

堆積軟岩のひずみレベルと透水特性に関する考察

A STUDY OF RELATIONSHIP BETWEEN STRAIN LEVEL AND PERMEABILITY OF SEDIMENTARY SOFT ROCK

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*****

Takeo Kaneko, Toshihiro Koyama, Yasumasa Suzuki, Kazuyuki Katoh, Masakuni Kumeda and Kazunori Takahashi

In order to evaluate permeability in excavated disturbed zone (EDZ), relationship between permeability and strain state of soft rock material is investigated by mechanical and permeability laboratory tests. In the case of soft rock which is treated in this research, critical shear strain is lower than strain that takes the lowest velocity of strain in creep test, and critical failure plane(s) is formed at the strain of peak strength in consolidated - drained (CD) test. From a point of view of permeability, a relationship between strain level and permeability is considered. The permeability is not changed at strains lower than the critical shear strain; however, it tends to increase at strains higher than the strain of the lowest velocity of strain or the strain of peak strength in CD test. It is recognized that increase of permeability is caused by shear failure plane(s) that is developed at the strains higher than the strain of the lowest velocity of strain or the strain of peak strength in CD test. The results indicate that permeability of EDZ can be predicted from strain distribution by rock mechanics analysis.

Key Words: soft rock, permeability, strain level, creep test, 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、応力解放に伴い掘削影響領域(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⁾。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、その影響を小さくすることが可能であるとされるが、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である。一方、EDZの透水特性は定量的な評価が困難であるとされ、透水特性の変化と空洞周辺岩盤における応力・ひずみ場変化の関係は明確にされていない。

本研究では、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(圧密排水試験、クリープ試験)、フローポンプ法による高精度の透水試験を実施した。得られた試験結果を用いて、ひずみレベルに着目した整理を行い、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。

2. 室内試験

本研究で使用した堆積軟岩コアは、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

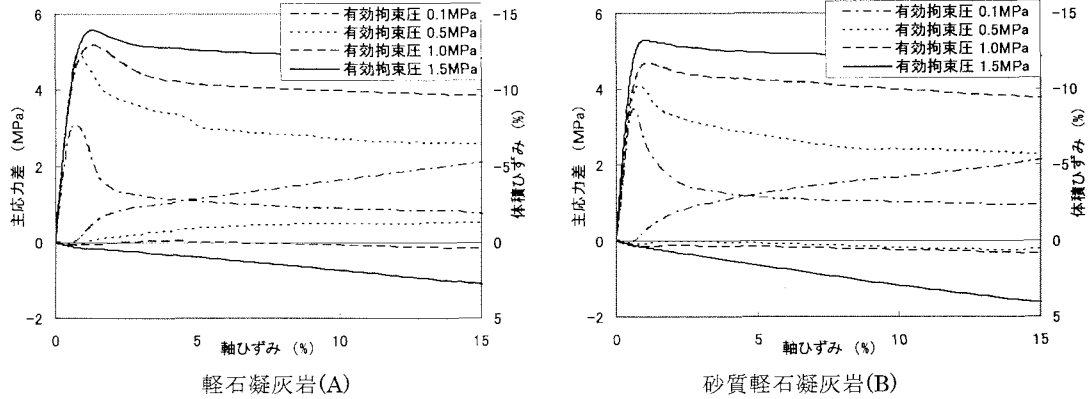
※	正会員	東電設計(株) 第一土木本部 地下環境技術部
※※	フェロー会員	東電設計(株) 第一土木本部 地下環境技術部
※※※		東京電力(株) 原子燃料サイクル部 処分技術グループ
※※※※		東京電力(株) 原子力技術・品質安全部 技術評価グループ
※※※※※		日本原燃(株) 再処理事業部 土木建築部 土木建築技術課

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⁾³⁾。

使用したボーリングコアは、軽石凝灰岩(岩種 A)、砂質軽石凝灰岩(岩種 B)の 2 岩種に区別した。GL-150～-139m 深度のボーリングコアより採取した岩種 A は、 $\phi 0.2 \sim 5.0 \text{ cm}$ 程度の白色軽石を含む軽石凝灰岩を主体とし、一部に灰色を呈する細粒、ガラス質な凝灰岩を伴う特徴を持ち、平均湿潤密度 1.52 g/cm^3 である。地質年代としては、新第三紀中新世にあたる。また、GL-95～-90m 深度のボーリングコアより採取した岩種 B は、 $\phi 1.0 \sim 5.0 \text{ cm}$ 程度の白灰色を呈する軽石を多く含む砂質軽石凝灰岩を主体とし、その基質部分には安山岩片等からなる砂粒子を多く含み、平均湿潤密度 1.55 g/cm^3 である。地質年代は、岩種 A と同じく新第三紀中新世にあたる²⁾³⁾。

(1) 圧密排水(CD)試験

供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体とし、土木学会「軟岩の調査・試験の指針(案)」3.3.3 軟岩の三軸圧縮試験に準拠し、圧密排水(CD)条件の下で、ひずみ制御(ひずみ速度: $0.01\%/ \text{min}$)、有効拘束圧は 0.1、0.5、1.0、1.5MPa として試験を実施した。今回の力学試験は CD 条件下で実施されているため、体積ひずみ(ε_v)と排水量(ΔV)には $\varepsilon_v = \Delta V / V = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ の関係がある。三軸試験条件では、 $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ と考えることができるため、最大せん断ひずみは $\gamma_{\max} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{33} = (3/2)\varepsilon_{11} - (1/2)\varepsilon_v$ として算定した。



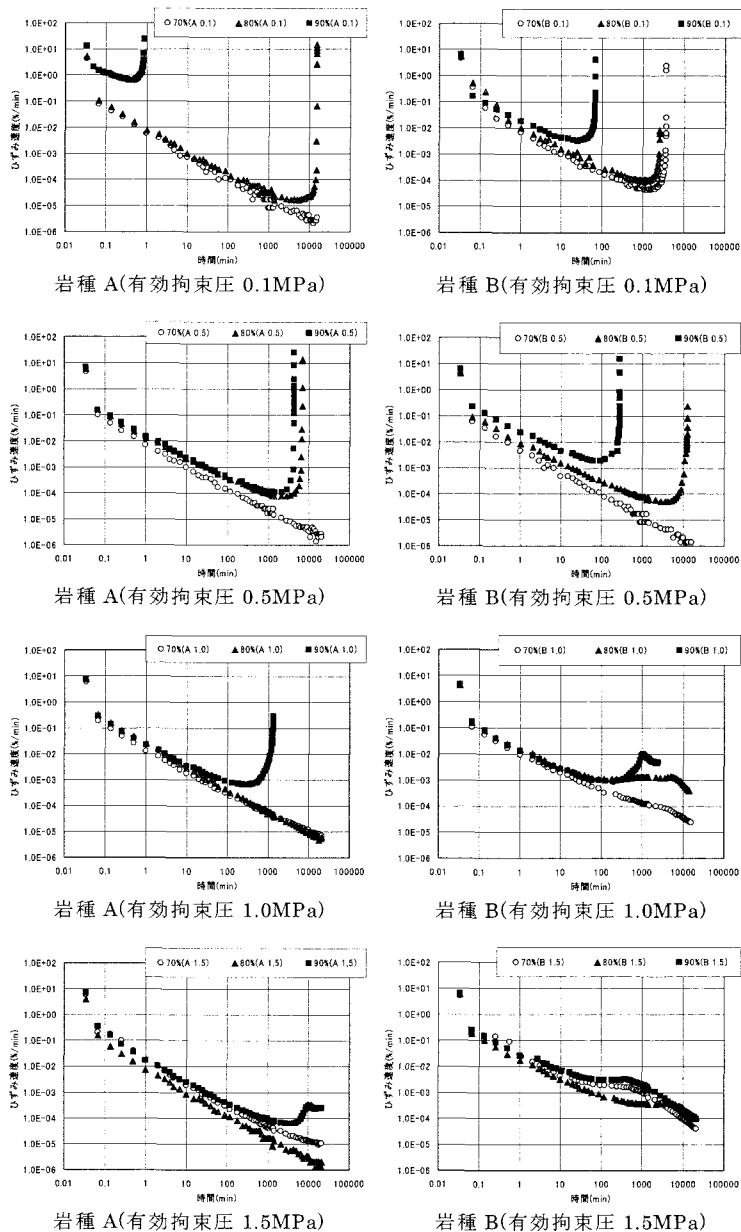
図－ 1 CD 試験結果

表－ 1 CD 試験結果 ひずみレベル一覧

岩種	有効拘束圧 (MPa)	軸差強度 (MPa)	ピーク時 軸ひずみ (%)	ピーク時 体積ひずみ (%)	ピーク時 最大せん断ひずみ (%)	E_{50} (MPa)	限界 ひずみ (%)	限界せん断ひずみ (%)
軽石凝灰岩 A	0.1	3.07	0.74	-0.07	1.15	606	0.51	0.74
	0.5	4.92	0.90	0.16	1.27	825	0.60	0.87
	1.0	5.18	1.38	0.19	1.97	818	0.63	0.92
	1.5	5.58	1.37	0.44	1.83	840	0.66	0.96
砂質軽石凝灰岩 B	0.1	3.46	0.62	-0.18	1.02	810	0.43	0.62
	0.5	4.09	0.76	0.27	1.01	800	0.51	0.74
	1.0	4.68	1.11	0.39	1.48	815	0.57	0.83
	1.5	5.30	1.01	0.43	1.30	1030	0.51	0.75

図－ 1、表－ 1 に CD 試験結果を示す。拘束圧 0.1MPa のケースでは、ピーク直前に体積ひずみが膨張に転じている。岩種 A は $c_d = 0.98 \text{ MPa}$ 、 $\phi_d = 28.5^\circ$ 、岩種 B は $c_d = 1.12 \text{ MPa}$ 、 $\phi_d = 23.1^\circ$ となった。なお、表－ 1 には、櫻井の限界ひずみ、限界せん断ひずみ⁴⁾を示す。これらの結果を用いて、以降のクリープ試験時の荷重を設定した。

(2) クリープ試験



図ー 2 クリープ試験結果

試験方法は、土木学会「軟岩の調査・試験の指針(案)」3.3.6 軟岩の三軸圧縮クリープ試験に準拠し、圧密排水条件、有効拘束圧は 0.1、0.5、1.0、1.5MPa、クリープ応力を圧密排水三軸圧縮試験の軸差強度×70、80、90%とした。なお、载荷日数は最大 15 日として、クリープ破壊に至らない場合については、1 日あたり 5%ずつ応力レベルを上昇させ、破壊を確認した。ここでは、図ー 2 に、クリープ試験結果として、15 日までの時間・軸ひずみ速度関係を示す。

拘束圧が小さい条件での試験結果は、クリープ荷重の载荷初期にはひずみ速度が大きく、2 次クリープに移行してひずみ速度が低下し、最小ひずみ速度を示した後、急激にひずみ速度が増加に転じ、破壊に至るというパターンを示すが、拘束圧が大きい条件(1.5MPa)での試験結果では、15 日間の試験期間中、ひずみ速度は低下傾向にあった。また、クリープの進展に伴って、一旦加速したひずみ速度がふたたび減速に転じる現象が一部供試体に認められた。これらは、せん断破壊面の発生後に、軟岩の固結部分の破壊を生じ、樽型破壊モードに移行したことに起因すると考えられる。

(3) 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⁵⁾を用いた高精度の透水係数測定を実施することで、各载荷段階における透水係数の変化を計測した。载荷は荷重制御で実施し、排水量の落ち着いた段階で透水試験を実施した。

供試体は、力学試験と同じく直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体とし、試験条件は、一定の有効拘束圧(0.1、0.5、1.0、1.5MPa、背圧 0.2MPa)条件下で、段階的に载荷(等方応力、ピーク強度の 70、80、90、

100%)を行い、各载荷段階でフローポンプ透水試験を実施した。なお、80%または90%の载荷条件では、クリープ的な挙動を観察するために载荷直後、24時間、72時間後にそれぞれ透水試験を実施した。フローポンプ試験では注入水量を0.01~0.05ml/minで設定し、その際の水頭差は35~823cmH₂O(平均256cmH₂O)であった。表-2、図-3に試験結果を示す。

表-2 透水試験結果一覧

岩種	有効拘束圧 (MPa)	載荷応力レベルごとの透水係数 (m/sec)*1										備考 * 2	
		等方	70%	80%			90%			100%	破壊後		
				載荷直後	24時間	72時間	載荷直後	24時間	72時間				
A 軽石凝灰岩	0.1	A-1	8.63×10 ⁻⁹	-	-	-	-	-	-	-	2.49×10 ⁻⁸	70%載荷中 6分で破壊	
		A-2	6.70×10 ⁻⁹	6.60×10 ⁻⁹	6.92×10 ⁻⁹	7.27×10 ⁻⁹	7.54×10 ⁻⁹	-	-	-	2.88×10 ⁻⁸	90%載荷中 60分で破壊	
	0.5	A-1	4.34×10 ⁻⁹	4.33×10 ⁻⁹	4.03×10 ⁻⁹	4.23×10 ⁻⁹	4.13×10 ⁻⁹	4.27×10 ⁻⁹	-	4.59×10 ⁻⁹	1.10×10 ⁻⁸	105%載荷中 36分で破壊	
		A-2	2.87×10 ⁻⁹	2.88×10 ⁻⁹	3.23×10 ⁻⁹	3.43×10 ⁻⁹	3.75×10 ⁻⁹	-	-	-	7.73×10 ⁻⁹	90%載荷中 1分で破壊	
	1.0	A-1	4.56×10 ⁻⁹	4.59×10 ⁻⁹	4.84×10 ⁻⁹	-	-	4.68×10 ⁻⁹	5.55×10 ⁻⁹	5.91×10 ⁻⁹	-	9.56×10 ⁻⁹	100%載荷中 12分で破壊
		A-2	3.79×10 ⁻⁹	3.64×10 ⁻⁹	4.03×10 ⁻⁹	-	-	4.12×10 ⁻⁹	5.11×10 ⁻⁹	-	-	1.48×10 ⁻⁸	90%-2 保持中 780分で破壊
	1.5	A-1	4.61×10 ⁻⁹	4.42×10 ⁻⁹	4.51×10 ⁻⁹	-	-	4.82×10 ⁻⁹	-	-	-	9.14×10 ⁻⁹	90%-1 保持中 360分で破壊
		A-2	5.81×10 ⁻⁹	5.77×10 ⁻⁹	5.85×10 ⁻⁹	-	-	5.70×10 ⁻⁹	7.47×10 ⁻⁹	-	-	3.86×10 ⁻⁸	90%-2 保持中 1680分で破壊
B 砂質軽石凝灰岩	0.1	B-1	1.24×10 ⁻⁸	1.39×10 ⁻⁸	1.42×10 ⁻⁸	1.61×10 ⁻⁸	1.88×10 ⁻⁸	2.10×10 ⁻⁸	-	-	-	4.21×10 ⁻⁸	90%-1 保持中 25分で破壊
		B-2	2.00×10 ⁻⁸	1.86×10 ⁻⁸	2.02×10 ⁻⁸	2.89×10 ⁻⁸	-	-	-	-	-	1.08×10 ⁻⁷	80%-2 保持中 780分で破壊
	0.5	B-1	4.23×10 ⁻⁹	3.99×10 ⁻⁹	3.83×10 ⁻⁹	3.85×10 ⁻⁹	3.69×10 ⁻⁹	7.79×10 ⁻⁹	-	-	-	6.73×10 ⁻⁹	90%保持中 20分で破壊
		B-2	4.72×10 ⁻⁹	3.81×10 ⁻⁹	5.15×10 ⁻⁹	-	-	-	-	-	-	1.56×10 ⁻⁸	80%-1 保持中 600分で破壊
	1.0	B-1	8.13×10 ⁻⁹	7.98×10 ⁻⁹	7.88×10 ⁻⁹	8.09×10 ⁻⁹	7.93×10 ⁻⁹	6.75×10 ⁻⁹	1.33×10 ⁻⁸	-	-	3.11×10 ⁻⁸	90%-2 保持中 49分で破壊
		B-2	4.87×10 ⁻⁹	4.32×10 ⁻⁹	4.41×10 ⁻⁹	-	-	4.29×10 ⁻⁹	4.94×10 ⁻⁹	9.56×10 ⁻⁹	-	1.67×10 ⁻⁸	100%載荷中 49分で破壊
	1.5	B-1	2.87×10 ⁻⁹	2.67×10 ⁻⁹	2.50×10 ⁻⁹	-	-	2.56×10 ⁻⁹	2.58×10 ⁻⁹	2.56×10 ⁻⁹	2.59×10 ⁻⁹	5.02×10 ⁻⁹	100%保持中 121分で破壊
		B-2	6.66×10 ⁻⁹	6.65×10 ⁻⁹	6.67×10 ⁻⁹	-	-	6.36×10 ⁻⁹	9.79×10 ⁻⁹	1.72×10 ⁻⁸	1.40×10 ⁻⁸	1.20×10 ⁻⁸	100%保持中 120分で破壊

*1: 透水係数は、定常解で求めた値で、水温 15°Cにおける値。

*2: 備考中、%以降の数字-1, -2, -3 は(1:所定軸力载荷直後、2:所定軸力载荷後 24時間、3:所定軸力载荷後 72時間)を示す。

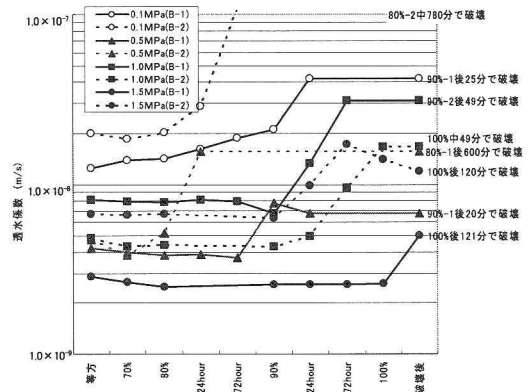
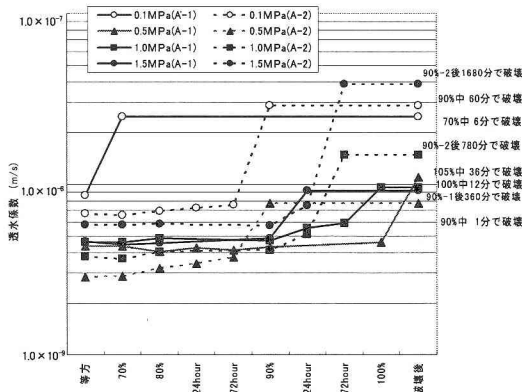


図-3 透水試験結果

岩種 B は岩種 A と比較して、初期の等方等圧条件から透水係数のバラツキが存在する。いずれも拘束圧 0.1MPa の供試体の透水係数が最も大きく、0.5MPa 以上の拘束圧では、透水係数の拘束圧依存性は明瞭とならなかった。初期状態での透水係数は、岩種 A は平均 5.16×10^{-9} m/sec、岩種 B は 7.99×10^{-9} m/sec であった。本試験では、せん断試験中の透水係数の変化を計測したが、破壊に至ったケースにおいても透水係数の増加は初期透水係数の 7 倍程度である。これは、透水係数の計測方向が载荷軸方向であることに起因している。岩盤の透水係数は、亀裂(せん断破壊面)に大きく依存するとされるが、今回の試験では亀裂方向の透水係数を直接計測することができず、亀裂部分と基質部分を含んだマクロの透水係数を計測している。

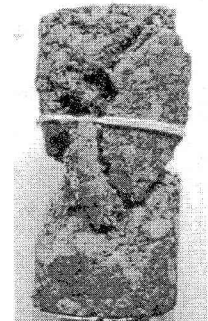


図-4 供試体(試験終了)

岩種 B 拘束圧 0.1MPa B-2

そのため、透水係数は亀裂の存在しない基質部分の影響を強く受け、図－ 4 に示す供試体においても、破壊後の透水係数 $1.08 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ を計測している。亀裂(せん断破壊面)部分では水の移動が自由であると仮定して、図－ 4 の供試体の上端から 7.5cm は透水抵抗がないと考え、下端より 2.5cm の透水係数を算定すると、透水係数は $2.68 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ となり、初期状態の透水係数 $2.00 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ とほとんど変わらない。つまり、破壊に至った後も、亀裂の存在しない基質部分の透水係数は初期状態に非常に近い状態にあると推定される。

本試験結果におけるわずかな透水係数の増加は、供試体内部のせん断破壊面の進展を示唆していると考えられる。

3. ひずみレベルと透水特性の関係

足立ら⁶⁾は、材料には、固有の応力・ひずみ・ひずみ速度状態面が存在し、クリープ挙動と応力緩和挙動は、その状態に応じた条件と状態面の解を求めることで説明が可能であり、本質的には同じ現象であると考えることができることを紹介している。図－ 5 に示すように、クリープ状態は軸差応力一定条件の面でひずみ速度低下を表現できるとしている。

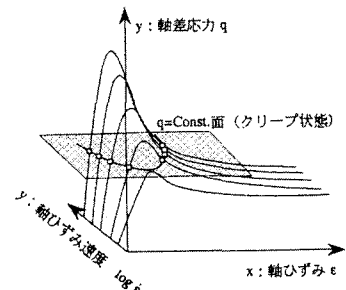
山内ら⁷⁾が比較的孔隙の多い軟岩に対して実施した一軸圧縮条件下でのクリープ試験では、1 次クリープの開始から 2 次クリープの終了までの全域で、試験片に含まれる微小な空隙が閉塞されていく過程とともに、粒子内での微小な亀裂の発生が認められるが、2 次クリープの後半(ひずみ速度の最小値以降)から载荷軸方向へ亀裂が進展し始め、3 次クリープの開始点付近から顕著な亀裂の伸長と連結が生じることを確認している。つまり、2 次クリープ後半以降では、内部構造に大きな変化が生じていると考えられ、このことが強度にも影響を与える。同じく、山内ら⁷⁾は、クリープ試験を途中で中止し残存強度を計測して 2 次クリープ後半以降の強度低下を確認し、内部の微小亀裂の進展と整合する結果を示した。また、最小ひずみ速度を記録するひずみレベルは、通常の一軸強度試験(定ひずみ速度)でピーク強度を迎えるひずみレベルよりも低いとしている。

Hallbauer⁸⁾らは岩石三軸圧縮試験時の軸ひずみと軸応力の関係、各ステップにおける供試体の状況を示した。図－ 6 からピーク強度に達する前に変形の局所化が生じていることがわかる。亀裂(せん断破壊面)の影響を強く受ける透水特性についてもピーク強度に達する前に変化が生じていることが推定される。

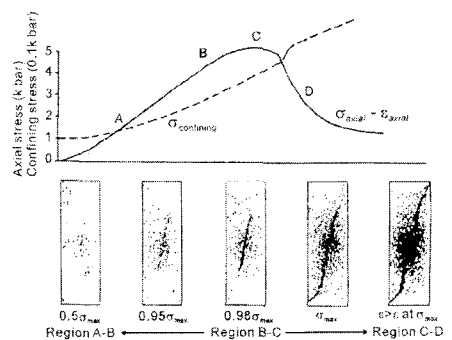
以上の知見に基づいて、本研究では、圧密排水三軸試験とクリープ試験の結果を、ひずみレベルで整理した上で、ひずみレベル毎の透水係数変化について考察を行う。

(1) ひずみレベルに着目した整理

図－ 7 は、CD 試験時の軸差応力とクリープ試験時のひずみ速度を、横軸に軸ひずみを取り、岩種、拘束圧毎に整理したものである。表－ 3 は、図－ 7 に示したクリープ試験の整理においてひずみ速度が最小となるひずみレベルを拘束圧、応力レベル毎に整理したものである。なお、表－ 3 には最大せん断ひずみについても同様の整理を行った結果を示している。ここでは、条件を統一するために、クリープ試験時に 15 日間以内に破壊に至らなかった試験については、対象から除外している。



図－ 5 状態面



図－ 6 変形局所化の観察

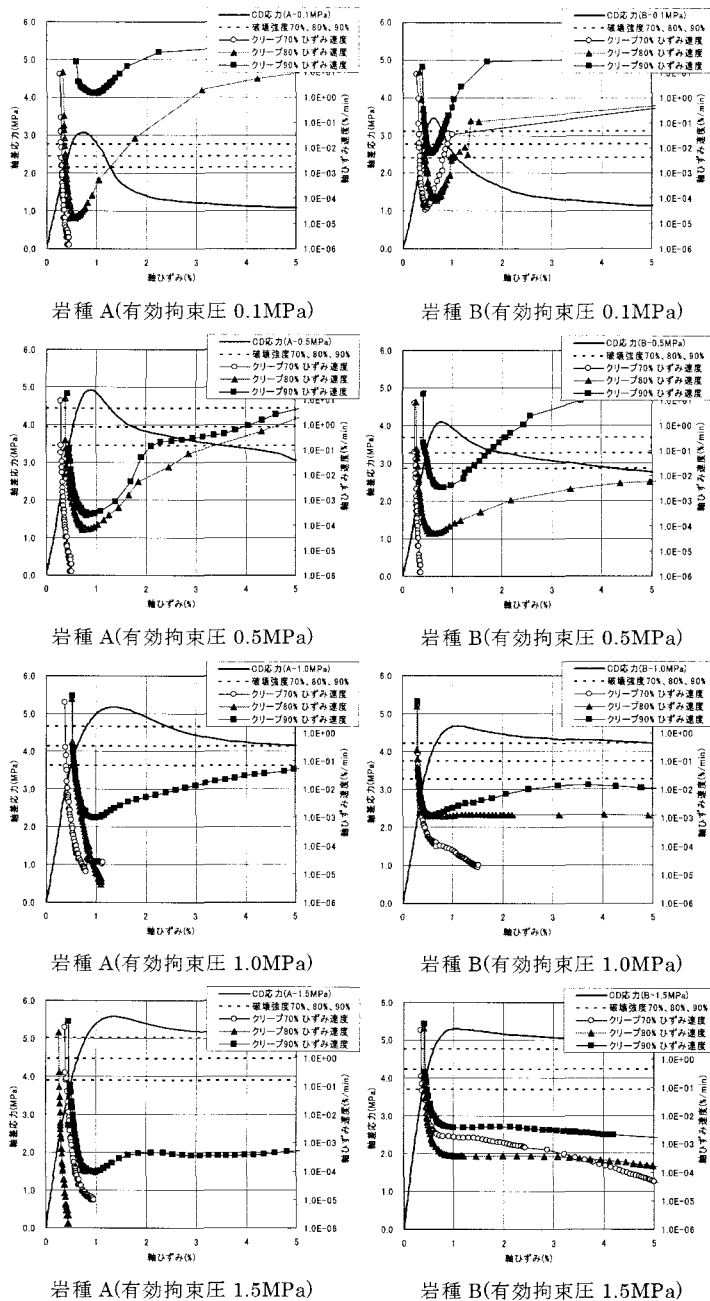


図-7 軸ひずみレベルと軸差応力、ひずみ速度

既往研究の知見に従えば、クリープ試験ひずみ速度最小時～CD試験ピーク時のひずみレベルで透水係数に影響を与えるようなひずみの局所化(せん断破壊面の形成)が生じていると考えられる。

(2) 透水係数とひずみレベルの関係

透水試験の結果をひずみレベルに着目して整理した結果を図-9、図-10に示す。岩種A、Bともに、拘束圧の低い0.1MPa条件で、わずかに透水係数が高い傾向が認められる。

表-3 ひずみ速度最小時のひずみ

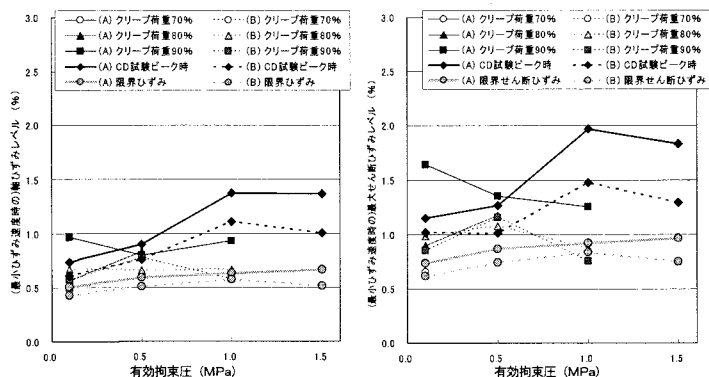
試料	有効拘束圧 (MPa)	軸ひずみ(%)		
		クリープ応力比		
		70%	80%	90%
軽石凝灰岩 (A)	0.1	—	0.57	0.97
	0.5	—	0.83	0.80
	1.0	—	—	0.93
	1.5	—	—	—
砂質軽石凝灰岩 (B)	0.1	0.48	0.68	0.57
	0.5	—	0.66	0.77
	1.0	—	0.67	0.58
	1.5	—	—	—

試料	有効拘束圧 (MPa)	最大せん断ひずみ(%)		
		クリープ応力比		
		70%	80%	90%
軽石凝灰岩 (A)	0.1	—	0.90	1.64
	0.5	—	1.17	1.35
	1.0	—	—	1.25
	1.5	—	—	—
砂質軽石凝灰岩 (B)	0.1	0.66	0.98	0.85
	0.5	—	1.08	1.16
	1.0	—	0.87	0.76
	1.5	—	—	—

図-7から、ひずみ速度が最小値を記録するひずみレベルは、CD試験のピーク時ひずみよりもやや小さい傾向が認められる。

表-1、表-3に示した結果を、ひずみレベルに着目して図-8にとりまとめた。

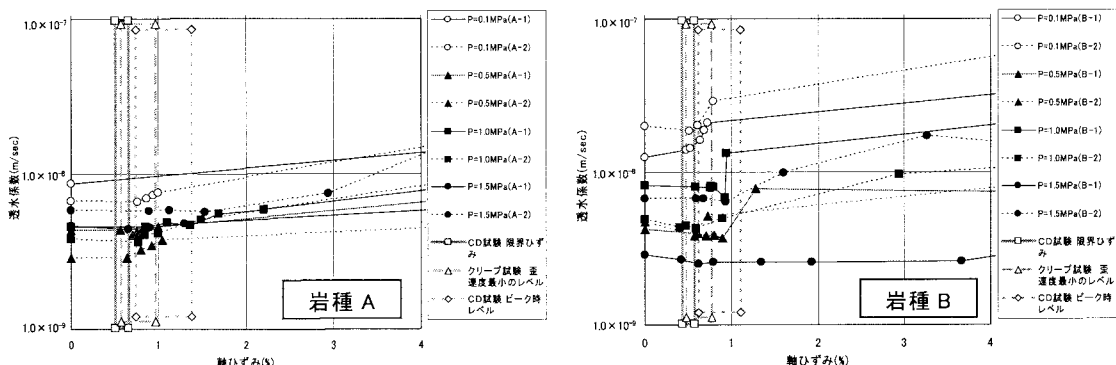
今回試験の対象とした2岩種の軟岩の場合、クリープ試験におけるひずみ速度最小時のひずみレベルは、CD試験のピーク時ひずみレベルよりも若干小さな値をとることが多い。また、限界ひずみ、限界せん断ひずみは、クリープ試験ひずみ速度最小時～CD試験ピーク時のひずみレベルの下限値を下回るレベルにあることがわかる。



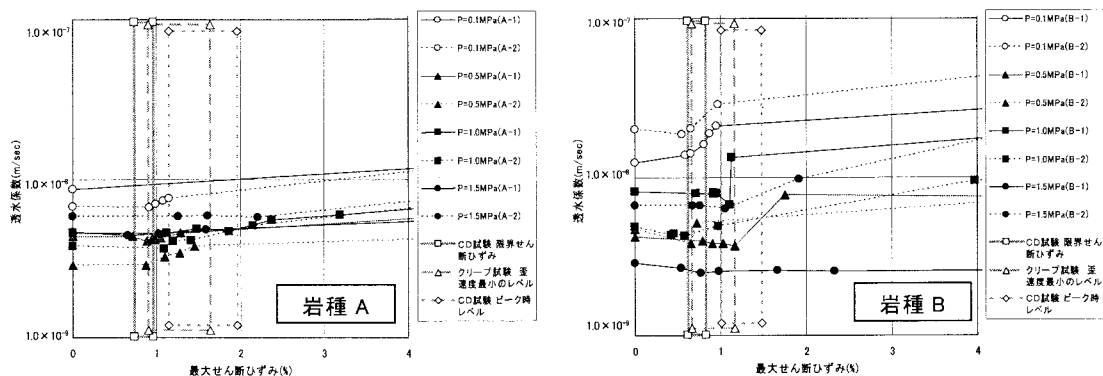
図－8 ひずみレベルの 比較

ひずみレベル一覧

岩種	ひずみレベル	軸ひずみ (%)	最大せん断ひずみ (%)
A	限界ひずみ	0.51～0.66	0.74～0.96
	ひずみ速度最小	0.57～0.97	0.90～1.64
	ピーク時	0.74～1.38	1.15～1.97
B	限界ひずみ	0.43～0.57	0.62～0.83
	ひずみ速度最小	0.48～0.77	0.66～1.16
	ピーク時	0.62～1.11	1.02～1.48



図－9 軸ひずみレベルと透水係数の関係



図－10 最大せん断ひずみレベルと透水係数の関係

図－9 に示す軸ひずみについて着目すると、両岩種ともに、拘束圧 1.0MPa 以下のケースでは、軸ひずみが限界ひずみ(岩種 A では 0.51～0.66%、岩種 B では 0.43～0.57%)に達するまでは透水係数の変化が認められず、クリープ試験のひずみ速度が最小値となるひずみレベル(岩種 A では 0.57～0.97%、岩種 B では 0.48～0.77%)あるいは CD 試験のピーク時軸ひずみレベル(岩種 A では 0.74～1.38%、岩種 B では 0.62～1.11%)に達すると、透水係数が増加する共通の傾向を示している。これは、供試体内部で生じたせん断破壊面を水が流れるためと考えられる。しかし、比較的拘束圧の高い 1.5MPa のケースについては、岩種 A では軸ひずみ 1.5%程度でわずかに増加の傾向に転じているが、岩種 B では 3%を超過するひずみレベルにおいても、ほとんど透水係数が増加しない供試体があった(P=1.5MPa(B-2))。これは、高拘束圧条件下で明確なせん断破壊面が生じることがなく、軟岩の固結組織の破壊による構型破壊モードを取ったためと考えられる。

試験時の排水量(ΔV)から算定した最大せん断ひずみと透水係数の関係(図-10)からは、軸ひずみレベルの整理と同じく、岩種 A、B ともに限界せん断ひずみまでは透水性の変化が認められず、クリープ試験でひずみ速度が最小値となるひずみレベルあるいは CD 試験におけるピーク時ひずみレベルに達すると、透水係数は増加の傾向を示すことがわかる。

透水係数の増加する軸ひずみ、最大せん断ひずみは拘束圧に依存して変化するため、今回の試験結果においても幅を持つが、掘削影響領域内において透水特性の変化を評価するにあたっては、下限値にあたる低拘束圧条件における試験結果を用いて評価を行うことが考えられる。

4. まとめ

処分空洞周辺岩盤の EDZ の透水特性の変化を適切に予測することは、合理的かつ現実的な安全評価を行う上で重要な課題である。本研究では、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(圧密排水試験、クリープ試験)、フローポンプ法による高精度の透水試験を実施した。

力学特性試験から、本研究で用いた堆積軟岩コアの場合、軸ひずみ、最大せん断ひずみ両者ともに、限界ひずみが最も小さなひずみレベルであり、次にひずみ速度が最小となるひずみレベルを経て、CD 試験ピーク時のひずみレベルに達することが確認できた。

フローポンプ法によるせん断過程を考慮した透水試験の結果から、破壊に至った後も、亀裂の存在しない基質部分の透水係数は初期状態に非常に近い状態にあると推定された。また、ひずみレベルに着目した整理結果から、岩種 A、B は軸ひずみ、最大せん断ひずみ両者ともに、限界ひずみレベルまで透水係数の増加傾向は認められず、拘束圧 0.1~1.0MPa の条件では、一定のひずみレベル以降において透水係数が増加する傾向が確認された。透水係数の増加傾向が認められるひずみレベルは、クリープ試験時で計測されたひずみ速度が最小となるひずみレベルと CD 試験のピーク時ひずみレベルとほぼ同等である。これは、岩種 A、B ともに共通の傾向であり、ひずみの局所化(せん断破壊面の形成)に関する既往研究の知見に従えば、クリープ試験ひずみ速度最小時~CD 試験ピーク時のひずみレベルで透水係数に影響を与えるようなせん断破壊面が供試体内部で形成されつつあることを示唆するものと考えられる。

ひずみレベルと透水係数の関係から、EDZ 内の透水特性変化領域をひずみレベルを用いて管理することができると考えられる。そのため、トンネル周辺 EDZ における透水係数を予測するためには、掘削直後~クリープ挙動を含めたトンネル周辺のひずみ場を予測することが必要となり、力学解析により軟岩の変形挙動を予測するアプローチが重要である。また、今回の試験方法では、亀裂(せん断破壊面)の透水係数を正確に計測できていないため、亀裂の透水特性を把握することが必要となる。これらを考慮に入れた上で、透水特性の変化を力学解析により定量的に評価することが今後の課題となる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構(1999): 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、IV-26
- 2) 佐々木泰(2000): 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
- 3) 佐々木泰、渡辺邦夫、林為人、細谷真一(2003): 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
- 4) 櫻井春輔、川嶋幾夫、大谷達彦、松村真一郎(1994): トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ、土木学会論文集 No.493/III-27、pp.185-188.
- 5) Esaki, T., Zhang, M., Takeshita, A. and Mitani, Y. (1996): Rigorous theoretical analysis of a flow pump permeability test. Geotech. Test. J., 19, 241-246.
- 6) 足立紀尚、岡二三生、曾良岡宏、小池真史(1998): 軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明、土木学会論文集、No.596/III-43、pp.1-10.
- 7) 山内優、山崎貴博、山下秀、杉本文男(1998): 軟岩のクリープ過程と一軸圧縮破壊過程の関連性、資源と素材、vol.114、pp.163-168
- 8) Hallbauer, D.K., Wagner H. and Cook, N.G.W.(1973): Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.10, pp.713-726