

せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化

VARIATION OF HYDRAULIC PROPERTIES ON SOFT ROCK DUE TO SHEAR DEFORMATION

郷家光男*・石井 卓**・木下直人***・船山潤一****

Mitsuo GOHKE, Takashi ISHII, Naoto KINOSHITA and Junichi FUNAYAMA

In order to investigate variation of hydraulic properties on soft rock due to shear deformation, permeability tests were performed on Kimachi sandstone by axial flow or radial flow technique during triaxial compress tests. For the radial flow technique, a water injection hole was prepared in the center of specimen, and side drains were prepared. As a result of the experiment, the radial direction permeability hardly increased until peak strength, and rapidly increased from strain softening to residual strength state. It is indicated that the axial flow technique underestimates permeability after peak strength.

Key Words: soft rock, hydraulic conductivity, triaxial compress test, radial flow, shear failure

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、地球化学特性が変化することが知られている¹⁾。このような変化が生じる領域は掘削影響領域と呼ばれるが、放射性廃棄物の地層処分では、掘削影響領域が放射性核種の移行経路となって、処分場の安全性に影響を与えることが懸念されている。したがって、処分場の安全性を議論するためには、坑道掘削時に周辺岩盤の透水性がどのように変化するかを事前に予測することが必要となる。軟岩において坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化を検討する場合、割れ目の透水性が岩盤の透水性を支配する硬岩とは異なり、既存の割れ目の変化だけでなく、基質部の変化も考慮する必要がある。また、放射性廃棄物の地層処分では、より深い場所に廃棄体を処分することが望ましいことから、坑道周辺岩盤は応力的に厳しい条件におかれることが予想され、非弾性的な変形の進行に伴う透水性の増大が懸念される。これまで、筆者らは既存割れ目の透水係数に対する垂直応力やせん断の影響、基質部の透水係数に対する拘束圧の影響について実験を行ってきた^{2),3)}。本研究では、軟岩の基質部がせん断を受ける過程で、その透水性がどのように変化するかを知るために、三軸圧縮試験中に透水試験を行った。

鈴木ら⁴⁾は三軸圧縮試験機を用いて新第三紀の細粒砂岩に対して、軸差荷重を載荷した各応力状態における軸方向と軸直角方向の透水係数の変化を計測している。その結果、載荷後、軸直角方向の透水係数は一旦減少し、ピーク荷重前から増加に転じること、また、載荷軸方向と軸直角方向の透水係数変化の傾向は異なることを示している。

石島ら⁵⁾は三軸圧縮試験機を用いて新第三紀の砂岩に対して、軸差応力の増加に伴う軸方向透水係数の変化を計測している。それによると、軸差応力の増加に伴い透水係数はわずかに増加する傾向が認められる程度であるが、破壊直前に至ると著しく増加することを示している。ただし、鈴木らおよび石島らの研究では、

* 正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所
** 正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所
*** 正会員 工博 株式会社地層科学研究所
**** 非会員 株式会社地層科学研究所

ひずみ軟化過程や残留強度時の透水係数の変化については不明である。

李ら⁶⁾は三軸圧縮試験機を用いて和歌山県産白浜砂岩に対して、軸差応力の増加に伴う軸方向透水係数の変化を計測している。それによると、載荷初期の体積収縮時には透水係数は減少する。さらに載荷すると、ぜい性挙動を示す供試体は体積膨張に転じて、透水係数は増加する。一方、延性挙動を示す供試体は膨張しないが、軸ひずみ-体積ひずみ曲線の勾配の変化点付近で透水係数は増加に転じることを示している。

上記の石島ら、李らが行った三軸圧縮試験の一樣流によるせん断透水試験(図-1(a) 参照)では、試験法は簡単で応力状態の制御も容易である反面、側面を不透水のメンブレンで覆っ

ているため、最も透水性の変化が著しいと考えられるせん断破壊面に沿った方向の透水性変化を計測できない。本研究では、せん断破壊面の影響を考慮できる試験として、図-1(b)に示すような放射流による方法を開発し、半径方向の透水係数の変化を調べた。放射流による試験では Moore ら⁷⁾の実験を参考に行っている。また、本件では、ひずみ軟化および残留強度過程に達したときの透水係数の変化についても調べた。

2. 実験方法

(1) 試料

実験に用いた岩石は、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を用いた。供試体の寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。また、放射流による試験を行う供試体の中央部には直径約 6.5mm、深さ約 80mm の注水孔を設けたが、下部約 20mm には孔を設けずにそのまま残した。

(2) 試験装置

試験装置は、多目的三軸試験装置を用いた。ただし、既存の三軸セルを用いた場合、供試体軸方向の一樣流による透水試験しか行うことができない。放射流による透水試験では、図-2 に示すように送水経路と排水経路の改造を行った。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の排水板を挟み込み、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。このようにすることで、注水孔から供試体内に流れ込んだ全ての水は供試体側部、側面排水材、排水板の溝の順に通過して排水され、流量を測定することができる。側面排水材には排水能力が高いことと、供試体をできるだけ拘束しないようにすることが求められるため、ナイロンメッシュを二重に巻き、かつ、約 1cm 間隔で斜めに切れ目を入れた。また、このシステムに対する性能確認の結果、測定可能な透水係数の上限値は $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であった。

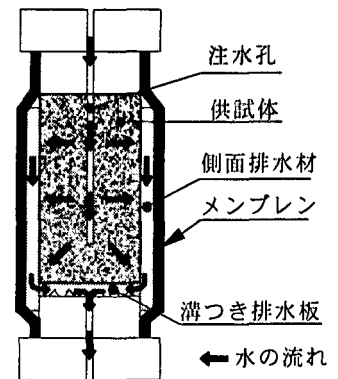


図-2 放射流による水の流れ

(3) 実験ケース

試験は、表-1 に示すように供試体の半径方向透水係数の変化に関する試験 3 個、軸方向透水係数の変化に関する試験 1 個の合計 4 個について実施した。

間隙水圧は全試験において 0.5MPa とした。また、載荷は変位制御として、ひずみ速度は 0.3%/h、最大軸ひずみは 5.0%とした。

透水試験は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、約5分間待ってから実施した。このとき、軸ひずみは一定に保つようにして、定水位法により行った。載荷過程では、①初期の等方等圧状態（軸応力=有効拘束圧）、②弾性変形状態（軸差応力約10MPa）、③ピーク強度到達時、④ひずみ軟化状態、⑤残留強度状態初期、⑥軸ひずみ3.5%到達時、⑦軸ひずみ5.0%到達時に透水試験を行った。また、除荷過程では、①除荷時中間点付近、②静水圧状態（軸応力=有効拘束圧）、③完全除荷時（軸応力=最小有効拘束圧0.3MPa）に行った。ひずみ軟化状態では透水性の変化が著しいと考えたため、複数の軸ひずみ条件下で透水試験を実施した。また、除荷過程における透水性の変化についても着目したが、残留応力が大きい場合のみ実施した。

さらに、試験終了後には供試体を取り出して、目視による観察を実施した。

3. 透水係数の評価方法

一様流の透水試験では、以下に示す式で軸方向透水係数 k_l を求めることができる。

$$k_l = \frac{L \cdot Q}{\Delta h \cdot A} \quad (1)$$

ここに、 L は供試体高さ、 Q は流量、 Δh は水頭差、 A は供試体断面積である。

今回の放射流の試験では、図-3(b)のように注水孔が供試体を貫通していないので、放射流の理論式を用いても正確な半径方向透水係数 k_r を求めることができないため、本試験では、正確な半径方向透水係数 k_r は、数値解析によって求める必要があった。しかし、軸対象 FEM 浸透流解析によって求めた透水係数と理論式による透水係数を比較してみると、実験ケースごとに供試体の寸法が微妙に異なるため、解析による値と理論式の値の比は各ケースによって異なってくるが、同一の供試体であれば、流量 Q や水頭差 Δh が変化しても、各透水試験段階における両者の比は一定になっていることがわかった。したがって、式(2)のように、理論式に修正係数 a を乗じることによって正確な半径方向透水係数 k_r を求めることができる。

$$k_r = a \frac{Q}{2\pi L_{in} \cdot \Delta h} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

ここに、 L_{in} は注水孔の深さ、 R_1 は注水孔の直径、 R_2 は供試体の直径である。また、修正係数 a を表-2 に示す。

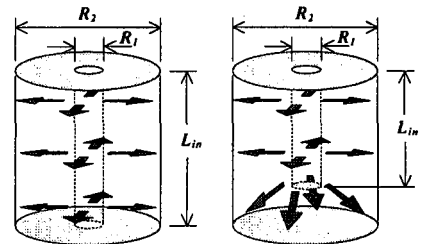
4. 実験結果

(1) 軸差応力、体積ひずみ、透水係数の変化

Case1~4における載荷、除荷過程の軸ひずみの変化に伴う軸差応力の変化を図-4に示す。図-4によると、載荷初期において、いずれのケースでも軸差応力は線形的に増加し、軸ひずみが0.36~0.55%でピーク強度を示している。ピーク強度は20.3~28.0MPaである。有効拘束圧が増加すると、ピーク強度もその時の軸ひずみも大きくなる傾向を示している。ピーク強度以降は、ひずみ軟化過程から残留強度に至る過程を呈しており、Case1、2および4では急激に軸差応力が低下し、軸ひずみが約1%になったときには残留強度に達し

表-1 試験条件一覧表

実験ケース	透水試験	有効拘束圧(MPa)
Case1	放射流	0.3
Case2	放射流	1.0
Case3	放射流	3.0
Case4	一様流	1.0



(a) 理論式 (b) 本研究
※両者とも上下端面は不透水

図-3 放射流に対する解析モデルの概念図

表-2 修正係数一覧表

試験ケース	修正係数
Case1	0.921
Case2	0.916
Case3	0.930

ていると考えられる。また、Case3 では、他のケースほどの急激な応力低下は見られない。残留強度もピーク強度と同様に有効拘束圧が増加すると大きくなる傾向が見られる。

Case1～4 における軸ひずみの変化に伴う体積ひずみの変化を図-5 に示す。体積ひずみは軸方向変位と周方向変位の測定値から求めていて、圧縮を正、膨張を負としている。なお、Case1 と 2 では軸ひずみが約 4%に達したときに周方向変位計が測定限界を超えたために、それ以降の体積ひずみを求めることができなかった。载荷初期において、いずれのケースでも供試体は収縮し、ピーク強度に達する直前から膨張に転じている。残留強度状態に達すると体積ひずみの変化率はほぼ一定となるが、有効拘束圧が大きい場合には変化率は相対的に小さい。すなわち、Case1, 2 および 4 では軸ひずみ約 4%の時点で 3%以上の体積ひずみが生じているが、Case3 では、約 1%となっていて、他の場合の 1/3 以下となっている。

Case1～4 における軸ひずみの変化に伴う透水係数の変化を図-6 に示す。Case1 と Case4 では、軸ひずみが 5%に達したときには軸差応力がほぼ 0MPa になったので、除荷過程の試験は行っていない。図-6 によると、各ケースにおける初期状態の透水係数は $4.3 \times 10^{-11} \sim 1.1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ となっている。また、Case1～3 の弾性域では、軸ひずみの増加に伴って透水係数はわずかに減少している。ピーク強度に達すると透水係数は増加の傾向を示すが、初期状態に対して 0.9～1.3 倍の増加にとどまり、初期状態との差は小さいことがわかる。ピーク強度以降、Case1 と 2 では軸差応力が急激に低下するに伴い、透水係数は著しく増加している。すなわち、Case1 のひずみ軟化過程では初期状態の約 40 倍、Case2 では約 25 倍になっている。一方、Case3 では、急激な応力低下は見られず、透水係数は約 3 倍程度の増加にとどまっている。残留強度状態になっても軸ひずみの増加に伴って、Case1～3 では透水係数は増加し続けている。特に、Case1 と 2 はあるひずみレベル以降になると、急激な増加を示し、軸ひずみ 5%における透水係数は初期状態の 20,000 倍以上になっている。ただし、拘束圧の大きい Case3 の増加は急激なものではなく、軸ひずみ 5%時の透水係数は初期状態の約 4 倍程度である。

軸ひずみが 5%に達した後、有効拘束圧=0.3MPa まで除荷する過程において、透水係数は Case2 では軸ひずみ 5%時の 2.7 倍に増加、Case3 では 2.3 倍に増加した。

一様流の透水試験を行った Case4 では、弾性変形状態の時から軸方向透水係数は増加し、ピーク強度時には初期状態の約 3 倍に増加している。ひずみ軟化過程になると軸差応力は急激に減少しているが、透水係数の急激な増加は見られず、軸ひずみ 5%の軸方向透水係数は初期状態の約 10 倍となっている。Case4 におけ

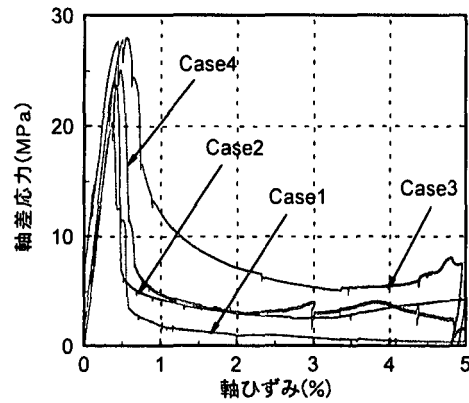


図-4 軸ひずみ－軸差応力関係

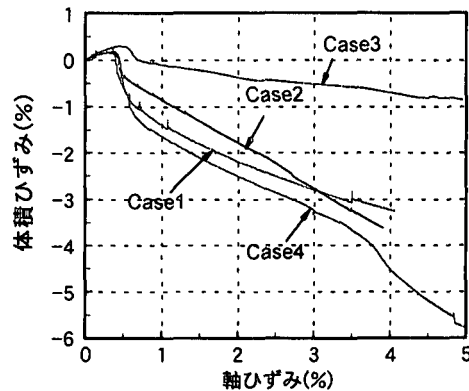


図-5 軸ひずみ－体積ひずみ関係

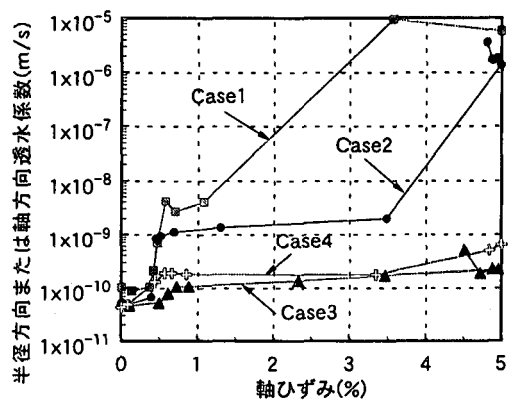


図-6 軸ひずみ－透水係数関係

る透水係数の変化は、同じ有効拘束圧（1.0MPa）である Case2 とは異なる傾向を示していることがわかる。

(2) 試験後の供試体観察結果

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 本の明瞭なせん断破壊面が発生していることがわかる。また、破壊面は供試体の側面から下端面、または、上端面に抜けていて、上下方向に貫通していないことがわかる。Case1 の破壊面の角度は約 74° 、開口幅は約 2mm、せん断面の変位量として数 mm 程度のずれがある。また、供試体は完全に分離していて、破壊面内にはガウジが少々付着している。Case2 の破壊面の角度は約 76° である。また、幅は約 1mm で一部開口しているが、供試体は完全に分離していない。これは、破壊面内部にガウジが部分的に存在していることによると考えられる。Case3 の破壊面の角度は約 50° で、幅は 0.5mm 以下であり、ずれも極めて小さい。また、破壊面内部はガウジで充填されていて、完全に密着している。Case4 の破壊面の角度は約 64° で、やや湾曲している。また、幅は約 2mm で一部開口していて、ガウジが部分的に存在している。

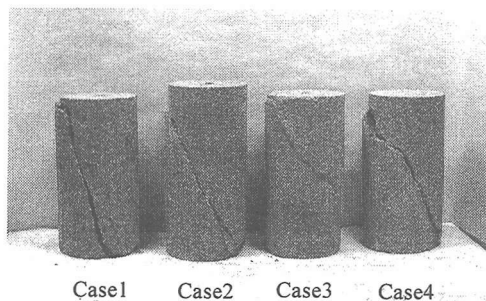


写真-1 試験終了後の供試体

5. 考察

(1) 半径方向透水係数と軸方向透水係数の変化の比較

有効拘束圧が同じで透水方向が異なる Case2 と Case4 について、透水係数の変化を比較してみる。軸差応力、体積ひずみの変化、および、試験終了後の供試体観測結果からは、Case2 と Case4 の変形・破壊挙動はほぼ同じ特徴を示していたが、透水係数の変化だけが異なる挙動を示している。すなわち、半径方向透水係数は一旦減少した後に、ピーク強度到達時には初期状態の 1.3 倍となっているのに対して、軸方向透水係数には減少傾向は見られず、ピーク強度到達時には初期状態の約 3 倍になっている。このような透水方向による透水係数の変化の違いは、定性的な傾向として、鈴木ら⁴⁾の実験結果と一致している。

弾性変形状態では、基質部の既存の微小き裂のうち軸方向と垂直な面を持つものが、軸差応力によって閉鎖するために、半径方向の透水係数が減少したものと考えられる。一方、軸方向と平行な面を持つ微小き裂に作用する垂直応力に変化がないことが、軸方向透水係数は減少傾向を示さないことにつながったと考えられる。

ピーク強度付近では、非弾性的な体積増加（ダイレタンス）が見られることから、基質部内部には多数の微小き裂が発生していると考えられる。このような微小き裂は軸方向に平行でかつ開口していることから、相対的に軸方向透水係数の増加率が大きくなったと考えられる。

ひずみ軟化過程から軸ひずみ 5%に至るまで、軸方向は初期状態の約 10 倍の増加に対して、半径方向は約 20,000 倍以上に増加しており、顕著な透水異方性が生じている。このような透水係数の異方性はせん断破壊面の形成によって生じたと考えられている。一般に、せん断破壊面は上下方向に貫通しないことから、最も透水性の変化が著しいと考えられるせん断破壊面に沿った方向の影響を調べるためには、放射流により半径方向の透水係数を求める方法が適しており、従来の軸方向の透水係数を求める方法は適していないと考えられる。ただし、せん断破壊面が形成される前の段階では、供試体軸方向に平行な微小き裂の発生の影響により、通常の軸方向の透水係数を求める方法が適していると考えられる。

(2) せん断破壊の進行に伴う透水係数の変化

Case1～3 の放射流の試験では、ピーク強度以降に透水係数の増加が見られる。そして、この増加の程度

は有効拘束圧に依存していることがわかる。せん断破壊面の角度とピーク強度以降の応力の変化から破壊面に作用した垂直応力 σ_n を算定すると、Case1, 2 では $\sigma_n=0.5\sim2.5\text{MPa}$ 、Case3 では $\sigma_n=5.0\sim14\text{MPa}$ の範囲で変化している。また、筆者らが行った来待砂岩の天然き裂に対するせん断-透水同時試験の結果²⁾によると、垂直応力 $\sigma_n=2.0\text{MPa}$ 以下のケースでは、せん断応力が残留強度に達すると透水係数が急激に増大したが、 $\sigma_n=5.0\text{MPa}$ のケースでは、流量は測定限界以下であった。以上のことを考慮すると、Case1, 2 ではせん断破壊面に作用していた垂直応力が小さかったために、破壊面内でガウジがあまり形成せれず、ピーク強度以降の透水係数の急激な増加につながったと考えられる。

6. まとめ

せん断応力下における軟岩基質部の透水特性の変化を把握することを目的として、三軸圧縮型の透水試験装置を用いて、軸差応力作用中に透水試験を行った。今回の試験によって得られた結果を以下に示す。

- (1) せん断応力下における軟岩基質部の透水性の変化を把握するためには、せん断破壊面の影響を考慮する必要がある、それに適した方法として、三軸圧縮応力下における放射流による透水試験方法が適用できることを確認した。
- (2) 弾性変形からピーク強度に至る過程では、相対的に軸方向透水係数の増加率が半径方向よりも大きくなっている。軸差応力によって微小き裂が発達し始める段階では、主に供試体軸方向に平行な微小き裂が発生するためと考えられる。
- (3) 有効拘束圧が小さい場合、ひずみ軟化および残留強度状態に達すると、軸方向透水係数の増加はわずかなのであるのに対して、半径方向透水係数は大幅に増加していて、顕著な透水異方性が生じている。
- (4) 有効拘束圧が 3.0MPa の場合、軸ひずみ 5%のときの半径方向透水係数は初期状態の約 4 倍であり、有効拘束圧 $0.3\sim1.0\text{MPa}$ の場合に見られたような、せん断破壊の進行に伴う急激な透水係数の増加は見られない。
- (5) せん断破壊面の影響を考慮して透水性変化を調べるための試験としては、放射流による方法が適しており、軸方向の一樣流による方法は適していないと考えられる。

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技術的信頼性、地層処分研究開発第2次取りまとめ、総論レポート、JNC TN1400 99-020, pp.III-71, 1999.
- 2) 石井卓, 桜井英行, 船山潤一, 木下直人：軟岩内き裂の透水性に関する基礎的実験, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.301-305, 2001.
- 3) 三谷泰浩, 江崎哲郎, 中島祐一, 郷家光男, 石井卓, 木下直人：岩盤不連続面の透水異方性に関する実験的研究, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, G04, 2002.
- 4) 鈴木尊, 長田昌彦, 薄井正幸：せん断変形下における岩石の浸透特性に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, III-A249, pp.498-499, 1997.
- 5) 石島洋二, 薛自求, 高橋学：新第三紀堆積岩の透水挙動と等価管路モデルによる解釈, 応用地質, Vol.32, No.5, pp.1-12, 1991.
- 6) 李小春, 高橋学, 張銘：白浜砂岩の延性挙動と透水特性との関連について, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.707-712, 1998.
- 7) Moore, D.E., Morrow, C.A. and Byerlee, J.D.: Chemical reactions accompanying fluid flow through granite held in a temperature gradient, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.47, pp.445-453, 1983.