

西松建設(株) 正員 平野 享
 山口大学工学部 正員 佐野 修
 山口大学工学部 正員 水田義明

1. まえがき

岩石の脆性破壊には時間や環境に依存する性質がある。珪酸塩質岩石の場合、その理由として水の助けをかりた応力腐食によるき裂の安定伸長が考えられている。この性質は、特に長期間の安定問題や月のように極めて水の希薄な環境下の脆性破壊を評価する際に重要となる。そこで本研究では応力腐食の速度に影響を及ぼすと考えられる温度ならびに水蒸気圧をパラメータとした一軸圧縮試験を行った。

2. 供試体と実験方法

供試体は比較的細粒、緻密な大島花崗岩である。大島花崗岩には配向性クラックに起因する互いに直交した2つの異方性面が認められる。クラックの配向性は強度に異方性をもたらすので¹⁾同一方向(クラックが最も卓越する面に垂直)のコアのみを用いた。変形挙動を観測するために、軸ひずみ、及びこれに垂直な横ひずみを異方性の主軸が供試体側面と交わる位置合計4ヵ所で測定した。さらに微小破壊のモニタリングを目的としてAEと弾性波速度の測定をPZT圧電素子を用いて行った。水蒸気圧の制御のために真空ベッセルを利用し、加熱は供試体にシリコンラバーヒーターを直接巻いて行った。載荷に先立ち約 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ Paの環境下で供試体を18時間～1ヵ月間、333～423Kにて乾燥させた。岩石の急激な加熱は温度勾配による熱応力を発生させ岩石の破損をもたらす可能性がある²⁾。そこで昇温・降温とも最大1K/minの速度で30分間温度を変化させ、その後1時間保持する手順により破損を抑えた。加熱温度が高いほど乾燥効率は良いが、組成鉱物の相転移を避けるために約700Kが上限となる。過去の類似の試験³⁾⁴⁾では500～700Kが選ばれているが、供試体に直接センサを取り付けず強度や加圧板の変位のみ計測されている。本実験では破壊挙動に関する多くの情報を得るために供試体に直接センサを装着したので423Kを上限に設定した。また偏心載荷により誘起される曲げモーメントを小さくすれば強度のばらつきを抑えることができると述べた報告⁵⁾にしたがって、計測された4つの縦ひずみの差をできるだけ小さく抑えた。

3. 実験結果と考察

強度の水蒸気圧依存性を図1に示す。緻密な岩石の浸透係数が小さいため、岩石内部の平均的な水蒸気圧は真空ベッセル内で観測された水蒸気圧に比較して高いと考えられる。しかし岩石内部の水蒸気圧を直接計測するのは困難なので適当なモデルにより評価することにした。一般に岩石の乾燥を扱う場合、空隙内部に液相水があるため気液二相構造を考慮する必要がある。含水飽和状態から出発した岩石の乾燥は主に液相水から供給される水蒸気の拡散で起こると考えられる。また曲率をもつ液相水に接する気体の飽和水蒸気圧は低下する。その曲率半径と飽和水蒸気圧の関係はKelvin式で表される。

$$\ln(p/p_s) = -2\Gamma V / \rho RT \quad (1)$$

ここで p はき裂内部の飽和水蒸気圧、 p_s は普通に言われる飽和水蒸気圧、 Γ は水の表面張力、 V は水のモル体積、 R は気体定数、 T は絶対温度で、 ρ は液相水の曲率半径を表す。供試体は一年以上室内放置しており、大島花崗岩は室内放置で乾燥すると約5ヵ月後に室内環境と平衡状態に収束するので、室内環境を298K、R.H. 70%とすれば式1より ρ は約3nmとなる。これは水分子の大きさ約0.3nmと比較して10倍であり液相水よりむしろ表面吸着水に近い

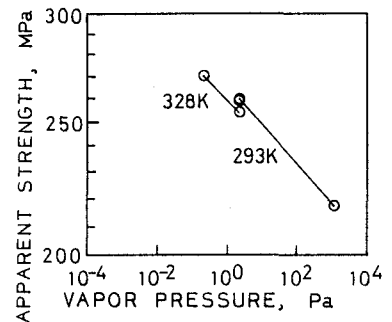


図1 強度の水蒸気圧依存性

ため、液相水を無視し気相水のみでの圧力差流れによる乾燥として扱うことにした。モデルでは水の移動経路、すなわち岩石内の連結したき裂を一様な径を持つ複数の円管で表現し、さらに低圧下では個々の分子の経路壁面への衝突が卓越する流れに移行する点も考慮した。上下を載荷板で拘束された円柱供試体における圧力差流れは軸対称問題と考えられる。基礎式を次に示す。

$$\partial p / \partial t = D \{ (1/r) (\partial p / \partial r) + \partial^2 p / \partial r^2 \} + w \quad (2)$$

ここでpは水蒸気圧、tは時間、rは供試体中心軸からの距離、Dは拡散係数、wは圧力の低下に伴い経路壁面から新たに離脱するガス量を表す。応力腐食の影響を考慮して岩石の破壊強度の表現を試みたモデルは既にいくつか報告されている⁴⁾⁶⁾。例えばSano et al.⁶⁾は次のように示した。

$$\ln(\sigma_{max}) = \{-1/(n+1)\} \{ \ln(p) - E^*/RT \} + c \quad (3)$$

ここで σ_{max} は岩石の一軸圧縮強度、nは材料に固有の定数で大島花崗岩の場合約32、 E^* は活性化エネルギー、cは実験的に決る定数である。式2で計算した水蒸気圧の過渡的变化を図2に、式3で計算した水蒸気圧を表1に示す。異なるアプローチで評価した水蒸気圧がほぼ一致したので各々のモデルは妥当と考えられる。

強度の温度依存性を図3に示す。式3は温度の上昇に伴い強度が連続的に低下することを示しているが、得られた強度は373K附近を極小値とし、高温側と低温側でほぼ同程度であった。これら供試体は加熱真空引きにより水蒸気圧数Paまで乾燥後、試験温度まで降下させており、この時点で一度表面から離脱した水の再吸着が起こり得ると考えられる。しかし水蒸気圧が低いので液相水の発生には至らない。岩石を伝ばする弾性波の減衰率は水の再吸着に敏感に対応し増加する⁷⁾。昇温過程で弾性波の減衰率の低下が認められたが、降温過程では逆に増加することが認められた。センサの感度および岩石や接着剤の弾性的性質が温度変化に対し可逆的ならば、減衰率の低下は水の離脱を、増加は水の再吸着を示唆している。表面に衝突した水がそこに留まる平均的な時間は降温により指数関数的に増大し、水の再吸着量を累積させ岩石の強度を下げると考えられる。したがって実験結果には温度降下による強度の上昇と同時に再吸着による強度低下が複合して作用すると考えられる。温度降下による強度上昇が顕著に認められた293~373Kの区間を直線近似しその勾配より求めた活性化エネルギー E^* は $6.1 \pm 0.7 \text{ Kcal/mol}$ であり、ガラスの応力腐食の E^* に比較して約1/4と小さく、むしろ水素結合の E^* に近い。あるいは複合作用によって見かけの E^* が本来の値に比較して小さく表れたと考えることもできる。

4. まとめ

大島花崗岩の一軸圧縮強度は岩石内部の水の状態に依存して変化し、その程度は応力腐食モデルによる評価と調和した。応力腐食は微小破壊の発生開始点に影響を与える。

参考文献

- 1) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野 修, 中川浩二: 材料 第38巻 第426号, pp.209-215, 1989
- 2) Richter, D. and G. Simmons: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr., 11, pp.403-411, 1974
- 3) Krokosky, E. M. and A. Husak: J. Geophys. Res., 73, pp. 2237-2247, 1968
- 4) Mizutani, H., H. Spetzler, I. Getting, R. J. Martin, III and N. Soga: Proc. 8th Lunar Sci. Conf., pp. 1235-1248, 1977
- 5) 佐野 修, 工藤洋三, 古川浩平, 中川浩二: 土木学会論文集 第388号/III-8, pp.141-150, 1987
- 6) Sano, O., I. Ito, M. Terada: J. Geophys. Res., 89, pp.9299-9311, 1981
- 7) Tittmann, B. R., L. Ahlberg and J. Curnow: Proc. 7th Lunar Sci. Conf., pp.3123-3132, 1976

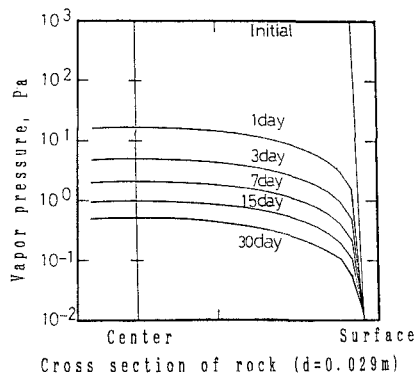


図2 水蒸気圧の過渡的变化

表1 強度より求めた水蒸気圧

真空引き時間	σ_{max}	p_{H_2O}
3 day	255 MPa	2 Pa
30 day	270 MPa	0.3 Pa

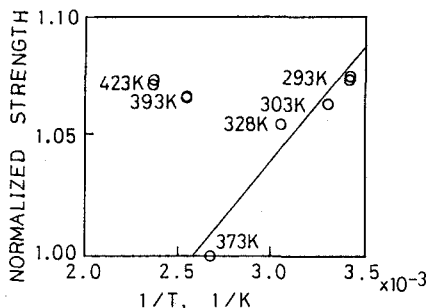


図3 強度の温度依存性