三城目安山岩の一軸圧縮強度の載荷速度依存性 および水飽和度依存性*

片岡みなみ¹ 羽柴公博² 福井勝則³

Dependence of Uniaxial Compressive Strength of Sanjome Andesite on Loading Rate and Water Saturation

by Minami KATAOKA^{a*}, Kimihiro HASHIBA^a and Katsunori FUKUI^a

a. Department of Systems Innovation, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan (*Corresponding author, E-mail: mkataoka@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

It is known that the rock strength increases with an increase in loading rate. Many studies on the loading-rate dependence of rock strength have been performed under two environments, namely water-saturated and air-dried conditions, and the loading-rate dependence has not been investigated well under the conditions of various water saturations observed in situ rock masses. In addition, the quantitative relation between the loading-rate dependence and water saturation has not been examined. In this study, the uniaxial compression test of Sanjome andesite under various water saturations was carried out and the dependence of the strength on the loading rate and water saturation was investigated. The test was performed with alternating two loading rates and the strength corresponding to each loading rate was determined from a single specimen. The test results show that the strength increase with a ten-fold increase in loading rate is almost the same under various water saturations and that the strength increases with a decrease in water saturation. Based on the test results, the theory to explain the dependence of the strength on the loading rate and water saturation was suggested. The variation in the strength was discussed to validate the theory.

KEY WORDS: Rock, Andesite, Loading-Rate Dependence, Water Saturation, Uniaxial Compressive Strength

1. 緒 言

斜面や地下空洞などの岩盤構造物の安定性を評価するためには、岩盤や岩石の時間依存性の把握が重要である。また、岩石の力学的挙動は、水の存在により大きく変化することが知られている¹⁾。露天掘り鉱山の残壁などの掘削された岩盤斜面の水飽和度は降雨や地下水流動により変化し、地下空洞周辺の岩盤の水飽和度は自由面からの排水と乾燥により変化すると考えられるため、水飽和度が岩石の力学的挙動に与える影響を把握することも重要である。岩石強度の水飽和度依存性は、応力腐食²⁾などで説明されている。さらに、応力腐食反応は時間に依存する現象であることから、岩石の時間依存性の主要な機構の一つとしても考えられている。岩石の時間依存性挙動の一つとして、載荷速度が増加すると強度が増加することが知られており^{3,4)}、これまでに岩石強度の載荷速度依存性と水飽和度依存性は関連付けて検討されてきた⁵⁻¹⁰⁾。しかし、これまでの岩石の時間依存性に関する検討は、湿潤条件と気乾条件の2種類の環境下でなされたものが多く、実際の岩盤で現れるような様々な水飽和度での時間依存性についてはよく調べられていなかった。また、岩石の水飽和度と時間依存性挙動との定量的な関係も解明されていなかった。

本研究では、三城目安山岩を対象として、6種類の異なる水飽

和度で実施された試験より、載荷速度と水飽和度が一軸圧縮強度に与える影響について調べた。試験結果をもとに、強度の載荷速度依存性および水飽和度依存性を統一的に説明する理論について検討した。

2. 試 験 方 法

片岡ら¹¹⁾は、4種類の岩石(三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、秋芳大理石)を用いた載荷速度切替試験¹²⁾を実施し、様々な水飽和度での2種類の載荷速度に対応する一軸圧縮下での応力-歪曲線を取得した。そのうちの載荷速度が 10^{-5} /sでの結果に着目して、稲田花崗岩を用いた定歪速度試験の結果と合わせて、水飽和度が強度および応力-歪曲線に与える影響について検討した。本研究では、片岡ら¹¹⁾の試験結果の中でも、過去の研究データの蓄積が多い三城目安山岩の結果を用いて、載荷速度が 10^{-4} /sでの強度も含めて、載荷速度と水飽和度が強度に与える影響について検討した。

以下に、片岡ら¹¹⁾が実施した試験方法の概要を述べる。試験片は直径25 mm、高さ50 mmの円柱形とした。21本の試験片を用意し、全ての試験片は2週間以上の試験室での気乾後に、105℃に設定した恒温器内で6日間以上乾燥させ、重量 m_d を測定した。恒温器での乾燥後は、1日間常温に戻した後にイオン交換水で真空湿潤させ、重量 m_w を測定した。 m_w および m_d から算出した有効空隙率は、平均19.7%であった。重量 m_w および m_d の測定後、片岡ら¹¹⁾に記載した方法で、試験片を6種類の異なる水飽和度(飽和湿潤: Water-saturated, 気乾浸水: Immersed in water, 1日気乾: Air-dried for 1 day, 気乾: Air-dried, 真空乾燥: Vacuum-dried, 炉乾燥: Oven-dried)に調整し、試験に使用した。

*2017年12月26日受付 2018年2月20日受理 資源・素材学会平成29年度春季大会および秋季大会において一部発表

1. 正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻
2. 正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 准教授
3. 正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 教授
[著者連絡先] FAX: 03-3818-7492 (東大・システム創成)

E-mail: mkataoka@sys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: 岩石, 安山岩, 載荷速度依存性, 水飽和度, 一軸圧縮強度

Fig.1 Stress-strain curves of Sanjome andesite in alternating loading-rate tests under several water conditions. Thick dotted curves are experimental data. Thin lines indicate estimated curves corresponding to the loading rates of 10^{-5} and 10^{-4} /s.

試験直前には試験片の重量 m_i を測定し、水飽和度 w を次式で算出した。

$$w = \frac{m_i - m_d}{m_w - m_d} \quad (1)$$

片岡ら¹¹⁾は、様々な水飽和度での強度の荷重速度依存性を調べるために、荷重速度切換試験¹²⁾を実施した。通常の強度試験の場合は、数種類の荷重速度のもとで実施する試験を、種々の水飽和度において繰り返さなければならないため、ある程度特性の揃った試験片が多数必要であり、かなりの手間と時間を要する。一方、荷重速度切換試験では、荷重の開始から終了まで2種類の荷重速度を交互に切り換えることで、1本の試験片から2種類の荷重速度に対応する応力-歪曲線を推定することができる。

試験では、容量 500 kN のデジタル制御式サーボ試験機を用いた。荷重は歪ゲージ式ロードセルで、変位はサーボ試験機に設置された差動変圧器式変位計で、それぞれ測定した。また、次式で表される応力帰還制御¹³⁾を採用した。

$$\varepsilon - \alpha \frac{\sigma}{E} = Ct \quad (\alpha \neq \pm\infty) \quad (2)$$

$\alpha = \pm\infty$ は定応力速度試験に相当し、 $\sigma = ECt$ となる。ただし、 ε , σ , E , C , t はそれぞれ歪、応力、ヤング率、荷重速度、時間である。 α は応力帰還量を決める定数で、ここでは 0.3 に設定した。試験では、式 (2) の左辺が一定量 $\Delta\varepsilon$ だけ増加するごとに、荷重速度 C を C_1 と C_2 で交互に切り換えた。本研究で用いた C_1 , C_2 および $\Delta\varepsilon$ は、気乾条件での検討結果¹²⁾より、どの水飽和度においても $C_1 = 10^{-5}$ /s, $C_2 = 10^{-4}$ /s, $\Delta\varepsilon = 5 \times 10^{-4}$ とした。

3. 試験結果

三城目安山岩の代表的な応力-歪曲線を Fig. 1 に示す。応力-歪曲線は水飽和度条件ごとに色分けして示している。どの水飽和度においても、荷重の初期では荷重速度の切換の影響はほとんど見られないが、応力がピーク強度の 40% 程度に達すると荷重速度の切換による応力の増減が徐々に見られるようになり、ピーク強度付近で顕著になった。ピーク強度以降で、応力は急激に低下し、ピーク強度の 20% 程度に達すると応力-歪曲線の傾きは緩やかになったが、この間も荷重速度の切換による応力の増減が観察された。

Fig. 1 に細線で示したように、応力-歪曲線上で荷重速度を C_1

Table 1 Experimental results of Sanjome andesite.

Condition	w	σ_{fl} (MPa)	$\Delta\sigma_{fC}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{fw}$ (MPa)	b (/MPa)	a_w/a
Oven-dried	1.0×10^{-3}	89.8	5.1	23.4	0.45	7.7×10^4
Vacuum-dried	1.4×10^{-2}	83.1	4.5	16.8	0.51	3.1×10^3
Air-dried	3.2×10^{-2}	79.3	5.0	13.0	0.46	5.1×10^2
Air-dried for 1 day	0.20	68.9	4.6	2.5	0.51	3.3
Immersed in water	0.29	69.9	4.9	3.6	0.47	5.5
Water-saturated	1.0	66.3	5.1	0.0	0.46	1.0
Average			4.9		0.48	

w : Water saturation. σ_{fl} : Uniaxial compressive strength at a loading rate of 10^{-5} /s. $\Delta\sigma_{fC}$: Strength increase with the loading-rate change from 10^{-5} to 10^{-4} /s. $\Delta\sigma_{fw}$: Strength increase with the water condition change from water-saturated condition at a loading rate of 10^{-5} /s. b and a : Constants in Eq. (5) and a_w is the value under water-saturated condition.

Fig.2 Relation between strength increase with the loading-rate change and water saturation. The scale of the right vertical axis was calculated with Eq. (8).

から C_2 に切り換える直前の点と、 C_2 から C_1 に切り換える直前の点をそれぞれ滑らかにつなぎ、2種類の荷重速度に対応する応力-歪曲線を推定した。それぞれの荷重速度での応力-歪曲線は水飽和度により大きく変化し、水飽和度が小さいときの曲線が大きいときのそれを内包する傾向が見られた。水飽和度が応力-歪曲線に与える影響の詳細については、片岡ら¹¹⁾を参照されたい。

推定された応力-歪曲線から得られた荷重速度 C_1 での強度 σ_{fl} および荷重速度が C_1 から C_2 に増加したときの強度の増加量 $\Delta\sigma_{fC}$ の、水飽和度条件ごとの平均値を Table 1 に示す。また、 $\Delta\sigma_{fC}$ と水飽和度 w の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 のプロットは、Fig. 1 と同様に水飽和度条件ごとに色分けして示している。 $\Delta\sigma_{fC}$ は水飽和度によらずほぼ一定で、平均 4.9 MPa となった。三城目安山岩の $\Delta\sigma_{fC}$ は湿潤条件と気乾条件とでほぼ一致する⁸⁾ことが確かめられているが、本研究により、様々な水飽和度においても変化しないことがわかった。

2種類の荷重速度での強度 σ_f と水飽和度 w の関係を Fig. 3 に示す。 σ_f と w は水飽和度条件ごとの平均値をプロットし、Fig. 1 と同様に色分けして示している。どの荷重速度においても、 w が飽和湿潤条件である $w = 1$ から減少するにつれて、片対数グラフ上で σ_f は直線的に増加する傾向が見られた。そこで、強度 σ_f と水飽和度 w の関係を、Yilmaz¹⁴⁾と同様に次式で近似した。

$$\sigma_f = \sigma_{f,w} + k \ln\left(\frac{1}{w}\right) \quad (0 < w \leq 1) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{f,w}$ は飽和湿潤条件での強度の平均値である。 k は近似直線の傾きであり、強度の水飽和度依存性の程度を表す定数で

Fig.3 Relation between strength and water saturation. The approximate line is expressed by Eq. (3).

ある。 $\sigma_{f,w}$ および最小二乗法により求めた k とその決定係数を Table 2 に示し、Fig. 3 にはこの近似直線を引いた。2 種類の載荷速度で k の値がほぼ同じことから、2 種類の載荷速度で強度の水飽和度依存性の程度が同等であるといえる。

式 (3) の右辺第二項は、飽和湿潤条件からの水飽和度の減少にともなう強度の増加量 $\Delta\sigma_{f,w}$ に対応するため、次式のように表される。

$$\Delta\sigma_{f,w} = k \ln\left(\frac{1}{w}\right) \quad (4)$$

Table 1 には、載荷速度 C_1 における強度と飽和湿潤条件での強度の平均値の差 $\Delta\sigma_{f,w}$ をまとめた。なお、表には示していないが、載荷速度 C_2 での $\Delta\sigma_{f,w}$ は C_1 でのそれとほぼ等しくなった。

4. 強度の載荷速度依存性および水飽和度依存性

岩石強度の載荷速度依存性は、これまでの研究で速度過程論や確率過程論¹⁵⁾ にならって説明されている¹⁶⁻¹⁸⁾。3 章より、三城目安山岩の $\Delta\sigma_{f,C}$ は水飽和度によらずほぼ一定であったため、大久保ら^{8, 19)} の検討と同様に、破壊が進行する速度 $d\lambda/dt$ が応力 σ の指数関数に比例するとした。ここで、 λ および t はそれぞれ破壊の進行および時間である。 $d\lambda/dt$ は、具体的には亀裂の進展速度、剛性の低下速度、非弾性歪の増加速度などを意味する²⁰⁾。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \exp(b\sigma) \quad (5)$$

ここで、 a と b は定数である。 $d\lambda/dt$ の時間積分が、ある値 A になると破壊すると仮定した¹⁶⁻¹⁹⁾。

$$A = \int_0^t \frac{d\lambda}{dt} dt \quad (6)$$

定応力速度での強度試験の場合は、式 (2) で $\alpha = \pm\infty$ に相当するので $\sigma = ECt$ として、 $t = t_f$ のときにピーク強度 σ_f に達する。その結果、強度と載荷速度の関係が次式のように表される。

$$\sigma_f = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{AbEC}{a}\right) \quad (7)$$

ただし、 $\exp(b\sigma_f) \gg 1$ とした。式 (7) は、強度 σ_f と載荷速度の対数 $\ln(C)$ が比例関係にあることを表している。 $1/b$ は、縦軸を強度、横軸を載荷速度の対数として表示したデータ点を直線近似したときの傾きであり、強度の載荷速度依存性の程度を表す定数

Table 2 Constants of approximation (Eq. (3)).

C (/s)	$\sigma_{f,w}$ (MPa)	k (MPa)	R^2
10^{-5}	66.3	3.6	0.86
10^{-4}	71.4	3.5	0.85

C : Loading rate. $\sigma_{f,w}$: Uniaxial compressive strength under water-saturated condition. k : Degree of water-saturation dependence of the strength. R^2 : Coefficient of determination.

となる⁶⁻⁹⁾。

載荷速度が C_1 から C_2 に増加したときの強度の増加量 $\Delta\sigma_{f,C}$ は、式 (7) で載荷速度が変化しても a , b , A , E はほとんど変化しないとすると、次式のように表せる。

$$\Delta\sigma_{f,C} = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{C_2}{C_1}\right) \quad (8)$$

2 章では式 (2) での応力帰還制御による載荷速度切替試験を実施したが、ピーク強度までは定応力速度試験との差は小さいとして、 $\Delta\sigma_{f,C}$ を用いて式 (8) より b を求めた。この水飽和度条件ごとの平均値を Table 1 に示す。どの水飽和度条件でも $\Delta\sigma_{f,C}$ が同程度であることから明らかだが、 b の値は水飽和度によらず一定で、平均 0.48 /MPa となった。参考までに、Fig. 2 に示した $\Delta\sigma_{f,C}$ と水飽和度の関係には、 $1/b$ の軸も示した。なお、 E は載荷速度により変化するが、この変化を考慮して求めた b の値は Table 1 の結果とほとんど変わらなかった。

式 (5) の b は強度の載荷速度依存性の程度を表す定数であるが、もう一つの定数 a についても検討した。同じ載荷速度における、飽和湿潤条件からの水飽和度の減少にともなう強度の増加量 $\Delta\sigma_{f,w}$ は、式 (7) から次式のように表せる。ただし、水飽和度が変化しても、 b , A , E , C はほとんど変化しないとした。

$$\Delta\sigma_{f,w} = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{a_w}{a}\right) \quad (9)$$

ここで、 a_w は飽和湿潤条件での a であり、式 (9) の a_w/a は各水飽和度条件での a に対する a_w の比である。3 章で求めた水飽和度条件ごとの $\Delta\sigma_{f,w}$ と本章で求めた $b = 0.48$ /MPa から式 (9) より計算した、載荷速度 C_1 での a_w/a を Table 1 にまとめた。水飽和度の減少にともない a_w/a の値は増加した。なお、表には示していないが、載荷速度 C_2 での a_w/a の値は C_1 でのそれと同程度となった。また、 E は水飽和度により変化するが、この変化を考慮して求めた a_w/a の値は Table 1 の結果とほとんど変わらなかった。

水飽和度の増加にともなう a の増加は、式 (5) からわかるように破壊の進行速度が水飽和度により変化することを示しており、例えば、同じ応力のもとでの破壊の進行速度が、飽和湿潤条件では気乾条件の 510 倍であるといえる (Table 1)。また、式 (5) は次式のように書き換えられる。

$$\frac{1}{a} \frac{d\lambda}{dt} = \exp(b\sigma) \quad (10)$$

式 (10) からは、破壊進行のメカニズムは応力の関数 $\exp(b\sigma)$ としてあまり変化せず、 a により時間軸である dt が伸縮されることで破壊の進行速度が変化する、つまり、水が豊富であることにより破壊の進行が加速することが示される。なお、式 (5) の右辺を $m\sigma^n$ とし、式 (6) の破壊条件を仮定すると、強度が載荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例する関係が得られる¹⁸⁾。しかしながら、 m と n の両方が湿潤状態と気乾状態とで変化するため、式 (10) のように水と時間の影響をわかりやすく説明することはできなかった。

Fig.4 Relation between a_w/a and water saturation. a_w/a was calculated with Eq. (9) using $\Delta\sigma_{f,w}$ and b . The line was calculated with Eq. (11) using b of 0.48 /MPa and k of 3.6 MPa.

a は水飽和度 w により変化するため、これらの関係を調べてみた。式 (9) および試験結果の近似式である式 (4) より、次式が導かれる。

$$\frac{a_w}{a} = w^{-bk} \quad (11)$$

Fig. 4 に、Table 1 にまとめた a_w/a と w の関係および式 (11) より計算した直線を示す。式 (11) の直線は、本章で求めた $b = 0.48$ /MPa および 3 章で求めた 2 種類の荷重速度での平均値である $k = 3.6$ MPa から計算した。図より、 a_w/a と w の関係は式 (11) とほぼ一致していることがわかる。 a は、強度の荷重速度依存性の程度を表す b および水飽和度依存性の程度を表す k を用いて表され、水飽和度の関数であることがわかった。

なお、反応速度論に基づく応力腐食による亀裂進展速度を表す式において、式 (5) の a に対応する定数は亀裂先端での水の活量となり²¹⁾、相対湿度や水蒸気圧^{5, 9, 10, 22, 23)}などが用いられてきた。本研究の検討からは、式 (11) に示す水飽和度の関数が使用できることが示された。

5. 強度の分布特性

4 章の結果から、破壊の進行速度 $d\lambda/dt$ を表す式 (5) の a が、式 (11) のような水飽和度の関数であることがわかった。そこで、式 (5) の a を水飽和度の関数 $f(w)$ 、 $\exp(b\sigma)$ を応力の関数 $g(\sigma)$ と表して、次式のように書き換えた。

$$\frac{d\lambda}{dt} = f(w) \cdot g(\sigma) \\ f(w) = a_w w^{bk}, \quad g(\sigma) = \exp(b\sigma) \quad (5')$$

ここで、 a_w 、 b および k は定数である。4 章と同様に破壊条件として式 (6) を仮定すると、強度 σ_f の荷重速度依存性および水飽和度依存性は次式のように表せる。ただし、 $\exp(b\sigma_f) \gg 1$ を利用した。

$$\sigma_f = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{AbEC}{a_w w^{bk}} \right) \quad (7')$$

強度の荷重速度依存性と水飽和度依存性を表している式 (7') を用いて、ある荷重速度と水飽和度での強度から、他の荷重速度と水飽和度での強度を推定できる。そこで、全ての試験データを用いて式 (7') の妥当性を検討した。まず、式 (7') をもとに飽和

湿潤条件以外での強度 σ_f を、飽和湿潤条件での強度 $\sigma_{f,w}^*$ へと変換した。

$$\sigma_{f,w}^* = \sigma_f - k \ln \left(\frac{1}{w} \right) \quad (12)$$

式 (12) の右辺第二項は、式 (4) のある水飽和度と飽和湿潤条件での強度の差 $\Delta\sigma_{f,w}$ である。次いで、荷重速度 C_2 での強度 $\sigma_{f2,w}^*$ を荷重速度 C_1 での強度 $\sigma_{f1,w}^*$ へと変換した。

$$\sigma_{f1,w}^* = \sigma_{f2,w}^* - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{C_2}{C_1} \right) \quad (13)$$

式 (13) の右辺第二項は、式 (8) の荷重速度 C_1 と C_2 での強度の差 $\Delta\sigma_{f,C}$ である。 $\sigma_{f1,w}^*$ は理論的には荷重速度 C_1 、飽和湿潤条件での強度となり、荷重速度や水飽和度によらない試験片ごとの強度の分布特性についての議論に利用できる。

$\sigma_{f,w}^*$ および $\sigma_{f1,w}^*$ の分布特性を検討するために、式 (6) の A がワイブル分布²⁴⁾に従うと仮定した。

$$1 - F(A) = \exp \left\{ - \left(\frac{A}{A_w} \right)^B \right\} \quad (14)$$

ここで、 $F(A)$ は A の累積分布関数、 A は尺度母数、 B は形状母数である。式 (7') を式 (14) に代入し、式 (12) を用いて整理すると、次式が得られる。

$$1 - F(\sigma_{f,w}^*) = \exp \left\{ - \exp \left(\frac{\sigma_{f,w}^* - A_w^*}{B_w^*} \right) \right\} \\ A_w^* = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{AbEC}{a_w} \right), \quad B_w^* = \frac{1}{Bb} \quad (15)$$

さらに式 (13) を用いて整理すると、次式が得られる。

$$1 - F(\sigma_{f1,w}^*) = \exp \left\{ - \exp \left(\frac{\sigma_{f1,w}^* - A_{1,w}^*}{B_{1,w}^*} \right) \right\} \\ A_{1,w}^* = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{AbEC_1}{a_w} \right), \quad B_{1,w}^* = \frac{1}{Bb} \quad (16)$$

すなわち、 $\sigma_{f,w}^*$ および $\sigma_{f1,w}^*$ はグンベル分布²⁴⁾に従い、 B_w^* および $B_{1,w}^*$ は荷重速度と水飽和度に依存しないことが示唆される。なお、過去の研究¹⁶⁻¹⁸⁾では、式 (5) の応力の関数を σ^n として式 (14) と同様の仮定により、強度がワイブル分布に従うとした。材料強度の分布関数としてはワイブル分布が広く利用されてきたが、グンベル分布も利用されることがあり²⁵⁾、一定の環境下での岩石強度の整理においては両者の差は小さい²⁶⁾。しかしながら、応力の関数中の n は湿潤条件と気乾条件とで異なるため、湿潤条件と気乾条件のそれぞれでの強度の分布特性を検討するとどまっていた。

まず、式 (15) の妥当性を検討するため、3 章で求めた k の値を用いて式 (12) により変換した飽和湿潤条件での強度 $\sigma_{f,w}^*$ のグンベルプロットを Fig. 5 (a) に示す。プロットはこれまでの図と同様に、水飽和度条件ごとに色分けして示している。どちらの荷重速度においても $\sigma_{f,w}^*$ は直線状に並んでおり、グンベル分布に従うことがわかる。また、最小二乗法により式 (15) の A_w^* および B_w^* を求め、Fig. 5 (a) にはこの直線を引いた。 B_w^* はどちらの荷重速度においても 3.2 となった。次いで、式 (16) の妥当性を検討するため、4 章で求めた b の値を用いて式 (13) により変換した荷重速度 C_1 、飽和湿潤条件での強度 $\sigma_{f1,w}^*$ のグンベルプロットを Fig. 5 (b) に示す。 $\sigma_{f1,w}^*$ は直線状に並んでおり、グンベル分布

Fig.5 Gumbel plot for converted strength $\sigma^*_{f,w}$ and $\sigma^*_{fl,w}$.

に従うことがわかる。最小二乗法により式 (16) の $A^*_{1,w}$ および $B^*_{1,w}$ を求め、Fig. 5 (b) にはこの直線を引いた。 $B^*_{1,w}$ は 3.0 となり、 B^*_w とほぼ等しくなった。

試験結果として現れる強度 σ_f には、試験片の強度の分布特性と、荷重速度や水飽和度などの試験条件の影響が含まれていると考えられる。本研究では、式 (12) で強度に与える水飽和度の影響を補正することで、それぞれの荷重速度ごとに変換した強度 $\sigma^*_{f,w}$ が一つの分布に従い、それらの形状母数 B^*_w はほぼ等しくなった。さらに、式 (13) で強度に与える荷重速度の影響も補正することで、異なる荷重速度と水飽和度での試験結果から変換した強度 $\sigma^*_{fl,w}$ が一つの分布に従い、形状母数 $B^*_{1,w}$ は B^*_w とほぼ等しくなった。この結果は、強度の荷重速度依存性および水飽和度依存性を統一的に説明する式 (7') や、試験片の強度の分布特性を示す式 (15) および式 (16) の妥当性を示しているといえる。なお、 $A^*_{1,w}$ および $B^*_{1,w}$ から求めた変換係数は 0.055 となった。この値は過去の研究^{16, 17)} で得られた結果 (三城目安山岩の強度のワイブル分布の形状母数から換算した 0.036 ~ 0.069) と同程度となり、妥当な結果であると考えられる。

6. 結 言

様々な水飽和度で実施された三城目安山岩の一軸圧縮試験より、荷重速度および水飽和度が強度に与える影響について調べ、強度の荷重速度依存性および水飽和度依存性を説明する理論や強度の分布特性について検討した。本研究では、破壊の進行速度 $d\lambda/dt$ を式 (5') のように水飽和度の関数 $f(w)$ と応力の関数 $g(\sigma)$ で表すことで、三城目安山岩の強度の荷重速度依存性および水飽和度依存性を統一的に説明する式 (7') を導いた。式 (7') の荷重速度依存性の程度を表す定数 b および水飽和度依存性の程度を表す定数 k は、飽和湿潤条件や気乾条件などの 2 種類以上の異なる水飽和度での荷重速度切替試験により求めることができる。今後は、他の岩石における本理論の適用性を検討する必要がある。

本研究では、一軸圧縮強度の荷重速度依存性および水飽和度依

存性を対象としたが、クリープといったその他の時間依存性挙動との関係についての検討や、封圧下や引張応力下での検討が、今後の課題に挙げられる。また、強度特性だけでなく、変形特性やその時間依存性に与える水の影響^{11, 27)} についても検討することで、岩石の時間依存性および水飽和度依存性を統一的に説明する理論や構成方程式を構築することも、今後の課題である。

謝辞 試験の実施に際して、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻学生の包添書氏にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

References

- 1) A. B. Hawkins and B. J. McConnell: Q. J. Eng. Geol., **25** (1992), 115-130.
- 2) B. K. Atkinson and P. G. Meredith: Fracture mechanics of rock, edited by B. K. Atkinson, (Academic Press, London, 1987), pp.111-166.
- 3) W. F. Brace and R. J. Martin, III: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **5** (1968), 415-426.
- 4) S. S. Peng: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **10** (1973), 235-246.
- 5) O. Sano, I. Ito and M. Terada: J. Geophys. Res., **86** (1981), 9299-9311.
- 6) K. Masuda, H. Mizutani and I. Yamada: J. Phys. Earth, **35** (1987), 37-66.
- 7) K. Masuda, H. Mizutani, I. Yamada and Y. Imanishi: J. Phys. Earth, **36** (1988), 291-313.
- 8) S. Okubo, Y. Nishimatsu, C. He and S. Y. Chu: J. Soc. Mat. Sci. Japan, **41** (1992), 403-409.
- 9) N. Kodama, Y. Fujii, Y. Fujita and Y. Ishijima: Journal of MMIJ, **119** (2003), 461-468.
- 10) H. Jeong, S. Kang and Y. Obara: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **44** (2007), 321-331.
- 11) M. Kataoka, T. Bao, K. Hashiba and K. Fukui: Journal of MMIJ, **133** (2017), 107-115.
- 12) K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43** (2006), 894-904.
- 13) S. Okubo and Y. Nishimatsu: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **22** (1985), 323-330.
- 14) I. Yilmaz: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **47** (2010), 342-347.
- 15) 横堀武夫: 材料強度学第2版, (岩波書店, 東京, 1974), 第8~9章.
- 16) S. Okubo and S. Y. Chu: Journal of MMIJ, **110** (1994), 533-538.
- 17) K. Shin, S. Okubo, K. Fukui and K. Hashiba: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **42** (2005), 251-260.
- 18) K. Hashiba and K. Fukui: Rock Mech. Rock Eng., **48** (2015), 859-865.
- 19) S. Okubo and S. Y. Chu: Journal of MMIJ, **109** (1993), 917-922.
- 20) K. Hashiba and K. Fukui: Journal of MMIJ, **129** (2013), 553-558.
- 21) S. W. Freiman: J. Geophys. Res., **89** (1984), 4072-4076.
- 22) Y. Nara and K. Kaneko: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **42** (2005), 521-530.
- 23) Y. Nara and K. Kaneko: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43** (2006), 437-453.
- 24) 宮村鐵夫: 新製品・技術の開発と信頼性工学, (日科技連出版社, 東京, 2011), 第9章.
- 25) H. Rinne: The Weibull distribution: a handbook, (CRC Press, Boca Raton, 2009), Chapter 3.
- 26) V. Y. Glushko and G. T. Rubets: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **10** (1973), 763-766.
- 27) S. Okubo, X. Gao and K. Fukui: Journal of MMIJ, **121** (2005), 583-589.