

P 23. 除荷過程を考慮したせん断-透水実験

Shear - flow experiment with specifically considering unloading process

○小西亮平, 長田昌彦, 山辺正 (埼玉大学), 佐々木泰 (日本原燃)

R.Konishi, M.Osada, T.Yamabe, T.Sasaki

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分に当たって、地盤の水理環境を把握することは、有害物質の湧水の危険性、地下構造物の安全性の面から重要である¹⁾。また、岩盤掘削によって応力負荷を受け、変形や亀裂が生じた空洞周辺を掘削影響領域 (以下 EDZ)²⁾ といひ、特に憂慮しなければならない問題である。

本研究では、EDZにおける軟岩の変形挙動に伴う透水挙動を検討するために、軟岩の諸物性を求めた上で、拘束圧の除荷過程におけるせん断-透水実験を行い、透水係数の変化挙動を測定する。

2. 実験の概要

2-1. 試料：軽石凝灰岩

試料は、直径 6cm、長さ 12 cmの円柱供試体に成形して用いる。また、試料は、深度 100~110mから採取されたもので、パミスを多く含み、不均質性の強い特性を持った軟岩³⁾である。平均的な一軸圧縮強さは 2.0MPa、引張強さは 0.2MPa である。

本実験で用いた供試体は深度によってパミスの含有量の割合が大きく異なり、図-1の写真に示した供試体はパミスの最大径が 5 cmで比較的パミスの含有量が多いものである。含有量の小さい供試体では、0.5~1.0 cm径のパミスが斑点状に含まれている。パミスの含有量は湿潤密度に影響を与えており、パミスの含有量が多いもので湿潤密度 1.5 g/cm³、含有量の小さいもので 1.6 g/cm³の値が得られた。

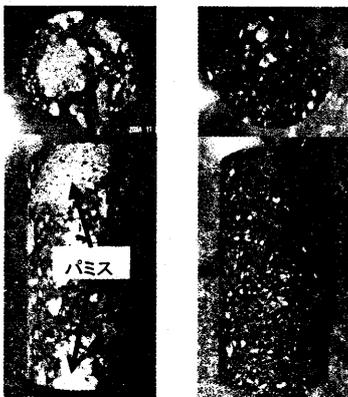


図-1 供試体写真

(左)パミス含有量大 (右)パミス含有量小

2-2. 試験装置および実験の流れ

本研究で用いた試験機は三軸圧縮試験機 (最大荷重

49kN) である。透水方法は、図-2の透水装置の概略図に示すように、供試体下面から軸方向に 0.03MPa の透水圧を直接掛ける方法を採用している。供試体長さから換算した動水勾配は約 25 である。

図-3に実験フローチャートを示す。供試体側面を不透水にするための措置として、供試体に添付したひずみゲージの上にシリコンゴムを塗付している。供試体を三軸試験機にセットした後、設定した等方圧を加えながら 24 時間圧密および透水を行う。以上が本実験の前段階である。

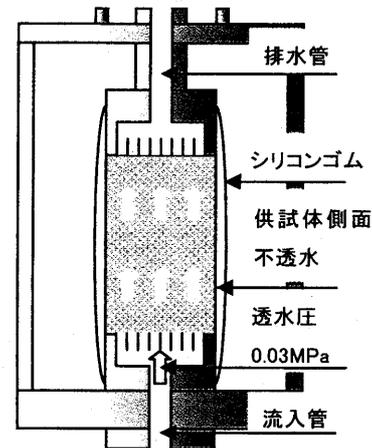


図-2 試験に用いる透水装置の概要図

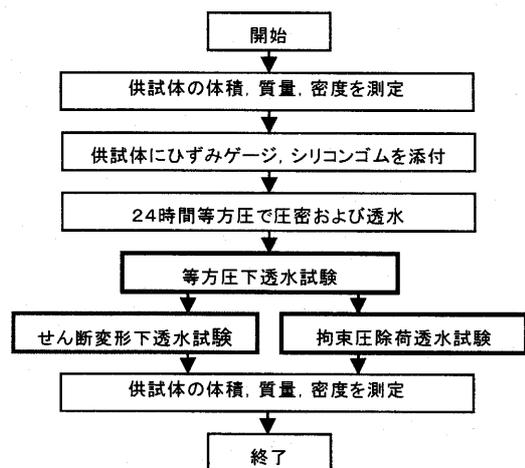


図-3 実験フローチャート

試験過程は、等方圧下での透水係数を測定した後、大きく 2 つの試験内容に分かれる。一つは、一般的な三軸圧縮試験を行い、せん断変形下での透水係数を計測したもので、もう一つが本研究の主軸に当たる拘束

圧の除荷過程を行いながらの透水試験である。その他の試験として、一軸圧縮試験、圧密試験、圧裂試験を行った。

2-3. 透水係数の算出方法

透水係数 k はダルシーの法則により次式で与えられる。

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot \Delta Q}{p_{diff} \cdot A} \quad \dots \text{式(1)}$$

v : 流速, i : 動水勾配, ρ : 水の密度, g : 重力加速度
 ΔQ : 時間当たりの流量, p_{diff} : 供試体両端面の差圧
 A : 供試体端面の面積

透水係数の算出に用いる時間当たりの流量は、図-4に示すように、体積変化計から得られる流出量を、計測誤差の含まない程度の時間間隔で除して算出している。また、供試体上下端面の差圧は、時間当たりの流量算出に用いた時間間隔での平均値を用いている。これらのデータを用いて、供試体の見かけの透水係数を算出している。

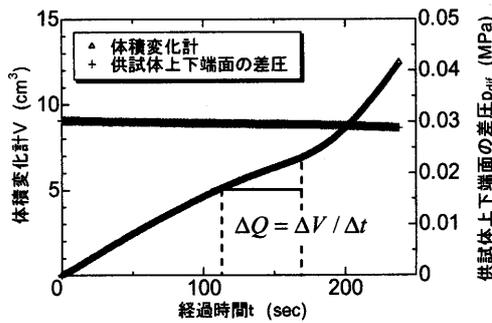


図-4 透水係数算出に用いるデータの計測

2-4. 拘束圧除荷透水試験の概要

拘束圧除荷透水試験は、土被りに相当する初期応力状態から徐々に平均有効応力を除荷していき、その応力状態に伴う透水挙動を測定するものである。

試験方法の概略を図-5に示す。手順は以下の通り。

- ①: 等方拘束圧を載荷させた状態(点A)から、軸差荷重を破壊前(点B)まで載荷する。この点の応力状態を、ある地中深さにある破壊前のインタクテナ岩石と仮定している。破壊の基準は、事前に行ったせん断変形下透水試験で得られた破壊包絡線を用いている。
- ②: 点Bでの軸差応力を保ったまま、次に拘束圧を徐々に除荷させる。

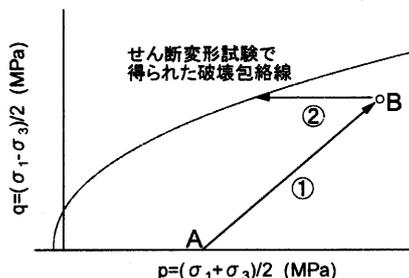


図-5 拘束圧除荷透水試験 手順の概略図

以上の操作を行いながら、透水係数の変化を測定した。ちなみに横軸 p 、縦軸 q は、モール円の天頂部を示している。

3. 実験結果および考察

3-1. 等方圧下透水試験の結果

等方圧下透水試験によって得られた結果を図-6、図-7、図-8、図-9に示す。図-6は、等方圧を供試体に載荷し、24時間経過した時点での各サンプルの透水係数を示している。等方圧 0~0.5MPa の間では透水係数は等方圧に対して負の相関が見られるが、1MPa より大きな等方圧下では、透水係数にほとんど変化が見られなかった。

図-7は、等方圧における体積ひずみを示している。また等方圧下透水試験の結果に加え、一軸圧縮試験で得られた弾性係数、ポアソン比から体積弾性係数 K および圧縮率 $1/K$ を式(2)を用いて算出し、一次式を描いている。

$$E = 355.2 [MPa], \nu = 0.159$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = 173.6 [MPa] \quad \dots \text{式(2)}$$

$$1/K = 57.6 [1/MPa]$$

E : 弾性係数, ν : ポアソン比
 K : 体積弾性係数, $1/K$: 圧縮率

このグラフから、等方圧 0~0.5MPa の間で体積ひずみは等方圧に対して増加傾向が強く、それ以上の等方圧下では、体積ひずみの増加傾向が弱くなっている。

図-8は、各サンプルの体積ひずみにおける透水係数を示す。グラフから、ばらつきがあるものの、体積ひずみと透水係数に一樣な負の相関関係があることが分かる。

図-6、図-7、図-8を総合的に考察すれば、透水係数は等方圧に依存しているが、原位置の試料の状態に比べ、サンプリング後の試料は内部構造に緩みを生じさせているため、低等方圧下と高等方圧下では透水係数の変化傾向が異なると考えられる。

図-9には、等方圧載荷前の初期の湿潤密度における透水係数を示している。図-6、図-7、図-8から透水係数は等方圧に依存していることが分かったが、図-9のグラフから、初期湿潤密度の増加に伴い透水係数も増加していることが分かる。初期湿潤密度は、供試体に含まれるパミスの含有量に依存している。つまり、透水係数は等方圧の他にパミスの含有量にも依存していると考えられる。

3-2. せん断変形下透水試験の結果

図-10に、せん断変形試験から得られた軽石凝灰岩のモール応力円を示す。破壊基準線は式(3)に示すフック・ブラウンの破壊包絡式を適用した。軽石凝灰岩の非線形な強度特性が見て取れる。

Hock - Brown's failure envelope

$$\tau = Aq_u \left(\frac{\sigma + \sigma_i}{q_u} \right)^B \quad \dots \text{式 (3)}$$

q_u : 一軸強さ, σ_i : 引張り強さ, A, B : 定数

図-11に、せん断変形を伴う透水挙動と破壊挙動を示す。透水係数の挙動を分かりやすくするため、透水係数は軸荷重を載荷する直前の透水係数で無次元化し、それを k/k_{initial} としている。グラフから拘束圧が小さい供試体ほど、破壊後の軟化が顕著になり、破壊後の透水性の増加傾向が大きいことが分かる。逆に、高い拘束圧では、破壊後に塑性化し、透水性は破壊前と変化がなかった。また、拘束圧 0.1MPa での軸差応力の挙動は拘束圧 0.3MPa 以上の挙動に比べ、明らかに弾性係数が異なる。先に述べたことだが、拘束圧 0.1MPa では供試体に緩みが発生しており、弾性係数が小さくなる現象が得られたと考えられる。したがって、図-11から、降伏まで弾性係数がほぼ一定な拘束圧 0.3MPa 以上で試料のゆるみが解消されるといえる。

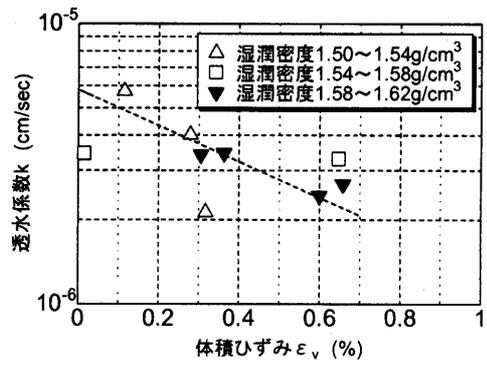


図-8 体積ひずみ-透水係数

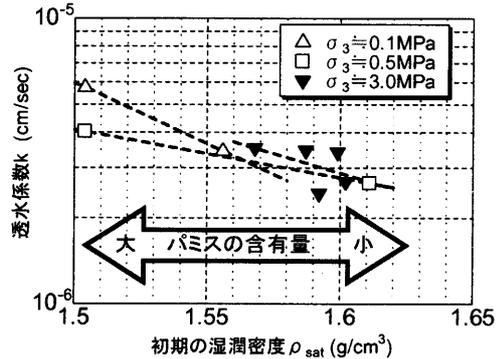


図-9 初期湿潤密度-透水係数

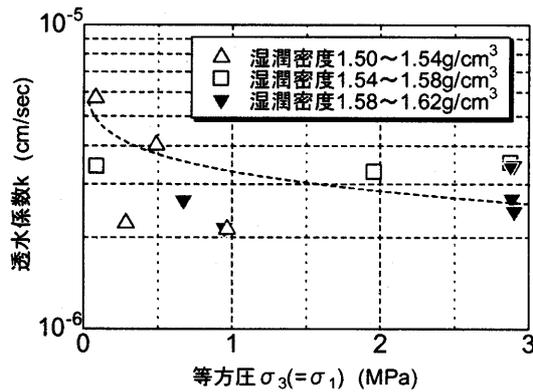


図-6 等方圧-透水係数

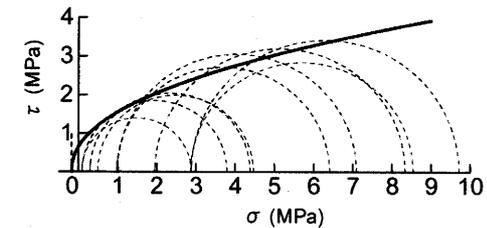


図-10 試料(軽石凝灰岩)のモール応力

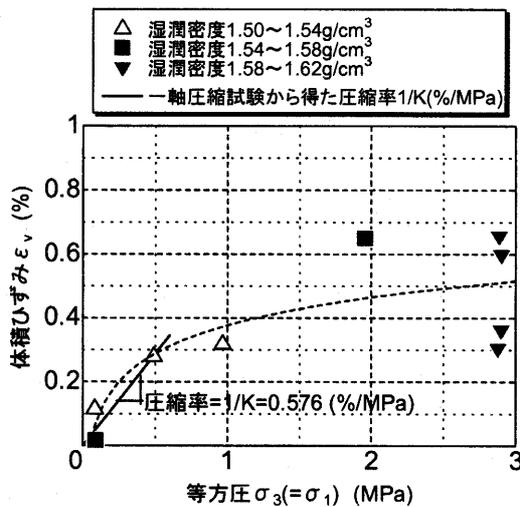


図-7 等方圧-体積ひずみ

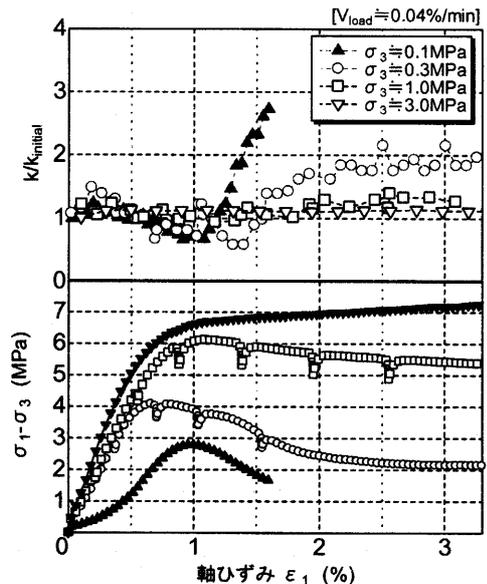


図-11 (上)軸ひずみ-無次元化透水係数
(下)軸ひずみ-軸差応力

3-3. 拘束圧除荷透水試験の結果

図-12に試験結果例を示す。いずれのサンプルも平均有効応力を除荷させると、せん断変形下透水試験で得られた破壊包絡線付近で供試体が破壊に達し、軸差応力が減少し始めることが分かる。しかし、破壊後の応力除荷に伴う透水性の増加傾向は2つのサンプルで若干異なり、応力がほとんど除荷された時の透水係数は、拘束圧除荷前の3~5倍になる結果が得られた。拘束圧除荷前の透水係数は sample-1 が $2.43 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、sample-2 が $3.40 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ である。試験後の供試体観察を行ったところ、せん断面が顕著に発生していた。

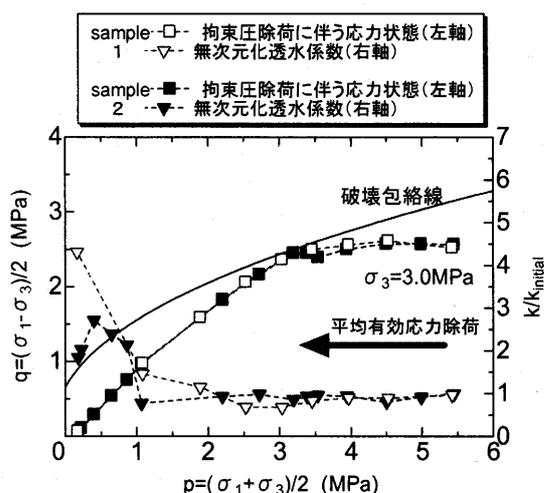


図-12 拘束圧除荷に伴う応力経路と無次元化透水係数

4. まとめ

今回、掘削影響領域における透水特性について検討するために、三軸圧縮によるせん断変形を伴う透水試験および、平均有効応力除荷過程のせん断一透水実験を行った。その結果、次のような考察に至った。

本試料(軽石凝灰岩)の透水性は、等方拘束圧に依存しているが、原位置から取り出した影響により岩盤内部に緩みが発生しており、低等方圧下では透水係数が大きな値を示した。したがって、EDZにおける応力が開放された領域に関しては、透水性の増加が懸念される。また、本試料の特徴であるパミスも透水性に影響を与えており、パミスの含有量が大きいと透水性も大きくなる傾向が見られた。したがって、本試料の透水性を評価する上でパミスの含有傾向についても十分注意しなければならない。

ある応力状態から平均有効応力を除荷させ破壊に至った後、平均有効応力がおよそ 1MPa まで減少してから透水性が増加した。

5. 今後の課題および展望

透水性は岩盤内の物理的構造に依存しやすい⁴⁾故に、不均質性の強い本試料では、透水係数などの諸物性に

ばらつきが大きかった。また、岩盤の複雑な応力状態と透水性に対して直接的な関係を見出すのは困難であり、その他のパラメータ、例えば変形や貯留係数などの挙動も考察材料の一つとして、より正確なデータを得られるように考慮していかなければならない。

今後は、拘束圧除荷透水試験での最終的な透水係数の挙動が2つのサンプルで異なる傾向を示した点に注目しながら実験を行い、サンプル数を増やし検討する必要がある。

参考文献

- 1) 宮島ら. 1999. トンネル設計・施工における亀裂性岩盤の浸透問題に関する現状と課題. 地盤工学会平成11年度発表講演集. pp.1295-1296
- 2) E.Hoek & E.T.Brown. 1982. Underground Excavations in Rock, chapter7. Institution of Mining and Metallurgy
- 3) 地盤工学会. 1995. 堆積軟岩の工学的性質とその応用. 地盤工学会
- 4) K. Hirata, T. Sugiyama & M. Karasawa. 1995. The examples of the foundation evaluation system and permeability tests for weak rocks. Rock Foundation, pp.317-320.