一般講演
開発機械／岩盤工学／資源経済と社会システム／資源開発技術
2020年9月8日(火) 09:00 ～ 11:30 第2会場

# [1K0201-06-03] 支笏溶結凝灰岩のピークおよび残留強度の時間依存性に対する封圧の影響
# The Effect of Confining Pressure in the Time Dependence of Peak and Residual Strengths for Shikotsu Welded Tuff

〇金井 康将[1]、尾上 義将[1]、藤井 義明[1]、児玉 淳一[1]、福田 大祐[1] （1. 北海道大学）
〇Yasumasa Kanai[1], Yoshimasa Onoue[1], Yoshiaki Fujii[1], Junichi Kodama[1], Daisuke Fukuda[1] （1. Hokkaido University ）

キーワード：支笏溶結凝灰岩、ピーク強度、残留強度、時間依存性、封圧
Shikotsu Welded Tuff, Peak Strength, Residual Strength, Time Dependence, Confining Pressure

時間依存性に対する封圧の影響は岩盤構造物の時間依存性を考慮した解析に必要である。既往の研究では、ピーク強度について封圧と共に時間依存性が小さくなるという結果も得られているが、封圧の影響が明らかになっているとはいえない。また、残留強度の時間依存性と封圧の影響についてはほとんど明らかになっていない。本研究では、ピーク強度、残留強度の時間依存性に対する封圧の影響を明らかにするために、支笏溶結凝灰岩について、三軸圧縮試験を実施した。実験の結果得られた時間依存性に対する封圧の影響について、他の岩石と比較し、微視的な構造も考慮しながら、原因について考察した。

©一般社団法人資源・素材学会

## 1.　はじめに

岩石の変形・破壊挙動には時間依存性があり、岩石の強度がひずみ速度とともに増加するひずみ速度依存性やクリープ変形などとして現れる。明瞭な引き金によらない岩盤構造物の長期的な変形挙動や安定性を評価するためには、岩石や岩盤の時間依存性を把握することが重要である。時間依存性の程度は $n$ という指標で表すことができ、小さな $n$ は大きな時間依存性を表す。

$n$ と封圧との関係は岩盤構造物の時間依存性変形の解析に必要である。また、大きな岩盤応力下における岩盤構造物の解析では、掘削損傷領域(EDZ, Excavation Damaged Zone)が現れ、EDZ の物性値として残留強度の $n$ が必要となる。既往の研究で、ピーク強度について封圧と共に $n$ が大きくなるという結果も得られているが、封圧の影響が明らかになっているとはいえない。また、残留強度の $n$（以下では $n'$とする）に関する知見は、ほとんど得られていない。

本研究では、支笏溶結凝灰岩の三軸圧縮試験を行い、$n$、$n'$のデータを蓄積し、それらの封圧依存性について明らかにした。

## 2.　$n$、$n'$の算出

$n$ の値は、様々な方法により求めることができる。本研究では、$n$ 値を一度の試験から求めることができる交替ひずみ速度試験を行った(Hashiba et al., 2006)。この方法では、ひずみ速度を交替しながら三軸圧縮試験を行う。両対数グラフ上のピーク強度とひずみ速度の直線の傾きを $b$ とすれば、$n = \frac{1}{b} - 1$ である（図 1)。

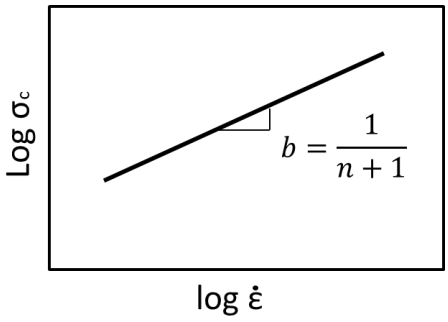



図 1 $n$ の求め方

## 3.　三軸圧縮試験

支笏溶結凝灰岩のブロックから、直径約 30 mm、長さ約 60 mm の供試体を作製した。恒温槽で 24 時間以上乾燥させ、室温 22 度の実験室で 24 時間静置し、気乾状態とした。湿潤状態で扱う供試体は半日以上、さらに熱収縮チューブ(NF300)で被覆して 3 時間以上純水中で真空脱気し、間隙水圧を負荷して載荷した。

供試体は超小型三軸ベッセル(Alam et al., 2014)にセットし、ひずみ速度は $10^{-4}$ $s^{-1}$と $10^{-5}$ $s^{-1}$を軸ひずみ 0.25%毎に入れ替え、軸ひずみ約 10%まで載荷した。封圧は気乾状態で 1~10 MPa、間隙水圧 1 MPa では 3~10 MPa とした。

### 3・1 気乾状態の実験結果

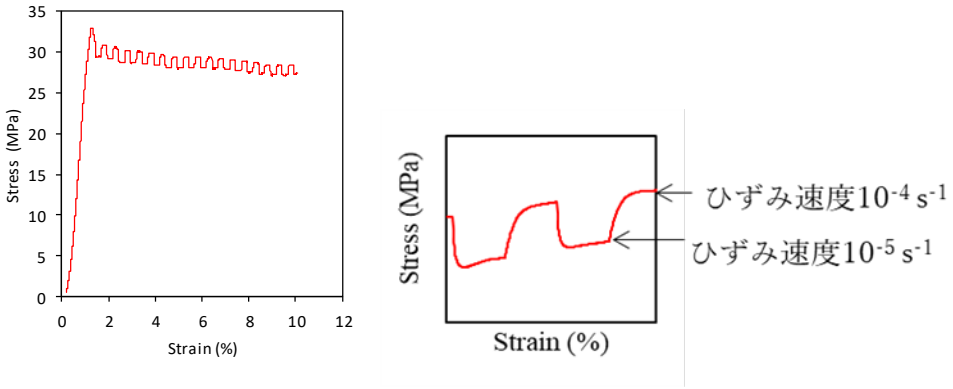
応力－ひずみ線図の例を図 2 に示す。残留強度はひずみ 8%の強度から読み取った。ピーク強度からは $n$、残留強度からは $n'$をそれぞれ求めた（表 1、図 3)。

図 3(a)から次式のように封圧 $Pc$ で $n$、$n'$を表すと係数 $A, B, A', B'$は表 2 のようになった。なお、( )内のデータは、計算には用いなかった。

$$n = A + BPc \tag{1}$$

$$n' = A' + B'Pc \tag{2}$$

$n$ は封圧と弱い負の相関、$n'$は封圧と負の相関がある。

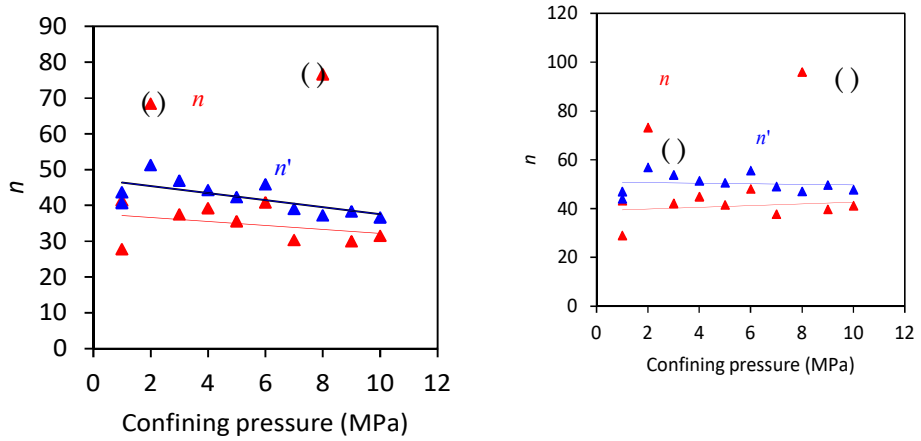



(a) 応力－ひずみ線図　　(b) 応力－ひずみ線図の拡大図

図 2 気乾状態における三軸圧縮試験の応力－ひずみ線図の例

表 1 気乾状態での三軸圧縮試験の結果

| swt | 封圧 [MPa] | ピーク強度(差応力) [MPa] | | $n$ | 残留強度(差応力) [MPa] | | $n'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $10^{-4}$ s$^{-1}$ | $10^{-5}$ s$^{-1}$ | | $10^{-4}$ s$^{-1}$ | $10^{-5}$ s$^{-1}$ | |
| 3 | 4.0 | 29.0 | 27.4 | 39.2 | 25.8 | 24.5 | 44.3 |
| 5 | 6.0 | 35.3 | 33.4 | 40.8 | 29.4 | 28.0 | 45.9 |
| 6 | 8.0 | 32.5 | 31.6 | 76.6 | 31.9 | 30.0 | 37.2 |
| 7 | 10.0 | 34.5 | 32.1 | 31.5 | 34.8 | 32.7 | 36.6 |
| 8 | 2.0 | 29.0 | 28.1 | 68.4 | 18.9 | 18.0 | 51.3 |
| 10 | 1.0 | 23.8 | 22.0 | 27.8 | 13.7 | 13.0 | 43.7 |
| 13 | 1.0 | 24.0 | 22.7 | 41.4 | 12.5 | 11.8 | 40.7 |
| 14 | 3.0 | 25.3 | 23.8 | 37.5 | 21.2 | 20.2 | 46.9 |
| 15 | 5.0 | 31.5 | 29.6 | 35.6 | 26.8 | 25.4 | 42.3 |
| 16 | 7.0 | 30.7 | 28.5 | 30.3 | 28.7 | 27.1 | 39.0 |
| 17 | 9.0 | 29.8 | 27.7 | 30.0 | 32.2 | 30.3 | 38.3 |




(a)差応力　　(b)全応力

図 3 封圧と $n$、$n'$の関係

表 2 支笏溶結凝灰岩における封圧と $n$、$n'$の関係

| Condition | $n$ | | | $n'$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $A$ | $B$ | $R^2$ | $A'$ | $B'$ | $R^2$ |
| Dry | 37.8 | −0.566 | 0.126 | 47.4 | −0.987 | 0.474 |
| Saturated | 34.4 | −0.324 | 0.02 | 46.3 | −1.39 | 0.585 |

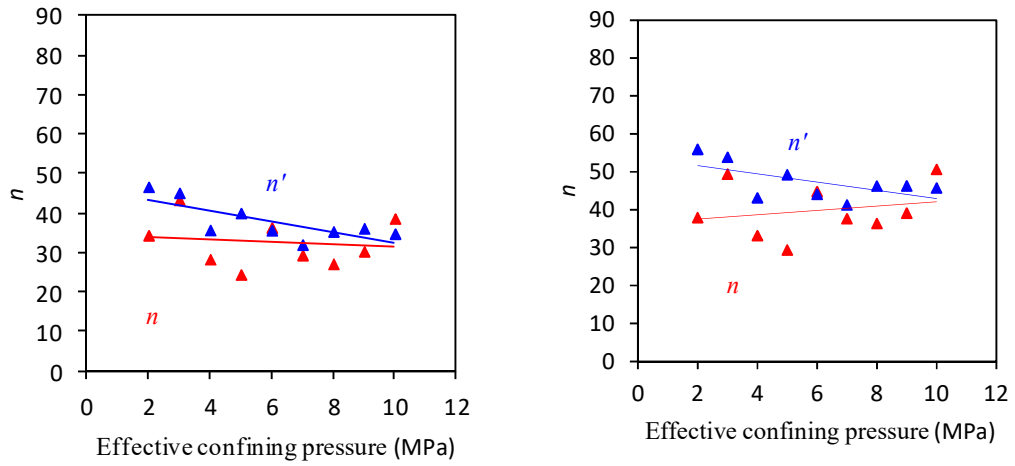
*赤：強い相関、橙：相関あり、黄：弱い相関、水色：相関なし

### 3・2 間隙水圧を負荷した実験結果

表 3、図 4 に実験結果を示す。残留強度はひずみ 4%（swtp9,11,12 はひずみ 8%）から読み取った。$n$ と封圧との相関はなく、$n'$は封圧と強い負の相関がある。

表 3 間隙水圧を負荷した三軸圧縮試験の結果

| swtp | 封圧 [MPa] | ピーク強度(差応力) [MPa] | | $n$ | 残留強度(差応力) [MPa] | | $n'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $10^{-4}$ s$^{-1}$ | $10^{-6}$ s$^{-1}$ * | | $10^{-4}$ s$^{-1}$ | $10^{-6}$ s$^{-1}$ * | |
| 3 | 4.0 | 26.3 | 22.5 | 28.3 | 21.1 | 18.6 | 35.7 |
| 4 | 6.0 | 28.3 | 25.0 | 36.3 | 27.9 | 24.6 | 35.7 |
| 5 | 8.0 | 26.5 | 22.5 | 27.1 | 28.5 | 25.1 | 35.4 |
| 6 | 10.0 | 35.0 | 31.2 | 38.6 | 34.9 | 30.7 | 34.8 |
| 7 | 2.0 | 21.3 | 18.7 | 34.4 | 10.8 | 9.8 | 46.7 |
| 8 | 3.0 | 23.3 | 21.0 | 43.4 | 16.8 | 15.2 | 45.1 |
| 9 * | 5.0 | 27.0 | 24.7 | 24.4 | 22.9 | 21.6 | 40.0 |
| 11 * | 7.0 | 26.8 | 24.8 | 29.4 | 25.9 | 24.1 | 32.0 |
| 12 * | 9.0 | 33.5 | 31.1 | 30.3 | 34.1 | 32.1 | 36.2 |




(a)差応力　　(b)全応力

図 4 有効封圧と $n$、$n'$の関係

### 4. 強度の時間依存性に対する封圧の影響について

Okubo et al. (2013)では、封圧が増加するとともに $n$ が増加するという知見が得られている。しかし、本研究では封圧と $n$ との相関はないか弱い負の相関という結果が得られた（表 2）。また、既往の研究においても、凝灰岩では同様の結果が得られている（表 4）。

表 4 $n$ に対する封圧の影響

| 岩石 | 封圧の影響 | 出典 |
|---|---|---|
| 三城目安山岩 | 増加 | Okubo et. al.(2013) |
| 稲田花崗岩 | 増加 | Okubo et. al.(2013) |
| 河津凝灰岩 | なし | Okubo et. al.(2013) |
| 田下凝灰岩 | なし | Okubo et. al.(2013) |
| 来待砂岩 | 増加 | 天羽(2017) |
| 支笏溶結凝灰岩 | ないか減少 | 本研究 |

Freiman (1984)によると、応力腐食による亀裂先端のサブクリティカルな成長速度(3)のようになる。

$$V = V_0 a(\mathrm{H_2O}) \exp\left(\frac{-E_{\mathrm{act}} + \alpha K_{\mathrm{I}}}{RT}\right) \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{2V^*}{\sqrt{\pi r_{\mathrm{c}}}} \tag{4}$$

ここで、$V$（m/s）は応力腐食による亀裂速度、$V_0$（m/s）は物質や環境により決まる定数、$a(\mathrm{H_2O})$は水の活量（activity, 相対湿度にほぼ等しい）、$E_{\mathrm{act}}$ (J/mol)は分子 1 mol あたりの活性化エネルギー、$K_{\mathrm{I}}$ はモード I の応力拡大係数（Pa・$\mathrm{m}^{0.5}$）、$R$ は気体定数( 8.3144 J $\mathrm{K}^{-1}$ $\mathrm{mol}^{-1}$)、$T$ は絶対温度（K）、$V^*$は活性化体積（$\mathrm{m}^3$/mol）、$r_{\mathrm{c}}$（m）は亀裂先端の半径である。
ここで比例定数 $A$、$B$ を用いて

$$K_{\mathrm{I}} = A\sigma$$

$$V = B\dot{\varepsilon}$$

とすると式(3)は以下のように変形できる。

$$\sigma = \frac{RT}{A\alpha}\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \frac{RT}{A\alpha}\ln a(\mathrm{H_2O}) + \frac{E_{\mathrm{act}}}{A\alpha} \tag{5}$$

したがって、$\dfrac{RT}{A\alpha}$ は載荷速度依存性の度合を表す。

封圧 $P_{\mathrm{c}}$ が増加すると、亀裂先端半径 $r_{\mathrm{c}}$ が減少し、式(4)より $\alpha$は増加、載荷速度依存性を示す $\dfrac{RT}{A\alpha}$ は減少すると考えられ、これが安山岩・花崗岩・砂岩の封圧により $n$ が増加したメカニズムと思われる。

一方、本研究で使用した支笏溶結凝灰岩は基質が主に火山ガラスであり、多量のポアが存在する。ポアに封圧が負荷されても亀裂先端半径は減少せず、載荷速度依存性に変化がなかったと考えられる。河津凝灰岩・田下凝灰岩についても、一軸圧縮強度がそれぞれ約 35 MPa（大久保・西松、1986）、約 16 MPa（大久保・福井、2002）なので、ある程度溶結していると推定され、同様のメカニズムが考えられる。

残留強度の時間依存性に対する封圧の影響についてはほとんど明らかになっていないが、本研究では支笏溶結凝灰岩の $n'$について、中程度から強い負の相関が得られた。これは、封圧によりガラス質の基質が粉砕されて生じた多数の亀裂においてサブクリティカルな亀裂成長が生じ、その結果として $n'$が減少、つまり残留強度の時間依存性が大きくなったと考えられる。

## 5. 結言

支笏溶結凝灰岩について三軸圧縮試験を行った結果、封圧とピーク強度の時間依存性の間には弱い負の相関または相関なしという結果が得られた。安山岩・花崗岩・砂岩は封圧により亀裂が圧縮され、亀裂先端半径が減少することで載荷速度依存性が減少するが、凝灰岩はポアに封圧を負荷しても亀裂先端半径は減少しないため、このような結果が得られたものと考察した。

残留強度の時間依存性に対する封圧の影響については、既往の研究ではほとんど明らかになっていないが、本研究では溶結凝灰岩の $n'$について、中程度から強い負の相関が得られた。支笏溶結凝灰岩内部のガラス質が封圧により圧壊され、多数の亀裂が生じ、残留強度の載荷速度依存性が増加したものと考察した。

## 引用文献


天羽啓太(2017)、いくつかの岩石における時間依存性変形挙動に対する封圧と水分飽和度の影響、北海道大学修士論文

大久保誠介・西松裕一(1986)、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、日本鉱業会誌、102 巻、1181 号、pp. 395-400

大久保誠介・福井勝則（2002）、田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式、資源と素材、Vol. 118, pp. 36-42

Alam, B., Niioka, M., Fujii, Y., Fukuda, D. and Kodama, J. (2014), Effects of Confining Pressure on the Permeability of Three Rock Types under Compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 65, pp. 49-61

Freiman, S. W. (1984), Effects of Chemical Environments on Slow Crack Growth in Glasses and Ceramics, J. Geophys. Res., No. B6, pp. 4072-4076

Hashiba, K., Okubo, S. and Fukui, K. （2006）, A New Testing Method for Investigating the Loading Rate Dependency of Peak and Residual Rock Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, Issue 6, pp. 894-904

Okubo, S., Hashiba, K. and Fukui, K. (2013), Loading Rate Dependency of the Strengths of Some Japanese Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol. 58, pp. 180-185