

垂直荷重の制御方式の違いによる不連続面のせん断 - 透水同時特性

九州大学工学部 学生会員 ○下田誠 九州大学大学院 正会員 江崎哲郎
九州大学大学院 正会員 三谷泰浩 九州大学大学院 学生会員 浦川文寛

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や各種エネルギーの地下貯蔵など深部地下の開発において安全性、経済性、環境上の配慮など厳しい設計条件が要求される。そのため岩盤の特性を支配する不連続面の力学・透水特性およびそれらのカップリング特性を適切かつ詳細に把握する必要がある。本研究では3つのケースの垂直载荷条件でせん断 - 透水同時実験を行い、垂直荷重の制御方式が不連続面のせん断 - 透水同時特性に与える影響について検討を行う。

2. せん断 - 透水同時実験

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。せん断 - 透水実験装置は、せん断時に試験体下部を移動させる構造で、2本の垂直ジャッキにより不連続面相互の回転を制御することが可能である。制御はせん断方向にはせん断変位制御、垂直方向には、試験体前後に設置された垂直変位計とコントロールユニットによって荷重制御、変位制御、剛性制御が可能である。また、せん断を一時的に止めた状態で一方向流の透水実験を同時に行うことができる。

2.2 実験ケース

実験は、垂直応力一定条件で上箱の傾斜を制御したケース(Case 1)、垂直応力一定条件(Case 2)、剛性一定条件(Case 3)の3ケースを行う。せん断時に不連続面に発生するガウジの影響を少なくするために垂直応力を3 MPa、垂直剛性を2 MPa/mm とする。透水実験は注水側の圧力水頭を3m、排水側の圧力水頭を1mで行う。実験ケースについて Table 1 に示す。

3. 実験結果および考察

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, はそれぞれのせん断変位におけるせん断応力と垂直応力、試験体前後の垂直変位、および、その平均値、透水係数を示す。なお、Fig. 3 の front と rear の変位計の位置は図中に示している。せん断応力はそれぞれのケースで、せん断開始直後から急激に増加し、せん断変位 0.90mm ~ 1.90mm の間でピーク値を示す。その後、せん断応力はひずみ軟化現象を呈しながら急激に減少し、残留せん断応力へと移行する。

せん断開始直後、垂直変位はほとんど変化しないが、せん断変位約 0.4 ~ 1.4mm で、垂直変位は増加し始め、せん断応力がピーク値を示した直後に垂直変位が急激に増加し、その後も、垂直変位は緩やかに増加する。また、Case 2, 3 とともにせん断初期では前後の垂直変位に差はなく、上箱の傾斜は生じていない。しかし、せん断応力がピークを示した後、前方が持ち上がるように上箱の傾斜が発生する。透水係数は、せん断初期に一旦減少し、垂直変位が増加し始めるときに、最小値を示す。その後、垂直変位の増加とともに、せん断変位 7mm まで透水係数は急激に増加するが、残留域では、垂直変位が増加しても、透水係数は増加せずに、増減を繰り返す。これは、残留域に至り、間隙幅がある程度増加すれば、力学的間隙幅の変化が、透水係数に及ぼす影響は、非常に小さくなることを示している。

4. 垂直荷重の载荷方式の違いによる影響

4.1 回転制御による影響

回転制御による影響を検討するために、Case 1 と Case 2 を比較すると、せん断初期のせん断剛性、ピークせん断応力は Case 1, 2 とともにほぼ同じ値を示し、残留せん断応力に大きな違いは見られない。Case 2 はせん断変

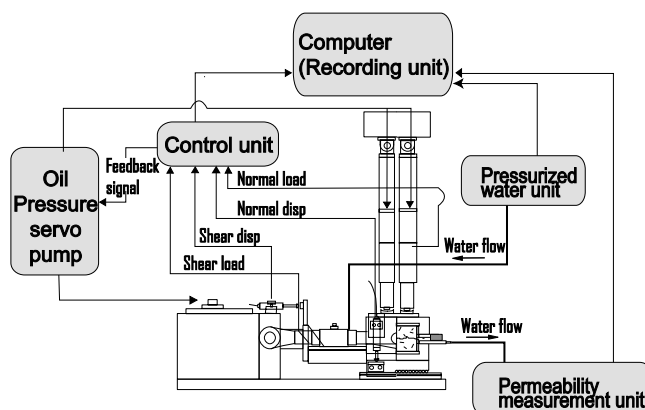


Fig. 1 Schematic view of 1-D flow type shear-flow coupling testing system.

Table 1 Test cases

Case name	Normal stress	Controlling inclination of upper box	Normal stiffness
Case 1	3 MPa	○	-
Case 2	3 MPa	-	-
Case 3	3 MPa + $k_n d_n$	-	2 MPa/mm

位 0.5mm ~ 0.8mm でせん断応力が一旦減少し、せん断応力がピークを示すせん断変位も Case 1, 2 で異なる。しかし、この時点では、上箱の傾斜はほとんど生じておらず、このような Case 1, 2 のせん断応力の違いは回転制御によるものではない。以上から上箱の傾斜を制御することが、せん断応力に及ぼす影響は非常に小さいといえる。

せん断初期では、Case 1, 2 の透水係数はほぼ等しい。また、残留域における透水係数にも Case 1, 2 に大きな違いはみられない。せん断変位 2.0mm ~ 5.0mm の範囲では、Case 1, 2 とともに垂直変位の増加にともなって、透水係数が増加するが、Case 1 のほうが Case 2 よりも垂直変位が大きいにも拘らず、透水係数は Case 1 のほうが小さい。これは Case 1 では、回転制御によって、不連続面に局所的な応力の集中が発生し、局所的に大きな接触領域ができる。この接触領域が透水経路を塞ぎ、水の流れを妨げているためと考えられる。

4.2 剛性制御による影響

剛性制御による影響を検討するために Case 2 と Case 3 を比較する。せん断初期のせん断剛性は Case 2, 3 でほぼ等しいが、Case 3 のピークせん断応力は Case 2 の約 80% で、ピークを示すせん断変位も 1mm 程小さい。ただし、この時点では、垂直変位の変化はなく、このようなせん断応力のピークのずれは剛性制御によるものではないと考えられる。ピーク以降のせん断応力を比較すると、Case 3 ではピーク直後のせん断応力の低下が小さく、残留域では Case 2 よりもせん断応力が約 1.5MPa 大きくなった。

透水係数および垂直変位はせん断初期では Case 3 のほうが大きい、Case 2 の垂直変位が Case 3 を超えるせん断変位 4 ~ 5mm で両ケースの透水係数はほぼ等しくなる。残留域では、Case 2 と Case 3 の垂直変位の差は 0.5mm 以上大きくなるが、透水係数はほぼ同じ値を示す。

5. まとめ

本研究では垂直荷重の制御方式の違いが不連続面のせん断 - 透水同時特性に与える影響について検討するために、3種類の実験を行い、比較したところ、次のような結果が得られた。

せん断初期では、垂直変位の変化、上箱の傾斜はともに非常に小さく、3種類の制御方式によるせん断挙動の大きな違いはみられない。

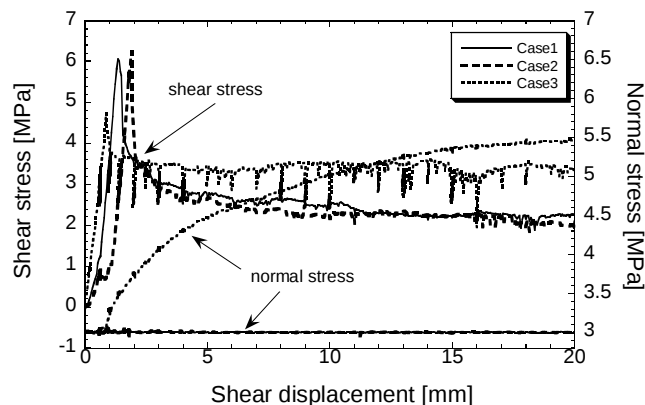


Fig. 2 Shear stress and normal stress vs. shear displacement

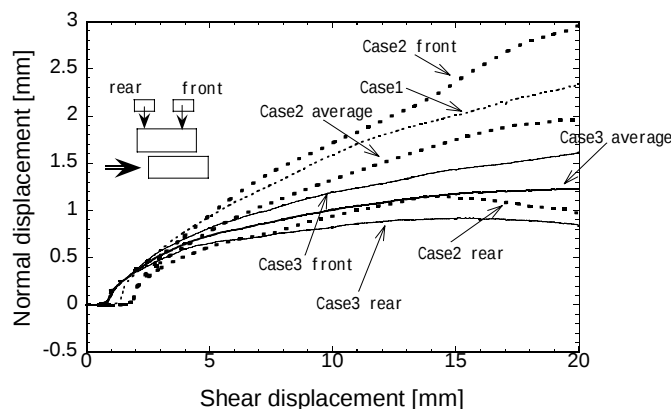


Fig. 3 Normal displacement vs. Shear displacement

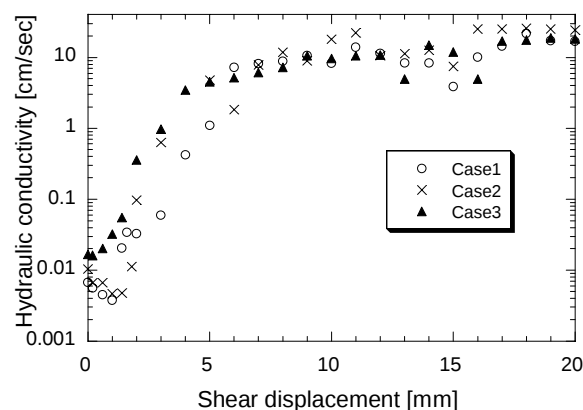


Fig. 4 Hydraulic conductivity vs. shear displacement

回転制御がせん断応力に及ぼす影響は非常に小さい。また、剛性制御を行った場合、ピークからのせん断応力の軟化が小さく、残留せん断応力は大きな値を示した。

せん断応力がピーク値から減少するとき、透水係数は垂直変位の増加とともに急激に増加する。このとき、上箱の傾斜を制御した場合の透水係数は他の2つのケースと比較して小さな値となった。

残留域では3つのケースで力学的間隙幅は大きく異なっているものの、透水係数はほぼ等しくなった。