

# 花崗岩質岩石のクリープ破壊に関する実験的研究

## Experimental study of Creep failure of Granitic rocks

竹村 貴人<sup>1</sup>, 小田 匡寛<sup>1\*</sup>, Golshani, A.<sup>1</sup>, 鈴木健一郎<sup>2</sup>  
Takato Takemura<sup>1</sup>, Masanobu Oda<sup>1\*</sup>, Aliakbar Golshani<sup>1</sup>, Kenichiro Suzuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学 工学部建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University

<sup>2</sup> 株式会社大林組 技術研究所

Obayashi Co., Ltd

### Abstract

Creep experiments were carried out under different environmental conditions, which are loading axis, stress level, confining pressure and water content, using Inada granite. Damage growth in primary and secondary creep phase is proportional to the pre-existing cracks orientation. When the tertiary creep appears, cracks propagate toward the direction of maximum compressive stress and instability takes place. Furthermore, time to creep failure was controlled by confining pressure, water content and biotite content.

**Key Words:** Damage growth, Granitic rock, Creep failure

### 1. はじめに

廃棄物の地層処分や液化エネルギーの備蓄などを目的とした大深度地下空間の利用に関連して、深部地質環境を考慮した岩石の健全性の評価が改めて問題となっている。このような深部領域にある岩石は圧縮応力下におかれ、偏差応力の増加により破壊を引き起こす。また、偏差応力を一定にした定応力状態下でもゆっくりとした変形が進行し、ある時間経過すると破壊（クリープ破壊）を引き起こす時間依存性を示すことも知られている(例えば Kranz

and Shcolz, 1977; Kranz, 1979; Masuda, 2001)。このような、ゆっくりとした変形は、例えば、空洞の掘削に伴う応力再配分により周辺岩盤からなるニアフィールドなどで起こることが報告されている(高治ほか、1999)。クリープ変形に伴い発生するクラックは、破壊を引き起こすだけでなく、水みちとしても機能することで透水係数を変化させることは想像に難くない。従って、母岩領域や地下空洞近傍における岩石・岩盤の長期的な力学・水理学的安定性の確保を考えるためには、深部地質環境下でのクリープ破壊およびそれに伴うダメージの進展を評価する必要がある。

本研究では、拘束圧と湿潤環境を変化させたクリープ試験を行い、深部地質環境の違いが岩石のクリ

\* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255  
電話：048-858-2111 FAX：048-858-2112  
Email：m-oda@post.saitama-u.ac.jp

ープ破壊に及ぼす影響について検討する。

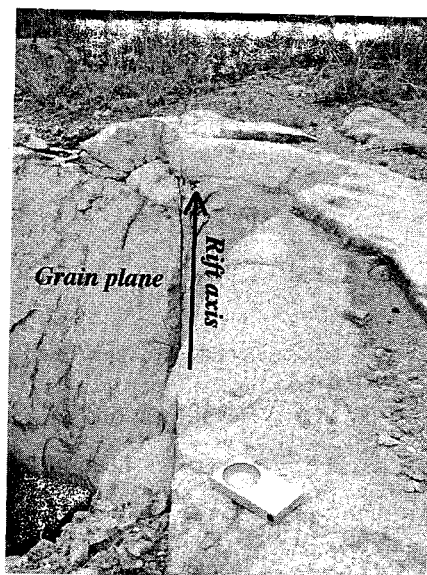
## 2. 岩石試料

実験には、茨城県笠間市に分布する花崗閃緑岩である稲田花崗岩を用いた。稲田花崗岩の構成鉱物は、XRD 分析 (Philips 社製) の結果より体積分率で石英 37%、斜長石 33%、正長石 24%、黒雲母および粘土鉱物 6% である。平均粒径は 2-4mm 程度であるが、石英、長石類はクラスター状(長田ほか, 1999)になっているため、肉眼での観察では大きな粒径に見える。稲田花崗岩は採石場において、三つの割れやすい面 Rift, Grain, Hardway があり、それぞれ  $N70^\circ E90^\circ$ ,  $N20^\circ W90^\circ$ , 水平面に一致している(図 1)。

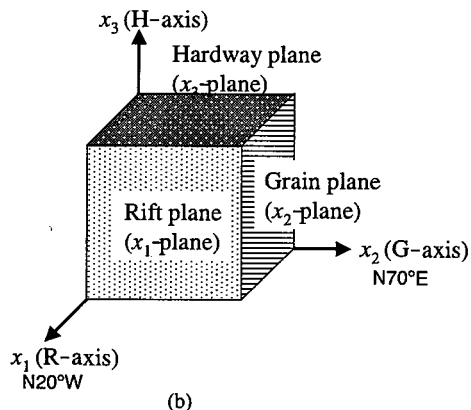
稲田花崗岩の異方性はこれまで、弾性波速度、透水係数などの物性値について確認されている (Oda, et al., 2002)。また、三つの異なる面から作られた薄片の観察から、クラックについては異方性が確認されるが、構成鉱物である石英や長石などの結晶構造の異方性は確認することができない。したがって、これら物性値の異方性はマイクロクラックに起因するものと考えられる。

## 3. 実験方法

地下深部の周辺環境が定応力下での岩石の変形にどのような影響を及ぼしているかを実験的に明らかにするため、クリープ設定応力、拘束圧および湿潤環境(乾燥・飽和)を変化させた実験を行った。ここで、乾燥試料は試験開始直前までシリカゲル入りのデシケーター内で2週間以上乾燥させたものであり、飽和試料は真空下で2週間以上強制飽和することで水で飽和された試料である。実験には、直径 5 cm 高さ 12 cm の円柱供試体で、両端面は精密平面研削盤(岡本製作所製平面研削盤)で平行度  $\pm 0.0035\text{mm}$  になるように仕上げた供試体を用いた。試験装置はデジタルサーボコントロール機能を有する極限状態場試験装置(MTS 社製モデル 815)を使用して行った。実験は  $1\text{MPa/s}$  の速度でクリープ設定応力レベルまで载荷し、その後、応力を一定に



(a)



(b)

図 1 (a) 稲田花崗岩の採石場での断裂系と (b) 座標系

保ち軸歪み、周歪みそして時間の測定を行った。また、飽和試料を用いた実験は、外部から常に水が供給できるような排水条件で行った。実験は室温状態(25度)一定の下、以下のクリープ破壊に至る時間とダメージの進展を評価するための試験をおこなった。

1) クリープ破壊: 拘束圧  $\sigma_3$  を 40, 80MPa に、そして湿潤環境を乾燥・飽和とした条件で破壊応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  の 100, 98, 95, 92% を開始点としたクリープ破壊試験を行った。ここで、クリープ開始点までに到達した応力を  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  とし、その比率

$\{(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f\} \times 100$  をクリープ設定応力レベル  $CL$  とした。載荷軸は Rift, Grain, Hardway 軸それぞれについて行い、 $P_c=40\text{MPa}$  の乾燥試料を 13 本、 $P_c=80\text{MPa}$  の湿潤試料を 6 本、そして  $P_c=80\text{MPa}$  の乾燥試料を 10 本の合計 29 本の供試体を用いた。また

2) クリープ中のダメージの進展: 定応力下での損傷の進展を考察するため、拘束圧  $40\text{MPa}$ 、クリープ設定応力レベルを  $92\%$  とした条件でクリープ試験を行った。ここで、除荷の開始点はクリープ試験中に歪み-時間関係をモニタリングすることで、2 次クリープ開始後とクリープ破壊直前とした。この実験で回収されたダメージを受けた試料の中心部から

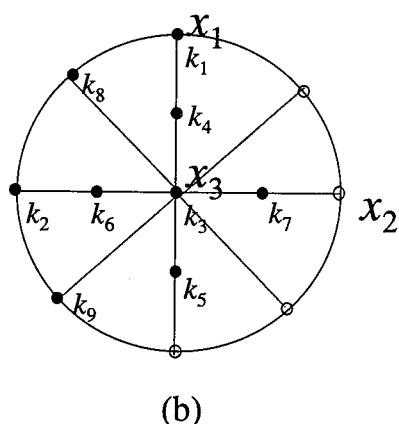
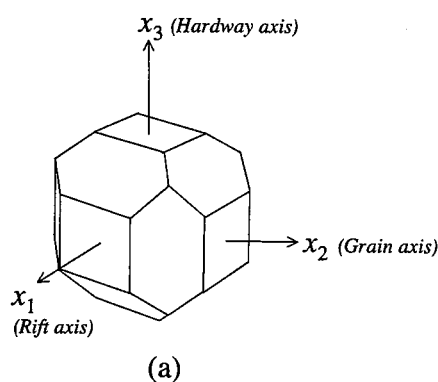


図 2 (a) 18 面体試料 (b) 18 面体試料から得られるステレオ投影図 (シュミット網に下半球投影)

18 面体試料を作成し (図 2(a))、9 方向の弾性波速度をステレオネット上にプロットすることで岩石試料の 3 次元内部構造を表現した (図 2(b))。

## 4. 実験結果

### 4.1 クリープ破壊

拘束圧と湿潤環境を変化させた時のクリープ設定応力レベル  $CL$  と破壊までの時間  $T_f$  の関係を図 3 に示す。いずれの実験条件であっても、載荷軸の方向による  $T_f$  の違いは見られなかった。また、稲田花崗岩のクリープ試験結果のうち、乾燥試料を用いた、拘束圧  $40\text{MPa}$  と  $80\text{MPa}$  の結果を比較すると、同じクリープ設定応力レベルでクリープを開始したとしても、拘束圧が低いほうが、速く破壊が起こることがわかる。また、拘束圧  $40\text{MPa}$  での乾燥試料と湿潤試料を比較すると、同じ応力レベルでクリープを開始すると湿潤試料の方が  $10\text{-}100$  倍の速さで破壊が起こっていることがわかる。これらのことから、稲田花崗岩のクリープ破壊における深部地質環境の効果は、拘束圧の増加がクラックの進展速度を鈍化させ、水の存在がクラックの進展速度を促進させるといえる。

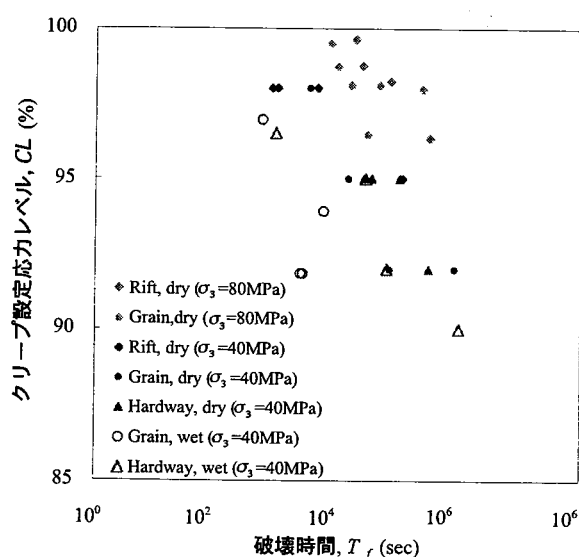


図 3 稲田花崗岩のクリープ設定応力と破壊時間

## 4.2 定応力下での損傷の進展

クリープ設定応力レベル  $CL=92\%$ 、乾燥状態、載荷軸を Hardway 軸とした実験条件でダメージを受けた試料の弾性波速度分布のステレオネットを図 4 に示す。ステレオネット中の  $x_1$  軸は Rift 軸、 $x_2$  軸は Grain 軸、 $x_3$  軸は Hardway 軸に対応している。また、図中の(a)はインタクトな状態の弾性波速度分布を示している。このうち、クリープ時間  $T$  の短い試料(b)の  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  軸の弾性波速度を比較すると、 $x_3$  軸が最も速く、次いで  $x_2$  軸、最も遅いのが  $x_1$  軸となっている。クラックが多くなるにつれて速度は遅くなると考えられるので、クラックの量は  $x_1 > x_2 > x_3$  という順になっていることが分かる。これは、Rift 面、Grain 面 Hardway 面の順に割れやすい事と対応しており、初期のマイクロクラックをそのまま反映している結果といえる。

クリープの進行に伴い、2 次、3 次クリープと進んだ(c), (d)に関しては、載荷軸である  $x_3$  軸の弾性波速度が常に速い事がわかる。このことは載荷軸に垂直な方向にクラックの発生が少ないことを考えれば当然の結果である。しかしながら、インタクト、クリープ設定応力到達時に比べると、クリープ破壊

の進行に伴い、 $x_3$  軸の弾性波速度が減少していることがわかる。このことは、クリープ破壊の進行中に粒界クラックの圧潰やすべりなどにより、載荷軸に対して垂直なクラックも増加していることを示唆している。また、クリープ破壊の進行に伴い  $x_1$ 、 $x_2$  軸の弾性波速度の減少が著しく、クラックが載荷軸に対して平行に成長していることを示している。また、静的載荷時のクラックの成長は初期のクラックの方向に依存しており、 $x_1$  と  $x_2$  軸の弾性波速度は常に  $x_1$  軸が遅いことが報告されている。しかしながら、クリープの進行による  $x_1$ 、 $x_2$  の差に大きな違いは見当たらず、静的載荷の時ほど初期クラックに方向依存性は見られなかった。

## 5. 考察

本研究で用いた稲田花崗岩のクリープ破壊の時間依存性は前述した通りである。ここでは、Kranz (1979)による Barre 花崗岩と増田(1998)による Indian 花崗岩との比較を行う。

クリープ設定応力レベル  $CL$  とクリープ破壊時間  $T_f$  との間には次の関係が成り立つことが、示されている (例えば Scholz、1968)。

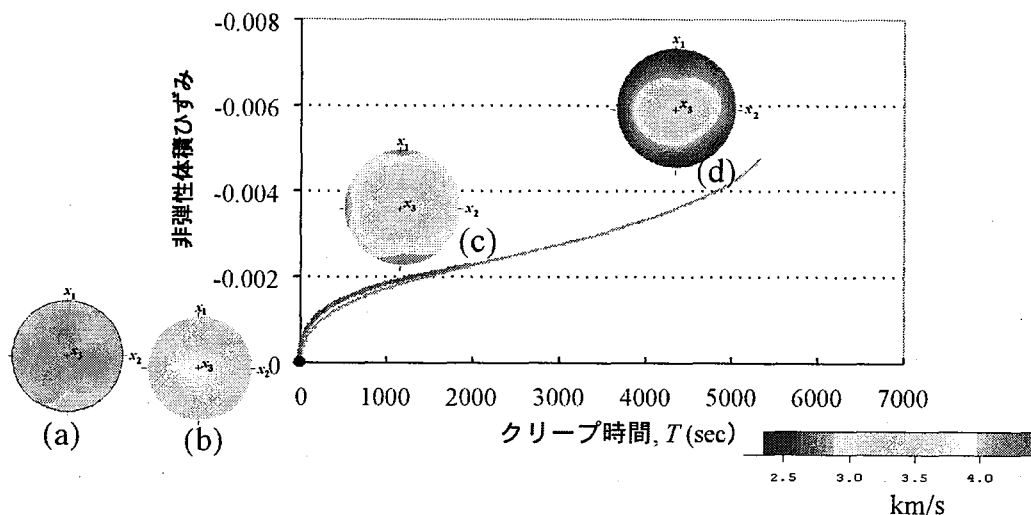


図 4 クリープ各段階の弾性波速度変化。(a) インタクト、(b) クリープ設定応力到達時、(c) 2 次クリープ開始後、(d) 3 次クリープ開始時。

$$CL = A \log T_f + B \quad (1)$$

ここで、A, B は定数である。上式は、クリープ破壊の進行は、クラックが応力腐食理論に基づいて準静的に成長するというモデルで説明することができるとされている（例えば、Michalsle and Freiman, 1982; Frieman, 1984）。図5にクリープ設定応力レベルと破壊時間の関係を示す。図中の直線は(1)式により近似された直線である。Barre、Indian 花崗岩は拘束圧約 50MPa、乾燥下で実験が行われており、本研究の実験条件とほぼ同じである。Barre、Indian 花崗岩の式 (1) における、定数 A が-3.45、-3.94 であるのに対して、稲田花崗岩の定数 A は-1.13 と非常に小さい。このことは、切片である定数 B が3つともほぼ同じであることから、同じクリープ設定応力からクリープを開始した場合、稲田花崗岩に比べ Barre、Indian 花崗岩は非常に速く破壊に至ることを意味している。実験条件は拘束圧がわずかに違うが、前述

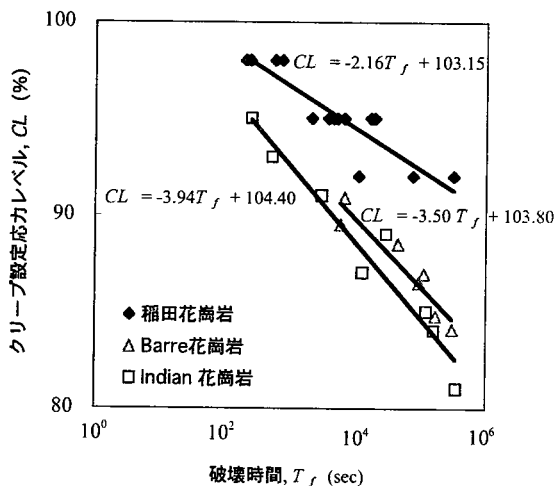


図5 稲田、Barre、Indian 花崗岩のクリープ設定応力レベルと破壊時間の関係

した拘束圧との関係でも、同一岩石で、これほどの差は生じない。しかしながら、雲母系鉱物の含有量は稲田花崗岩が 4% 程度であるのに対して、

Barre、Indian 花崗岩では 18% と 10% である。このことから、破壊時間の大きな差は岩石内部の岩石学的な特徴に起因すると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、稲田花崗岩の定応力下での破壊とダメージの進展について実験的な考察を行った。その結果、花崗岩類のクリープ破壊について以下のようにまとめることができる。

稲田花崗岩のクリープ破壊は深部地質環境のうち、拘束圧の増加がクラックの進展速度を鈍化させ、水の存在がクラックの進展速度を促進させる効果があるといえる。また、雲母系鉱物の含有量が異なる花崗岩類では、その含有量が高いほどクリープ破壊に至る時間は短いことが明らかになった。このことから、定応力下でのダメージの進展はガラスや石英岩などケイ酸質材料で論じられてきた応力腐食理論だけでなく、塑性変形が起りやすい雲母などの粘土鉱物の役割も大きく関与していると考えられる。このような雲母系鉱物は、花崗岩体の形成過程では最終晶出鉱物であるため、岩体中心部と辺縁部では雲母系鉱物の含有量が異なってくる。従って、構成鉱物の組み合わせの違いによる岩石の力学的挙動は、岩体のどの部分が長期的な安定性を持つのかを考える際の重要な指標となると考えられる。

## 引用文献

- Frieman, S. W.: "Effect of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics", *J. Geophysical Res.*, **89**, 4072-4076 (1984).
- Kranz, R. L.: "Crack growth and development during creep of Barre granite", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abst.*, **16**, 23-35 (1979).
- Kranz, R. L. and Scholz, C. H.: "Critical dilatant volume of rocks at the onset of tertiary creep", *J. Geophys. Res.*, **82**, 4893-4898 (1977).
- 増田幸治: "定応力下にある花崗岩の変形・弾性波速度変化・微小破壊活動について", 地質調査

- 所月報、**49**、147-155 (1998).
- Masuda, K.: "Effects of water on rock strength in a brittle regime", *J. Structural Geology*, **23**, 1653-1657 (2001).
- Michalsle, T. A. and Freiman, S. W.: "A molecular interpretation of stress corrosion in silica", *Nature*, **295**, 511-512 (1982).
- Oda, M., Takemura, T. and Aoki, K.: "Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite", *Mechanics of Materials*, **34**, 313-331 (2002).
- 長田昌彦・山辺 正・吉中龍之進："稲田花崗岩の初期マイクロクラック", *応用地質*, **39**, 500-510 (1999).
- 高治一彦・奥津一夫・三浦一彦・田部井和人・納多勝・杉江茂彦・高橋真一："ニアフィールドの長期力学安定性評価", *サイクル技報*, **5**, 27-36 (1999).
- Scholz, C .H.: "Mechanism of creep in brittle rock", *J. Geophys. Res.*, **73**, 3295-3302 (1968).