

凝灰岩の SHS 型三軸せん断試験と強度回復現象のモデル化に関する一考察

京都大学 学生会員 ○ 大野 正登  
 横浜国立大学 正会員 菊本 統  
 愛媛大学 正会員 安原 英明  
 京都大学 正会員 岸田 潔

1. はじめに

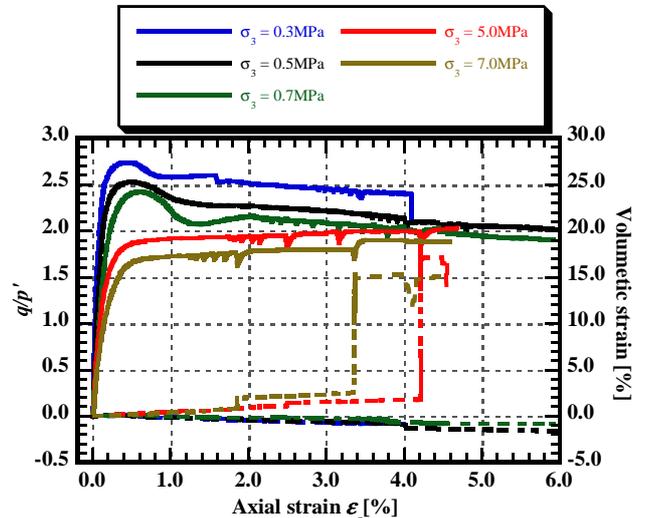
放射性廃棄物や CO<sub>2</sub> 等エネルギー生成後の副産物を岩盤内に固定し、長期に渡る隔離性能を保証するには、天然バリアとなる岩盤の力学的・水理学的特性の変化の予測評価が不可欠である。そこで筆者ら<sup>1,2)</sup>は、緑色凝灰岩を用いて、せん断と停止を繰り返すせん断-保持-せん断(以下、SHS)型三軸せん断試験を実施し、拘束圧、温度条件が強度回復現象に及ぼす影響を評価してきた。本研究では、保持過程における強度回復は、構造特性の回復現象に起因するとして定式化した構成モデル<sup>3)</sup>により、SHS 型三軸せん断試験の解析を行った。

2. SHS 型三軸せん断試験

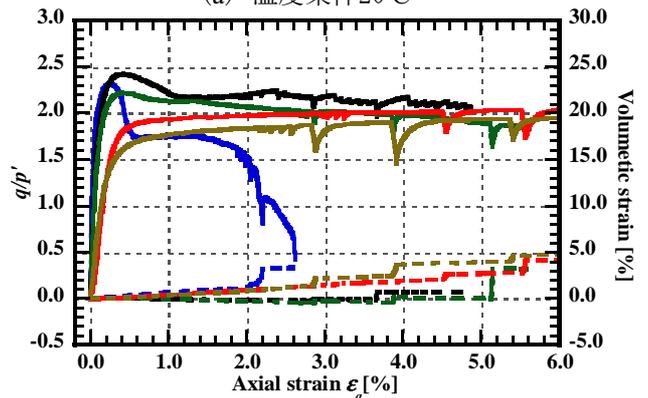
試験には直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱供試体に形成した大谷石を用いた。成分分析の結果では、モンモリロナイトや沸石など熱による変質が想定される物質の含有を確認している<sup>1)</sup>。試験は排水条件で行い、せん断過程では軸ひずみ速度 0.01 %/min を与えた。初期せん断はひずみ軟化後の残留強度まで行った後、軸ひずみを一定に保って所定の保持時間を与え、再びせん断する SHS 過程を繰り返し与えた。本実験では、再載荷時の強度回復現象に着目して、SHS 過程における保持時間を徐々に増加させた。温度条件は、20 °C と 60 °C、拘束圧条件は 5.0 MPa と 7.0 MPa の合計 4 パターンで実施した。

3. 実験結果

図 1 に応力比  $q/p'$  と軸ひずみおよび体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。 $p'$  は平均有効応力、 $q$  は軸差応力である。実線が応力比、点線が体積ひずみを表している。SHS 過程における強度回復に着目すると、拘束圧 0.3, 0.5, 0.7 MPa では、特に長時間の保持(保持時間が 12 時間以上)を行った際、保持前に比べて再せん断時の強度が明瞭に増加することを確認でき、保持時間が長いほど、回復量は大きくなる傾向にある。一方、拘束圧 5.0,



(a) 温度条件 20°C



(b) 温度条件 60°C

図1 SHS型三軸せん断試験における応力比-軸ひずみおよび体積ひずみ-軸ひずみ関係

7.0 MPa 条件では、保持時の応力緩和は確認できるものの、明瞭な強度増加は確認できなかった。

図 2 に温度条件 20 °C においての、SHS 過程における保持時間と強度回復量  $\Delta q$  を示す。 $\Delta q$  は、0.3, 0.5, 0.7 MPa 条件では再せん断開始時と再せん断中のピークの偏差応力の差と定義し、5.0, 7.0 MPa 条件では、保持後のせん断応力と、再せん断過程において直線挙動から離脱する点との応力差と定義した。図 2 のように保持時間が増加するにつれて  $\Delta q$  も増加する傾向を見て取れ、Dieterich<sup>4)</sup>の示す次式

$$\tau_s = \tau_0 + A \ln(t_h) \quad (1)$$

キーワード 強度回復, 凝灰岩, せん断-保持-せん断, 加温, 修正カムクレイモデル

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1 京都大学工学研究科都市社会工学専攻 TEL 075-383-3269

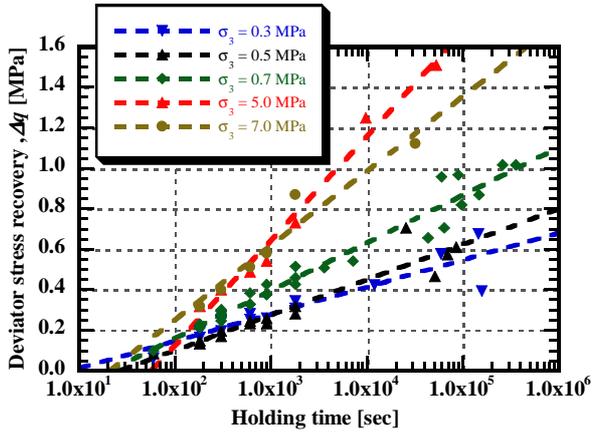


図2 SHS過程における保持時間-強度回復量の関係

を満たしている. なお,  $\tau_s$  は再せん断時のせん断強度,  $\tau_0$  はせん断停止時のせん断強度,  $t_h$  はせん断停止時間,  $A$  は定数である. また, 拘束圧が上昇するにつれ, 式(1)の  $A$  値が大きくなる傾向が確認できる.

4. SHS 三軸せん断試験の解析

4.1. 構造の回復を考慮したモデル

Kikumoto, et al.<sup>3)</sup>は, 修正 Cam Clay モデルに状態変数  $\psi$  を導入して粒度変化を記述している. ここでは, 保持に伴う強度回復は, 構造特性の回復に起因すると考え, 状態変数  $\psi$  の概念を構造特性の回復に応用して構成モデルを定式化し, 実験の再現を試みる.

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left\{ \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \ln \left[ 1 + \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \right] \right\} - \frac{\psi}{1 + e_0} - \varepsilon_v^p \quad (2)$$

また本研究では試みに, 状態変数  $\psi$  は Dieterich<sup>4)</sup>の対数線形の強度回復式と関連付けて以下のように仮定した.

$$\frac{\psi}{1 + e_0} = aA \ln(t_h) \quad (3)$$

ここで,  $a$  はフィッティングパラメータであり,  $1.5 \times 10^{-3}$  とした.

4.2. 解析結果

図3に, 拘束圧 0.7 MPa 条件での SHS 型三軸せん断試験の解析結果を示す. SHS 過程における保持時間は, 600, 1800, 42000 sec とした. 図3より, 保持過程において応力比が大きくなっており, 強度回復は表現できたといえる. なお, 本モデルでは, 保持時の応力緩和は考慮していない.

図4に拘束圧 0.3, 0.7 MPa のケースについて, 保持時間と強度回復度量の関係における実験値と解析値を示す. 実験値と同様, 解析値が保持時間に対して対数線形を示していることが確認できる. また,  $a$  は拘束圧 0.7 MPa 条件において解析値と実験値に近い値をとる

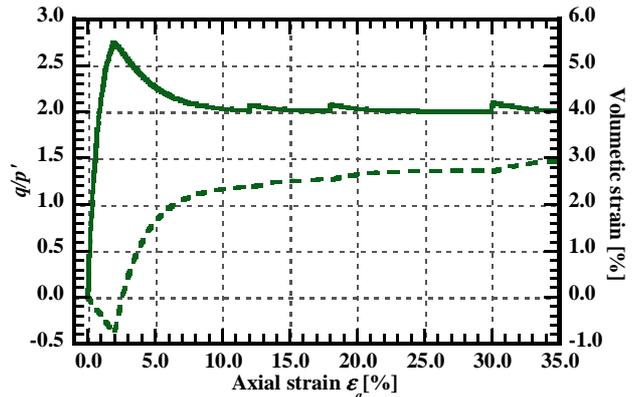


図3 解析結果における応力比-軸ひずみおよび体積ひずみ-軸ひずみ関係(拘束圧0.7 MPa)

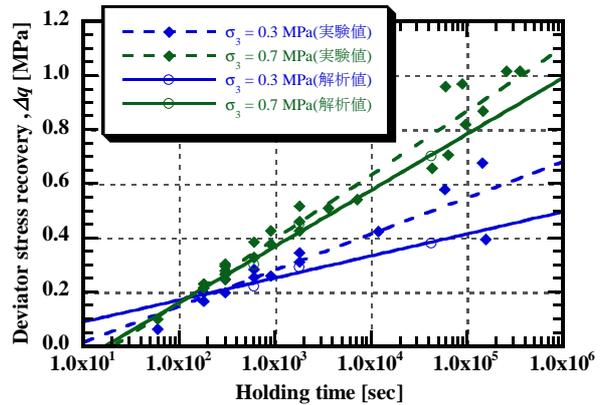


図4 保持時間-強度回復量関係における実験値と解析値の比較

ように設定したが, 拘束圧 0.3 MPa 条件では解析値は実験値と近い値をとらなかった.

5. 結論

再せん断時の強度回復を保持による構造の回復と仮定して, 修正 Cam Clay をベースとして構造回復特性を考慮したモデルにより SHS 三軸せん断試験の解析を行った. その結果, 保持後の再せん断過程における強度回復をよく表現した. 今後は, 強度回復量の拘束圧依存性をより正確に再現する  $\psi$  の発展側を検討する予定である.

参考文献

- 1) Kishida, K. et al: Slide-hold-slide Experiments on Sedimentary Rock Under Drained Triaxial Stress Conditions, 45th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 411-418, 2011.
- 2) 大野 正登, 他: 凝灰岩の三軸せん断-保持-せん断試験と拘束圧による影響, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム, 337-342. 2014
- 3) Kikumoto, M. et al.: Particle crushing and deformation behavior, Soils and Foundations, .50, (4), .547-563, 2010
- 4) Dieterich, J.H.: Direct observation of frictional contacts; New insights for state-dependent properties, Pure Applied Geophysics, 243, 283-302, 1994.