# 堆積軟岩のダイレイタンシー特性が 透水性に及ぼす影響について

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

堆積軟岩のような多孔質媒体の特徴的な挙動のひとつに、ダイレイタンシーがある.応力状態の変化に 伴いせん断が発生し、併せて体積の膨張や圧縮といった体積ひずみが生じる.体積ひずみの変化は、透水 性に影響を与えると考えられ、水理学挙動と力学挙動の間には相互作用が働くと考えられる.本研究では、 軽石凝灰岩の水理学挙動、力学挙動の相互作用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.この試験結果を元に、体積ひずみ、透水係数の関係式を提案した.また、室内試験を模擬した解析を 行うことで、クラックが透水性に及ぼす影響について考察した.

Key Words : dilatancy, permeability, softrock, volumetric strain, triaxial shear-flow test, seepage analysis

## 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,放射性廃棄物の地中処分があり,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、ダイ レイタンシー特性、時間依存性挙動を示す. 特にダイレ イタンシー特性は岩盤の変形、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 た冨田ら<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、計測と解析を 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土-水連成解析を行い、 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、堆積軟岩(軽石凝灰岩)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.既往の研究において、シ ルト質岩石を用いた試験結果より体積ひずみ-透水係数 の関係式が提案されており<sup>4</sup>、本実験との比較を行った. また、上記の試験を模擬した解析を行い、供試体におけ るクラックと透水性の関係について考察を行なった.

#### 2. 実験概要

## (1) 供試体および実験装置

堆積軟岩の一種である軽石凝灰岩を用いた.実験で使 用した供試体は直径50mm,高さ100mmの標準供試体6本で ある.三軸試験装置の主要部分は,圧力室,軸荷重載荷 装置,体積変化測定用ビュレット等であり,透水試験装 置は2本のビュレットである.測定項目は,軸荷重,軸 変位,排水量,水頭差の4項目である.以下その測定方 法について述べる.

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25mm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り、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 でもって差圧計により測定した.水頭差は、供試体の上 流端と下流端にそれぞれのビュレットを接続し、差圧計 によって測定した.全ての実験は恒温(20℃),恒湿 (60%),拘束圧一定(0.1MPa)のもとで行った.

#### (2) 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、7×10<sup>2</sup>%/minで行った. 圧縮試験中,途中い くつかの点においてせん断変位を固定し、2~5時間の透 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.

変水位透水試験における初期水頭差は,実験器具の 都合上900mm程度とした.計測は,圧縮前の初期状態, 体積ひずみが圧縮側に最大の点及びその前後,膨張に転 じた後に関して行った.

## 3. 実験結果

実験結果の一例として、供試体5の軸ひずみ-軸差応力 関係、軸ひずみ-体積ひずみ関係を図-1に示す.応力曲 線上で切れ込みのように応力が低下しているのは、透水 試験中にせん断変位を固定しているためである.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、体積 ひずみにも影響が見られないので、応力緩和の影響はな いものとした.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移り、 最終的には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.

図-2に供試体5の軸ひずみ-透水係数関係,軸ひずみ-体 積ひずみ関係を示す.せん断が進むにつれて体積ひずみ と透水係数が共に増加していることから,何らかの相関 があると思われる.図-3に供試体4、5の体積ひずみ,透 水係数の関係及び後述の式(2)を,表-1に供試体4と5の透 水係数の変化を示す.供試体4では圧縮挙動中において, やや透水性が下がり,それ以降は膨張が進むにつれて透 水性も増大する結果となった.供試体5では圧縮挙動中 は透水性に変化は見られず,膨張するにつれて透水性は 上昇したが,体積ひずみが-5%以降の変化はあまり見ら れなかった.また,透水性の増大には2種類の傾向があ り,体積ひずみ-4%以前の緩やかな増加と,それ以降の 急激な増加である.

**写真-1**に実験終了後の供試体の写真を示す.全ての供 試体で水平に近い角度の明瞭なクラックがみられた.ま た,水平面より40~70°程度の角度でクラックが確認さ れた.ただし、透水性の変化に影響を与えていると思われるのは、斜め方向のクラックだと考えられる.



#### 表-1 透水係数の変化

計測点	透水係数[10 <sup>6</sup> cm/sec]		
軸ひずみ[%]	供試体4	供試体5	
0	3.877	2.901	
0.2	-	2.888	
0.5	2.752	2.779	
0.7	-	3.066	
1.0	2.061	3.977	
1.5	4.267	-	
2.0	-	7.946	
3.0	-	8.945	
5.0	5.885	12.245	
7.0	-	24.446	
10.0	18.425	24.794	



写真-1 試験後の供試体(左:供試体4,右:供試体5)

## 4. 実験考察

透水性は、体積ひずみの増加につれて増大する. これ は、斜め方向のクラックおよび全域において体積膨張が 発生したためと考えられる. 透水係数が急激に上昇する 部分は、クラックの進展の結果、水みちが形成されたた めと考えられる. 透水性の変化を、体積ひずみと初期間 隙率で表した既往の実験式が、(1)式のように提案され ている.

 $k = \begin{cases} k_0 \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left( 1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right)^3 & before \quad peak \quad stress \\ \eta k_0 \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left( 1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right)^3 & after \quad peak \quad stress \end{cases}$ (1)

 $k_0$ :初期透水係数, $\varepsilon_v$ :体積ひずみ, $n_0$ :初期間隙率,  $\eta$ :任意の係数

しかし,式(1)では本実験で見られた急激な変化を表 すことが出来ない.また,図-3において,供試体5で は体積ひずみが-5%以降の変化が小さく,透水性の上昇 には上限があると考えた.そこで,軽石凝灰岩における ピーク応力後の透水係数の変化を,今回の実験結果を基 に線形近似した式(2)を提案した.場合分けを,緩やか に変化する前半,急激に増加する後半,上限値に達した 後の3通りとし,上限値に達した後の値は一定とした. 急激に増加し始める点は,実験結果より残留強度に至る 前後と考えられる.残留強度に至ったかどうかの判断は, 体積ひずみの値を基準とし,その値を4%とした.

$$k = \begin{cases} k_0 - 2.093 \times 10^{-6} \times \varepsilon_v \\ \text{Zone } B \text{ before residual state } (0 > \varepsilon_v \ge -0.04) \\ k_\gamma - 1.451 \times 10^{-5} \times (\varepsilon_v + 0.04) \\ \text{Zone } C \text{ residual state } (-0.04 > \varepsilon_v, k < k_u) \\ 8.43 \times k_0 \\ \text{Zone } D \text{ residual state } (-0.04 > \varepsilon_v, k \ge k_u) \\ k_0 : 初期透水係数, k_r : 体積ひずみ4%の時の透水係 \end{cases}$$

#### 数, $k_u$ :透水係数の上限値, $\mathcal{E}_v$ :体積ひずみ

#### 5. 解析概要

実験結果から、ピーク応力後に正のダイレイタンシー が生じ、次第に透水性が増大することが確認できた.一 方、実験終了後には**写真-1**に示すようにクラックが確認 された.透水係数の変化は、全体的な体積ひずみの変化 と関連するものとして実験の整理を行い、定式化を行っ たが、クラックの影響がどの程度あるのかは不明である. そこで、二次元定常飽和浸透流解析を実施することで、 クラックによる水の流れの寄与に関する検討を行った.

## (1) 解析方法およびメッシュ条件

解析には二次元有限要素法を用いた.地盤内は飽和しているものとし,浸透流は定常状態を仮定した.地盤中の水の流れにはダルシー則を用いた.クラックにおける透水係数は,他の部分より大きくした.

解析領域を図-4に示す.実験で用いた供試体と同じで 高さ100mm,幅50mmとした.要素は1mm×1mmで,要 素数は5000,クラックは幅1mmとして上端から25mmの 位置に水平方向のクラックを,下端から上端には至らな い位置に斜め方向のクラックを配置した.

## (2) 境界条件

境界条件は、実験条件と同様にするため、上下端を 排水条件、側面を非排水条件とした.実験における設定 から、上下端に 0.9m の水頭差を与えた.ただし、実験 は変水位透水試験なので徐々に水頭差は小さくなるが、 解析では 0.9m で一定である.また、初期透水係は実験 値から 3.0×10<sup>6</sup> cm/sec とした.

#### (3) 解析ケース

解析ケースは、(1)水平方向のクラックのみ、(2)斜め 方向のクラックのみ、(3)水平方向と斜め方向のクラッ ク、(4)水平方向と、それより下側の斜め方向のクラッ クの4パターンに関して行なった.クラックの透水係数 は、初期透水係数から1オーダー流れやすい場合と2オ ーダー流れやすい場合の2ケースを考え、計8パターン を行った.



#### (4) 評価方法

実験は三次元だが,解析は二次元なので実験結果と 解析結果をそのまま比較することはできない.そこで, 実験結果と解析結果を比較するため,以下の方法で解析 結果から供試体の透水係数を求めた.

まず,解析領域に単位奥行きを持たせ,下端のメッシュごとに垂直方向の流速と底面積をかけ合わせ,流量 とした.解析上,速度水頭は無視しているため,ここで は動水勾配に透水係数をかけたものを流速とした.この 流量を供試体の断面積と動水勾配で除し,供試体全体に おける透水係数とした.

## 6. 解析結果および考察

前章(4)で示した方法から,各解析ケースごとに求め た透水係数を表-2に示す.この結果から,水平方向のク ラックだけでは透水性に変化が無いことが確認された. また,水平方向と斜め方向の両方にクラックがある場合 は,斜め方向のクラックだけの場合よりも,わずかだが 透水性が向上することが認められた.これは,水平方向 に水が流れやすくなり,斜め方向のクラックに流入する 水量が増加するためであると考えられる.ただし,この 影響は微小であるため,実験においても水平方向の亀裂 が大きな影響を与えていないと考えられる.

式(2)のZONE Bにおける最終的な透水係数の値と,ク ラックの透水性を2オーダー変えた場合の値は比較的近 い値をとっている.このことから,領域Bにおける透水 性の増大は,クラックが進展して水みちが形成された結 果であると考えられる.それ以降(ZONE C)の透水性 が大きく増大する現象を,解析では再現できなかった. 実験では,クラックにおけるダイレイタンシーの発現に よって開口幅が増加しているが,解析ではダイレイタン シーの変化を考慮していないので,実験結果とは異なる 結果となっている.

表-2 ケースごとの透水係数の値

クラックに	各ケースにおける供試体全体				
おける透水	での透水係数(5-(4)で示した方				
係数の変化	法で算出)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	
1オーダー	3.03	3.58	3.61	3.47	
2オーダー	3.03	7.69	7.81	6.10	

(単位:10<sup>-6</sup>cm/sec)

#### 7. まとめ

実験結果から、せん断が進むにつれて、透水性は増 大することが分かった.解析において、急激に透水係数 が増大する前(ZONE B)までは、クラックでの透水性 を2オーダー大きくすることで説明できた.ただし、急 激に透水係数が増大する部分に関しては再現することは できなかったので、ダイレイタンシーの影響を詳細に評 価する必要がある.

#### 参考文献

- 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,JNCTJ8400 2003-002, 2002.
- 2) 冨田敦紀,森川誠司,田部井和人,白鷺卓,蛯名孝仁,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) LD.Yang, X.B.Yan, Y.Li, X.X.Zhang : Experimental study on the permeability of soft rock, Asia rock mechanics symposium, 2006.
- 5) 冨田敦紀, 戸井田克, 白鷺卓, 蛯名孝仁, 岸田潔, 足立紀 尚:空洞掘削後の岩盤内応力測定結果に基づく堆積軟岩空 洞掘削時の破壊現象の一考察, 第36回岩盤力学に関するシ ンポジウム講演論文集, pp.245-250, 2007.

# EVALUATION OF THE PERMEABILITY INFLUENCED BY DILATANCY IN SOFT ROCK

## Yusuke KAWAI, Hideaki YASUHARA, Shinichiro NAKASHIMA and Kiyoshi KISHIDA

Considering the permeability of a soft rock, the evolution of permeability induced by dilatancy was investigated through triaxial shear-flow tests. The result showed that the permeability variation depends on the stress level. After a peak stress, the permeability started to increase. Around a start of the residual state, the augmentation in permeability was accelerated, followed by the steady permeability.

Each specimen had two kinds of fractures. 2D seepage analyses describing the flow tests showed that the horizontal fracture slightly exerted influences on permeability and the oblique did significantly. At the end, the ultimate permeability was predicted twofold compared with that at the beginning.