

(49) 三城目安山岩のクリープに及ぼす周圧の影響

東京大学大学院 ○趙 顕
東京大学工学部 正会員 大久保誠介
東京大学工学部 正会員 西松 裕一

The Influence of Confining Pressure on the Creep of Sanjome Andesite

Hyun Cho, Graduate Student
Seisuke Okubo, The University of Tokyo
Yuichi Nishimatu, The University of Tokyo

Abstract

Compression and creep tests were carried out under confining pressure.

The results can be summarized;

1. In compression tests, strength increases with loading rate. The strength increase for every ten-fold increase of loading rate does not depend on confining pressure.
2. Strain rate decreases following the logarithmic law in primary creep and is inversely proportional to residual life time in tertiary creep.
3. Creep strain when creep strain rate takes its minimum value increases with confining pressure.
4. The creep strain rate normalized by its minimum value is plotted against $\tau = (\text{elapsed time}) / (\text{residual life time})$. The curve of creep strain rate to τ depends on neither confining pressure nor creep stress level.

1. はじめに

岩石の一軸圧縮応力下での挙動は数十年の間熱心に研究されており、相当に多くのことがわかってきた。例えば、一軸圧縮強度は載荷速度が大きいほど増加し、その程度は載荷速度が10倍になる毎に大体に3~6%である¹⁾。また、クリープ試験においては、他の多くの物質と同じように、対数クリープ則に従う1次クリープ、歪み速度が一定な2次クリープ、歪み速度が次第に増加して行く3次クリープが、この順に現れることもわかって来た²⁾。クリープ応力と寿命の関係にしても、ある程度のことが最近わかって来たと言える³⁾。

他方、三軸圧縮応力下における岩石の挙動については、まだまだ不明な点が多い。地中にある岩石や岩盤はほとんどの場合、三軸応力下にあるので、当然多くの研究の対象となったが、基礎的な事項の一つである周圧下での強度の載荷速度依存性についても、従来の試験結果はごく少ない⁴⁾。さらに、周圧下でのクリープ挙動についても、研究結果は少なく^{5) 6)}、周圧下でも3次クリープは起こり得るのか等についても不明であるし、クリープ応力と寿命の関係もほとんどわかっていない。

本研究では、40 MPa までの周圧下において、載荷速度を変えた圧縮試験とクリープ試験を行い、載荷速度依存性やクリープ挙動が周圧によってどのように変化するかを検討した。

2. 実験方法と実験装置

周圧下での試験を行う際の要点の一つに、周圧の維持の問題が挙げられる。圧縮試験では、荷重の増加に伴って周圧ベッセル内のロッドが押し込まれてゆくので、何らかの手段でベッセル内の油を抜く必要がある。また、試験片内部に微小なクラックが発生・成長し、ダイラタンシーとして知られているように、試験片の体積が増加するので、これに見合った調整も必要となる。特に、クリープ試験の破壊寸前では歪み速度が急激に増加するとともに体積も急激に増加するので、注意が必要である。周圧の維持方法として、1) Breadthauer型の周圧ベッセルを使用する、2) サーボ制御式の周圧維持装置を圧力源として使用する、3) 十分な容量のアクキュムレータを周圧ベッセルと圧力源との間に入れる、等が挙げられよう。いずれも一長一短があるが、今回は、比較的装置が簡単で保守管理がし易いので、クリープのような長期間にわたる試験に好適と思われる3)の方式を試してみた。本試験に、使用したアクキュムレータの容量は4 l (使用最高圧力42 MPa) であり、試験中における周圧変動は予め設定した値と比べて高々±0.1 MPa であった。

岩石試料としては、三城目安山岩を用いた。直径約25 mm、高さ約50 mmに成形し、温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 15\%$ に保たれた実験室中に一カ月間以上放置した後、高分子樹脂の熱可縮性チューブを被せた。

3. 圧縮試験

図1には周圧が0, 5, 10, 20, 40 MPaの時の応力-歪み線図を示す。縦軸を軸方向応力 σ_1

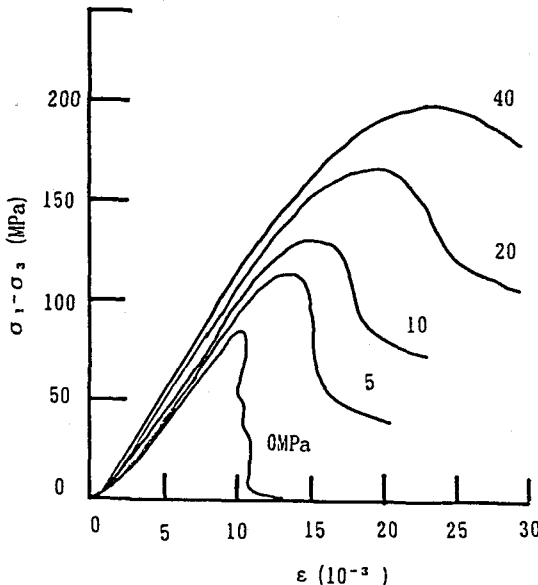


図1. 周圧下での応力-歪み線図
 σ_1 : 軸方向応力、 σ_3 : 周圧
 図中に周圧を示す

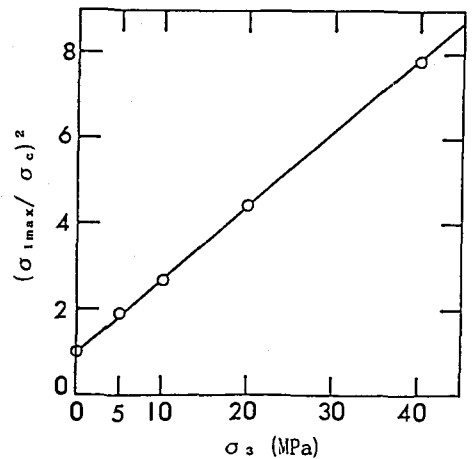


図2. 周圧(σ_3)と強度($\sigma_{1\max}$)との関係
 σ_c は一軸圧縮強度

と周圧 σ_3 との差とし、横軸の歪みは、軸方向応力と周圧との等しい試験開始時の軸方向歪みを原点にとって描いた。図よりわかるように、一軸圧縮試験では強度破壊点を過ぎると、載荷能力は急激に低下し、応力-歪み線図の傾きは急であり、残留強度はほとんど0である。しかし、周圧の増加とともに強度破壊点付近の曲率半径が次第に大きくなり、強度破壊点を過ぎても載荷能力の低下は緩やかとなる。また、残留強度も次第に増加する。これらの結果は、従来の試験結果と定性的に一致する⁴⁾。

周圧の増加にともなって強度が増加してゆくのはよく知られており、その様子を説明するのに、応力円包絡線説、せん断歪みエネルギー説等が提案されている。いくつかを試みたあと、図2にJanachが理論的な考察から提案した次式⁷⁾に基づいて整理した結果を示す。

$$\sigma_{1max}^2 = c(\sigma_3 + d) \quad (1)$$

σ_{1max} は強度破壊点での軸方向応力であり、図の縦軸は一軸圧縮強度 σ_c で標準化した値(σ_{1max}/σ_c)の2乗とした。(1)式は最初花こう岩を対象として提案されたものであるが、この場合にもよく当てはまることがわかる。興味深いのは、横軸の切片がおおよそ一軸引張強度になることである。

図3には、横軸に載荷速度の対数を取り、強度($\sigma_{1max} - \sigma_3$)の載荷速度依存性を示す。これより、いずれの周圧下でも強度は、載荷速度の対数にほぼ比例して増加してゆくことがわかる。載荷速度毎秒 $d\varepsilon/dt = 1 \times 10^{-6}$ と 1000×10^{-6} での強度の差 $\Delta\sigma$ は、周圧5, 10, 20 MPaでそれぞれ13.4, 17.2, 16.7 MPaであり、また以前に行った一軸圧縮応力下での値は16.5 MPaであった。この結果を見る限り $\Delta\sigma$ は周圧にあまりよらず、したがって、載荷速度が10倍になると強度は周圧によらない一定値だけ増加すると言える。

4. クリープ試験

周圧下でのクリープ試験について知られていることはわずかであり、特に破壊が生ずるまでの試験結果はほとんど見受けられない。今回は表1に示すような条件のもとで、破壊が生ずるまで試験を行った。

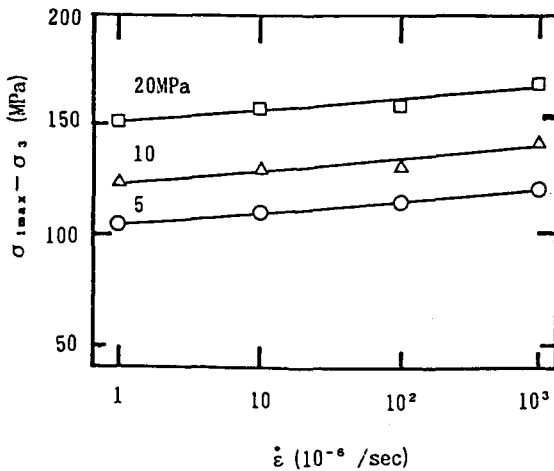


図3. 強度の載荷速度(ε)依存性

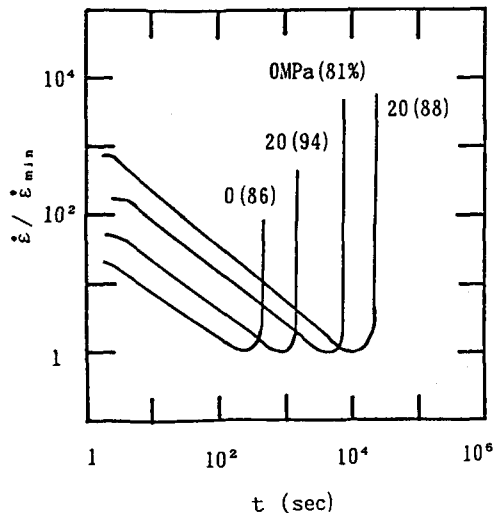


図4. クリープ歪み速度と経過時間

ε_{min} は最小歪み速度

図中の数字は周圧MPa (クリープ応力 σ_3 の%)

表1. 強度とクリープ試験条件

周圧 (MP a)	強度 (MP a)	クリープ応力 (MP a)	クリープ応力レベル (%)
0	84.85	68.73/72.97	81/86
5	113.82	97.89/101.48	86/89
10	129.90	114.31/122.20	88/94
20	159.01	139.93/149.44	88/94
40	196.46	168.09/182.27	88/94

まず、クリープ歪み速度と経過時間との関係を図4に示す。縦軸は最小歪み速度で規準化してある。これから、初期の間歪み速度は両対数グラフ上で-1の傾きで低下してゆくのがわかる。即ち、周圧下でも一軸圧縮クリープの場合と同様に対数クリープ則の成り立つことがわかる。このことは、周圧、応力レベルによらず、今回の試験範囲内では常に成り立つ。

図5には、歪み速度と残存寿命との関係を示す。ここで言う残存寿命Tとは、破壊までに残された時間であり、一軸圧縮クリープでは次の式の成り立つことがわかっている。

$$d\varepsilon/dt = C_0/T \quad (2)$$

即ち、3次クリープ領域では歪み速度がTに反比例して加速的に上昇してゆく。図5でも、Tが小さい時、両対数グラフ上での傾きがほぼ1となり、周圧下でも(2)式の成り立つことがわかる。前にも指摘したように、(2)式が成り立つとすれば、事前に試験片の破壊時刻の推定が可能である。

周圧下のクリープでも、1次クリープは対数クリープ則に従い、3次クリープでは(2)式の成り立つことがわかった。次にクリープ歪み速度とクリープ歪みとの関係を見てみる。図6には両者の関係を示したが、横軸はクリープ試験開始時点よりの歪みの増加分である。一軸圧縮クリープの場合にはクリープ歪み速度が最小値となるときのクリープ歪みは 0.8×10^{-3} 程度であり、これより歪みが大きくなると、次第に歪み速度が増加してゆく。また、最小歪みの軸を対称軸としてほぼ左右対称である。周圧が増加す

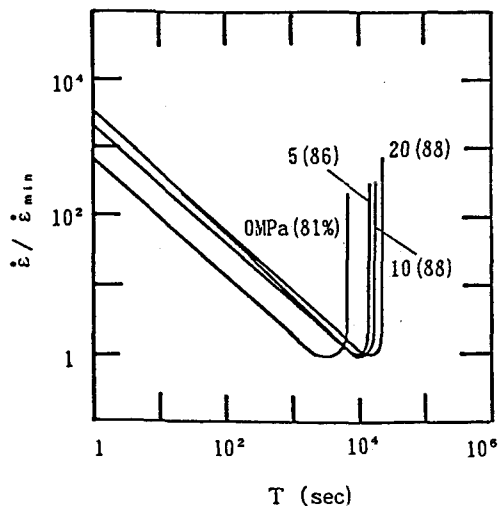


図5. クリープ歪み速度と残存寿命(T)

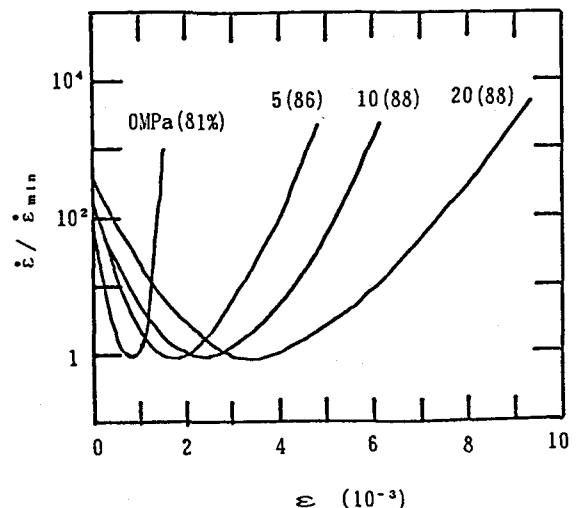


図6. クリープ歪み速度とクリープ歪み

ると歪み速度が最小となる時の歪みが大きくなり、周圧20MPaでは $3 \sim 4 \times 10^{-3}$ となる。また、形状は左右対称的でなくなると言えよう。なお、ここでは、各々周圧下での、試験結果の一例ずつを示したが、クリープ歪み速度とクリープ歪みとの関係は、試験ごとにほとんど変わらず、また応力レベルにもほとんど影響されない。図1に示したように、圧縮試験においては、周圧が増加するほど応力-歪み線の強度破壊点以降の傾きが緩やかになってゆき、強度破壊点を越えても負荷能力の低下は徐々にしか起こらなくなる。この事と、クリープ試験において、周圧の増加とともにクリープ歪みが相対的に大きくなることとは密接なかわりがあると考えられる。

図7には、横軸に次式で表される経過時間(t)と残存寿命(T)との比 τ をとって、クリープ歪み速度を示した。

$$\tau = t/T \quad (3)$$

τ は、tが小さい時にはtに比例し、破壊寸前ではTに反比例する。図7のような表示方法を用いると、今回行った試験結果は周圧、応力レベルによらずほとんど重なってしまう。

5. まとめ

今回は周圧下での圧縮試験とクリープ試験を行った。重要な結果をまとめてみると次のようである。

- 1) 圧縮試験で載荷速度を10倍にした時の強度の増加($\Delta\sigma$)は、周圧によって変化しない。
- 2) 周圧下でも、1次クリープは対数クリープ則に従い、3次クリープでは歪み速度は残存寿命に反比例して増加する。
- 3) クリープ試験で歪み速度が最小となるクリープ歪みは、周圧の増加に従い増加する。
- 4) クリープ歪み速度- τ 曲線は、周圧にも応力レベルにもほとんど影響されない。

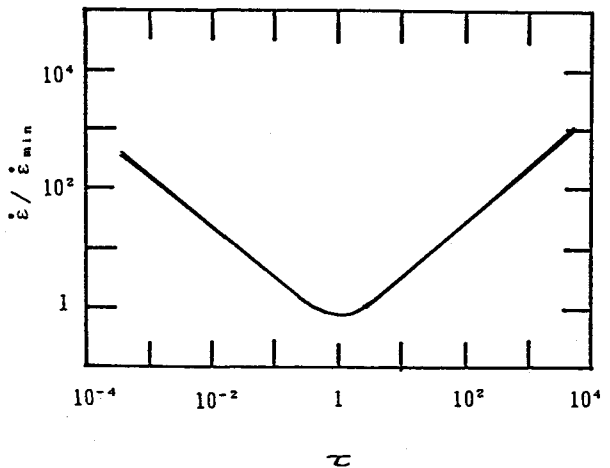


図7. クリープ歪み速度と τ

参考文献

- 1) 西松裕一、大久保誠介、山口勉、小泉昇三：日本鉱業会誌，97，1163-1168（1981）
- 2) 福井勝則、大久保誠介、西松裕一：資源・素材学会誌，105，521-526（1989）
- 3) 大久保誠介、西松裕一、秋哲淵：第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，282-286（1991）
- 4) 山口勉、大久保誠介、西松裕一、小泉昇三：日本鉱業会誌，99，87-92（1983）
- 5) kranz R. L. and Scholz C. H.：JGR，82，4893-4898（1977）
- 6) 山口勉、大久保誠介、西松裕一、小泉昇三：日本鉱業会誌，99，1029-1034（1983）
- 7) Janach, W.：Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.，14，209-215（1977）