

(58) 岩石の時間依存性挙動に及ぼす水分の影響

— 一軸圧縮状態における —

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

東京大学大学院 秋 哲淵

The Influence of Moisture on the Time Dependent behaviour of Rocks in Uniaxial Compression

Seisuke Okubo, The University of Tokyo

Yuichi Nishimatsu, The University of Tokyo

Suck Yeun Chu, Graduate Student

Abstract

Moisture has various effects on the behaviour of rocks. It is well known that the compressive strength decreases significantly with increase of moisture content. Though many studies have been carried out concerning to the effects of moisture, the influence on the time dependent behaviour is still open to discussion. It is very important to clarify the time dependency for analysing the long-term stability or durability of underground structures.

At first, uniaxial compression tests have been carried out varying the loading rate. The results indicate that the increase of strength with 10 fold increase of loading rate has a certain value which does not depend on moisture content. Also, creep tests have been carried out in air-dried and water saturated conditions, and it is found that the life time depends on the difference between the strength and the creep stress, $(\sigma_F - \sigma_c)$; The creep under the same stress difference gives the same life time without regard to moisture content.

1. はじめに

岩石強度は、気乾状態と湿潤状態とで相当に異なることが知られている。Colback(1965)は、湿度が増加すると頁岩や砂岩の圧縮強度が顕著に低下することを示した。Vutukuri(1974)は、従来の研究をまとめたが、その結果を見ると岩石の強度は水分によって左右されるが、その程度は岩石ごとに異なる。岩石に及ぼす水の影響はその後も多くの研究者によって取り上げられたが、その機構については不明な点が多い。Kirby(1984)は、水分の及ぼす化学的影響の特集号の初めで、水分の影響は複雑であり、種々の機構が互に関連し合っていると述べている。今後、地下空間は種々の用途に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。Lajtai(1986)は、湿潤状態では低い応力でクリープ変形が進む可能性があるとし、特に岩盤の長期安定性を検討する場合には水分の影響を考慮する必要があると述べている。しかしながら、気乾状態と湿潤状態とを比較しつつ、岩石の時間依存性挙動を検討した例は少ない。

岩石の時間依存性を調べる方法として、載荷速度を変えた圧縮試験や、クリープ試験がある。クリープ試験の場合、破壊強度の80%でクリープ実験を行った、あるいは応力レベル80%でクリープ実験を行った、と言った表現が見られる。気乾状態と湿潤状態とで、それぞれの破壊強度の80%でクリープ実験を行った時、両者の挙動が似通っていれば、応力レベルを支配パラメータとした議論が可能であろう。しかしながら、現状ではこの間に答えるための基礎データが不足している。また、定歪速度試験で、歪速度によって強

度が変化することは良く知られている。2つの現象の間には密接な関係があるが、その関係は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様に変化するのか、など不明な点が多い。

以下では、最近行った圧縮試験とクリープ試験の結果を紹介し、続いてここで述べた2つの疑問点を中心に検討する。

2. 載荷速度を変えた圧縮試験

試験機としては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岩石は応力帰還制御（大久保,1984）で試験を行った。試験室は温度 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 15\%$ 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ヵ月以上試験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1ヵ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使用し、空气中に放置した時のpHは5.7前後である。

図1には、載荷速度 $C = 10^{-5}/\text{s}$ で流離面に垂直に載荷した、三城目安山岩の気乾状態と湿潤状態との応力-歪線図を示す。これより、湿潤状態では、強度が15%程度低下すること、ヤング率が6%程度低下することがわかる。湿潤状態の応力-歪線図は全体に縮むが、形状はあまり変らない。特に、強度破壊点以降で、応力-歪曲線が複雑に曲っている部分も、似通っているのは興味深い。同様の傾向は、稲田花こう岩や河津凝灰岩でも見られる（何,1989）。

一軸圧縮試験で載荷速度を増加すると、強度が順次増加することが知られている。図2には、縦軸を一軸圧縮強度 σ_F とし横軸を載荷速度 C の対数とした実験結果の例を示す。この線図上で両者の関係は、ほぼ直線となり次式で近似できる。

$$\sigma_F = \frac{\text{Const.} + \ln(C)}{\delta} \quad (1)$$

ここで、 δ は常数であり、各岩石での値を表1に示す。興味深いことに、何れの場合も気乾状態と湿潤状態とで、 δ は殆ど変わらない。ここでは示さないが、応力-歪線図は、気乾状態でも湿潤状態でも、載荷速度の大きい時のものが小さい時のものを内包する。その意味では、図1に示した傾向と一致するが、違いは載荷速度によるヤング率の変化はずっと小さいことである。同様の傾向は、三城目安山岩、河津凝灰岩等でも認められる（何,1989）。

表1 実験に使用した岩石の諸元

岩石	一軸圧縮強度 (MPa)	δ (1/MPa)
	気乾/湿潤	気乾/湿潤
三城目安山岩	76/63	0.41/0.41
稲田花こう岩	190/184	0.23/0.23
河津凝灰岩	33/23	2.0 /1.8
田下凝灰岩	16/9	2.8 /2.7
大谷凝灰岩	11/5	3.2 /3.3

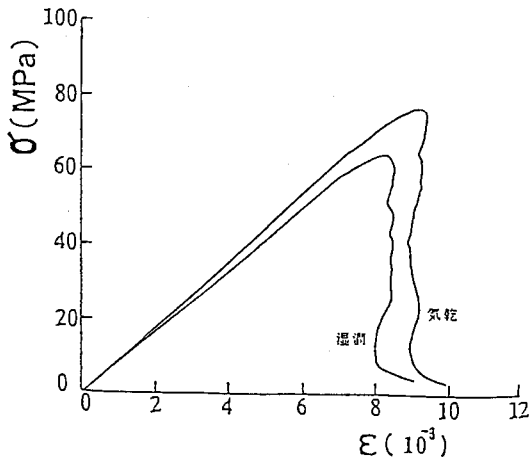


図1 三城目安山岩の気乾状態と湿潤状態の
応力-歪線図の比較

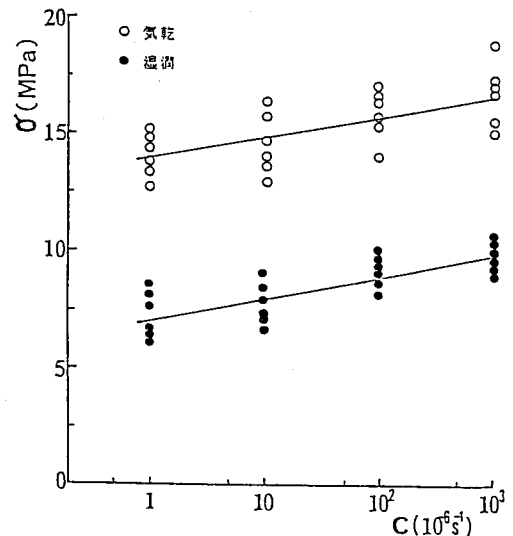


図2 気乾状態と湿潤状態での載荷速度による
一軸圧縮強度の変化(田下凝灰岩)

3. クリープ試験と寿命

油圧式クリープ試験機(大久保, 1986)を用いて行った測定例を図3に示す。ここでは、縦軸を歪速度、横軸を $\tau = t / (t_c - t)$ とした。 t は経過時間、 t_c は寿命であり、 τ は経過時間残存寿命比と言える。歪速度は最初傾き -1 で減少してゆくが、 $\tau = 1$ 付近で最小となった後、傾き 1 で増加してゆき試験片は破壊する。 τ は t の小さい時には t に比例し、破壊間近では残存寿命 $T = (t_c - t)$ に反比例するので、1次クリープは対数クリープ則に従い、3次クリープ領域で歪速度は残存寿命に反比例すると言える。この傾向は、気乾状態でも湿潤状態でも見られる。また、歪速度- τ 線図は両状態で殆ど変わらない。図4には $P-t$ 線図の例を示すが、これより、応力レベル 82% の気乾状態での寿命が、応力レベル 76% の湿潤状態での寿命より長く、応力レベルによって両状態の寿命を整理出来ないと言える。

破壊現象の進む速度が応力の関数 $\lambda(\sigma)$ に比例するとしよう。 λ としては、

$$\lambda = L \cdot \exp(\delta \cdot \sigma) \quad (2)$$

を仮定する。ついで、『応力の関数 $\lambda(\sigma)$ の積分値が、岩石によって定まる一定値 Λ に達すると破壊する。』と仮定する。クリープの場合には応力 σ は一定値 σ_c であるので、 λ の時間 0 から t までの積分値は、 $L \cdot \exp(\delta \cdot \sigma_c) \cdot t$ となる。この値が Λ となると破壊するので、 t_c を寿命として次式が成り立つ。

$$t_c = \Lambda / \{L \cdot \exp(\delta \cdot \sigma_c)\} \quad (3)$$

次に、応力速度 C' を一定として、一軸圧縮試験を行った場合を考える。破壊強度 σ_F に達するまでの時間を $t_F = (\sigma_F / C')$ とし、 $\lambda(\sigma)$ を t_F まで積分した値が Λ に等しいとすれば、近似的に次式を得る。

$$\sigma_F = \frac{\ln(\Lambda \delta / L) + \ln(C')}{\delta} \quad (4)$$

(3), (4) 式より、寿命と強度の関係式が得られる。

$$t_c = \exp\{\delta(\sigma_F - \sigma_c)\} / (C' \cdot \delta) \quad (5)$$

以上の考え方の要点は、応力の関数 $\lambda(\sigma)$ の履歴積分が支配パラメータであることであり、応力腐食による亀裂の進展を考え亀裂密度がある値になると破壊するとした考え方や、応力依存型速度過程論に基づい

た考え方とも矛盾しない。

(5) 式は、応力速度 C' の時の一軸圧縮強度と、クリープ応力 σ_c の時の寿命の関係を示している。(3) 式を利用して一軸圧縮強度の載荷速度依存性より、三城目安山岩の δ を求めると、気乾状態でも湿潤状態でも約0.4となった。 σ_F としては $C' = 1 \text{ MPa/s}$ の時の値を採用することにすれば、(5) 式は次のようになる。

$$t_c = 2.5 \exp\{0.4(\sigma_F - \sigma_c)\} \quad (5')$$

図5には、これを実線で示した。これは、一軸圧縮試験の結果よりのクリープ寿命の予想値である。実際、クリープ試験を行って求めた寿命の幾何平均値を図に示したが、測定された寿命は実線より若干上にくることが多いものの、気乾状態とか湿潤状態とかに依らず(5') 式が大体成立すると言える。すなわち、一軸圧縮強度試験の結果を使用して、クリープ寿命を推定することが可能である。

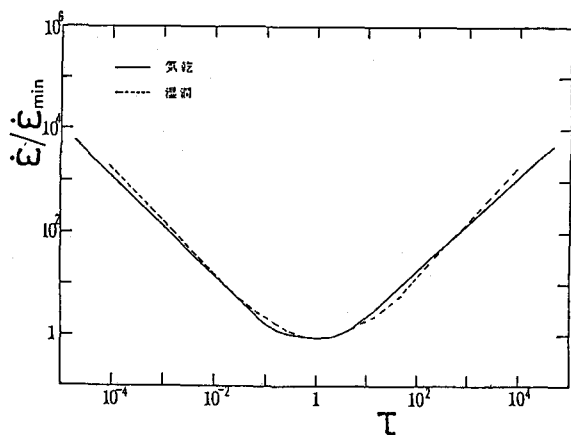


図3 三城目安山岩のクリープ歪速度
 $\tau = t / (t_c - t)$

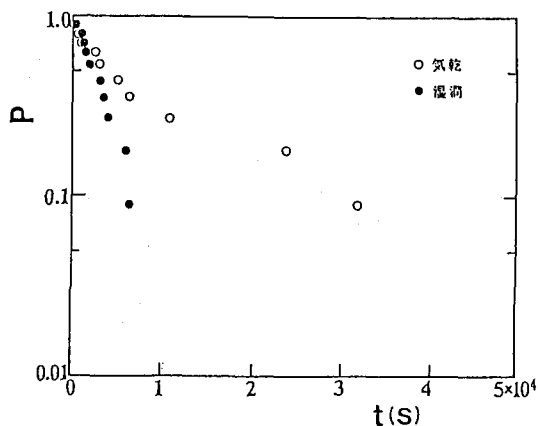


図4 三城目安山岩の気乾状態と湿潤状態
での $P-t$ 線図 (生存確率-寿命線図)

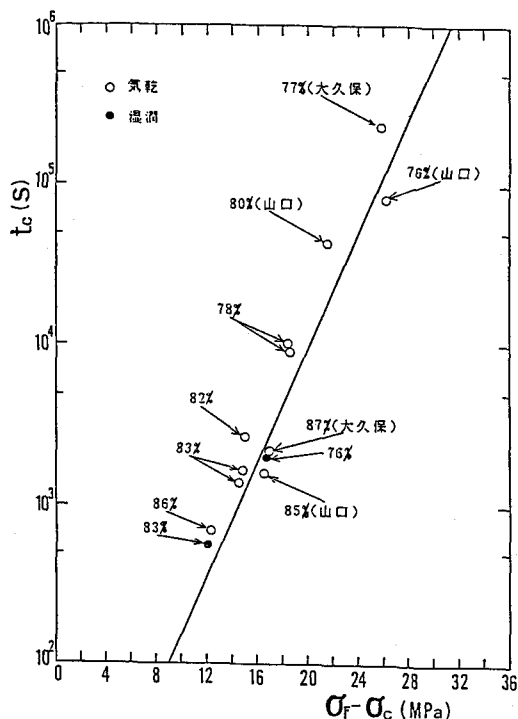


図5 クリープ寿命の測定値と予測値 (実線)
山口(1983)と大久保(1986)の測定値も
示した。図中の数字は、載荷速度 $C = 10^{-4}/s$ の時の一軸圧縮強度を基準と
した応力レベル。

一軸圧縮試験より求めた δ を使用して推定した寿命が、実際と若干異なる理由を2つ挙げておこう。(5)式の σ_F は定応力速度試験の時の破壊強度であるのに対し、実際に使用したのは定歪速度試験より求めた強度である。強度破壊点直前では応力速度が次第に小さくなってゆき、その結果、こうして求められた強度は小さ目となっていることが考えられる。今一つは、圧縮試験で応力が σ_F となる時(強度破壊点)と、クリープ試験で試験片が破壊する時とを、対応するものとみなし等価に扱っている点である。

通常クリープ試験を行う時には、一軸圧縮強度の何%で行ったと言う表現が使用される。前に述べたように、気乾状態と湿潤状態とで同じ応力レベルでクリープ試験を行うと、湿潤状態の方がはるかに短い寿命となる。これは、応力レベル(σ_c/σ_F)では整理しきれないことを示唆している。(5)式より、同一岩石であれば、クリープ寿命を決定するのは実は $(\sigma_F - \sigma_c)$ であることがわかる。気乾状態と湿潤状態とで強度が異なっているとしても、一軸圧縮強度とクリープ応力との差が等しければ、クリープ寿命は等しくなる。簡単な例を挙げてみよう。仮に、気乾状態での一軸圧縮強度が100 MPaで湿潤状態のそれが50 MPaの岩石があるとする。それぞれの80%レベルでのクリープ応力は、80 MPaと40 MPaとなり、 $(\sigma_F - \sigma_c)$ は20 MPaと10 MPaとなる。したがって、 $(\sigma_F - \sigma_c)$ が10 MPaしかない湿潤状態の80%応力レベルの寿命は、 $(\sigma_F - \sigma_c)$ が20 MPaの気乾状態の場合の寿命より相当に短くなる。

4. 考察

(2)式の代りに

$$\lambda(\sigma) = L \cdot \sigma^n \quad (6)$$

とすれば、(3)、(4)、(5)式に対応した次式が得られる。

$$t_c = \Lambda / (L \cdot \sigma_c^n) \quad (7)$$

$$\sigma_F = \{\Lambda(n+1)/L\}^{1/(n+1)} C'^{1/(n+1)} \quad (8)$$

$$t_c = \frac{\sigma_F}{C' (n+1)} (\sigma_F / \sigma_c)^n \quad (9)$$

(9)式では、クリープ寿命 t_c は応力レベル(σ_c/σ_F)の n 乗に反比例する。クリープ試験でよく応力レベルを用いた試験結果の整理が行われるのは、このような考察が背景にあるためであろう。しかしながら、気乾状態と湿潤状態とでは、(6)式の n が異なるため、両者を共に議論する時、応力レベルを用いた議論は成り立たなくなる。

今回示した圧縮試験結果では、載荷速度 C が10倍となると $\Delta\sigma = \ln(10)/\delta$ だけ強度が増加し、その値は気乾状態と湿潤状態とで変わらない。また、(3)式からクリープ寿命は、クリープ応力が $\Delta\sigma$ だけ増すと1/10になると言える。このように、圧縮試験での強度の載荷速度依存性と、クリープ試験での寿命の応力依存性とは結びついている。

参考文献

- P.S.B.Colback and B.L.Wiid: Proc.3rd.Can.Rock Mech.Symp., Univ.Tront, Jan.15-16, pp.65-83(1965)
 V.S.Vutukuri, R.D.Lama and S.S.Saluja: Handbook on Mechanical Properties of Rocks(Vol.1), pp.50-57(1974) Trans Tech Publications
 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一, 小泉昇三: 日鉱誌, Vol.99, p.1029-1034(1983)
 大久保誠介, 西松裕一: 日鉱誌, Vol.100, pp.1052-1056(1984)
 S.H.Kirby: J.Geoph.Res., Vol.89, pp.3991-3995(1984)
 E.Z.Lajtai and L.P.Bielus: Rock Mech. Rock Eng., Vol.19, pp.71-87(1986)
 大久保誠介, 西松裕一: 日鉱誌, Vol.102, pp.395-400(1986)
 何 昌栄: 岩石の圧縮荷重下での変形・破壊の時間依存性, pp.24-49(1989) 東京大学博士論文