

## 三軸圧縮試験中に形成された堆積軟岩のせん断面に対する透水特性の評価

清水建設 正会員 郷家 光男

**1. はじめに** 岩盤中に空洞を掘削すると、周辺岩盤の力学特性、水理特性、地球化学的特性が変化することが知られている<sup>1)</sup>。このような領域は掘削影響領域（EDZ）と呼ばれ、放射性廃棄物処分場の地下施設の安全性に影響を与えることが懸念されている。特に、軟岩サイトの周辺岩盤は応力的に厳しい状況になることが予想され、非弾性的な変形に伴う透水性の増大が懸念されている。これまで、筆者は堆積軟岩の供試体に対して三軸圧縮試験の途中で透水試験を行うことによって、せん断破壊の進行に伴う透水係数の変化について検討した<sup>2)</sup>。ただし、そこに示された透水係数はせん断面を含む供試体全体の透水係数であって、せん断面そのものの透水係数ではない。そこで、本研究では、非弾性的な変形に伴うEDZの透水特性変化のより合理的な予測に資することを目的として、以前に行った試験<sup>2)</sup>のデータと浸透流解析を用いて三軸圧縮試験中に形成されたせん断面の透水特性の評価を試みた。

**2. 試験概要** 試験に用いた岩石は、新第三紀中新世の凝灰岩質砂岩である島根県産の来待砂岩である。供試体の寸法は直径50mm、高さ100mmとした。そして、三軸圧縮試験中に所定の応力状態、またはひずみ状態に達した後に軸ひずみを一定に保持して、定水位法による透水試験を行った。このとき、透水試験は放射状流による方法で発散流とした。放射状流による透水試験の概念図を図-1に示す。すなわち、供試体中央に非貫通の注水孔を設け、供試体下部と載荷板の間に溝つき排水板を挟み、側面を側面排水材で巻き、その外側をメンブレンで覆った。注水孔から供試体内に流れ込んだ全ての水は供試体側面、側面排水材、排水板の溝の順に通過して排水されて流量を測定することができる。また、試験時の有効拘束圧を表-1に示す。間隙水圧や載荷速度などその他の試験条件については文献2)を参照されたい。

**3. 試験結果** 試験終了後の供試体を写真-1に示す。写真-1によると、いずれの供試体にも1枚の明瞭なせん断面が発生していることがわかる。また、せん断面は供試体の側面から上端面、または下端面に抜けていて、上下方向には貫通していなかった。Case1では完全に供試体は分離していてガウジが少々付着していた。

Case2ではせん断面の一部は開口しているが、供試体は完全には分離していなかった。また、Case3ではガウジで充填されていて完全に密着していた。Case1～3の軸ひずみ-軸差応力関係を図-2に示す。この図によると、軸ひずみが0.36～0.50%でピーク強度を示して、その後、ひずみ軟化過程を経て残留強度状態に至った。写真-1の状況を合わせてみるとせん断面はピーク強度以降に供試体を貫通したものと考えられる。

透水試験の各Stepでの差圧と計測された流量を図-3に示す。ピーク強度までは差圧を0.5MPaとして透水試験を行ったが、その後、供試体の透水性が増加したことから差圧を下げた流量を計測した。

**4. 評価方法と結果** せん断面の透水係数については、ピーク強度以降の差圧と流量を境界条件として、透水試験をFEM浸透流解析で再現することで求めた。例として、Case3における解析メッシュを図-4に示す。本研究では基質部をソリッド要素（黒色）、写真-1に示された明瞭なせん断面を一枚の平面と見なしてシェル要素（緑色）でモデル化した。基質部の透水係数には、弾性変形時に求められた透水係数を各試験Stepにおいて一定値として与えた。せん断面の透水係数を $k_f$ とすると、平行平板モデルにより水理学的開口幅 $e_f$ は以下のようになり<sup>3)</sup>、これをシェル要素の厚みとして与えた。

$$e_f = \sqrt{12\mu k_f / \rho_w g} \quad (1)$$

ここに、 $\mu$ は水の粘性係数、 $\rho_w$ は水の密度、 $g$ は重力加速度である。

解析の境界条件を図-5に示す。モデルの上下端面は不透水境界とした。注水孔を図-3に示された各試験Stepの差圧 $\Delta h$ を与えたとき、側面から出てくる水の流量を求め、その流量が計測された流量と合うまで、せん断面の透水係数 $k_f$ の値を変えて解析を繰り返すことによってせん断面の透水係数 $k_f$ を求めた。

せん断面のせん断変位（ピーク強度時を0）と透水係数 $k_f$ の関係を図-6に示す。各Caseにおける初期状態の透水係数 $k_f$ は $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ となった。ひずみ軟化過程においてCase1では初期状態の約35倍、Case2では約16倍、Case3では約5倍となった。さら

キーワード：放射性廃棄物、堆積軟岩、掘削影響領域、三軸圧縮試験、せん断面、透水係数

連絡先：〒135-8350 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設技術研究所 Tel.03-3820-8438 Fax. 03-3820-5959

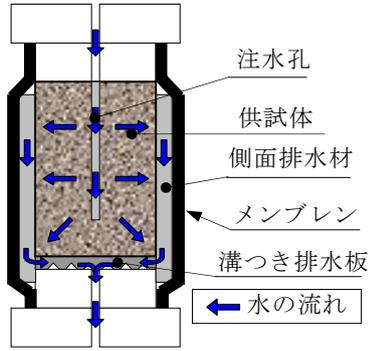


図-1 透水試験の概念図

表-1 試験条件

実験ケース	有効拘束圧(MPa)
Case1	0.3
Case2	1.0
Case3	3.0

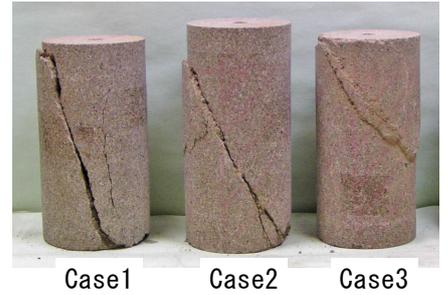


写真-1 試験終了後の供試体

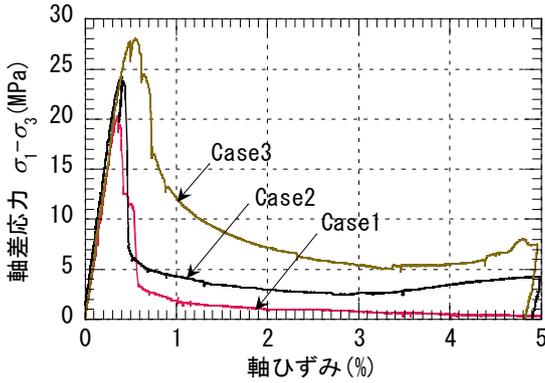


図-2 軸ひずみ-軸差応力関係

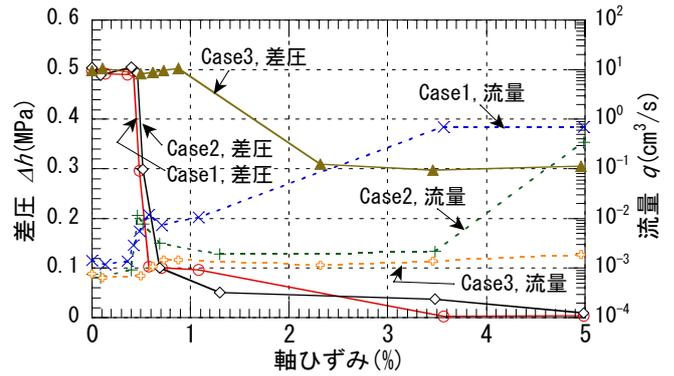


図-3 透水試験時の差圧と流量

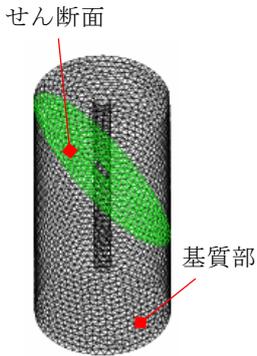


図-4 解析メッシュ

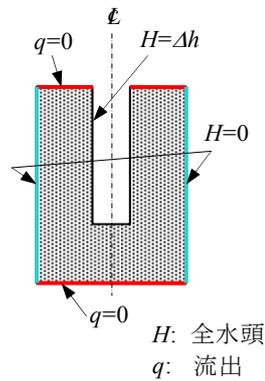


図-5 境界条件

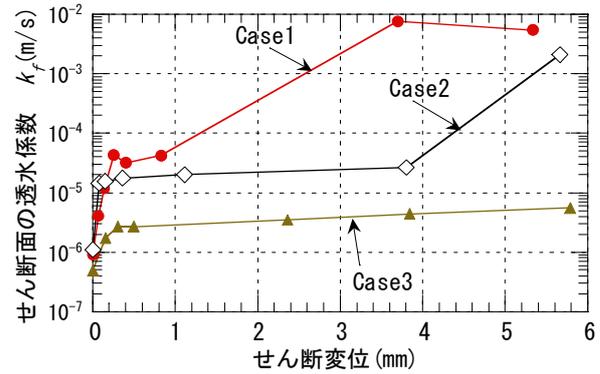


図-6 せん断面の透水係数の変化

に、残留強度状態になっても透水係数は増加し続け、特に、Case1 と 2 はある変位レベルになると急激な増加を示し、最大で約 8000 倍まで増加した。ただし、拘束圧の大きかった Case3 では急激な増加は見られず、最終的には初期状態の約 10 倍程度の増加となった。Case1 と 2 では、せん断面に作用していた垂直応力が小さかったために、せん断面内でガウジの生成があまり進まず、ピーク強度以降のせん断面の透水係数の急激な増加につながったと考えられる。

**5. まとめ** 三軸圧縮試験中に実施した透水試験と浸透流解析を組み合わせることによって、堆積軟岩の供試体に形成されたせん断面の透水係数を算定した。その結果、せん断面の初期の透水係数は  $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$  のオーダーであり、せん断破壊の進行に伴って増加す

ることがわかった。そして、その増加の程度は拘束圧に依存する傾向があることがわかった。今後、ここで得られた結果を活用して、非弾性的変形に伴う EDZ の透水性増大の予測に結びつけていきたいと考えている。

**参考文献**

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，地層処分開発第2次取りまとめ，総論レポート，JNC TN1400 99-020，pp.III-71，1999。
- 2) 郷家他：せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.167-172，2003。
- 3) 例えば，ドミンゴ，P.A.他：地下水の科学 I—地下水の物理と科学—，地下水の科学研究会誌，土木工学社，pp.68，1995。