

軟岩の透水特性に関する考察と 掘削影響領域における透水特性予測手法の提案

金子 岳夫¹・小山 俊博¹・鈴木 康正¹・関根 裕治²
佐々木 泰³・石田 裕樹³

¹正会員 東電設計(株) 地下環境技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail: caneko@tepsco.co.jp

²正会員 東京電力(株) 技術開発研究所 設備基盤技術グループ

³正会員 日本原燃(株) 埋設事業部 開発設計部 土木埋設グループ

放射性廃棄物処分における安全評価を実施する場合、掘削影響領域(EDZ)の透水特性の変化を適切に予測することは、合理的な安全評価を行う上で重要な課題である。これまで筆者らは、堆積軟岩コアを用いた力学試験、透水試験を実施し、ひずみレベルと透水特性変化の関係を示してきた。しかし、その中では、載荷過程を経て生じる亀裂面、および亀裂面のない基質部分の透水特性を明らかにできていない。

本研究では、初期状態(載荷前)における透水係数の拘束圧依存性を確認した上で、載荷過程を経た軟岩の亀裂面、および亀裂面のない基質部分の透水特性を室内試験により計測および評価する。さらに、力学解析と関連付けて、亀裂面の透水特性を考慮した EDZ 内透水特性変化領域の予測手法を提案する。

Key Words : soft rock, permeability, shear failure, excavated disturbed zone(EDZ)

1. はじめに

放射性廃棄物処分における安全評価を実施する場合、天然バリアでは岩盤の透水特性を把握することが重要となるが、地下深部に建設される処分施設近傍では、掘削影響領域(EDZ)が形成され、透水性が増大することが過去の原位置試験等から指摘されている¹⁾。この影響は、プラグの設置、グラウトの施工、セルフヒーリング等により、小さくなるものと考えられるが、EDZの透水特性の変化を適切に予測することは、合理的な安全評価を行う上で重要な課題の一つである。

筆者らは、EDZにおける岩盤の透水特性変化を把握するために、堆積軟岩コアを用いた力学特性試験、透水試験を実施し、堆積軟岩におけるひずみレベルと透水特性変化の関係を示した。しかし、その中では、載荷過程を経て生じるせん断破壊面、および破壊面のない基質部分の透水特性を明らかにできていない。本研究では、初期状態(載荷前)における透水係数の拘束圧依存性を確認した上で、載荷過程を経た軟岩のせん断破壊面、および破壊面のない基質部分の透水特性を、室内試験により計測し、せん断破壊面自体の透水特性を考慮したEDZ内の透水特性変化を予測する手法を提案する。

2. 室内透水試験

(1) 試験コアの概要

本研究では、青森県上北郡付近に分布する鷹架層において実施したボーリングよりコアを採取して試験に用いた。当該箇所では、新第三紀中新世に堆積した軟岩が広く分布し、主に砂岩・凝灰岩からなる中部層と主に泥岩からなる下部層が分布していることが確認されている。試験対象とした深度に分布する主な地層は、割れ目が少ない新第三紀の海成堆積岩であり、粗粒砂岩、軽石凝灰岩、軽石混り砂岩等から構成され、透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 程度、間隙率約 50%とされる²⁾。

使用したボーリングコアは、軽石凝灰岩であり、採取深度は約GL-100mであり、文献⁴⁾と比較して、30~40m程度浅い位置のサンプルとなる。ボーリング全長は、凝灰岩質が卓越した箇所、軽石を含有する箇所など若干のバラツキも認められるが、軽石の最大径が1cm前後の部分を供試体として成形した。

(2) 室内透水試験手順

a) 拘束圧依存性確認透水試験

初期状態の供試体(直径 50mm, 高さ 100mm の円柱供試体)について、透水係数の拘束圧依存性を確認するた

め、圧密排水(CD)条件の下、拘束圧を制御した透水試験を実施する。拘束圧を、0.1→0.5→1.0→1.5→1.0(MPa)の順に変化させ、それぞれのステップでフローポンプ透水試験を行う。

b) セン断亀裂面透水試験

三軸圧縮試験機を用いた CD 条件下での载荷を行い、フローポンプ透水試験法を用いた高精度の透水係数測定を実施することで、軟岩の各载荷段階における透水係数の変化を計測する。セン断破壊に至った後、供試体をセルからはずし、破断面が供試体端面に出る供試体と、破断面のない供試体を作成し、それぞれについて拘束圧を考慮した透水試験を実施する。

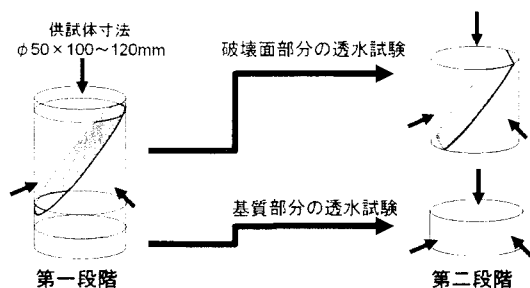


図-1 室内透水試験概要

表-1 セン断時拘束圧(0.1MPa)

ステップ	第一段階				第二段階(分割後)		
	1	2	3	4	5	6	7
σ_3 (MPa)	0.5	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	1.0
σ_1 (MPa)	0.5	1.0	0.1	破壊	0.1	0.5	1.0

表-2 セン断時拘束圧(0.5MPa)

ステップ	第一段階				第二段階(分割後)		
	1	2	3	4	5	6	7
σ_3 (MPa)	0.1	1.0	0.5	0.5	0.1	0.5	1.0
σ_1 (MPa)	0.1	1.0	0.5	破壊	0.1	0.5	1.0

供試体は、直径50mm、高さ100～120mmの円柱供試体とし、圧密排水(CD)条件の下、試験を実施した。図-1に示すとおり、第一段階として第1～3ステップで、等方の拘束圧条件における透水特性を確認した後、ひずみ制御(ひずみ速度：0.01%/min)、有効拘束圧は0.1、0.5MPaとしてセン断試験を実施した。ピーク強度を経て、残留状態に達した時点で第4ステップの透水試験を行い、その後、供試体をセルから取り出し、破壊面部分の供試体と破壊面の生じていない基質部分の供試体に分割する。次に、第二段階試験として、破壊面部分と基質部分の供試体について、それぞれ拘束圧を変化させ第5～7ステップ透水試験を実施した。

c) 引張亀裂面透水試験

セン断亀裂面の特性に加えて、引張亀裂面の透水特性

を把握するための透水試験を行う。供試体は、直径50mm、高さ50mmの円柱供試体とし、第一段階として、圧密排水(CD)条件の下、拘束圧を制御したフローポンプ透水試験を実施する。その後、供試体をセルから取り出し、圧裂引張試験を行い、引張亀裂の生じた供試体を用いた第二段階のフローポンプ透水試験を行う。

表-3 引張亀裂透水試験

ステップ	第一段階			第二段階(破壊後)		
	1	2	3	5	6	7
σ_3 (MPa)	0.1	1.0	0.5	0.1	0.5	1.0
σ_1 (MPa)	0.1	1.0	0.5	0.1	0.5	1.0

(3) 試験結果

a) 拘束圧依存特性

2 供試体について実施した拘束圧-透水係数関係を図-2(a)に示す。拘束圧 1.0MPa 以下の条件では、拘束圧の低下に伴って、透水係数が大きくなる傾向が認められた。つまり、掘削に伴い拘束圧が低減する空洞壁面近傍(拘束圧 1.0MPa を下回る領域)では、亀裂の有無に関わらず透水係数が大きくなる可能性がある。

試験から得られた体積ひずみ-透水係数、拘束圧-体積ひずみの関係を図-2(b)(c)に示す。拘束圧の増加に伴って認められる体積ひずみの増加(間隙の縮小)に起因して、透水係数が小さくなるものと考えられる。ただし、0.1MPa のケースは、体積ひずみの減少に比してやや透水係数が大きく出ている。0.1MPa 拘束圧時のフローポンプのヘッドは最大で 160cmH₂O (16kPa)程度であるが、今後、試験時の側方流動について確認を行う必要があると考える。

b) セン断亀裂面の透水特性

図-3 に、亀裂面に関する透水試験結果を示す。セン断時拘束圧 0.1MPa と 0.5MPa の結果を比較すると、低拘束圧条件の下で破壊に至った亀裂部分(□)は、透水係数の増大傾向が大きく、比較的拘束圧の高い条件下で破壊に至り発生するセン断亀裂(■)の透水係数の増大傾向は小さい。つまり、軟岩中に掘削されるトンネル周辺で発生する EDZ の透水係数の増大は、破壊領域(ゆるみ域)の中でも、特に壁面近傍の最小主応力が小さい領域において注意が必要と言える。

さらに、セン断亀裂(□、■)の存在する供試体では、拘束圧の増加に伴って透水係数が小さくなった。空洞掘削時には、支保の内圧効果によって透水係数が小さくなることが考えられる。長期的な予測をするためには、さらに試験データの蓄積が必要と考えられるが、埋戻しを行った後、内圧が空洞壁面に作用する場合は、透水特性が回復することを期待できる。

また、破壊に至った供試体より、亀裂のない基質部

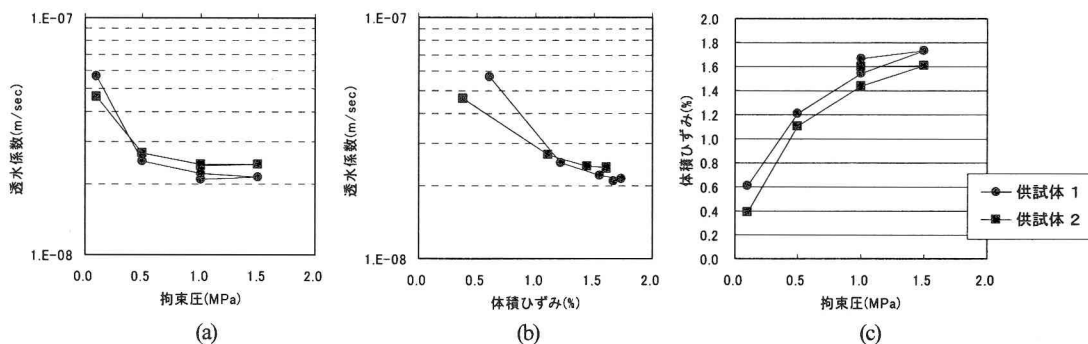


図-2 拘束圧依存特性確認 試験結果

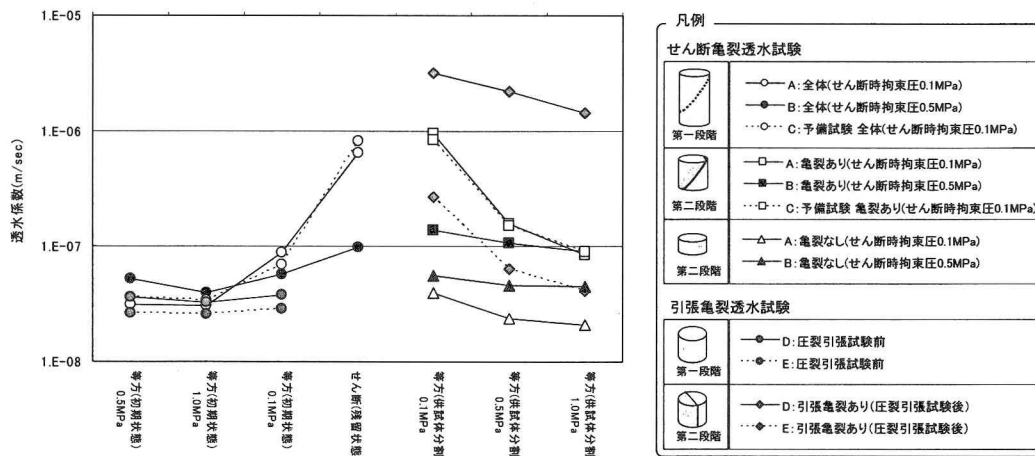


図-3 亀裂面に着目した透水試験結果

分を切り出して透水試験を実施した結果、亀裂のない基質部分の透水係数(Δ , $\blacktriangle$)は初期状態($\circ$, $\bullet$)と比較して小さくなっていることが分かった。载荷過程において、軟岩基質部分の空隙が縮小し、透水係数が小さくなった可能性等が考えられる。

c) 引張亀裂面の透水特性

図-3 より、変形が大きく、目視によっても確認可能な状態まで成長した引張亀裂($\blacklozenge$ —D: 圧裂引張試験)は、非常に透水係数が大きく(初期状態と比較して 100 倍程度)、また拘束圧が増加した場合にも透水性の回復幅は小さい。それに対して、引張破壊に達した状態でも、目視による亀裂の確認ができない場合($\blacklozenge$ —E: 圧裂引張試験)は、透水性は高くなるものの(初期状態と比較して 10 倍程度)、せん断亀裂と同程度であり、拘束圧の増加に伴い初期状態近くまで透水性は回復している。ただし、これら引張亀裂の試験に関しては、試験時の体積ひずみの変化が他の試験と比較して非常に小さい等の挙動があったため、今後確認試験が必要と考えている。

3. 透水係数分布の予測手法

(1) 亀裂面の透水特性

亀裂の透水特性を室内透水試験で明らかにした上で、力学解析との関連付けを行うために、亀裂の透水量係数について考えた。ここで、透水量係数は単位時間(1 秒)に亀裂 1m あたりを流れる流量(m^3)とする。

図-4 に試験後の亀裂部分供試体写真とモデル化の考え方を示す。写真に示すように、亀裂部分の供試体は、上下端面に亀裂面が認められるように分割成形している。ここでは模式図の通り単純化して、上下端面に長さ 5cm の亀裂 1 本が露出し連続している状態を仮定し、次の式 (1)より、亀裂の透水特性を表す透水量係数 T を考える。

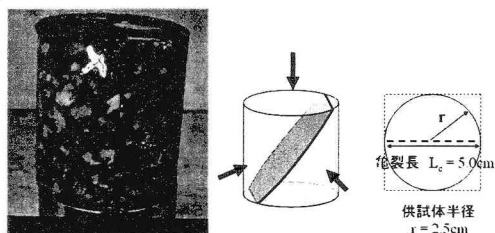


図-4 亀裂部分のモデル化

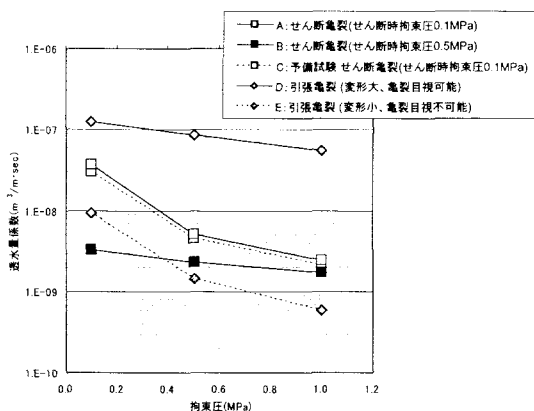


図-5 亀裂透水量係数と拘束圧の関係

$$T = \frac{(K_c - K_n) \times A}{L_c} \quad (\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{sec})) \quad (1)$$

ここで、 K_c は亀裂供試体の透水係数、 K_n は亀裂無し(基質)供試体の透水係数、 A は供試体断面積($\pi \times 2.5^2 \text{cm}^2$)、 L_c は亀裂長(5cm)である。上記の考え方にに基づき、室内

試験結果について亀裂部の透水量係数と拘束圧の関係を図-5に取りまとめた。拘束圧毎の亀裂透水特性を用いて、以降の透水性予測を考える。

(2) 透水特性予測の考え方

ここで、力学解析結果を用いた透水係数予測手法について考える。

筆者らは文献⁴⁾の中で、同岩種を用いた三軸せん断透水試験によって、岩石コアは一定のひずみレベルに達した段階で透水係数が変化することを確認している。これによると、透水係数に変化が生じるひずみレベルのしきい値は、限界せん断ひずみ以上、軸差応力ピーク時ひずみ以下の範囲にあり、クリープ試験ひずみ速度最小時のひずみレベル(当該岩種では1.26%)となっている。本研究においても、ひずみのしきい値を超過した領域については、亀裂を生じた岩盤としての取扱いを行う。前段の室内試験で、亀裂を生じた場合にも、拘束圧増加に伴って透水係数の回復が期待できることが明らかになった。そこで、今回の透水係数の設定方針を、ひずみレベルと拘束圧(最小主応力)の関係について表-4に整理する。

表-4 透水係数設定の考え方

ひずみレベル	拘束圧(最小主応力)レベル	今回の透水係数設定の考え方
破壊領域 $1.26\% \leq \gamma_{\text{max}}$	引張 or $\sigma_3 \leq 0.1 \text{MPa}$	拘束圧 0.1MPa における基質部分の透水係数に、拘束圧 0.1MPa における引張亀裂透水量係数最大値を考慮することにより算定
	$0.1 \text{MPa} < \sigma_3 \leq 0.5 \text{MPa}$	拘束圧 0.1MPa における基質部分の透水係数に、拘束圧 0.1MPa における亀裂透水量係数平均(せん断時拘束圧 0.1MPa ケース)を考慮することにより算定
	$0.5 \text{MPa} < \sigma_3 \leq 1.0 \text{MPa}$	拘束圧 0.5MPa における基質部分の透水係数に、拘束圧 0.5MPa における亀裂透水量係数平均(せん断時拘束圧 0.1MPa ケース)を考慮することにより算定
	$1.0 \text{MPa} < \sigma_3$	拘束圧 1.0MPa における基質部分の透水係数に、拘束圧 1.0MPa における亀裂透水量係数平均を考慮することにより算定
非破壊領域 $\gamma_{\text{max}} < 1.26\%$	$\sigma_3 \leq 1.0 \text{MPa}$	拘束圧 0.1MPa における初期透水係数平均値
	$1.0 \text{MPa} < \sigma_3$	拘束圧 1.0MPa における初期透水係数平均値

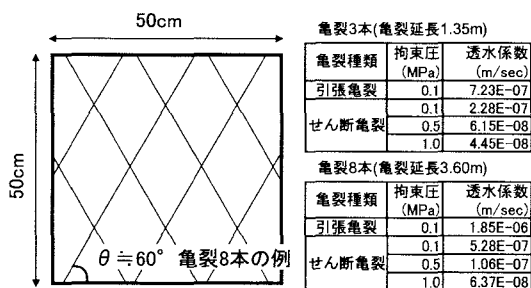


図-6 破壊領域内のマクロ透水係数

本研究では、コアを用いた透水試験を実施し、亀裂自体の透水特性を確認したが、透水係数を予測するためには、亀裂の密度が重要となる。しかし、力学解析を用いて破壊領域に発生する亀裂の密度を予測することは困難である。様々な直径の供試体を用いた試験を実施した谷

らの研究⁹⁾によれば、直径 $d=10, 20, 35\text{mm}$ では1本、 $d=50, 100\text{mm}$ では1~2本、 $d=300, 500\text{mm}$ では3~8本のせん断破壊面が観察されたとされる。ここでは、力学解析の結果、ひずみのしきい値を超過し破壊領域と判断した場合、 $50 \times 50\text{cm}$ の領域あたりに3~8本の亀裂が均等な間隔で生じると仮定する。

以下に表-4の考え方にに基づいて、亀裂を含む破壊領域の透水係数を算定する手順を示す。図-6に示すように、破壊領域と判断された領域については、領域内に均等に発生する亀裂の方向・長さを仮定する。その上で、各拘束圧条件における亀裂のない基質部分の透水量(図-3中の▲、△に相当)に、仮定した亀裂延長と亀裂透水量係数より得られる亀裂透水量を加算することによって、領域内のマクロな透水係数を算定した。各ケースの透水係数を図-6中に示す。以上の考え方にに基づいて、予測される透水係数を表-5、図-7に取りまとめる。

表-5 予測される透水係数

ひずみレベル	最小主応力(MPa)	色	透水係数(m/sec)
破壊領域 $1.26\% \leq \gamma_{\max}$	$\sigma_3 \leq 0.1$		A: $7.23 \times 10^7 \sim 1.85 \times 10^8$
	$0.1 < \sigma_3 \leq 0.5$		B: $2.28 \times 10^7 \sim 5.28 \times 10^7$
	$0.5 < \sigma_3 \leq 1.0$		C: $6.15 \times 10^8 \sim 1.06 \times 10^7$
	$1.0 < \sigma_3$		D: $4.45 \times 10^8 \sim 6.37 \times 10^8$
非破壊領域 $\gamma_{\max} < 1.26\%$	$\sigma_3 \leq 1.0$		E: 5.63×10^8
	$1.0 < \sigma_3$		F: 3.25×10^8

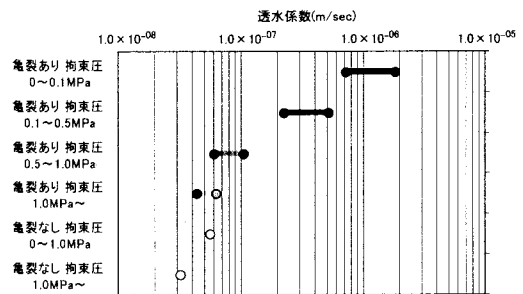


図-7 予測される透水係数

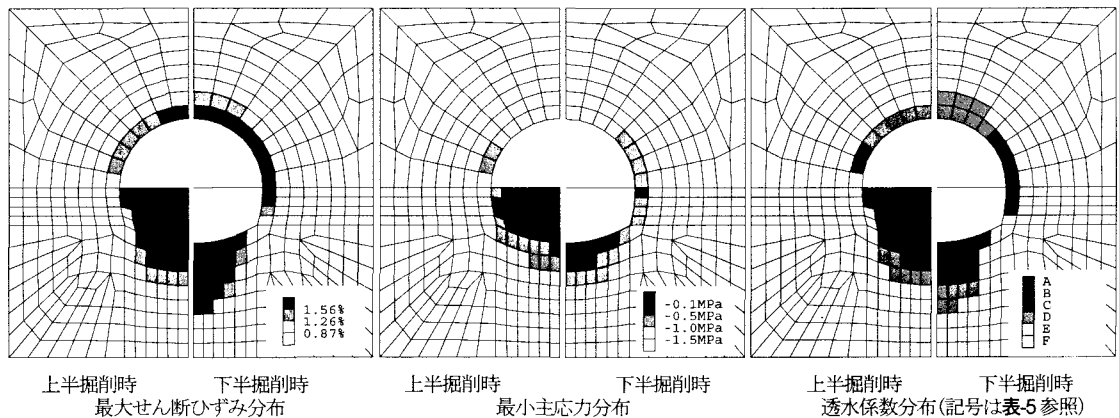


図-8 解析結果

表-6 解析使用物性値

岩盤物性	設定値	吹付支保物性	設定値
弾性係数	770 MPa	吹付厚	吹付10cm
ポアソン比	0.36	剛性(若材齢)	4800 MPa
単位体積重量	1520 kg/m ³	剛性(硬化後)	20000 MPa
ピーク強度	$0.98 + \sigma \tan 28.5$		
残留強度	$0.10 + \sigma \tan 36.0$		

(3) 透水特性変化領域の予測

ここで、比較的単純な形状の空洞について、二次元平面ひずみ解析を行い、前段にて取りまとめた透水係数予測手法について例示する。解析に用いた物性値は文献⁴⁾を参考に表-6の通り設定した。

解析モデルは、上下半掘削を行う幅5mの空洞、支保材は吹付コンクリート10cm、掘削深度は250mと設定している。初期地圧は、単位体積重量×深度、側圧係数は164/(深度)+0.74を用いた⁹⁾。掘削解析の支保前後の掘削解放率60:40%とし、ピーク強度に達した場合は、当該要素の応力をピーク強度以下になるよう再配分している。

今回提案した透水係数予測手法では、まず、最大せん断ひずみ分布より、しきい値(今回は1.26%を使用)を用いて、亀裂の生じる領域を判別する。亀裂有無の判定の後、要素毎に算出された最小主応力に基づき、表-5に示

す透水係数を適用することで、透水係数の予測を行う。

図-8に力学解析による、最大せん断ひずみ分布、最小主応力分布を示す。なお、各図のうち、左側は上半掘削時、右側は下半掘削時の結果を示すものである。掘削により、空洞壁面近傍では亀裂を生じるひずみレベルに達する要素が生じる。さらに、亀裂が生じる要素において、壁面近傍で最小主応力が小さい要素では、透水係数が大きくなり、壁面より深部に向かうに従って、最小主応力が比較的大きくなるため、透水係数の変化は小さくなる傾向が得られた。

4. まとめ

本研究では、荷重過程を経た供試体に生じる亀裂面および基質部の透水特性を室内試験により確認した。室内試験の結果より、得られた知見を取りまとめる。

- ・低拘束圧条件の下で破壊に至った亀裂部分は、透水係数の増大傾向が大きく、比較的拘束圧の高い条件下で破壊に至り発生するせん断亀裂の透水係数の増大傾向は小さい。
- ・せん断亀裂の存在する供試体の透水特性は、拘束圧の増加に伴って回復した。

・せん断破壊に至った供試体より、亀裂のない基質部分を切り出して透水試験を実施した結果、亀裂のない基質部分の透水係数は初期状態と比較して小さくなった。

以上の知見より、軟岩中に掘削されるトンネル周辺で発生する EDZ の透水係数の増大は、破壊領域(ゆるみ域)の中でも、特に壁面近傍の最小主応力が小さい領域において注意が必要であると言える。また、壁面近傍の透水特性変化領域においても、支保の内圧効果が発揮されることにより、透水係数の増大傾向を抑制することが期待できる。

さらに、本研究では室内試験より得られた透水特性に基づき、亀裂面および基質部の透水特性を整理し、トンネルの掘削解析結果より、透水特性の変化領域を予測する手法を提案した。今回提案する予測手法では、ひずみのレベルにより亀裂の有無を決定し、さらに最小主応力のレベルにより亀裂の生じた部分と基質部分の透水特性を決定することができる。

今後の課題としては、引張亀裂面の評価、亀裂密度の推定、本手法の妥当性検証が挙げられる。まず、引張亀裂面の試験結果は、再度試験をしてその透水特性を確認する必要がある。また、亀裂の生じる頻度については、異なる岩種を用いた既往試験のデータ⁹⁾より推定した値である。亀裂密度は正確な透水特性予測のために、欠かせないパラメータであるため、力学解析を用いて亀裂密度を予測する手法、あるいは原位置の BTV データを蓄

積して亀裂密度を予測する手法を検討する必要がある。最後に、本研究で提案した予測手法は、室内試験結果のみを用いて構築されたものである。そのため、手法の妥当性を検証するためには、実空洞での原位置透水試験結果との比較が重要となる。

謝辞：研究を取りまとめるにあたり電力中央研究所 中川協明一郎様、末永弘様より、室内試験方法に関しては応用地質株式会社 岩本健様より、貴重なご意見を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ分冊3 地層処分システムの安全評価, p.IV-26, 1999
- 2) 佐々木泰：低レベル放射性廃棄物処分システムにおける新第三紀堆積岩の透水性状の研究, 埼玉大学学位論文, 2000
- 3) 佐々木泰, 渡辺邦夫, 林為人, 細谷真一：新第三紀堆積岩に対する低動水勾配での透水係数に関する一考察, 資源と素材, vol.119, pp.587-592, 2003
- 4) 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, pp.89-96, 2005
- 5) 谷和夫, 池見元宣：三軸圧縮試験で見られた均質な軟岩のせん断挙動に関する寸法効果, 第11回岩の力学国内シンポジウム, 講演論文集 CD-ROM, A14, 2002
- 6) 核燃料サイクル開発機構：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, p.III-121, 1999

A STUDY OF PERMEABILITY OF SOFT ROCK AND A PROPOSAL FOR ESTIMATION OF PERMEABILITY OF EDZ

Takeo KANEKO, Toshihiro KOYAMA, Yasumasa SUZUKI, Yuji SEKINE,
Tai SASAKI and Yuuki ISHIDA

In order to evaluate permeability in excavated disturbed zone (EDZ), the former study shows the relationship between permeability and strain of soft rock. However, permeability of shear failure planes itself has not been clarified.

In this study, laboratory experiments for evaluating permeability along failure planes in soft rock specimen are conducted. At first, permeability dependency on confining pressure of soft rock is confirmed before loading process, and then permeability tests of shear failure planes and matrices after loading process are carried out in various confining pressure. Finally, an estimation method for permeability in EDZ is proposed, that is based on a relationship among permeability, strain and stress.