

# 三軸せん断過程における堆積軟岩の構造変化と透水性に関する実験的検討

河合 祐輔<sup>1\*</sup>・中島 伸一郎<sup>2</sup>・安原 英明<sup>3</sup>・岸田 潔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

<sup>2</sup>京都大学 次世代開拓研究ユニット (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

<sup>3</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

\*E-mail:yusuke@t03.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

放射性廃棄物地層処分のような大深度地下での空洞掘削における、掘削前後の地下水の流れを評価する際、周辺地盤の透水係数は一定として扱われることが多い。しかし、堆積軟岩のような多孔性媒体では、空洞掘削に伴う応力状態の変化が構造骨格に影響を及ぼし、透水係数が変化すると考えられる。そこで、応力レベルの違いによる構造の変化と、それに伴う透水係数の変化を定量的に把握することを目的として、三軸せん断試験とトランジェントパルス法を用いた透水試験を行なった。その結果、体積ひずみと透水係数の関係に正の相関があることが確認された。また、X線CT装置を用いて、試験後供試体における内部構造の可視化を行い、透水経路となりうるき裂の発生状況に関して考察を行った。

**Key Words** : hydraulic conductivity, softrock, transient pulse method, triaxial shear-flow test, X-ray CT

## 1. はじめに

近年、地下空間の有効利用が重要視されるようになってきている。地下空間の特性を活かした利用方法のひとつに、放射性廃棄物の地層処分があり、実用化に向けた研究が進められている。低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い廃棄物を埋設するための余裕深度処分では、堆積軟岩地盤を対象とする検討が行なわれている<sup>1)</sup>。

軟岩は、土と岩の中間の力学的挙動を呈する材料と定義される。その特徴的な挙動として、拘束圧依存性、ダイレイタンス特性、時間依存性挙動がある。特にダイレイタンス特性は岩盤の変形、ひずみを生じるため、間隙水圧や透水性に影響を及ぼすと考えられ、力学挙動と水理学挙動の相互作用を考慮する必要がある。しかし、この関係性を評価した研究は十分とはいえない。

この相互作用を対象とした研究として、青森県六ヶ所村における、余裕深度処分埋設施設の試験空洞を利用した富田ら<sup>2)</sup>の研究がある。この研究では、試験空洞掘削に伴う間隙水圧の変化から、空洞掘削周辺における力学的安定性に与える影響についての評価を、現場計測と数値解析をもとに行っている。坂田<sup>3)</sup>は、室内試験を行うことで、堆積軟岩の体積ひずみに由来する透水性の変化式を提案している。この式を組み込んだ応力-浸透連成

解析を行い、空洞掘削による周辺地盤への影響を評価している。

本研究では、せん断に伴う堆積軟岩の体積ひずみ挙動と透水性の相互関係を解明することを目的とし、三軸せん断-透水試験を実施した。さらにX線CT装置を用いて、実験後の供試体の内部構造の可視化を行なった。

## 2. 三軸せん断-透水試験概要

### (1) 供試体

試験供試体は堆積軟岩の一種である軽石凝灰岩を用いた(写真-1)。色が濃い箇所は凝灰岩が多く、白色部が軽石である。含まれている成分としては、Si, Alが多く、次いでK, Fe, Ca, Naとなっている(表-1)。今回の実験で使用した供試体は直径50mm、高さ100mmに整形した標準供試体5本(表-2における供試体No. 08-01, 08-02, 08-04, 08-30, 08-31)であり、いずれも炭酸置換法で飽和状態にしたものを用いた。



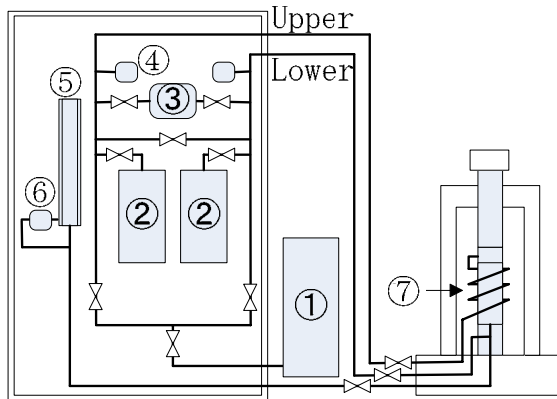
写真-1 実験に用いた軽石凝灰岩

表-1 蛍光X線分析による成分分析結果

Component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O
Wt. [%]	72.8	13.2	4.8	2.8	2.4	2.3

表-2 実験に用いた供試体と実験条件

供試体 No.	拘束圧 [MPa]	背圧 [MPa]	透水試験の パルス圧 [MPa]	5日 保持
08-01	0.4	0.3	0.03	×
08-02	0.4	0.3	0.03	×
08-04	0.4	0.3	0.03	○
08-30	1.0	0.6	0.06	×
08-31	1.0	0.6	0.06	×



- ① : 圧力タンク
- ② : 貯留槽
- ③ : 差圧計
- ④ : 圧力計
- ⑤ : 二重管ビュレット
- ⑥ : 差圧計
- ⑦ : 供試体

図-1 試験装置概略図

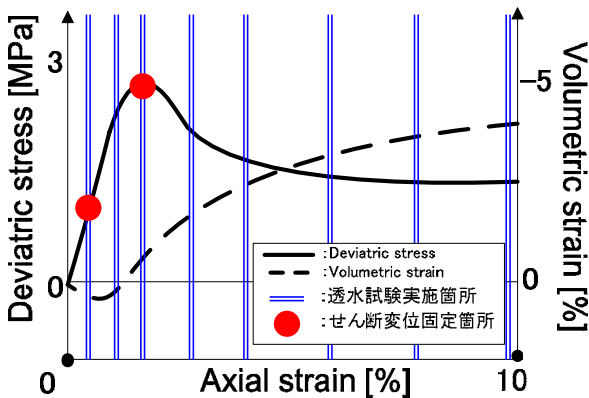


図-2 透水試験概要

## (2) 実験装置

三軸試験装置の主要部分は、圧力室、軸荷重装置、体積変化測定用ビュレット等である。透水試験装置の主要部分は貯留槽である。測定項目は、軸荷重、軸変位、排水量、透水試験時の上下流端の水圧の4項目である。軸荷重は三軸セルの載荷軸に設置されたロードセルによって、軸変位は載荷軸の変位を接触型変位計によって外部測定した。排水量は供試体の体積変化を知るために測定するものである。図-1に示すように、供試体からの吸排水量を二重管ビュレット内管に導いて水位一定の外管

との水頭差をもって差圧計により測定した。上下流端のそれぞれの水圧は圧力計を用いて、差圧は差圧計を用いて計測した。

## (3) 載荷および透水試験方法

せん断過程における載荷はひずみ制御で実施した。ひずみ速度依存性の影響を排除するためにひずみ速度は一定とし、 $7 \times 10^2$  %/minで行った。圧縮試験中、途中せん断変位を固定し、透水試験を行った。透水試験終了後は再び載荷し、軸ひずみが10%に至るまで計測した。また、拘束圧下で長時間一定のひずみで保持することで応力、透水性に変化が出るか調べるため、軸ひずみ0.4%と1.0%の2点で変位を固定し、5日間保持した。

透水試験は、せん断変位を固定した後、系の圧力が一定になってからトランジェントパルス法で行った。計測は、せん断前の初期状態、体積ひずみが圧縮側に最大の点及びその前後、膨張に転じた後の計9点に関して行った(図-2)。トランジェントパルス法による透水係数は、式(1)、(2)によって求めた。<sup>4)</sup>

$$P_1 - P_f = \frac{\Delta P \cdot V_2}{V_1 + V_2} \exp(\alpha t) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{KA}{\mu \beta L} \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \quad (2)$$

ここに、

- $P_1$  : 上流側の圧力 [MPa]
- $P_2$  : 下流側の圧力 [MPa]
- $V_1$  : 上流の貯留槽の体積 [m<sup>3</sup>]
- $V_2$  : 下流の貯留槽の体積 [m<sup>3</sup>]
- $P_f$  : 圧力の収束値 [MPa]
- $\Delta P$  : 圧力パルス [MPa]
- $t$  : 試験開始後の経過時間 [s]
- $K$  : 透水係数 [darcy]
- $A$  : 供試体の断面積 [m<sup>2</sup>]
- $L$  : 供試体の長さ [m]
- $\mu$  : 水の粘性係数 [ $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
- $\beta$  : 水の圧縮率 [ $\text{MPa}^{-1}$ ]

## (4) 実験条件

全ての実験は恒温(20℃)、恒湿(相対湿度60%)のもとで行った。拘束圧、背圧、パルス圧、せん断変位保持の有無に関しては表-2に示した。パルス圧は、間隙水圧の1/10程度となるように設定した。

## 3. 試験結果

### (1) 応力

軸ひずみ-軸差応力、体積ひずみ関係を図-3に示す。有効拘束圧(=拘束圧-背圧)0.1MPa(供試体No. 08-01, 08-02)では最大軸差応力は2MPa、残留時の最終体積ひずみは4.5~6%程度であった。また、有効拘束圧0.4MPa(供試体No. 08-30, 08-31)では、それぞれ3~4MPa、4%

前後であった。応力曲線中に切れ込みのように応力が低下している箇所が見られるが、これは透水試験中にせん断変位を固定しているため、応力緩和が発生したからである。透水試験終了後の再載荷時には元の応力に回復しており、応力緩和による影響はないものと考えられる。供試体No.08-04において長期間保持した場合でも、せん断再開後は元の応力レベルに回復していることから、低拘束圧では変位固定による応力の変化は見られない。

全ての供試体でせん断が進むにつれて軸差応力が増加し、ピーク強度に達した後減少に転じ、最終的に残留状態に至る典型的なひずみ硬化・軟化型の挙動を示した。体積ひずみは、初期段階では圧縮を示し、軸差応力がピークに達する前に膨張に転じた。

## (2) 透水係数の変化

軸ひずみ-透水係数関係を図-4に示す。有効拘束圧0.1MPa (供試体No. 08-01, 08-02) では、軸ひずみ3%までに透水係数は大きく増加しており、最終的には初期透水係数の10~30倍程度の値になった。有効拘束圧0.4MPa (供試体No. 08-30, 08-31) では、軸ひずみ1%以降緩やかに増大しているが、軸ひずみ3%以降は大きな変化は見られない。最終的には初期透水係数の3~5倍程度の値となった。また、供試体No. 08-02, 08-04, 08-31では、ある程度透水係数が増大すると、体積ひずみが増大しても透水性は変化しなくなる。しかし、透水性が大きくなると圧力の収束が早くなるため、実際にはこれらの値よりも大きな透水係数を示す可能性がある。また、応力と同様に供試体No.08-04の5日間保持の前後で透水係数に変化はなく、変位を固定して保持した効果は見られない。

体積ひずみ-透水係数関係を図-5に示す。どの供試体も、体積ひずみの増加に伴い透水性が増大していることから、体積ひずみと透水係数には正の相関があることがうかがえる。特に体積ひずみ-1%までは、どの供試体でも同様に透水係数が増加する傾向が見られる。このことから、体積ひずみ-1%までは拘束圧に関わらずと透水性は増大し、それ以降は拘束圧が小さいほど割合で増大していくと考えられる。

## 4. X線CTを用いた供試体内部構造の可視化

実験結果から、体積ひずみが増大するに伴い透水係数も増加することが確認された。透水性の増大は、せん断に伴い生じたき裂に起因していると思われる。しかし、今回行なった実験では供試体全体の透水係数しか求められず、き裂では実験結果よりもより高い透水係数を示すと考えられる。そこで、実際にどのようなき裂が発達することで透水性に影響を及ぼしているか把握する為、実

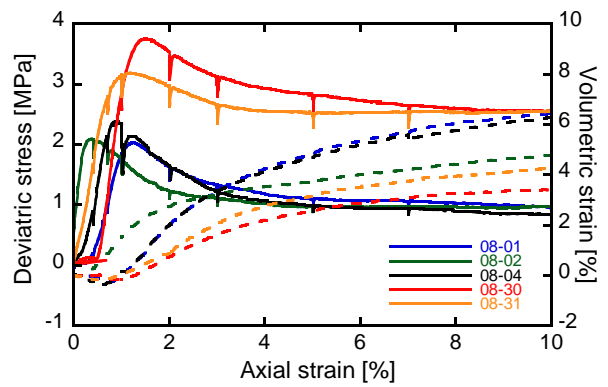


図-3 軸ひずみ-軸差応力、体積ひずみ関係

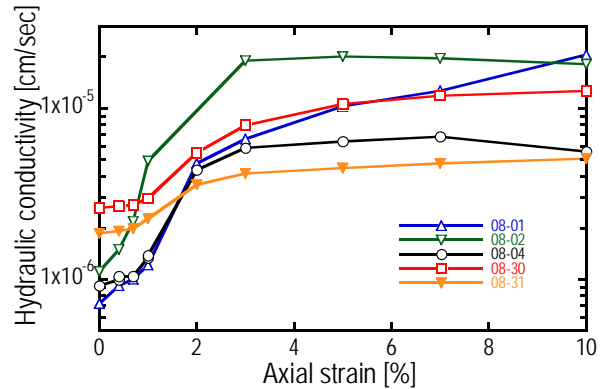


図-4 軸ひずみ-透水係数関係

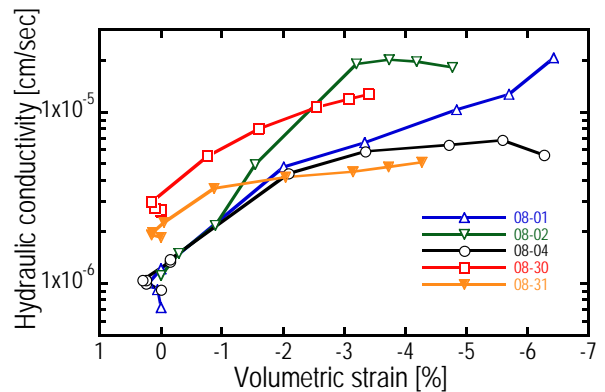


図-5 体積ひずみ-透水係数関係

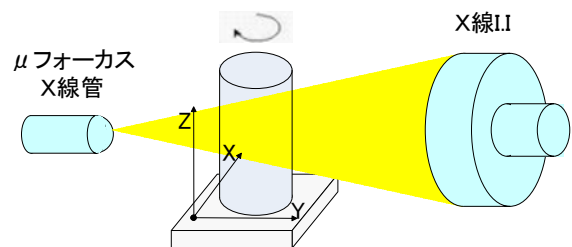


図-6 X線CT概要図

験後の供試体を、X線CT装置(KYOTO-GEOXCT(TOSCANNER-32250μHDK))を用いて撮影し、内部構造の可視化を行った。実験装置の概要図を図-6に示す。主要構成部は試料台、μフォーカスX線管、X線IIである。X線源にμフォーカスX線装置を用いており、高分解能のX線画像を得ることができる。

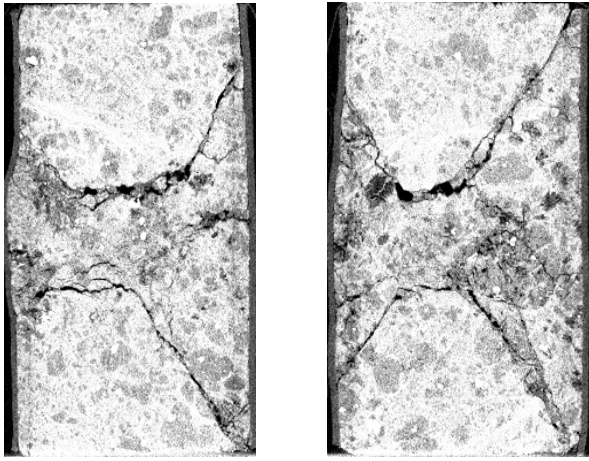


図-7 X線CT撮影結果 (左: X-Z断面, 右: Y-Z断面)

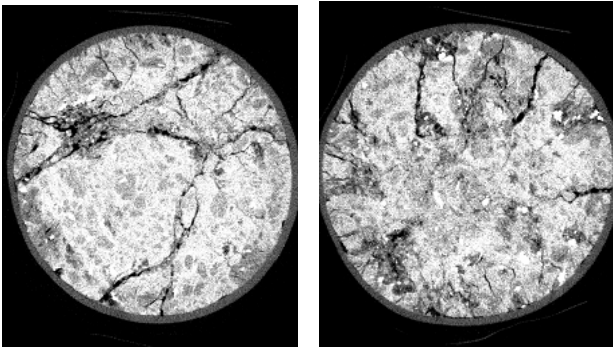


図-8 X線CT撮影結果-X-Y断面 (左: 下方, 右: 中央)

供試体No.08-04の撮影結果を図-7, 8に示す。図-7は、Z軸方向の断面図である。せん断面が発達している様子が確認できる。これらのZ軸方向のき裂が透水性増大に大きく寄与していると考えられる。ただし、せん断面は上下で連続しておらず、せん断面が斜めから水平方向へ曲がっている。また、せん断面以外にも微小なクラックが生じていることが分かる。

図-8の左は供試体下端から約2.5cm, 右は下から約5cmの断面図である。左図からは2本のせん断面と、その周辺の無数のき裂が見られる。右図では、せん断面は見られないが、表面付近から中央に向かって多くのき裂が生じている。これらの画像から、せん断面は上下で連続して

いないが、せん断面以外にも数多くのき裂が存在しており、これらのき裂がみず道となり、透水性の増大に寄与していると考えられる。

## 5. まとめ

実験結果から以下の知見が得られた。

- せん断が進むにつれて体積ひずみは膨張し、透水係数は増大する。
- 体積ひずみ-1%までは拘束圧によらず透水係数は増大し、それ以降は拘束圧が小さいほど透水係数は増大する。
- X線CT画像から、せん断面以外にも無数のき裂が存在し、これらのき裂がみず道を形成していると考えられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、X線CT撮影に多大な協力を頂きました京都大学工学研究科岡二三生教授、肥後陽介助教には心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計, JNCTJ84002003-002, 2002.
- 2) 富田敦紀, 森川誠司, 田部井和人, 白鷺卓, 蛭名孝仁, 岸田潔, 足立紀尚：堆積軟岩空洞掘削時の間隙水圧の計測と数値解析的検討, 材料, Vol.56, pp.813-819, 2007.
- 3) 坂田知也：H-M連成解析を用いた軟岩における空洞安定性に関する基礎的研究, 京都大学修士論文, 2007.
- 4) 高橋学, 薛自求, 小出仁：稲田花崗岩・白浜砂岩・来待砂岩・新第三紀泥質岩の透水特性について, 地質調査所月報第42巻, 第67号, pp.305-331, 1991

## EXPERIMENTAL STUDY ON EVOLUTION OF PERMEABILITY IN SOFT ROCK MODERATED BY STRUCTURE MODIFICATION DURING TRIAXIAL SHEAR PROCESS

Yusuke KAWAI, Shinichiro NAKASHIMA, Hideaki YASUHARA  
and Kiyoshi KISHIDA

Evolution of permeability induced by internal structure change was investigated through the triaxial shear-flow tests at several confining pressures prescribed. During shearing, permeability was intermittently measured by holding the shear displacements. The obtained results show that the permeability variation depends on the stress level. Prior to a peak stress, permeability slightly changes, and after the peak stress, the permeability started to increase abruptly. Around an onset of the residual state, the augmentation in permeability was accelerated, followed by steady permeability. Specifically, it is noticeable that the evolution of permeability is attributed to volume changes induced by shearing.