

流れの可視化技術による岩盤不連続面のせん断-透水同時特性の実験的評価

長崎大学大学院 学生員○矢野孝樹 李 博 佐保亮輔
フェロー 棚橋由彦 正会員 蔣 宇静

1.研究目的

近年、地下エネルギー貯蔵施設や高レベル放射性廃棄物の地層処分のプロジェクトが注目を集めている。これらは地下の隔離性や地下水に対する水封性、流動機能を利用するものである。その設計、施工及び維持管理の面で、適切な対策を施すためには、基礎的な情報として、力学、透水等の岩盤諸特性を把握する必要がある。本研究では、岩盤不連続面せん断-透水同時特性の評価を行うため不連続面内の流れを可視化する技術を構築し、不連続面内の水理・物質移動のメカニズムを解明するとともに、せん断過程における透水係数の変化について考察を行う。

2.試験装置の概要

本研究で開発したせん断-透水同時特性試験装置は垂直とせん断载荷フィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムで、パソコンにより载荷がコントロールされる。また、透水機構部はカセット式せん断箱に止水機構を組み込むことで改良を加え、一面せん断試験装置に上流、下流タンク及びせん断スペーサーなどを接続することによって透水機構を付加した構造としている。供試体の端部に接合されたパイプから圧力をかけてせん断箱内へ水を流入させ、供試体逆端部から流出する水の重量(透水量)をリアルタイムに計測する。

3.流れの可視化技術

通常は、不連続面内の流れを平行平板モデルで表し、不連続面を流れる流量は間隙幅の3乗に比例する3乗則が適用できるとされている。しかし一方、自然界に存在する岩盤不連続面は内部構造が非常に複雑であるため、単純な平行平板モデルを適用することには限界があると考えられる。そこで、本研究ではせん断用供試体の上半分を透明な材料に置き換え、供試体の上部に取り付けられたCCDカメラでせん断中の水の流れをリアルタイムに観察し、せん断過程における流れの特徴を明らかにする可視化システムを設計した。

4.試験ケース

表-1 試験ケースの設定

| ケース | 上部・下部材料 | 水頭差 h (mm) | 载荷条件 |
|-----|---------|--------------|---|
| 1 | アクリル/石膏 | 200, 100, 50 | $\sigma_{n0}=1.0\text{ MPa}$ (CNL 制御) |
| 2 | アクリル/石膏 | 100, 50, 30 | $\sigma_{n0}=1.0\text{ MPa}$ $K_n=1.0\text{ GPa/m}$ |
| 3 | 石膏/石膏 | 30, 20, 10 | $\sigma_{n0}=2.0\text{ MPa}$ (CNL 制御) |

上部が透明供試体で、下部が石膏供試体とするケース 1, 2, また、上部下部とも石膏供試体を用いたケース 3 で行う。透水条件は、水頭差を 3 段階に変化させて試験を行い 3 つの平均から透水量を求め

る。また、可視化を行う際は浸透水を食紅で着色する。水温 20℃で、動粘性係数が $1.004 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ である。CNL 制御は垂直応力一定制御、 K_n は垂直剛性一定 (CNS) 制御における周囲地山の垂直剛性である。 σ_{n0} は初期垂直応力である。

5.可視化画像

図-1 にケース 2 の条件下での流れの可視化画像の一例を示す。接触部分の変化に注目すると、せん断前では上部の透明供試体と下部の石膏供試体の噛み合いが良いため、接触面積は広く、接触数が多いことがわかる。しかし、せん断が進む

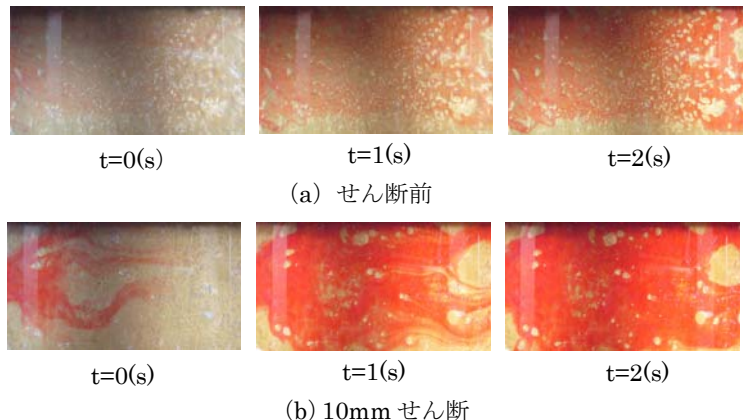


図-1 せん断における水の流れとその拡散の様子 (ケース 2)

キーワード せん断-透水同時特性/流れの可視化/透水係数

連絡先 〒852-8521 長崎市文教町 1-14 TEL 095-819-2612

につれ接触数が徐々に減少していき、接触面積も小さくなっている。これより、せん断による接触部分の変化が顕著であることを把握できる。また、浸透水の色の濃度が開口幅の大きさに比例しているとする、せん断初期の水の色は非常に薄いことから、不連続面内を流れる流量が少なく物理的開口幅も小さいことがわかる。せん断の進行に伴い、水の色濃度が増していることから流量が増加し、ダイレーションにより物理的開口幅が大きくなっていることがわかる。これより、せん断過程における流れの可視化画像を解析して開口幅の分布と変化を精度良く把握することができると考えられる。

6.せん断変位とせん断応力の関係

図-2より、ケース3ではせん断応力がピークに達した後に低下しており、ピークせん断応力と残留応力の差が大きい。しかし、ケース1, 2ではピークが顕著に現れていない。これは供試体の組み合わせが石膏-石膏では表面の凹凸がせん断によって表面が破壊されるが、組み合わせが透明材-石膏の場合、透明供試体が破壊されず塑性変形のみ発生したためであると考えられる。透明供試体ではピークせん断応力を超えた後の残留段階の挙動が、石膏供試体と近い。また、ケース1とケース2で残留応力に差が生じている。これはCNS制御でせん断が進むにつれ垂直応力が増加し残留応力が大きく生じたためである。これより材料の違いによる影響は無視できないことがわかる。

7.開口幅の検証

図-3に水理学的開口幅と物理的開口幅の関係を示す。水理学的開口幅とは、次に示すダルシー則(式(1))から逆算して求めた開口幅である。

$$Q = Av = Aki = We \cdot \frac{ge^2}{12\nu} \frac{\Delta h}{L} \quad (1) \quad k = \frac{ge^2}{12\nu} \quad (2)$$

ここで、 Δh は水頭差、 g は重力加速度、 A は断面積、 e は水理的開口幅、 ν は動粘性係数である。物理的開口幅とは垂直全平均変位から得られた値である。水理学的開口幅と物理的開口幅では一般的に後の方が大きい値をとる。これは、不連続面内凹凸が存在することにより、水の流れに“摩擦”を与え、流速が損失したためである。図-3でも、全ケースで水理学的開口幅のほうが小さい。これより、透明供試体を用いても水理学的開口幅と物理的開口幅との関係を精度良く表現できたといえる。

8.透水係数の評価

図-4にせん断変位に対する透水係数の変化を示す。せん断初期では表面の凹凸が噛み合った状態となることから、透水係数は小さい値を示す。その後、ダイレーションの増加に伴い、透水係数も増加している。上下石膏供試体と上部透明供試体、下部石膏供試体とでは透水係数の挙動は非常に類似している。

9.結論

流れの可視化技術により、不連続面内の水の流れを視覚的に把握することを可能にしたため、垂直応力一定制御と垂直剛性一定制御における開口幅と透水性、せん断応力の変化を詳細に考察した。その結果、せん断に伴う不連続面表面同士の接触状態の変化による水理学的な特性の変化を詳細に把握でき、不連続面の水理・物質移動モデルの検証に有用な実験データを提供することができた。

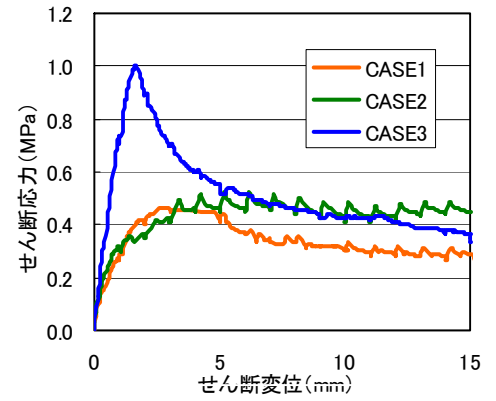


図-2 せん断応力と変位との関係

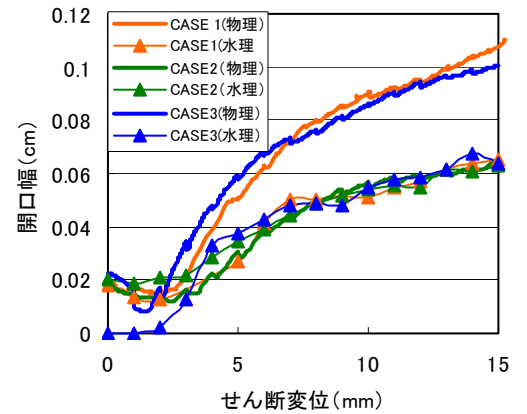


図-3 開口幅の検証

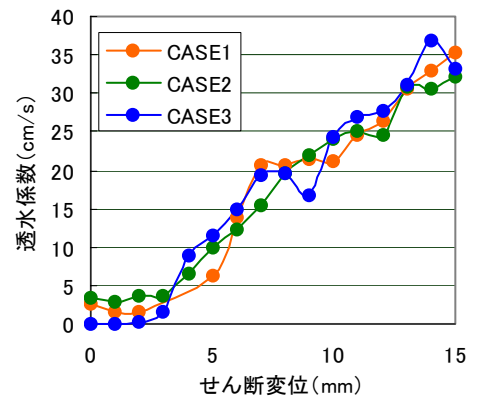


図-4 透水係数の評価