第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
（社）土木学会　2011 年１月　講演番号 50

せん断変形の進行に伴う堆積軟岩の透水特性の変化

郷家　光男[1*]・石井　卓[1]・佐ノ木　哲[2]・松井　裕哉[3]・杉田　裕[4]

[1]清水建設株式会社　技術研究所（〒135-8530　東京都江東区越中島三丁目 4－17）
[2]株式会社地層科学研究所（〒242-0014　神奈川県大和市上和田 1794　鳥海ビル 2F）
[3]独立行政法人日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門　東濃地科学研究ユニット
（〒509-6132　岐阜県瑞浪市明世町山野内 1 番地 64）
[4]独立行政法人日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門　幌延深地層研究ユニット
（〒098-3224　北海道天塩郡幌延町北進 432 番 2）
*E-mail: m-gohke@shimz.co.jp

せん断変形の進行に伴う透水特性の変化を把握することを目的として，日本原子力研究開発機構が幌延深地層研究計画において採取した稚内層の硬質頁岩に対してせん断破壊透水試験を行った．透水試験には軸方向の一様流と半径方向の放射流による方法を採用した．その結果，軸方向の透水試験では，ピーク強度到達時には透水係数は増加する傾向を示し，残留強度時には初期状態の十倍程度まで増加した．一方，半径方向の透水試験では，ひずみ軟化過程に至ると透水係数は軸方向よりも大幅な増加を示した．

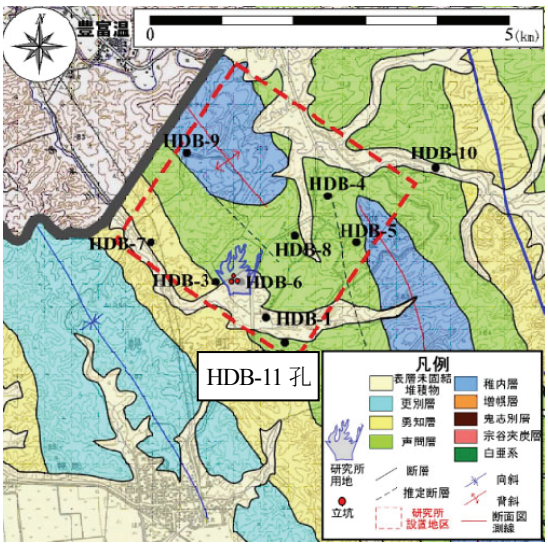
Key Words: *geological disposal, excavation disturbed zone, soft rock, permeability, shear deformation*

１．はじめに

岩盤中に空洞を掘削すると，その周辺岩盤では力学特性，水理学特性，地球化学特性などが変化することが知られていて，このような領域は掘削影響領域と呼ばれている [1)]．放射性廃棄物の地層処分では岩盤の低透水性を重要視していることから，掘削影響領域が坑道沿いに連続的に形成された場合，この掘削影響領域が処分場閉鎖後に放射性核種の選択的な移行経路となって，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，処分場の閉鎖後の安全性を議論するためには，坑道掘削前に岩盤の透水性がどの様に変化するのかを事前に予測・評価できることが必要である．

堆積軟岩を対象として周辺岩盤の透水性の変化を検討する場合，割れ目の透水性が支配的な硬岩とは異なり割れ目の透水性の変化だけでなく，基質部の透水性の変化も考慮する必要があると考えられる．また，高レベル放射性廃棄物の地層処分では，地下 300m 以深に最終処分することが法律で定められており，核燃料サイクル開発機構 [2)]（現在の日本原子力研究開発機構，以下，原子力機構と称す）による坑道の力学的安定性の検討結果を考慮すると，地下深部の堆積軟岩中に坑道を掘削した場合，その周辺岩盤には塑性領域が発生し，周辺岩盤の透水性は増大することが予想される．そのような背景のもと，堆積軟岩の基質部のせん断破壊に伴う透水特性の変化を調べることを目的とした試験（以下，せん断破壊透水試験と称す）として，三軸圧縮試験やクリープ試験と透水試験を組み合わせた試験 [3), 4), 5), 6)]が行われている．しかし，これらの事例では，供試体の軸方向の一様流による方法を採用しているために，得られた透水係数の値はせん断破壊面の存在しない基質部の透水性の影響を強く受けているものと考えられる．そのため，せん断破壊面の発生の影響を考慮できるようにするために，平面ひずみ圧縮試験 [7)]や一面せん断試験 [8)]と組み合わせて透水試験を行う事例も見られるようになった．また，筆者らは，せん断破壊面の影響を考慮できる試験法として，三軸圧縮試験と半径方向の放射流による透水試験を組み合わせた方法を考案し，来待砂岩などに適用してきた [9), 10)]．

本研究では，原子力機構が幌延深地層研究計画において実施した深層ボーリングで採取した稚内層の硬質頁岩のコアを用い，せん断変形の進行に伴う透水特性の変化を把握することを目的としたせん断破壊透水試験を行った．また，透水試験における通水方向による試験結果の違いについても把握するために，供試体の軸方向の一様



図－1　ボーリング孔位置と周辺の地質

流と軸方向に直交する半径方向の放射流による透水試験を実施した．

2．せん断破壊透水試験

(1) 試料

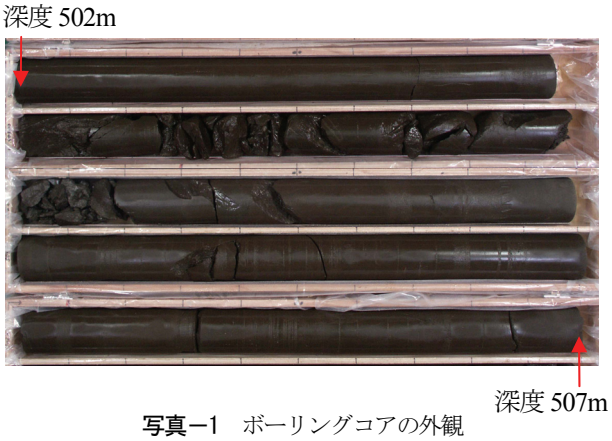
原子力機構が幌延深地層研究計画において実施した深層ボーリングの位置と周辺の地質を**図－1** に示す．今回の室内試験では，HDB-11 孔と呼ばれる深度 1,020m の鉛直ボーリング孔のコアを対象とした．HDB-11 孔の地質は，深度 23m から 460m 付近までは声問層と考えられる珪藻質泥岩で，それ以深は次第に硬質化し，深度約 500m 以深では典型的な稚内層と考えられている硬質頁岩からなっている[11]．そして，深度 502m～507m 間の稚内層の硬質頁岩のコアから供試体（直径 50mm，高さ 100mm）を作成した．深度 502m～507m のボーリングコアの外観を**写真－1** に示す．

(2) 透水試験方法

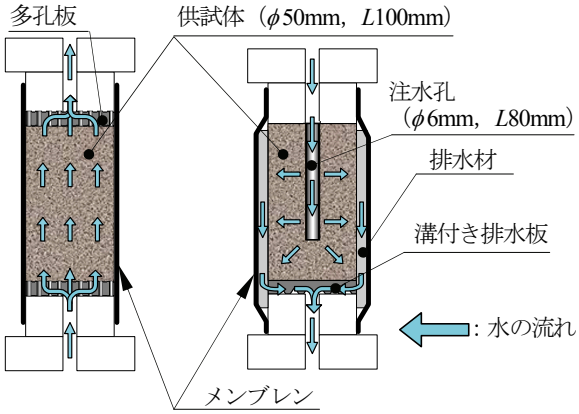
a) 軸方向の一様流による方法

軸方向の一様流による方法では，供試体軸方向の一次元の流れとなっている．送・排水経路の概念を**図－2** (a) に示す．そして，本研究では，試験装置に多目的三軸試験装置を用い，試験方法にはトランジェントパルス法[12]を採用した．圧力パルスを与えた後の間隙水圧の時間変化から，透水係数 k は，以下の式より求められる．

$$h_u - h_f = \Delta h \frac{V_d}{V_u + V_d} e^{-\alpha t} \qquad (1)$$



写真－1　ボーリングコアの外観



(a) 一様流　　(b) 放射流

図－2　透水試験の送・排水経路

$$\alpha = \frac{KA}{\mu \beta L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \qquad (2)$$

$$k = \frac{\rho g}{\mu} K \qquad (3)$$

ここに，h_u は上流側の圧力水頭（m），h_f は最終平衡時の圧力水頭（m），Δh はパルス水頭（m），V_u は上流側貯留槽の体積（m^3），V_d は下流側貯留槽の体積（m^3），t は透水試験開始後の経過時間(s)，K は固有浸透係数(m^2)，A は供試体の断面積（m^2），L は供試体の長さ（m），μ は水の粘性係数（Pa・s），β は水の圧縮率（1/Pa），ρ は水の密度（kg/m^3），g は重力加速度（m/s^2）である．

b) 半径方向の放射流による方法

半径方向の放射流による方法では，中央部の注水孔から側面に向かう流れとなっている．そして，試験装置には軸方向の一様流による方法と同様に多目的三軸試験装置を用いたが，送・排水経路については，**図－2** (b) に示すような改良を行った．すなわち，供試体中央に直径約 6mm，深さ約 80mm の注水孔を設けて，供試体下部と加圧板の間に溝付き排水板を挟み，側面を排水材で巻き，その外側をメンブレンで覆った．

放射流による透水試験では定水位法を採用した．ただし，注水孔が供試体を貫通していないことから，注水孔下端部の近傍から流入した水には下向きの流れが発生するために，完全な二次元の放射流を前提とした理論式[13]を用いて透水係数を算定しても誤差が生じることになる．そこで，本研究では，試験で得られた流量と差圧を境界条件とする軸対称 FEM 定常浸透流解析から供試体の透水係数を求めることにした．すなわち，解析モデルの境界条件として，上下端面を不透水として，注水孔の圧力水頭 h_u と供試体側面の圧力水頭 h_d については，それらの水頭差 Δh が透水試験の差圧と同じになるように与える．そして，全要素に透水係数を一様に与えた後，供試体側面の流出量 q を算定し，その流出量 q が透水試験時に計測された流量と合うまで透水係数を変える解析を繰り返すことによって，供試体の透水係数 k を求めた．

この透水試験によって流量を計測する場合，排水材には，通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．そのため，約 1cm 間隔で斜めに切れ目を入れたナイロン製のメッシュを排水材として用いた．この排水材の通水能力を事前に確認した結果，測定可能な透水係数の上限値は 4.7×10^{-6}m/s であった．また，排水材を巻かないで三軸圧縮試験を事前に行い，このときの体積ひずみの挙動と第３章の試験結果を比較した結果，排水材による拘束の影響は小さいと判断した．

(3) 試験条件

載荷条件は軸方向のひずみ制御であり，ひずみ速度は 0.1%/h 以下，最大軸ひずみは 2%とした．また，有効拘束圧は 0.3MPa と 1.0MPa の 2 パターンとした．また，透水試験の方法として，軸方向の一様流と半径方向の放射流の 2 パターンを採用したことから，試験ケースは 4 ケースとした．試験ケースを**表－1** に示す．

透水試験を行う時期に関しては，i）初期状態，ii）弾性変形状態，iii）ピーク強度到達時，iv）ひずみ軟化過程初期，v）ひずみ軟化過程中期，vi）ひずみ軟化過程後期，vii）残留強度時または最大軸ひずみ時とした．

３．試験結果

(1) 軸差応力，体積ひずみの変化

Case1～4 における軸ひずみの変化に伴う軸差応力の変化を**図－3** に示す．Case2 については，軸ひずみが約 1.8%となったときに，供試体を覆っていたメンブレンが破損したことから，それ以降の載荷を中断している．載荷を開始して軸ひずみが 0.71～0.83%となったときにピーク強度を示した．その後，ひずみ軟化を呈し，軸差応力は急激に低下した．そして，軸ひずみが 1%を越えた時点で残留強度状態に達した．

表－1　試験ケースの一覧

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

Case2～4 における体積ひずみの変化を**図－4** に示す．体積ひずみは軸方向変位と周方向変位の計測値から算定していて，膨張を負としている．なお，Case1 に関して，有効拘束圧が 0.3MPa と低かったことから，トランジェントパルス法による透水試験を行ったときに，供試体側面とメンブレンの間に側方流が起こることが懸念されたために，側方流を防ぐシリコンを塗布したことから，Case1 では周方向変位の計測を行わなかった．

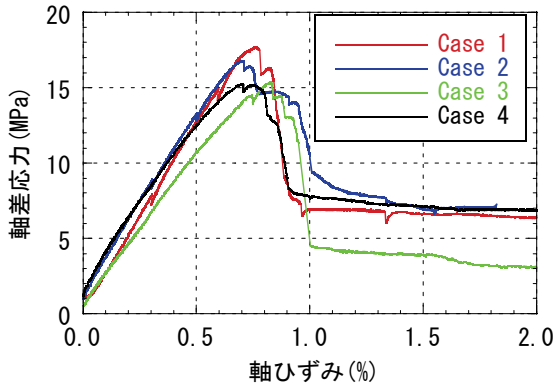
図－4 によると，Case2 では，軸差応力が増加するにつれて，体積ひずみは収縮を示したが，徐々に収縮が緩やかになった．このように軸差応力は増加しているにも係わらず収縮が緩やかになったのは，体積ひずみが線形弾性体を仮定したときの収縮成分と非弾性的な膨張成分の和からなるものとすると，この非弾性的な膨張成分が徐々に増加したためと考えられる．そして，軸ひずみが約 0.5%になるとほぼ収縮は止まり，ピーク強度直前から体積ひずみは膨張側に向かう挙動を示した．また，Case3 と Case4 も，軸差応力が増加するにつれて体積ひずみは収縮を示し，徐々に収縮が緩やかになる挙動を示した．この挙動も Case2 と同様に，非弾性的な膨張成分が徐々に増加したためと考えられる．ただし，収縮が緩やかになる度合いは Case2 よりも小さかった．また，ピーク強度に達する直前まで収縮は続き，ピーク強度に達したとほぼ同時に膨張側に向かう挙動を示した．

(2) 透水係数の変化

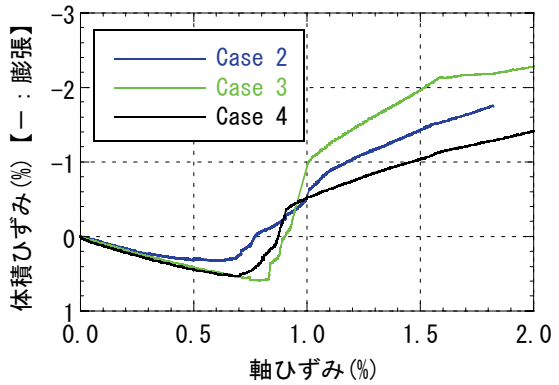
Case1～4 における軸ひずみの変化に伴う透水係数の変化を**図－5** に示す．

Case1 における初期状態の透水係数は 1.90×10^{-11}m/s であった．弾性変形状態の軸ひずみ 0.60%までの透水係数には変化がほとんど見られなかったが，ピーク強度到達時の軸ひずみ 0.78%では 5.94×10^{-11}m/s と増加を示した．そして，最大軸ひずみ 2%では，2.01×10^{-10}m/s と初期状態の約 10 倍まで増加した．

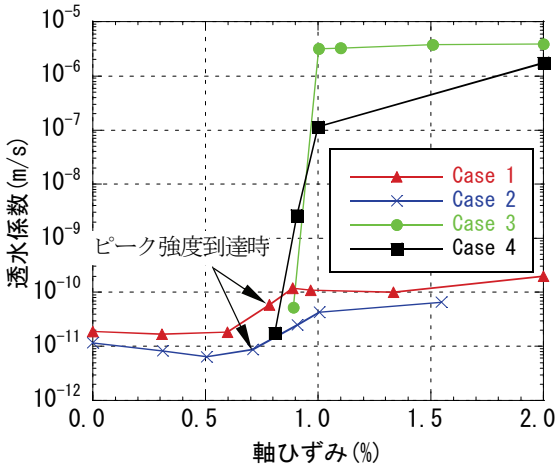
Case2 における初期状態の透水係数は 1.17×10^{-11}m/s であった．弾性変形状態の軸ひずみ 0.51%では 6.40×10^{-12}m/s まで減少したが，ピーク強度到達時の軸ひずみ 0.71%では 8.73×10^{-12}m/s と増加側に転じた．そして，ひ



図−3　軸ひずみ−軸差応力関係



図−4　軸ひずみ−体積ひずみ関係



図−5　軸ひずみ−透水係数関係

ずみ軟化過程以降も増加を続け，最終的に初期状態の約6倍まで増加した．また，有効拘束圧0.3MPaのCase1と比較してみると，有効拘束圧1MPaのCase2のほうが，透水係数，および初期状態からの増加率ともに小さくなっていることが分かった．

(a) Case 1　(b) Case 2　(c) Case 3　(d) Case 4

写真−2　試験終了後の供試体

Case3に関して，初期状態からピーク強度到達時までは，透水係数が小さすぎたために定水位法では透水係数を求めることができなかった．そして，ひずみ軟化過程初期の軸ひずみ0.89%のときに透水試験が可能となった．この時の透水係数は5.22×10^{-11}m/sであり，同じ有効拘束圧であるCase1のひずみ軟化過程初期と同程度であった．しかし，ひずみ軟化過程中期以降になると，Case3の透水係数は一気に計測の上限値付近まで増加し，その後，透水係数の増加は頭打ちの状態となった．Case3の初期状態の透水係数がCase1の初期状態と同じであったと仮定すると，Case3の最終的な透水係数は初期状態から5オーダー程度の増加を示したことになる．

Case4もCase3と同様の挙動を示した．すなわち，初期状態からピーク強度までは定水位法では透水係数を求めることができず，ひずみ軟化過程初期の軸ひずみ0.81%のときに透水試験が可能となった．この時の透水係数は1.79×10^{-11}m/sであり，Case2のひずみ軟化過程初期と同オーダーであった．そして，ひずみ軟化過程中期以降になると透水係数は急増し，最終的には，計測限界値付近まで増加した．Case4の初期状態の透水係数がCase2と同じであったと仮定すると，最終的な透水係数は5オーダー程度の増加を示したことになる．

ピーク強度以前については，通水方向による透水係数の差を調べることができなかったが，ひずみ軟化過程中期以降になると，同じ有効拘束圧の条件であっても，通水方向によって透水係数に著しい違いがあることが分かった．ここで示された結果は，定性的な傾向としては，来待砂岩の事例[9]と一致している．

(3) 載荷終了後の供試体の状況

試験終了後の供試体の状況を**写真−2**に示す．いずれの供試体においても，供試体の側面上部，または上端部から側面下部に向かって，主要なせん断破壊面が形成されていることが分かった．また，Case1〜3においては，主要なせん断破壊面以外にも短いき裂が発生していた．さらに，せん断破壊面の内部を観察した結果，せん断変位による細粒化傾向も見られた．

４．考察

(1) 透水試験結果と破壊の進行の関連について

Case2～4 の体積ひずみの挙動に関して，ピーク強度に達する前から，体積ひずみには非弾性的な膨張成分が生じた．このような非弾性的な膨張成分は，供試体内部において新たに微小き裂が発生・開口することによって生じるものと考えられている[14]．また，Case1 と Case2 の透水係数は，ピーク強度到達時から増加する傾向を示したが，これも体積ひずみの非弾性的な膨張成分の発生と同様に，微小き裂の発生・開口に起因したものと考えられる．Case3 と Case4 においても，体積ひずみの挙動から供試体内部に新たに微小き裂が発生していたと考えられるが，定水位法で測れるほど発達していなかったと考えられる．

供試体内部で新たに微小き裂が発生・開口した後，さらに載荷を進めると，微小き裂同士が連結するようになって，最終的には，せん断破壊面が形成されるとされている[15]．Case3 と Case4 では，ひずみ軟化過程初期になってから透水係数を計測することができたが，この段階では，軸方向の Case1 と Case2 と同程度の透水係数であったことを考えると，せん断破壊面が形成されつつある段階であり，通水経路に破壊されていない基質部が残っていたのではないかと考えられる．そして，ひずみ軟化過程中期において，Case3 と Case4 の透水係数は急増したが，このときに，注水孔から供試体側面まで繋がるようなせん断破壊面が形成されて，基質部よりもせん断破壊面を選択的に流れたと考えられる．

さらに，残留強度状態以降も体積ひずみは膨張を続けるものの，Case3 に関しては，透水係数の増加が見られなくなった．せん断破壊面の表面は凸凹を有していて，せん断破壊面で滑りが起こるものとすれば，せん断破壊面の開口幅が増加し，透水係数も増加するものと考えられたが，実際には増加が見られなかった．このことは，Case3 の残留強度時では，既に，計測可能な上限値に達していて，実際の透水係数は試験結果以上であったことが考えられる．

今回の試験では，一つの試験条件に対して多数の供試体を用意することができなかったことから，各載荷段階における破壊の進行状況については，直接確認することはできなかった．また，供試体の内部構造の変化についても調べていない．よって，今後の課題として，破壊の進行状況と透水特性の変化との関連を検証することが挙げられる．これに対しては，一つの試験条件に対して多数の供試体を用意し，ある載荷段階で試験を終了させて供試体を観察する．そして，この終了させる載荷段階を様々に変える試験を繰り返せば，破壊の進行状況の関係について明らかにすることができると思われる．また，内部構造の変化については，河合ら[4]が行ったように X 線 CT 装置を使って供試体の内部構造を可視化していくことが考えられる．さらに，残留強度時の透水係数の検証についても，今後の課題と考えている．

(2) 事前調査段階における掘削影響の予測について

地表面からのボーリング調査に基づいて，放射性廃棄物地層処分の地下施設の安全評価を行う際には，坑道周辺に生じる掘削影響領域の透水性について予測できることが望ましい．特に，堆積軟岩サイトにおいて坑道の周辺岩盤に塑性領域が発生する可能性があると予測された場合，本研究で行ったような室内試験の結果から，掘削影響領域の透水係数を推定することが実用的である．ただし，ひずみ軟化過程中期以降になると，半径方向の透水試験の結果は軸方向の透水試験よりも透水係数の大幅な増加を示したことに注意を要する．つまり，坑道の周辺岩盤に塑性領域が生じ，その塑性領域がひずみ軟化過程中期以降に相当する状態になった場合，軸方向の透水試験の結果から透水係数を推定すると，透水係数を過小評価してしまう可能性がある．

今回の試験では，せん断破壊面を含んだ供試体全体の平均的な透水係数で透水性を評価した．しかし，坑道の周辺岩盤に塑性領域が発生した場合，その透水係数には応力やひずみの状態以外にも，塑性領域に発生するせん断破壊面の密度や連結性も関連すると考えられ，この密度や連結性が室内試験の状況とは異なることが考えられる．そのため，実際の坑道周辺岩盤に塑性領域が発生したときの透水係数は，ひずみ軟化過程になると増加する可能性はあるが，せん断破壊透水試験の結果と定量的に一対一に対応せず，今回の試験のような大幅な増加を示すとは限らないと考えられる．

したがって，試験結果から周辺岩盤の塑性領域の透水係数の定量的な予測に結びつける方法や，その検証については，今後の課題である．

５．おわりに

本研究では，原子力機構が幌延深地層研究計画において採取した硬質頁岩に対して，せん断変形の進行に伴う透水特性の変化を把握することを目的として，三軸圧縮試験と透水試験を組み合わせたせん断破壊透水試験を行った．また，透水試験の通水方向による違いについて把握するために，供試体軸方向の一様流と軸方向に直交する半径方向の放射流による透水試験を実施した．得られた結果を以下に示す．

・硬質頁岩は軸ひずみ 0.71～0.83%の時にピーク強度を示し，その後，軸差応力は急激に低下し，軸ひずみが

1%を越えた時点で残留強度状態に達した.

・軸方向の透水試験の結果，初期状態の透水係数は 10^{-11}m/s のオーダーであった．また，ピーク強度到達時には透水係数は増加を示し，残留強度時には初期状態の約 6～10 倍まで増加した.

・半径方向の透水試験の結果，ひずみ軟化過程初期以降に透水係数を計測することができた．そして，ひずみ軟化が進むと透水係数は急増し，最終的には，初期状態から 5 オーダー程度増加したと推定された.

・半径方向の透水試験のひずみ軟化過程における透水係数の急増は，ひずみ軟化過程でせん断破壊面が形成されて，このせん断破壊面を選択的に流れた結果であると考えられる.

・安全評価を行うときに，坑道周辺岩盤に塑性領域が生じて，その塑性領域がひずみ軟化過程中期以降に相当する状態になった場合，軸方向の透水試験の結果から透水係数を推定すると，透水係数を過小評価してしまう可能性がある.

今後の課題として，破壊の進行状況と透水特性の変化との関連の検証，残留強度時の透水係数の検証，塑性領域の透水係数の予測法の検討等が挙げられる.

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の技術的信頼性, 地層処分研究開発第２次取りまとめ，分冊１　わが国の地質環境，JNC TN1400 99-021，pp.III-126-III-146，1999.
2) 黒木重盛，谷口航，小尾繁，長谷川宏，杉野弘幸，窪田茂，出羽克之 : 地下空洞の力学安定評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-037，1999.
3) 金子岳夫，小山俊博，鈴木康正，加藤和之，久米田正邦，高橋一憲 : 堆積軟岩のひずみレベルと透水特性に関する考察, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.89-96, 2005.
4) 河合祐輔，中島伸一郎，安原英明，岸田潔 : 堆積軟岩のダイレイタンシー特性が透水性に及ぼす影響について，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.278-282，2008.
5) 高田迪彦，藤井義明 : 差応力下での来待砂岩の透水性に関する研究，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.277-280，2009.
6) 河合祐輔，中島伸一郎，安原英明，岸田潔 : 三軸せん断過程における堆積軟岩の構造変化と透水性に関する実験的検討, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.287-290. 2009.
7) 吉田秀典，山崎卓哉，井上純哉 : 岩盤の透水－応力連成挙動の把握を目的とした試験装置の開発と連成挙動の解明に関する研究，土木学会論文集 C，Vol. 64，No. 4，pp.843-855，2008.
8) 熊谷聡之，長田昌彦，朴赫 : 一面せん断変形下における岩石の透水特性の変化，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.296-299，2009.
9) 郷家光男，石井卓，木下直人，船山潤一 : 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.
10) 郷家光男，岸野佑次 : 軟岩の掘削影響領域における透水性変化モデルの提案, トンネル工学論文集, 第 19 巻, pp.59-68, 2009.
11) 日本原子力研究開発機構 : 幌延深地層研究計画　平成 17 年度調査研究報告，pp.15-22，2006.
12) Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T.: Permeability of granite under high pressure, *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, No.6, pp2225-2236, 1968.
13) 地盤工学会 : 岩の調査と試験, 地盤工学会, pp.369-400, 1989.
14) 里優 : 乾燥した岩石のダイラタンシーに関する理論的研究, 材料，Vol.41，No.466，pp.1068-1074，1992.
15) Horii, H., Nemat-Nasser, S.: Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, No.B4, pp.3105-3125, 1985.

VARIATION OF HYDRAULIC PROPERTIES ON SEDIMENTARY ROCK DUE TO SHEAR DEFORMATION

Mitsuo GOHKE, Takashi ISHII, Satoru SANOKI, Hiroya MATSUI and Yutaka SUGITA

In order to investigate the variation of hydraulic properties on soft rock due to shear deformation, permeability tests were performed on hard shale of the Wakkanai formation by axial flow and radial flow techniques under triaxial compression. The experimental results showed that the axial direction permeability increased to approximately 10 times lager than the initial one in residual strength zone. On the other hand, the radial direction permeability increased remarkably in strain softening zone.