

主要造岩鉱物の応力緩和実験に関する研究

名古屋大学工学研究科 徐 廉碩
名古屋大学工学研究科 正会員 市川康明
名古屋大学工学研究科 正会員 清木隆文
名古屋大学工学研究科 Piotr DZIADZIUSZKO

Abstract: The micro-structure of rock plays an important role to predict the long-term behavior for more than thousand years. We performed a series of relaxation tests under microscope observation in laboratory. The specimens that are preserved in water are Kisokoma - granite of Japan and a pegmatite that consists of quartz and albite. The aim of this experiment is to observe the sequential propagation of micro-cracks and its affect to the macroscopic response of the rock material under relaxation state.

1. 序論

現在日本では、使用済核燃料を再処理し利用しようとする核燃料サイクルが考えられていることで問題なのは、再処理の際発生する高レベル廃棄物が非常に強い放射能をもち、半減期が数万年に及ぶということである。その処理方法としては、ガラス固化体にした後、銅あるいは鉄などのキャニスターに収容し、その周囲をベントナイトで覆うという多重人工バリアをほどこして地下深部の岩盤中に埋めることが考えられている。しかし放射性核種を人間の生活環境から数万年にわたり隔離するには、人工バリアだけでは万に一つのことを考えると不十分であり、より安全性を高めるために岩盤や土などの天然バリアの遮断効果を利用しなければならない。

岩盤には多くのマイクロクラックが含まれているので、そこに地下水が存在すると、流れにしたがって放射性核種が拡散していく過程が問題となる。特に、マイクロクラックの進展、風化に伴う水路変化の可能性を考慮すると、岩盤の長期的な挙動を調べ、その安全性が保証されるかどうかを把握することが重要である。岩石中のマイクロクラック観察は、岩石破壊、応力緩和、透水などのメカニズムを知るために重要である。

今までに岩石の時間依存性挙動について多くの実験が行われている。しかしその多くは、一定の荷重条件下でひずみが増加していく過程を観察するクリープ実験であり、一定の変位条件の下で応力が緩和していく応力緩和実験は Haupt [1] や Peng[2] によっていくつか行われているものの、花崗岩のような硬岩ではほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、木曾駒型花崗岩と花崗岩の造岩鉱物である石英と長石で構成される石英・長石型ペグマタイトを用いて岩盤の長期挙動を検討する。岩盤の長期時間依存性挙動の例として、一定の荷重条件の下でひずみが増加していくクリープ現象と、一定の変位条件の下で応力が緩和していく応力緩和現象が挙げられる。ここでは、水浸条件下において応力緩和挙動に注目した室内実験を行う。実験供試体は上述の花崗岩と石英・長石型ペグマタイトを用いた。この実験では供試体端面の変位を拘束した場合の時間経過に伴う応力変化を計測し、同時にマイクロクラックの変化を観察する。

Title: Microscopic observation of granite and pegmatite in relaxation tests

Authors: Yong-Seok SEO, Yasuaki ICHIKAWA, Takafumi SEIKI and Piotr DZIADZIUSZKO

Address: Dept. of Geotechnical and Environmental Engineering, Nagoya University, JAPAN

Tel: +81-52-789-3830

2. 応力緩和実験

2.1 供試体

花崗岩の主構成鉱物は含有量的に95%以上が石英、長石、雲母である。今回は、花崗岩の長期挙動を調べるために重要なことであると思われる主構成鉱物間の挙動に注目して、二相多結晶体である新潟県産の石英と長石構成されるペグマタイトを用意し、実験を行った。写真1はその偏光顕微鏡写真である。長石は粗粒の曹長石が大部分を占めており、石英は中粒に属している。雲母類は花崗岩の中で含有量的には5%程度分布しているが、完全な板状劈開が発達しており、構造的に弱い強度特性を持つ。今回はこの点に着目し中粒で黒雲母と角閃石が目立つ長野県の木曽駒型花崗岩を用いて実験を行った。

供試体の寸法は、縦(載荷方向)40mm、横20mm、高さ5mmで、上部は観察しやすいように鏡面仕上げにし、それ以外は4/1000mm程度の精度で製作した(図1)。



写真1 石英・長石型ペグマタイトの顕微鏡写真

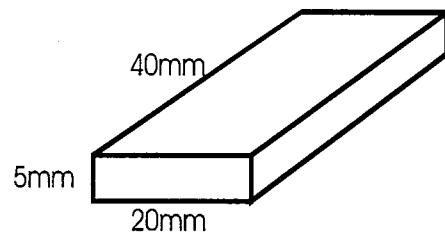


図1 供試体の形状

2.2 実験装置

実験システムは図2のように3つのサブシステムすなわち載荷装置、計測装置、観察装置で構成されている。載荷装置は油圧式ポンプ、載荷試験機によって構成されている。載荷装置の詳細を図3に示す。

油圧式ポンプによって加えられた圧力は、油圧シリンダーとピストンを通して金属載荷板に達し、花崗岩の一軸圧縮強度まで載荷することが可能となっており、また、変位固定用ネジによって載荷板を任意の位置に固定できる。岩石供試体を設置する場所は箱型になっており(圧力セル)、供試体が水で飽和した状態で実験することが可能である。計測装置はデジタルひずみ測定器(TDS-301)、パーソナルコンピュータ(EPSON PC-286V)によって構成されている。供試体のひずみは、載荷装置に取り付けられた変位計(東京測器 CDP-10)により軸ひずみが計測される。また、軸応力はロードセル(東京測器 DM6820)により計測される。計測データはこれらのセンサーからデジタルひずみ計測器を介してパーソナルコンピュータに入力される。応力あるいは軸ひずみは、実験中リアルタイムで画面上に数値や応力-時間、応力-ひずみグラフとして表示される。同時に計測データはデジタルデータとしてハードディスク内に保存される。観察装置は、実体顕微鏡、CCDビデオカメラ、モニター、ビデオ、ビデオプリンター、スチルカメラによって構成されている。顕微鏡では供試体の表面にライトをあて(同軸照射装置と補助照射装置を併用)10~40倍の画像が観察できる。

マイクロクラックの進展を連続撮影する手段は2つある。1つはビデオに記録する方法で、実験を再現することが可能であり、実験終了後にビデオプリンターを通して任意の画像を取り出すことができる。もう一つは、スチルカメラを用いて一定時間ごとに記録する方法である。後者の方法ならより良い解像度で画像を得ることが可能である。

2.3 実験方法

応力緩和試験は温度の変化に敏感であるため実験は温度が $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ で保つ恒温室で行った。花崗岩とペグマタイト供試体は一週間蒸留水で飽和させたあと使われた。

実験の手順はまず、供試体を蒸留水の中から取り出して鏡面仕上げの面を上にし、ロードセル、供試体、金

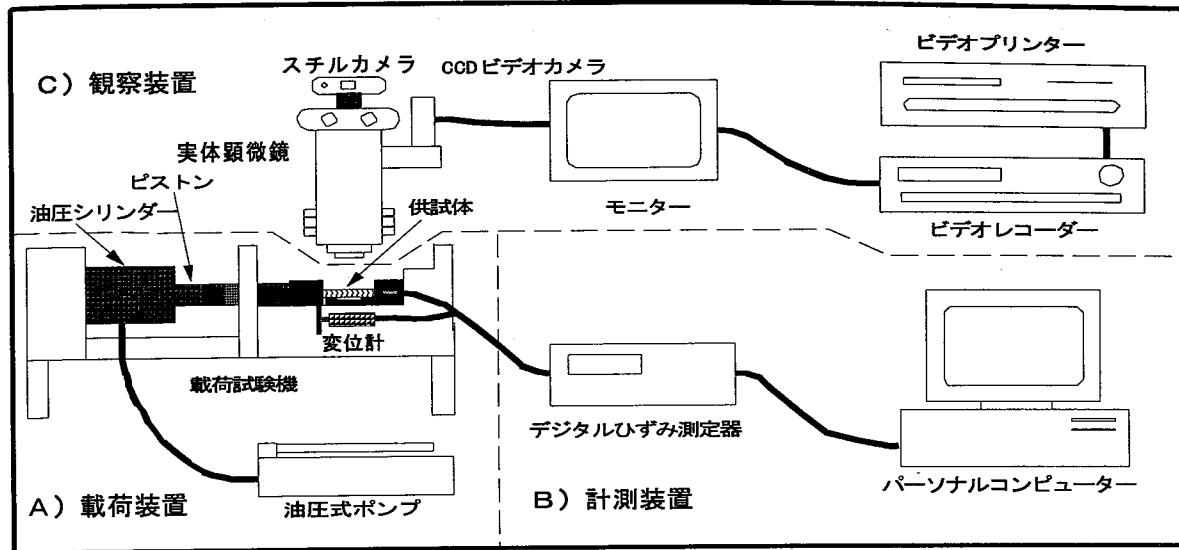
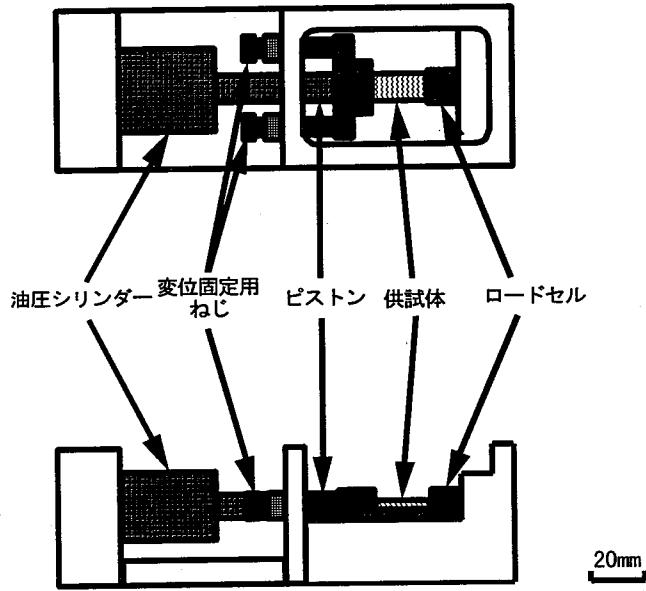


図 2 実験システム



属載荷板の各中心線が一致するようにセットする。つぎに、油圧ポンプにより金属載荷板が供試体に接してロードセルの計測値が約 10kgf/cm^2 になるまで応力を負荷する。供試体が固定されたのを確認した後供試体の表面が隠れるまで蒸留水を入れる。セットの時、供試体の表面が乾燥するので蒸留水を入れてから約 10 分程度そのまま放置した後、計測装置のイニシャルをとり計測を開始する。載荷速度を $2.0\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ とし、所定の応力レベルまで載荷する。所定の応力レベルまで達したら、変位固定用ねじを軽く締める。

図 3 載荷試験機

写真的撮影は計測直前に供試体の状態をスチルカメラで写真に撮り、その後は、約 24 時間にごとに応力の値を確認し写真を撮った。なお、実験室の環境が恒温状態であり、湿度が低く蒸留水が常に蒸発するので、蒸留水の補充には充分に気をつけた。

3. 実験結果および考察

3.1 一軸圧縮実験

今回の応力緩和実験に先立ち、各サンプルについて 5 回一軸圧縮強度試験を行った。実験方法には応力緩和実験で使う同じ装置を用い、応力緩和実験と同様に水で飽和した状態で実験を行った。

その結果を図 4 に示す。この図にはペグマタイトと木曽駒型花崗岩を用いて 5 個の試験を行って得られた平均値と一軸強度が示してある。なお、応力緩和実験ではこの平均値（初期応力レベルと呼ぶ）を基準として、その 65~70%に対応するひずみを載荷した。

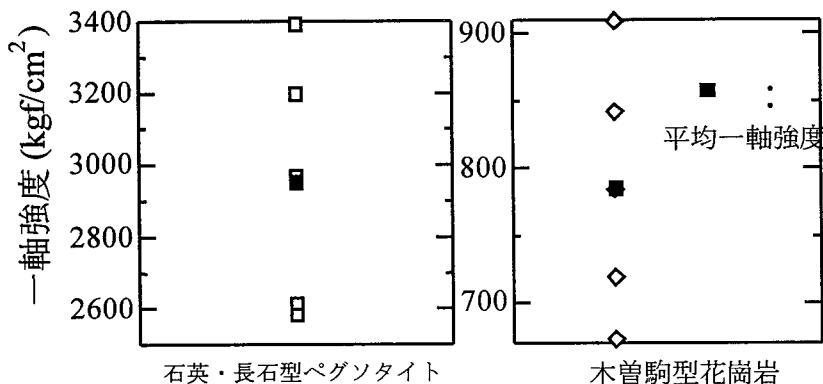


図 4 一軸圧縮強度実験結果

3.2 応力緩和実験

応力緩和実験は石英・長石型ペグマタイト(Q-F1, Q-F2)について初期応力レベル 65~70%と、木曽駒型花崗岩(GN1)については 70%で行った。今回は石英・長石型ペグマタイトの応力緩和曲線 2 本と木曽駒型花崗岩の応力緩和曲線 1 本を示す。

図 5 は初期応力レベルが 65~70%の時の石英・長石型ペグマタイトの応力緩和曲線である。150 時間経過した時の応力レベルが安定状態にあるとすると、Q-F1 は 49 kgf/cm^2 、Q-F2 は 42 kgf/cm^2 の応力緩和を示している。Q-F1,2 共に 50%の応力緩和が 5 時間以内に発生している。

図 6 は木曽駒型花崗岩の初期応力レベルが 70%の時の応力緩和曲線である。160 緩和時間の時点での応力緩和が 122 kgf/cm^2 を示しているものの、まだ応力レベルが安定に達していない状態である。GN1 は 6 緩和時間の時点で 60 kgf/cm^2 の応力緩和現象を現している。

図 7 は緩和時間に伴う緩和応力を示したものである。2 個のペグマタイトにおいて Q-F2 の方が 5%高い初期応力レベルでの実験結果であるが、150 緩和時間の時点では Q-F1 に比べやや低い緩和応力を現す。これは初期応力レベルの差は小さいものだが、初期応力にあまり関係ない応力緩和を示した実験結果である。Q-F1 は 160 緩和時間の時点ではほぼ安定しているのに対し、Q-F2 はまだ安定状態に達していない。しかし、Q-F1 の応力緩和曲線を最小二乗法を適用して延長してみると 300 緩和時間の付近では Q-F2 とほぼ一致する緩和応力を現すと予測される。木曽駒型花崗岩は雲母類が比較的多く分布しているので一軸強度も弱いのだが、緩和応力も大きい、しかも安定状態に達するまでの時間も長くかかる。

今回の応力緩和実験で得られた代表的な顕微鏡写真を写真 2、3 に示す。写真 2.1~2.3 は Q-F1 の供試体で、初期応力レベルが 65%の時に 49 kgf/cm^2 の応力緩和を示した時のものである。実験 60 時間後には結晶内に先在したクラックが進展するのが分る。その後、165 時間後の写真では先在クラックの進展と粒間でのクラックの進展も確認できる。写真 3.1~3.3 は Q-F2 の供試体で、初期応力レベルが 70%の時に 42 kgf/cm^2 の応力緩和を示した時のものである。実験開始から 100 時間後の写真ではあまりクラックの進展が見られないが、354 時間後（写真 3.3）では粒間の部分で多くのクラックが進展している。

NR1 の供試体は、初期応力レベルが 70%の時に 122 kgf/cm^2 の応力緩和を示した時のものである。今回の写真ではほとんどクラックの進展が見えなかった。

今回の写真では載荷方向である水平方向のクラックの進展より粒間の部分で多くのクラックが進展している。これは載荷方向にクラックの進展が集中した石目が多く分布している Seo ら[3]の稻田花崗岩の実験結果

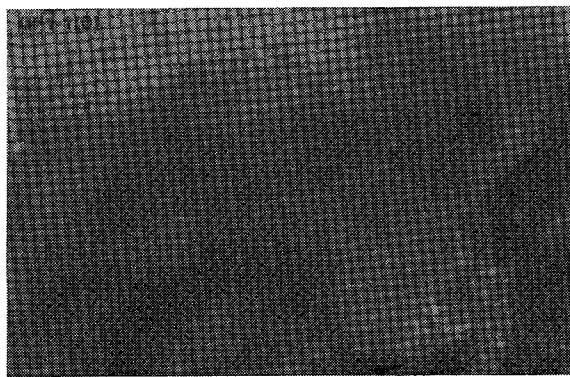


写真 2.1 Q-F1 実験開始直後の結晶状態



写真 2.2 Q-F1 60時間後の結晶状態



写真 2.3 Q-F1 165時間後の結晶状態

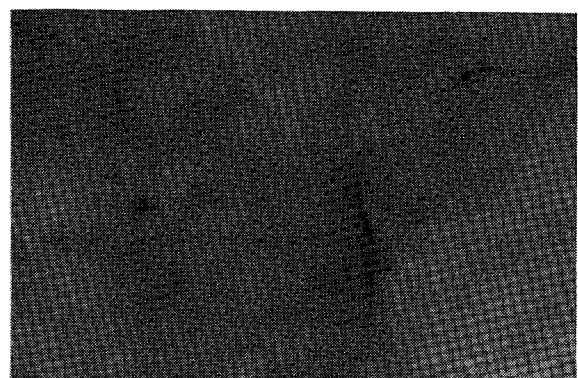


写真 3.1 Q-F2 実験開始直後の結晶状態

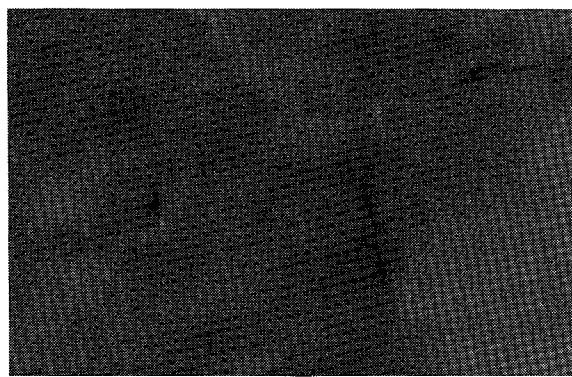


写真 3.2 Q-F2 100時間後の結晶状態

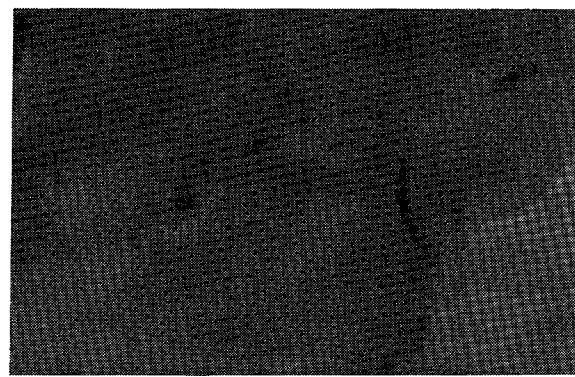


写真 3.3 Q-F2 354時間後の結晶状態

黒線:マイクロクラックの進展の様子

とは違う傾向である。稻田花崗岩の場合は石目の強い発達のため先在クラックの専断強度が粒間より低かったと思われる。石英・長石型ペグマタイトは稻田花崗岩に比べ、長い緩和時間で粒間部分のクラックの進展が見られるのも特徴である。木曾駒型花崗岩はより長い緩和時間を通して徐々に安定していく傾向が見られる。

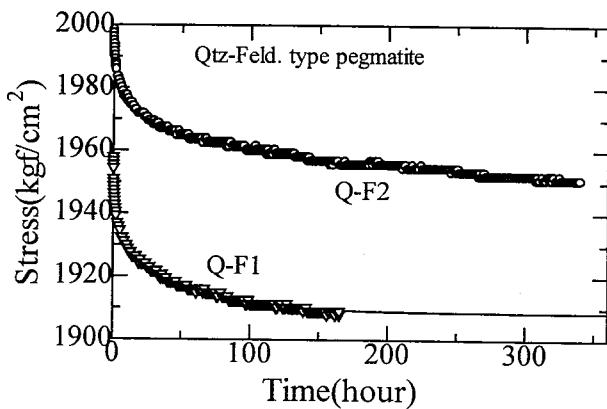


図 5 石英・長石型ペグマタイトの応力緩和曲線

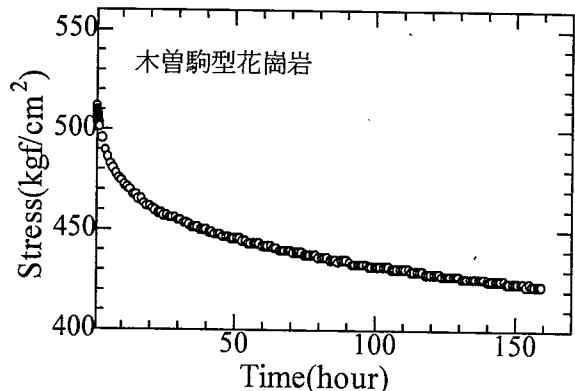


図 6 木曾駒型花崗岩の応力緩和曲線

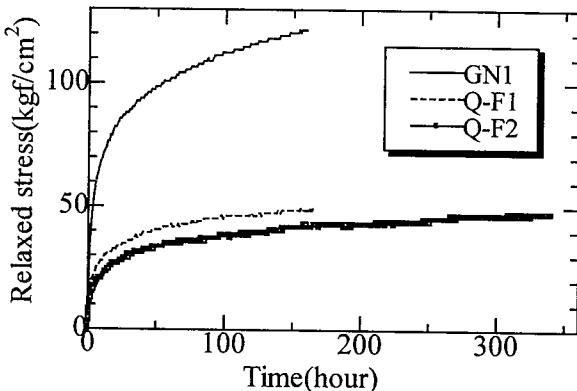


図 7 緩和応力と緩和時間の関係

4. 結 論

木曾駒型花崗岩と石英・長石型ペグマタイトを対象として応力緩和実験を実施し、つぎのような結果を得た。

- 1) 先在マイクロクラックと粒間でのマイクロクラックの進展が応力緩和現象に深く影響している。
- 2) 先在マイクロクラックの方が粒間でのマイクロクラックの進展より先に発達して行く。
- 3) 強度が高い石英・長石型ペグマタイトが雲母類を多く含有している木曾駒型花崗岩より早めに時間経過に従って応力は減少し、一定値に収束していく。
- 4) 先在クラックと粒間が発達している結晶質岩の場合、応力緩和は初期応力レベルより構造的欠陥に依存する。

参考文献

- [1] Haupt, M., 1991, A constitutive law for rock salt based on creep and relaxation tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24:179-206.
- [2] Peng, S. 1973, Time-dependent aspects of rock behavior as measured by a servo-controlled hydraulic testing machine, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.Geomech.Abst*, 10:235-246.
- [3] Seo, Y. S., Fujii, N. and Ichikawa, Y., 1997, Direct observation of progressive microcrack development in relaxation tests on granites and their main component minerals, *ARMS '97*, p495-499.