向に垂直なクラックの閉塞による非線形性は、初期潜在クラックの異方性より、温度履歴により進展、発生したクラックの方が、より大きな影響を与えることを示している。領域②の線形領域では、温度履歴水準間でも同じと言え、載荷軸間、本実験における履歴温度の差は線形性に影響を及ぼさない。

横変形係数は、H軸, 150°C履歴の領域①が極端に大きいのを除いて全応力区間でR軸が最も大きい。載荷軸間において軸変形係数は差がなかったことから、ダイラタンシーの発生は軸に平行な面のクラックが支配的であると言え、R軸方向載荷に比べ軸に平行な面にR面が存在するH軸, G軸方向載荷で横変形係数が小さいことから、温度履歴を受けた後も初期潜在クラックの配向性がダイラタンシーに影響を残すと言える。また、領域① (H軸, 150°C履歴を除く)、領域②では履歴温度水準間で差はないが、領域③のみで100°C履歴に対し150°C履歴で19% (H軸), 47% (G軸), 35% (R軸) 大きな値となった。温度履歴による微小クラックは100°C履歴に対し150°C履歴で載荷前からより多く進展、発生している前提から考えると、初期潜在クラックも温度履歴により新たに進展、発生した微小クラックも載荷時ダイレイションのクラック進展への関与が小さくなると言える。

4. あとがき

異方性を考慮し、温度履歴を受けた花崗岩について各種の物性値について、クラックの観点からまとめた。また、載荷時の非線形性についても検討した。今回の結果からは、次のような結論が得られた。

- (1) 温度履歴を受けると弾性波速度が低下する。これは温度履歴による微小クラックの拡大、進展によるものと考えられるが、その方向性は等方的である。
- (2) 履歴温度が高くなると、体積ひずみ変化量が減少することから、初期潜在クラックも温度履歴により新たに発生した微小クラックも載荷時ダイレイションのクラック進展への関与が小さくなると言える。
- (3) しかし、ダイラタンシーを支配する横変形係数が全応力レベルでR軸が大きく、ダイラタンシーには初期潜在クラックの配向性は、温度履歴後も影響を残している。
- (4) 履歴温度が高くなることにより、一軸圧縮強度、圧裂強度が高くなった。
- (5) 今回の結果では横方向の変形は全応力レベルで非線形で、Martin他が定義している線形で均質弾性体的挙動は認められなかった。また、破壊までの応力-ひずみは3つの領域に区分され、軸方向、横方向とも変形は破壊応力の約30%~70%区間(領域②)で温度履歴の影響はなかった。なお、同応力区間の軸方向の変形は、ほぼ線形であるとともに、初期潜在クラックによる異方性の影響もなかった。

5. 参考文献

- 1) C. D. MARTIN et. al : The Progressive Fracture of Lac du Bonnet Granite, Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 31, No. 6, pp. 643-659, 1994
- 2) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二 : 花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布, 土木学会論文集, 第370号/III-5, pp. 189-197, 1986
- 3) 酒井 昇 : 一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動, 応用地質, 第28巻, 第1号, pp19-24, 1987
- 4) 北野晃一他 : 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 第29巻, 第3号, pp36-47, 1988