

# 堆積軟岩におけるダイレイタンシー特性と透水性に関する基礎的研究

京都大学 学生会員 ○河合 祐輔, 坂田 知也  
 京都大学 正会員 細田 尚, 岸田 潔, 中島 伸一郎  
 東電設計 正会員 富田 敦紀

## 1. はじめに

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を解明することを目的として、排水定ひずみ速度三軸圧縮試験と変水位透水試験を組み合わせ実施した。また、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>1)</sup>、本実験との比較を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 供試体

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 5cm, 高さ 10cm の標準供試体 6 本(供試体 1~6)である。

### (2) 実験装置

実験装置の概略図を図-1 に示す。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り、透水試験装置は 2 本のビュレットである。図中の矢印は、透水試験時及び圧縮試験時の水の流れである。

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载荷軸に設置されたロードセルによって、軸変位は载荷軸の変位を 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 2 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。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。

### (3) 载荷方法

せん断過程における载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、途中いくつかの点において载荷を止め、2~5 時間の透水試験を行った。透水試験後は再び载荷し、軸ひずみが 10% に至るまで計測した。

### (4) 透水試験の初期水頭差及び計測点

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。透水試験実施点の概要を図-2 に示す。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

図-3 に供試体 5 の軸ひずみ - 軸差応力、体積ひずみの結果を示す。応力曲線状で、切れ込みのように応力が低下しているのは、透水試験実施中の応力緩和である。

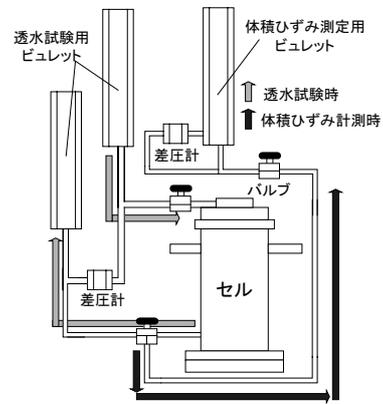


図-1 実験装置

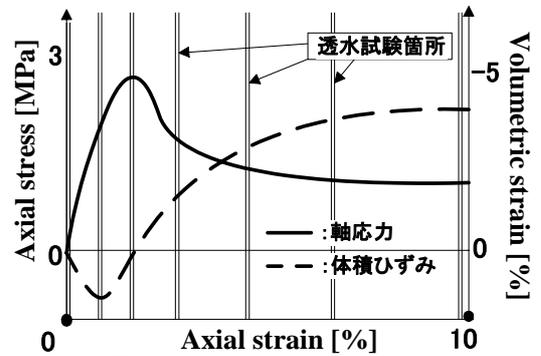


図-2 透水係数計測点概要

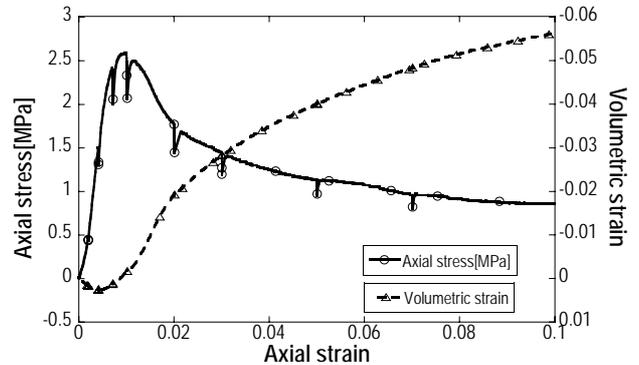


図-3 軸ひずみ-軸差応力、および軸ひずみ-体積ひずみ関係

キーワード 堆積軟岩, ダイレイタンシー, 透水係数, 三軸圧縮試験

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C クラスター TEL 075-383-3269

る。再載荷後には元の応力に回復しており、体積ひずみの変化にも影響が見られないことから、本実験では応力緩和の影響は考慮しないものとした。いずれの供試体においても、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といった典型的なひずみ硬化-軟化型の挙動を示す。体積ひずみは、初期段階では圧縮を示し、ピーク強度に至る前に膨張に転じた。図-4 に体積ひずみ、透水係数の関係および後述の式(1)のグラフ、式(2)の場合分けを示す。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種類の傾向がある。体積ひずみ-4%以前では緩やかに透水係数が増加するが、以降急激に変化する部分が見られる。

写真-1 に実験終了後の供試体の写真を示す。全ての供試体に共通して水平に近い角度で明瞭な破断面がみられた。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。これらのクラックは、透水性の変化に影響を与えていると考えられる。

4. 考察

クラックの発生により、正のダイレイタンスが生じ、透水性は上昇した。透水係数が急激に増加する部分は、これらのクラックが進展した結果、水みちが形成されたためと考えられる。透水性の変化を表現した既往の実験式<sup>1)</sup>は、

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

$k_0$  : 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

である。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-4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強度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。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

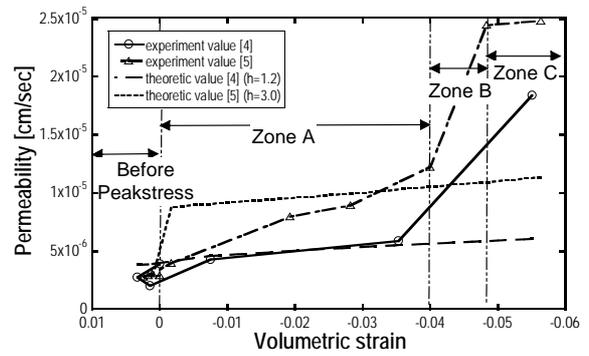


図-4 体積ひずみ-透水係数関係



写真-1 試験後の供試体 (左:供試体4, 右:供試体5)

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。

$$k = \begin{cases} k_0 - 2.093 \times 10^{-6} \times \varepsilon_v & \text{Zone A before residual state } (0 > \varepsilon_v \geq -0.04) \\ k_\gamma - 1.451 \times 10^{-5} \times (\varepsilon_v + 0.04) & \text{Zone B residual state } (-0.04 > \varepsilon_v, k < k_u) \\ 8.43 \times k_0 & \text{Zone C residual state } (-0.04 > \varepsilon_v, k \geq k_u) \end{cases} \quad (2)$$

$k_0$  : 初期透水係数,  $k_\gamma$  : 体積ひずみ-4%の時の透水係数,  $k_u$  : 透水係数の上限値,  $\varepsilon_v$  : 体積ひずみ

5. まとめ

- ・ 今回の実験で、体積膨張が進むにつれて透水性が大きくなることがわかった。
- ・ 式(2)は、今回行った実験の範囲のものであり、今後拘束圧等の設定を変えた実験を行い、検討、改良する必要がある。

参考文献

1) L.D.Yang, X.B.Yan, Y.Li, X.X.Zhang : Experimental study on the permeability of soft rock, Asia rock mechanics symposium, 2006