

流れの可視化技術による岩盤不連続面のせん断一透水同時特性の実験的評価

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

1.はじめに

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、CO₂等の地中貯留等のプロジェクトが注目を集めている。これらはいずれも地下の隔離性や地下水に対する水封性、流動機能を積極的に利用するものである。その設計、施工及び維持管理については、適切な対策を施す必要があり、これらの基礎的な情報として、力学、透水等の岩盤の諸特性を正確に把握する必要がある¹⁾。本研究では、岩盤不連続面のせん断一透水同時特性の評価を行うために不連続面内の流れを可視化する技術を構築し、それを適用することにより不連続面内の水理・物質移動のメカニズムを解明することを目的とする。

2.試験装置の概要

せん断一透水試験機の概要を図-1に示す。この装置は、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ている。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パ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なっている。せん断箱は、供試体の端部に接合されたパイプから圧力をかけて水を流入させ、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できる。この際、不連続面に対して最大で100mの圧力水頭差を模擬することができる。

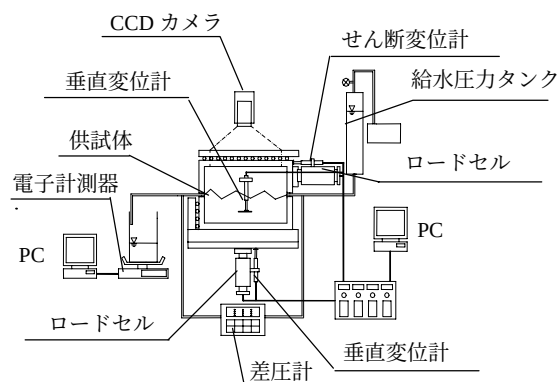


図-1 試験機概要図

3.流れの可視化技術

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。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²⁾。しかし一方、対象とする流れが層流であるか乱流であるかを議論することは3乗則が適用できるかどうかを確かめる上で非常に重要であるものの、未だに明らかにされてない。そこで、可視化技術を不連続面内の流れの観察に適用し、せん断過程における流れの特徴を判断する。具体的には、せん断用供試体の上半分を透明材で作製し、下半分は石膏系材料で作製する（一軸圧縮強度は32MPa）。せん断中の水の流れは、供試体の上部に取り付けられたCCDカメラでリアルタイムに観察する。

4.試験ケース

今回は試験装置の3ケースの試験を実施する。ケースAは上部・下部共にアクリル平行平板、ケースBは上部がアクリル不連続面供試体、下部が石膏系不連続面供試体、ケースCは上部・下部共に石膏系不連続面供試体を図-1のようにカセット式せん断箱にセットして透水試験を行う。なお、3ケースの試験条件は表-1～表-3に示す。

表-1 試験ケース A

開口幅 e (mm)	水頭差 h (cm)
0.82	1, 5, 10, 20
0.466	5, 10, 30, 50
0.3	20, 50, 100, 200
0.2625	50, 100, 200, 300

表-2 試験ケース B

せん断変位 u (mm)	水頭差 h (cm)
0, 1, 3, 5, 10	10, 30, 50

表-3 試験ケース C

せん断変位 u (mm)	水頭差 h (cm)
0～6	30, 20, 10
7～15	10, 5, 3

5. 結果と考察

5.1 水理学的開口幅の検証〈試験ケース A〉

滑らかな平行平板流れでモデル化すると、流れる流量は一般に間隙幅の 3 乗に比例する 3 乗則が成立する。そこで、アクリル平行平板のような滑らかな表面を持つ供試体で透水試験を実施し、本試験装置の試験精度を確かめる。図-2 に理論値と実験値の比較を示す。物理的開口幅とは開口幅 e 、水理学的開口幅とは透水量に 3 乗則を適用させて求めた開口幅である。実験値は理論値にほぼ一致していることからせん断一透水試験装置は高い精度を有するといえる。

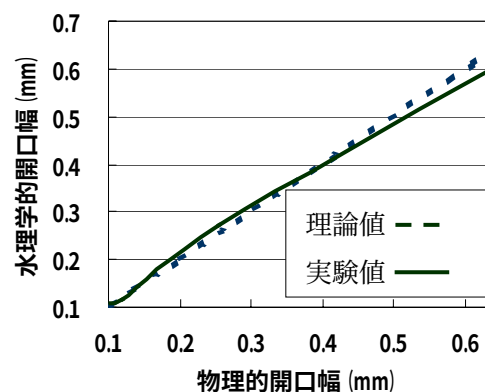


図-2 水理学的開口幅と物理的開口幅の比較

5.2 せん断における流れの変化〈試験ケース B〉

一例として、せん断変位 1mm、10mm における可視化画像を図-3 に示す。せん断では、不連続面の表面の接触状態の変化により流れが顕著に変化することが観察された。また、接触部分では乱流現象が見られた。

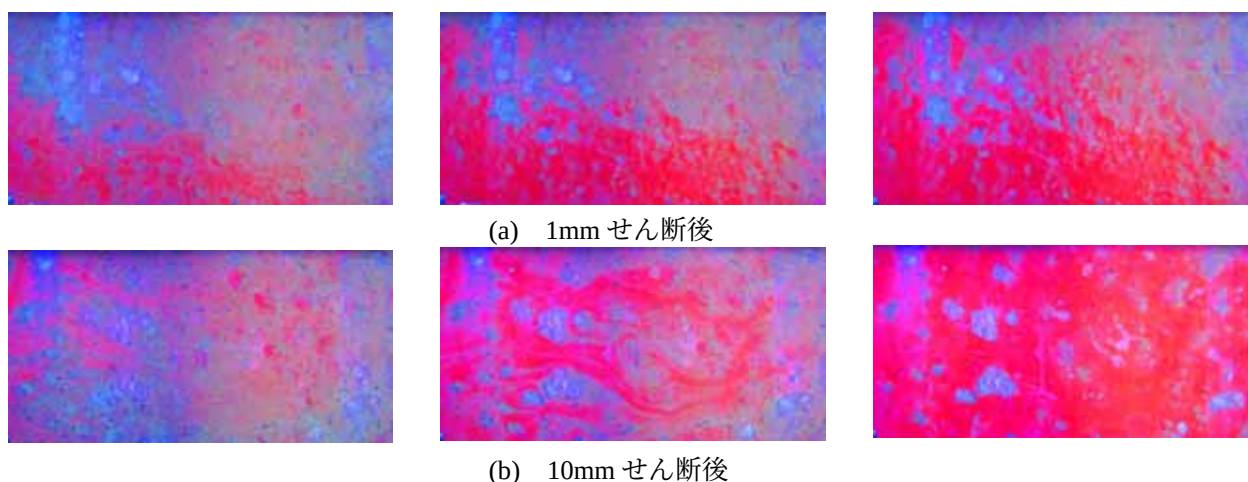


図-3 せん断過程における流れの変化 ($h=10\text{cm}$)

5.3 透水係数の評価〈試験ケース C〉

図-4 には垂直応力一定 (CNL) 制御におけるせん断変位と透水係数の関係を示す。せん断初期に凹凸が噛み合った状態となることから、透水係数は非常に小さい値を示す。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。せん断変形の進行による透水性の変化はダイレーションの傾向に類似している。ダイレーションが生じると、不連続面の隙間が増加し流れの通路が徐々に連結され〈図-3〉、急激に透水性が増加する。透水係数は全体的には増加を辿っているが、せん断変位 8mm 付近では透水係数が一旦減少したのは、発生したガウジにより一時的に供試体の噛み合い状態が良くなったためと考えられる。

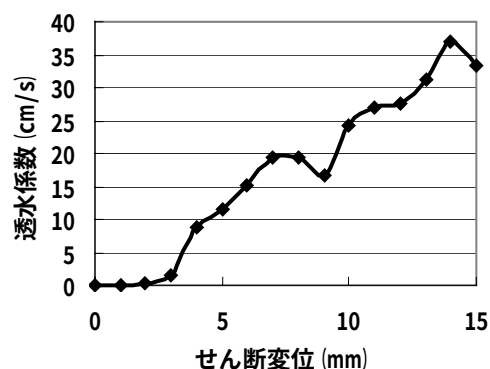


図-4 せん断変位と透水係数の関係
(垂直応力一定制御, $\sigma_{n0}=2\text{MPa}$)

6. おわりに

今回の試験結果より試験装置が高い精度を有していることがわかる。また、せん断における流れの可視化画像を得ることにより流れの変化を把握することができた。今後は垂直剛性一定 (CNS) 制御など、種々な境界条件におけるせん断一透水同時特性を考察していく。

【参考文献】

- 1) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発，2002。
- 2) 蔣宇静：岩盤不連続面のフラクタル特徴とせん断挙動および透水特性との関係，科学研究費補助金（奨励研究 A）成果報告書，1999。