

(122) 岩石の圧縮強度とクリープ寿命の分布特性に及ぼす水分の影響

東京大学大学院 〇秋 淵
東京大学工学部 正会員 大久保 誠介

The Influence of Moisture on the Statistical Distribution of Compression Strength and Lifetime in Creep of Rocks

Seok Yeon Chu, Graduate Student
Seisuke Okubo, The University of Tokyo

Abstract

The values of Compression strength and lifetime in creep always show wide dispersion. Until now, most of the studies have been carried out under air-dried condition. The data concerning to influence of moisture on the statistical distribution of the strength and lifetime are insufficient, and there still remains a number of unclarified points. The statistical study on the strength and lifetime of rocks under the water-saturated condition has an important engineering significance in design of a mining excavation and also in long-term stability of an underground structure. In this study, laboratory tests have been conducted for the purpose of obtaining fundamental knowledge on statistical distribution of rocks under both conditions.

At first, uniaxial compression tests were performed upon Sanjome andesite and Toge tuff to investigate the effect of moisture on statistical distribution. It is shown that the strengths under both conditions accord with Weibull's distribution, and the value of Weibull's coefficient of the uniformity, m , is almost the same in both conditions. Also, creep tests have been carried out in both conditions. When the logarithms of probability of survival were plotted against the lifetime, upwards concave curve and linear trend were obtained under air-dried and water-saturated conditions, respectively. This difference on P-t diagram is well explained assuming the same Weibull's coefficient of the uniformity in both conditions.

1. はじめに

岩石の強度がばらつくことは古くから指摘されている。西松(1970)は、個々のクラックの進展し始める応力(クラックの強度)がワイブル分布に従うと仮定し、花こう岩と安山岩の圧縮強度のばらつきについて論じた。上野(1960)は、クラックの強度がワイブル分布に従うとの仮定に基づき、大理石の曲げ強さと引張強さの平均値の比は、理論値と実験値とでよい一致を示すと報告している。

岩石の種類によって程度の差はあるが、クリープの寿命も著しくばらつくことが明らかになっている。クリープ寿命に関しても、個々のクラックの時間経過に伴う伸びを評価し、最も早く限界長さに達するクラックによって試験片の寿命が決まるとすれば、強度の場合と同様の議論が成り立つ。他方、確率過程論に基づいて取り扱う立場も有力である。Scholz(1972)は、単結晶石英のクリープ破壊は確率過程論的問題であると述べている。また、西松(1980)は安山岩の遅れ破壊試験を行い、一段のボアソン過程と見なせるとした。

水分は岩石の強度やクリープ寿命に大きな変化をもたらすことが知られている。著者ら(1992)は一軸圧縮試験で、応力-歪線図の形状は気乾状態と湿潤状態とで似通っているが、岩石強度は湿潤状態で低下することを示した。今後、地下空間は種々の用途で活用されると思われるが、その際、水分の影響を考慮する必要がある場合が多く、特に水分を含んだ岩石のクリープ挙動を明かにすることは地下構造物の長期

安定性を検討するのに役に立つと思われる。Lajtai (1986) は、湿潤状態では低い応力でクリープ変形の進む可能性があることを述べている。実際、著者ら (1991) は、同じ応力レベルでのクリープ寿命は気乾状態より湿潤状態で相当短くなることを示した。岩石の気乾状態と湿潤状態との破壊機構が異なれば、それに対応して強度の分布特性やクリープ寿命の分布特性が異なると考えられるが、その分布が気乾状態と湿潤状態とで変わらないのか、変わるとすればどのように変化するのかなど現状ではその間に答えるための基礎データが不足している。以下では最近行った圧縮試験とクリープ試験結果のばらつきを調べた上で、両者の分布特性の関連性について検討する。

2. 一軸圧縮強度

試験機としては容量10tの油圧式サーボ試験機を用い、クラスⅠ岩石は定歪速度で、クラスⅡの岩石は応力帰還制御 (大久保、1984) で試験を行った。試験機室は20±5℃、湿度65±15%に保たれている。以下で言う気乾状態とは、試験片整形後1カ月以上試験機室で自然乾燥させた後試験をした場合であり、湿潤状態とは試験機室で自然乾燥させた試験片を真空ポンプで減圧しながら試験片の中が飽和状態となるまで水を強制浸透させた後、1カ月以上水中に放置してから試験をした場合である。なお、水は市販のイオン交換による清浄水をしばらく空気中に放置し、pHが5.7前後となり以後殆ど変わらなくなってから試験に供した。今回使用した岩石は三城目安山岩、田下凝灰岩の2種類である。試験片は、高さ約52mmで直径25mmの円柱形とし、試験片の両端面は平行度±0.02mm以内に仕上げた。なお、三城目安山岩については比較的流理面が顕著であったので同じブロックから流理面に対して平行 (X,Y) 及び、垂直 (Z) の3方向より試験片を作成した。

強度が次式で表わされるワイブル分布に従うと仮定する。

$$F(\sigma_F) = 1 - G(\sigma_F) \\ = 1 - \exp(-\sigma_F^m / \alpha) \quad (1)$$

ここで、 $F(\sigma_F)$ とは試験片の一軸圧縮強度 σ_F の累積分布関数で圧縮強度が σ_F を越えない確率を表す。また、 m と α は定数で、 m はワイブルの均一性係数と呼ばれ、 m 値が大きい程度ばらつきが小さいことを意味する。図1、図2には三城目安山岩のX方向と田下凝灰岩での $1/G$ と σ_F との関係を示す。これより、両岩石共に図上ではほぼ直線の関係となりワイブル分布に従うと言えよう。図1に示した三城目安山岩の線図では、歪速度の増加により右側に移動するだけで最小自乗法で求めた直線の傾き m はさほど変わらない。湿潤状態での関係も、気乾状態と比べて全体的に左側に移動するだけで形状は気乾状態とあまり変わらない。ここには示していないが、三城目安山岩のY,Z方向の線図からも同様の傾向が見られる。図2に示した田下凝灰岩の場合、気乾状態では傾き m が載荷速度 $C = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ でかなり小さくなっているが、その以外のところではさほど変わらない。

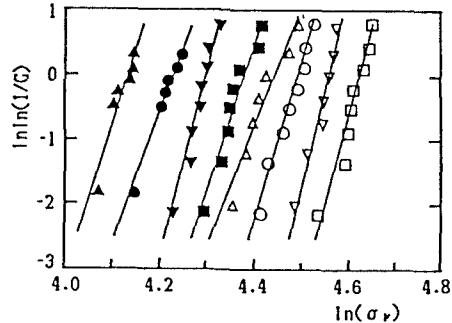


図1 三城目安山岩(X)方向の一軸圧縮強度の分布

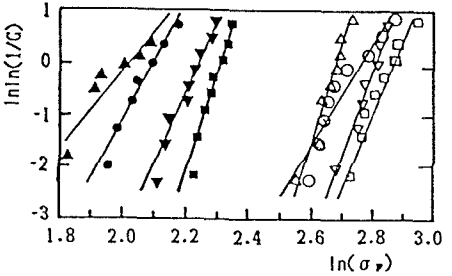


図2 田下凝灰岩の一軸圧縮強度の分布

△: 載荷速度 $C = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, ○: $C = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
 ▽: $C = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, □: $C = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
 Open symbol: 気乾状態
 Solid symbol: 湿潤状態

表1 一軸圧縮試験より求めたワイブル分布の諸パラメータ (載荷速度、 $C = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の場合)

岩石試料			均一性係数 m	α (MPa) ^m	相関 係数	試験 回数
三城 目安 山 岩	X	DRY	30.5	2.02E60	0.97	7
		WET	29.1	2.36E54	0.98	8
	Y	DRY	24.0	2.54E49	0.91	8
		WET	19.3	1.41E36	0.98	7
	Z	DRY	22.6	5.62E48	0.97	7
		WET	18.9	5.58E35	0.88	8
田下 凝灰岩	DRY	15.8	1.90E19	0.97	7	
	WET	14.0	4.04E13	0.96	9	

他方、湿潤状態では載荷速度が大きくなるほど m も大きくなる傾向が伺えるが、試験回数が少ないこともあって、今後さらなる検討が必要と思われる。これらの点を除けば傾向は三城目安山岩の場合と同じである。表1には、載荷速度 C が 10^{-4} s^{-1} のときのワイブルの均一係数 m 及び α 値を最小自乗法で求めた結果を示す。興味深いことに、均一性係数 m は両岩石共に気乾状態と湿潤状態とで大差はない。

3. クリープ寿命

5 tの油圧式クリープ試験機(大久保、1986)を用いて三城目安山岩のクリープ試験を行なった。一方、田下凝灰岩の場合はクリープ荷重がかなり低いため、容量1 tの空気式クリープ試験機を用いた。空気式クリープ試験機の概略図を図3に示す。(a)はコンプレッサで(b)の精密減圧弁(Bellofram社製

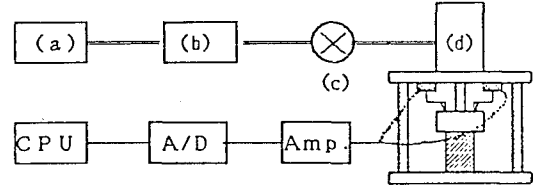


図3 空気式クリープ試験装置の概略図

type10)に最大 10 kg/cm^2 の空気圧を供給する。圧力は精密減圧弁によって一定に保たれ、(d)の空気圧シリンダ(Bellofram社製SAS-140-122)に供給される。クリープ試験に際しては、まず(c)のバルブを締めたまま精密減圧弁を調整して設定圧力とする。その後、バルブを開けることによって、試験片には0.5s以内に所定の応力が加わる。試験中の荷重の変動は0.2%以下であった。試験片はステンレス容器内に納められ、湿潤状態でのクリープ試験は容器に水を満たした状態で行った。変位は試験機本体の上板に接着した一對のシングルカンチレバー式変位計により測定される。変位計の検定は上ブラテンの上部に種々の厚さの板をはさんで行った。変位計の出力は、直流増幅器によって増幅された後、デジタルマルチメータ(アドバンテスト製TR6846)に入力され、デジタル化される。デジタルマルチメータの出力は、GP-1B回線を通し、マイクロコンピュータ(PC-9801)に転送される。変位の分解能は $3.7 \times 10^{-4} \text{ mm}$ である。

図4(a)、(b)には、クリープ寿命の分布特性を知るために縦軸を生存確率とし、経過時間を横軸とした(以下 $P-t$ 線図)三城目安山岩のX方向の実験結果を示す。気乾状態の $P-t$ 線図では、クリープ寿命が小さい所とクリープ寿命が大きい所とで傾きが若干異なり、全体的には下に凸な曲線となる。他方、湿潤状態での $P-t$ 線図は、ほぼ直線となる。図5(a)、(b)に示した田下凝灰岩の $P-t$ 線図でも三城目安山岩とほぼ同様の傾向が見られるが、気乾状態では三城目安山岩の場合よりもっと下に凸な曲線となる。湿潤状態では、気乾状態より直線に近い分布曲線となる。

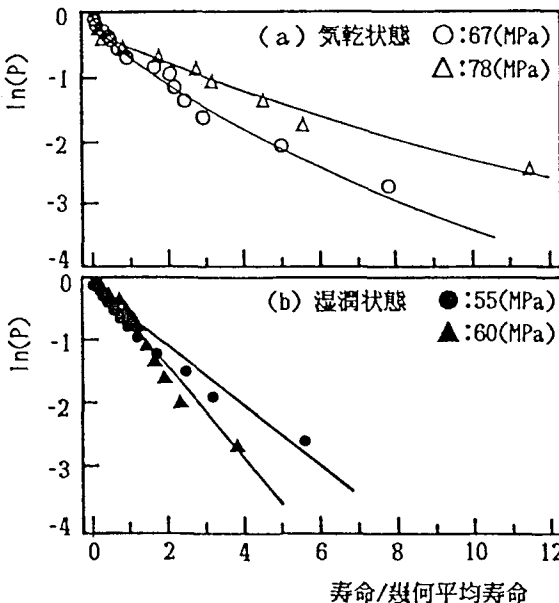


図4 三城目安山岩(X方向)のクリープ寿命の分布

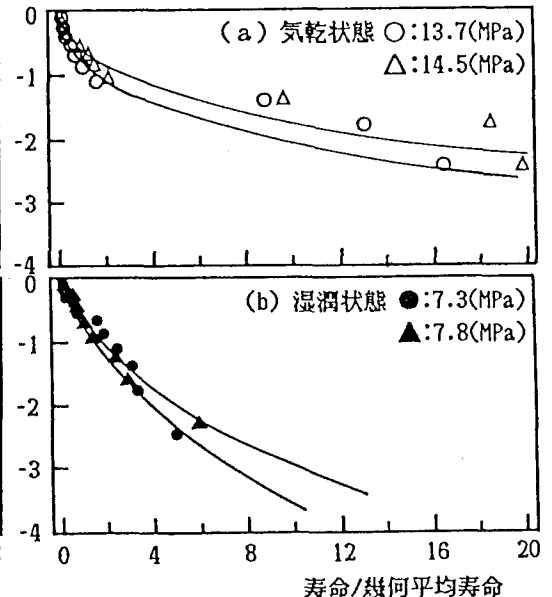


図5 田下凝灰岩のクリープ寿命の分布

破壊現象の進む速度が応力関数として次式で表わされると仮定する(大久保、1991)。

$$d\Lambda/dt = -L\sigma^n \quad (2)$$

ついで、 Λ は最初1で、次第に減少し0となった時破壊すると考える。

$$\int_1^0 d\Lambda = \int_0^t -L\sigma^n dt \quad (3)$$

クリープでは、応力 σ は一定値 σ_c となるので、クリープ寿命を t_c として次式が成り立つ。

$$t_c = 1/L\sigma_c^n \quad (4)$$

次に、応力速度 $\dot{\sigma}$ 一定で圧縮試験を行った場合を考えると、圧縮強度を σ_F として次式を得る。

$$\sigma_F = \left(\frac{n+1}{L\dot{\sigma}} \right)^{1/(n+1)} \quad (5)$$

(4)、(5)式より、寿命と強度との関係式が導かれる。

$$t_c = \frac{\sigma_F^{n+1}}{(n+1)\dot{\sigma} \cdot \sigma_c^n} \quad (6)$$

ここで、一軸圧縮強度が σ_F を越える確率 $P(\sigma_F)$ が次式で表されたとする。

$$G(\sigma_F) = \exp(-\sigma_F^m/\alpha) \quad (7)$$

(6)、(7)の式から、生存確率 P とクリープ寿命 t_c との関係式が得られる。

$$P(t_c) = \exp \left\{ - \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{(n+1)\dot{\sigma}} \right) \cdot \sigma_c^{nm/(n+1)} \cdot t_c^{m/(n+1)} \right\} \quad (8)$$

(8)式では、生存確率 P がクリープ寿命 t_c の $m/(n+1)$ 乗に比例し、 $P-t$ 線図上で、 $m=(n+1)$ であれば直線、 $m < (n+1)$ であれば下に凸、 $m > (n+1)$ であれば上に凸となる関係が成立する。 n は応力係数とも呼ばれる定数で載荷速度を変えた一軸圧縮試験から求めた n 値を表2に示す。これより、 n 値は気乾状態の方が湿潤状態より大きいことがわかる。表2に示した $m/(n+1)$ 値から明らかなように、両岩石ともに $m/(n+1)_{dry} < m/(n+1)_{wet}$ となる。即ち、気乾状態での $P-t$ 線図は湿潤状態での $P-t$ 線図に比べ下に凸な曲線となり、この点で実験結果と一致している。(8)式右辺の α 、 m 、 n 、と $\dot{\sigma}$ を一軸圧縮試験から求め、これらの値を(8)式に代入して $P-t$ 線図を描いたものを図4、図5では実線で示した。これより、両岩石ともに(8)式からの計算結果は実験結果とある程度一致していることがわかる。

なお、(2)式の代わりに

$$d\Lambda/dt = -L \exp(\beta\sigma) \quad (2)'$$

とすれば、(8)式に対応して次式を得る。

$$\ln P(t_c) = - \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{\beta} \ln \left\{ t_c \cdot \beta \cdot \dot{\sigma} \cdot \exp(\beta\sigma_c) \right\} \right]^m \quad (8)'$$

また、(2)式の代わりに

$$d\Lambda/dt = -L \sinh(\beta\sigma) \quad (2)''$$

表2 三城目安山岩と田下凝灰岩での
応力関数 n 及び $m/(n+1)$

岩石試料			β (1/MPa)	n	m/(n+1)
三城 目安 山岩	X	DRY	0.42	37	0.80
		WET	0.41	27	1.04
	Y	DRY	0.42	37	0.65
		WET	0.42	29	0.67
	Z	DRY	0.42	37	0.61
		WET	0.40	28	0.68
田下		DRY	2.75	41	0.38
凝灰岩		WET	2.68	23	0.61

m : 載荷速度、 $C=10^{-4}s^{-1}$ 場合である

とすれば、(8)式に対応して次式が得られる。

$$\ln P(t_c) = - \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{\beta} \cdot \cosh^{-1} \left\{ t_c \cdot \sigma_c \cdot \beta \cdot \sinh(\beta \sigma_c) \right\} \right]^m \quad (8)''$$

(8)'、(8)'' 式中の常数 β を一軸圧縮試験から求め表2に示すが、 β は気乾状態と湿潤状態とでさほど変わらない。従って、(8)'、(8)'' 式はクリープ応力 σ_c によって $P-t$ 線図の形状が決定される。それらの計算結果を図6に示す。これより、クリープ応力 σ_c が大きくなるほど下に凸な曲線となる傾向を見せる。クリープ応力は気乾状態の方が湿潤状態より大きく、それ故気乾状態での $P-t$ 線図が湿潤状態での $P-t$ 線図よりもっと下に凸曲線となるとして、今回の実験結果を説明出来る。なお、(8)'' 式の計算結果は(8)' 式のそれと大差がなかったので示さなかった。

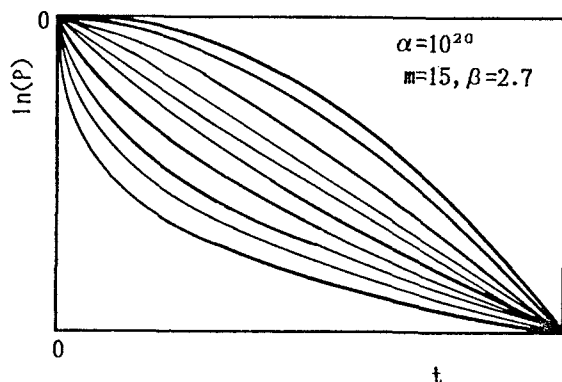


図6 (8)'式の計算結果、クリープ応力 σ_c は、
上から順に0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30(MPa)である

4. 考察

(8) 式中の m は気乾状態と湿潤状態とでさして違わない。一方、 n は気乾状態で大きく、 $m/(n+1)$ の値は小さくなる。その結果、 $P-t$ 曲線は気乾状態の方がより下に凸なり、この傾向は実験結果と一致している。また、一軸圧縮試験でのばらつきはクリープ寿命のばらつきと密接な関係があり、一軸圧縮試験のばらつきより、(8)式を用いてクリープ寿命の分布が予想出来る。今回の研究結果では、 m が気乾状態と湿潤状態とでさほど変わらない。これは、個々のクラックの伸びの結果もたらされる試験片全体の破壊の仕方が、気乾状態と湿潤状態とで変化なく、ただ単にある応力下でそれらの現象が進む速度のみが異なると考えると説明出来る。破壊現象が進む速度の応力関数の式として、(2)式の方が通常よく使われる。これは、含まれるパラメータ n が無次元であり、色々な試験結果を比べるのに便利だからと思われる。他方、(2)'、(2)'' 式との関係を仮定すると、同じ β の値で気乾状態と湿潤状態との時間依存性挙動を説明できるが、どちらの方がより良いのかは今後検討を重ねたい。一方、確率過程論的立場によれば、一段のポアソン過程では $P-t$ 線図は直線となり、今回の湿潤状態での実験結果は説明出来る。しかしながら、気乾状態での実験結果はおそらく多段のポアソン過程を仮定する必要があるだろう。従来より、本論文で主として取り上げた決定論的な立場よりのばらつきの説明と、確率過程論的な立場よりの議論がなされて来たが、両者とも一長一短があり、いまの所、場合に応じて使い分けていく必要があろう。

参考文献

- 西松裕一：岩石の強度の確率論，日本鉱業会秋季大会分科研究会試料，A2-3 (1970)
- 上野五郎：岩石の曲げ強さに関する統計学的研究，材料試験，9, 81, pp. 423-427 (1960)
- C.H.Scholz：Static Fatigue of Quartz, J. Geoph. Res., Vol. 77, No. 11, pp. 2104-2114 (1972)
- 西松，山口：岩石の引張遅れ疲労寿命の分布特性に関する確率過程論的研究，材料，29, pp. 86-90 (1980)
- 大久保，西松，何，秋：湿潤状態での岩石の一軸圧縮強度の載荷速度依存性，材料，41, pp. 403-409 (1992)
- E.Z.Lajtai and L.P.Bielus：Delayed Failure Loaded in Uniaxial Compression, Rock Mech. Rock Eng., Vol. 19, pp. 71-87 (1986)
- 大久保，西松，秋：岩石の時間依存性挙動に及ぼす水分影響，岩の力学シンポジウム，pp. (1991)
- 大久保，西松：応力速度のNegative Feed Backを用いた岩石の一軸圧縮試験，日鉱誌，100, pp. 1052-1056 (1984)
- 大久保，西松：三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性と構成方程式，日鉱誌，102, pp. 395-400 (1986)