高温・高圧水環境下における花崗岩のせん断破壊とすべり軟化挙動[†]

高橋 亨* 橋田 俊之*

Shear Fracture and Slip Weakening Behavior on Granite under High Pressure and High Temperature Water Conditions

by

Toru TAKAHASHI* and Toshiyuki HASHIDA*

In this study, the triaxial deformation experiments were conducted to investigate the temperature and pressure effects on fracture strength of a granite using slip-weakening model. The experiments were conducted at temperatures and pressures up to 600°C and 150MPa under water environment. Experimental results show that the peak differential strength decreases with increasing temperature. In contrast, the slip-weakening behavior shows temperature insensitive within the temperature range of this study except 600°C conditions. We measured the fracture energy using slip-weakening curve at various temperature and pressure conditions. From our experimental results, under the same effective normal stress conditions, we could not observe the effect of temperature and pressure in our experimental conditions. Since the tectonic stresses applied to rock mass are constant at the geothermal field, these results suggest that it is available to apply the slip-weakening model to explain the crack propagation behavior in geothermal field.

Key words : Rock, Shear fracture, Slip-weakening, Triaxial deformation, Supercritical water, Geothermal energy

1 緒言

近年、日本で実施された深部地熱資源調査^{1)~3)}において、岩手県葛根田地域における深部花崗岩体において、既存地熱貯留層の直下約 3500m の深度において温度が 500°C を超える有望な地熱地帯が発見され、次世代の地熱エネルギー源としての期待が高まっている。水圧破碎技術を用いて地下き裂システムを設計し、水循環により抽熱をおこない発電に利用する高温岩体 (Hot Dry Rock, HDR) あるいは高温湿潤岩体 (Hot Wet Rock, HWR) 方式による地熱貯留層の開発⁴⁾においては、熱抽出媒体となる流体、および熱交換面となるき裂の存在が不可欠である。しかしながら葛根田地熱貯留層においては、熱水の流路となる天然の地下き裂がほとんど存在せず、また熱抽出媒体である水も存在しない可能性が示唆されており、水圧破碎によるき裂設計技術の開発が鍵となっている。

これまでの研究において、地下貯留層の水圧破碎によるき裂進展評価においては結合モデルであるすべり軟化曲線の有用性が示唆されている。しかしながら葛根田貯留層のような高温・高圧環境下における岩石のすべり軟化挙動に関する知見は十分ではない。さらに葛根田貯留層においては、欧州の深部高温地熱貯留層^{5), 6)}で観察されているように温度、圧力ともに水の臨界点 (374°C, 22.1MPa) を超える超臨界水環境にあるものと考えることができ、超臨界水環境下における岩石のき裂進展挙動評価が重要な課題となっている。

本研究においては、超臨界水環境のような高温・高圧水環境下における岩石のせん断破壊挙動をすべり軟化則に基づき評価することにより、その温度、圧力依存性について検討を行った。

2 実験方法

2.1 高温・高圧三軸圧縮試験

本実験の試験片として福島県飯館村産の花こう岩を用いた。その鉱物組成を Table I に示す。平均粒径は約 1.5mm であり、空隙率は約 0.8% である。試験片の形状は円柱形であり、長さ 60mm、直径 20mm の試験片を用いた。試験片の作成は、岩石ブロックからダイヤモンドコアビットで岩石コアを作成した後、その両端の平行をとるために平面研削盤で研削加工して、実験に用いた。花こう岩は異方性を有しているため、本実験においては、弱面 (rift plane) が軸荷重を負荷する方向と平行になるよう試験片を作成した。試験片作成時に付着した汚れ・不純物等を取り除くために、試験片は全て実験前にアセトンおよび蒸留水を用いて超音波洗浄機で洗浄を行う。その後、真空乾燥機を用いて 24 時間以上乾燥させた。水環境条件において用いる試験片については、試験片中

Table I. Mineral composition of Iitate Granite.

Mineral	Quartz	K-feldspar	Plagioclase	Biotite	Others
Vol. %	37.1	21.8	34.0	6.3	0.6

† 原稿受理 平成 15 年 11 月 10 日 Received Nov. 10, 2003

* 正会員 東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉, Fracture and Reliability Res. Inst., Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai, 980-8579

の間隙に蒸留水を十分浸透させるために、グラファイトスリーブと共に蒸留水の中に24時間以上浸してから実験を行った。

本実験の実験装置として、岩石強度特性評価超臨界装置（三菱重工業株式会社製）を用いた。本装置は、封圧、間隙圧、温度、軸圧をそれぞれ独立にコンピュータ制御することが可能であり、最大1Hzのサンプリング速度でデータの取り込みを行う。それぞれの環境条件変数の制御範囲は、封圧が0～150MPa、間隙圧が0～150MPa、温度が常温～600℃、軸圧は100tonであり、本研究において対象としている地殻深部の環境条件を十分に模擬できるものである。また封圧媒体、間隙圧媒体として蒸留水を用いている。Fig. 1に試験装置主要部の概略図を示す。

実験方法としては、まず試験片を厚さ3mmのグラファイトスリーブに挿入する。グラファイトスリーブを用いる理由として、せん断すべりが生じたときに、試験片が破断することにより、後で述べる銀ジャケットが傷ついて破けるのを防ぐ緩衝材とするためである。またグラファイトは多孔質体であるため、間隙水がグラファイトに浸透し、試験片に間隙圧が均一にかかるようにする働きがある。Fig. 2に示すように間隙水の注入は試験片の上側からのみ行うが、花こう岩は透水性が低いいため、間隙水が全体に浸透して間隙圧が一定になるまでに時間がかかる。そこでグラファイトスリーブで覆い、側面からも間隙水を送ることで浸透までの時間を短縮することができる。グラファイトスリーブは試験片と同様に蒸留水に浸し、十分に蒸留水を含んだ状態で実験に用いる。次に、試験片の上下に材質が窒化硅素（ Si_3N_4 ）のスペーサーを設置する。上部スペーサーには間隙水の流路となる穴が設けてある。試験片とスペーサーの間には、厚さ0.1mmのモリブデン薄板を挟む。これは圧縮試験を行うと、試験片とスペーサーの間に摩擦力が生じてしまい、それにより試験片またはスペーサーが破壊してしまう恐れがある。そこでモリブデン薄板を挟むことにより試験片とスペーサーの間の摩擦力を低減する。このように試験片をスペーサーで

挟んだものの全体に厚さ0.3mmの銀ジャケットを被せる。それを下部ピストンに設置し、銀ジャケットの端部にビニールテープを巻いてシールする。シール部分は高温にならないため、ビニールテープでシールすることにより、封圧媒体となる水が銀ジャケット内部に流入するのを防ぎ、封圧と間隙圧をそれぞれ独立に制御して実験を行うことが可能となる。銀ジャケットとグラファイトスリーブの強度は試験片の強度に比べて非常に小さいため無視できる。

その後、熱電対を試験片の上・中・下の位置に配置する。中央の熱電対のフィードバック信号に従い、温度の制御を行う。試験片とスペーサーを銀ジャケットで覆ったものに、ヒータ線を巻きつけた銅製のヒーターボビンをかぶせ、さらに断熱用のパイロフェライトとステンレスの多層断熱構造となっている容器で全体を覆う。このヒーターボビンにより試験片の周囲だけを集中的に加熱することにより、封圧媒体である水が対流を起して温度の不均一が生じるのを防ぐ。そして、上部ピストンを設置し、下部ピストンと同様に銀ジャケットの端部をビニールテープでシールする。この試験片部を圧力容器内に設置し、上部ピストンに空けられている間隙水用の穴に配管を取り付ける。圧力容器に設置後、封圧用配管、ヒータ、熱電対用配線を接続する。

試験片をセットした後、封圧、間隙圧を試験条件の設定値まで昇圧する。間隙水は、間隙水圧系統の配管を真空引きした後、蒸留水を注入して実験を行う。間隙圧を上昇させるときには、封圧と約30MPaの差圧を保つようにする。これは、封圧により試験片の空隙が閉じて、間隙水が浸透しなくなるのを防ぐためである。封圧、間隙圧が所定の圧力に達した後、温度を昇温速度5℃/minで上げていく。温度が設定値に達したら、試験片周辺の温度勾配がなくなり、内部の間隙水の分布が均一になるように、試験片の周辺状態が安定となるまで約1時間保持する。そして完全に安定状態となった後、ピストンを軸変位速度0.02mm/minで動かしていき、試験片が完全にせん断破壊するまで軸荷重を負荷していく。破断後はヒータ電源を切り、封圧媒体の蒸留水の温度が下がった後に、封圧、間隙圧を下げ、設置と逆の手順で試験片を取り出す。

2・2 せん断パラメータの評価

試験片に軸応力 σ_1 、封圧 σ_3 が作用したときに、破断面が生じたとする。そのときの破断面と垂直軸方向との破壊角 θ をとると、せん断破断面に作用するせん断応力 τ と法線応力 σ_n は次式で表される。

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} (1 - \cos 2\theta) \quad (2)$$

ここで、法線応力は間隙圧 P_p の影響を受けているため、実際に破断面に作用する有効法線応力 σ_n^{eff} は次式で示される。

$$\sigma_n^{eff} = \sigma_n - P_p \quad (3)$$

Fig. 1. Schematic diagram of high temperature-pressure autoclave system used for triaxial deformation test.

よって試験後の破断した試験片を取り出し、その破断面の破壊角 θ を測定することにより、封圧、間隙圧、軸荷重より、破断面に作用したせん断応力 τ と有効法線応力 σ_n^{eff} を上式に従って求め、せん断応力と有効法線応力を用いてせん断破壊挙動の評価を行う。また、得られたせん断応力とすべり変位量の関係より、Fig. 2 に示すように最大せん断応力から残留摩擦応力に降下する過程がすべり軟化曲線となる。得られたすべり軟化曲線の面積を積分することにより、せん断すべりにおける破壊エネルギーを得ることができる。

3 実験結果および考察

3.1 すべり軟化曲線の評価

Fig. 3 に、封圧 P_c が 100MPa、間隙圧が 25MPa の条件下において、温度を室温、300℃、450℃、600℃と変化させて三軸圧縮試験を行ったときの軸方向差応力-荷重線変位曲線の代表例を示す。Fig. 3 より、温度が高温条件になるに従い、変形の早期に弾性変形領域から外れて非弾性変形を開始しており、高温条件ほど最大差応力が低下している様子が観察される。また、Fig. 4 に温度が室温、封圧 100MPa、間隙圧 25MPa で実験を行った後の試験片の破断写真を示す。本実験で行った全ての試

Fig. 2. Calculation of slip-weakening curve.

Fig. 3. Stress-Strain curves obtained by triaxial compression test. Confining pressure is 100MPa and pore pressure is 25MPa.

Fig. 4. Brittle shear faulting in a compressive test of lidate Granite. Temperature is 500℃, confining pressure is 100MPa and pore pressure is 25MPa.

験条件において、Fig. 4 に示すようなせん断破断面が形成される。本研究で行った全ての実験において、破断後の試験片には Fig. 4 に示されるようなせん断破断面が形成されており、破壊角 θ は温度、圧力によらず約 30° で形成された。このときのせん断破壊による破断面と軸方向の破壊角 θ を測定することにより、式 (1) を用いてせん断応力 τ を求め、Fig. 2 に示す手順により各試験条件におけるすべり軟化曲線を得ることができる。

はじめに、すべり軟化挙動の温度依存性について検討を行う。Fig. 5 に、封圧 100MPa、間隙圧 25MPa の条件において、温度を常温から 600℃まで変化させたときのすべり軟化曲線を示す。温度が 25℃の常温条件においては比較的ぜい性的な破壊挙動を示し、最大荷重から残留摩擦応力まで急激に低下する。一方、温度が 300℃、450℃と高温の条件においては、緩やかに応力が降下する様子が観察される。せん断応力が最終的に残留摩擦応力までに変形する臨界すべり変位量 δ_c は、600℃の条件を除きほぼ一定となっている。温度 600℃を超える水環境下において挙動が異なる理由としては、花崗岩中の鉱物が一部ぜい性-延性遷移挙動を示すために明確なすべり軟化挙動を示さず、Fig. 3 に示されるように非常になだらかな荷重変位曲線となるためであると推察される。

3.2 温度・封圧依存性に関する検討

間隙圧を 25MPa で固定し、封圧を 50MPa、100MPa、150MPa と変化させて、温度 25℃、300℃、450℃の各温度域において実験をおこない、破壊挙動に対する温度と封圧の影響について観察を行った。各温度・封圧条件に

Fig. 5. Slip-weakening behavior. Confining pressure is 100MPa and pore pressure is 25MPa.

おいて得られた Fig. 5 のすべり軟化曲線より計算した破壊エネルギーの温度および封圧依存性を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、本研究で用いた実験条件においては、明確な温度依存性は観察されなかった。また、データにばらつきは見られるものの、全体的には封圧が大きいほど高い破壊エネルギーを示していることがわかる。これは封圧が高くなるほど最大差応力が大きくなり、結果として高いせん断応力を示すためである。しかしながら、封圧依存性を検討するためには、せん断破壊面に作用する有効法線応力について検討しなければならない。式 (2) から分かるように、軸方向の応力 σ_1 が変化するに伴いせん断破壊面に作用する法線応力、すなわち式 (3) により得られる有効法線応力も変化し、最大せん断応力に達し、残留摩擦応力までせん断応力が降下していく過程において有効法線応力は常に変化していることがわかる。また封圧が大きいほど変化量も大きくなる。地殻深部においては、水平方向および垂直方向の地殻応力が常に一定に作用しており、従って地下のき裂面に作用する有効法線応力は変化しないと考えられるので、したがって封圧依存性を検討していく上では、地殻深部と同一条件、つまり有効法線応力が一定のもとで考察していかなければならない。

そこで最大せん断応力と有効法線応力、残留摩擦応力と有効法線応力の関係について、今回実験を行った全ての温度・圧力条件における結果をプロットし、それぞれの関係を最小二乗法により直線近似したものを Fig. 7 に示す。残留摩擦応力に関しては摩擦の法則に従うことから原点を通るように近似を行った。Fig. 7 において、最大せん断応力を近似した直線と残留摩擦応力を近似した直線の傾きを比較すると、ほぼ同一の傾きであることがわかる。したがって、有効法線応力が常に一定であると仮定すると最大せん断応力から残留摩擦応力まで応力が降下するとき、その応力降下量はほぼ一定になることが推定される。しかし、実際の実験における応力降下過程において、有効法線応力はすべり変位量の変化に従い常に減少している。そこで有効法線応力を一定とするならば Fig. 7 により応力降下量を一定と仮定した上で破壊挙動を比較していかなければならない。

Fig. 6. Temperature and pressure dependence of fracture energy.

Fig. 7. Relationship of effective normal stress, peak shear stress and residual frictional stress.

有効法線応力を一定と仮定すると、応力降下量はほぼ一定とみなすことができ、また臨界すべり変位量は温度・圧力条件の違いにより変化しない。したがって、すべり軟化曲線において、縦軸のせん断応力を応力降下量で割り、横軸のすべり変位量を臨界すべり変位量で割ることにより規格化を行った結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 には、本研究で実験を行った全ての条件の規格化されたすべり軟化曲線を重ねた図を示す。また、Fig. 8 中の曲線は全てのデータ点を近似したものである。Fig. 8 をみると全ての点がほぼ同じような曲線に乗っており、同じようなすべり軟化挙動が観察される。したがって、応力降下量が一定、つまり有効法線応力が一定のもとでは、温度・圧力条件が変わっても、すべり軟化曲線により評価される破壊エネルギーは、本研究の温度・圧力条件のもとではほぼ一定であるということがわかる。

4 結 言

本研究においては、高温・高圧環境下における花崗岩のせん断破壊特性に関して、すべり軟化曲線を用いた破壊挙動の評価を行った。その結果、本研究で用いた温度・圧力条件においては、有効封圧が一定という条件を仮定すると、すべり軟化挙動において明確な温度・圧力依存性というものは観察されず、ほぼ一定の値で評価できることが分かった。この結果より、地殻応力が一定の地下環境下において地下き裂の進展挙動を評価することにおいても本研究で用いたすべり軟化モデルが有効であることを示唆するものである。

Fig. 8. Standardized slip-weakening curve.

参 考 文 献

- 1) K. Ikeuchi, R. Komatsu, N. Doi, Y. Sakagawa, M. Sasaki, H. Kamenosono and T. Uchida, Geothermal Resources Council Transactions, **20**, 609 (1996).
- 2) O. Kato, N. Doi, K. Ikeuchi, T. Kondo, H. Kamenosono, M. Yagi and T. Uchida, Proc. 8th Int. Symposium on the Observation of the Continental Crust through Drilling, 241 (1996).
- 3) T. Uchida, M. Yagi, M. Sasaki, H. Kamenosono, N. Doi and S. Miyazaki, Proc. 8th Int. Symposium on the Observation of the Continental Crust through Drilling, 73 (1996).
- 4) H. Abé, H. Niitsuma and R. Baria (ed.), Special Issue on Hot Dry Rock/Hot Wet Rock academic review, Geothermics, 28 (1999).
- 5) G. Cappetti, C. Romano, U. Cigni, P. Squarci, G. Stefani and L. Taffi, Geothermal Resources Council Int. Symposium on Geothermal Energy, 303 (1985).
- 6) B. Staingrimsson, A. Gudmundsson, H. Franzon and E. Gunnlaugsson, Proc. 15th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, SGP-TR-130, 81 (1990).

書 評

“Materials Handbook-A Concise Desktop Reference”

François Cardarelli 著

(2000 年, Springer-Verlag 発行, A5 版, 595 ページ, 本体価格 20 910 円)

材料科学およびその関連分野においてはいくつかの詳細なシリーズもののハンドブックが出版されているが、1冊で金属およびその合金、セラミックス、ポリマー、鉱物、木材、建築材料などの広範囲な材料の性質をまとめて知ることが可能な書は少ない。

本書は迅速かつ簡便に全ての材料の正確な物理、化学的特性を知ることがを目的に、原子力から土木工学におよぶ広範囲な科学、技術分野の科学者、技術者、教員、学生用にまとめられた実用ハンドブックである。

カバーする材料は金属およびその合金、半導体、超伝導体、磁性材料、誘電体、熱電対および工業用電極などの各種の電子材料、セラミックス、耐火材料、ガラス、ポリマーおよびエラストマー、鉱物、鉱石、隕石、岩石、樹木、木材、建築材料である。各材料の中では特に一般的な工業材料の特性に力点を置きとりまとめられている。各材料に関して下記のような物理、化学的特性が取り上げられている。

- 1) 機 械 的 特 性 : 密度, 弾性係数, ボアソン比, 降伏および引張り応力, 硬さ, 破壊靱性など
- 2) 熱 的 特 性 : 融点, 熱電導度, 比熱容量, 熱膨張係数, スペクトル放射率など
- 3) 電 気 的 特 性 : 電気抵抗, 誘電定数, 誘電体損失率など
- 4) 磁 性 特 性 : 透磁率, 残留磁気, ホール定数など
- 5) 光 学 特 性 : 屈折率, 反射率など
- 6) 電 気 化 学 特 性 : ネルンスト標準電極電位, ターフェル定数, 電気伝導度など
- 7) そ の 他 : 腐食速度, 熱中性子断面積, 自然に存在する元素の同位体の存在比, 電子仕事関数, リチャードソン定数など

さらに、元素の特性、コスト、熔融塩および液体金属、結晶学および結晶化学などについての詳細な補足資料および文献が掲載されており関連情報を迅速かつ容易に引き出すことができるよう工夫されている。机上における有益なハンドブックとして活用をすすめたい。

(香川大学 江原隆一郎)