

軟岩空洞周辺の透水係数の変化と岩石供試体せん断時の透水特性

Change of Permeability Coefficients around Underground Excavations in Soft Rocks and Permeability Characteristics of Rock Specimens under Shearing

宇野晴彦*・田坂嘉章**・谷智之***・吉川和夫****

Haruhiko UNO, Yoshiaki TASAKA, Tomoyuki TANI and Kazuo YOSHIKAWA

In the present study, short-distance permeability tests and seismic velocity measurements are conducted in a cavern at a depth of 50 m in sedimentary soft rocks. It is found that the permeability coefficients near the excavation boundaries are bigger and the high permeability zones are in good agreement with the loosened zones identified from the deformation measurement data. Rock specimens taken from the in-situ test site are used to measure the permeability coefficients using flow pump test method and the permeability characteristics of the sedimentary soft rocks under shearing process is investigated.

Key Words: softrock , permeability test , excavation disturbed zone , tunnel

1. はじめに

地下構造物の建設において、掘削による周辺岩盤の透水特性の変化を把握することは、周辺領域および空洞周辺の長期的な水理特性を評価する上で非常に重要なことである。透水特性の変化は、岩盤掘削による応力変化に伴うゆるみ領域の発生が起因しており、原位置での透水係数分布を捉えることは、応力変化領域を評価することにもなり、空洞の安定性を評価する上で重要な情報を得ることができる。また、空洞掘削による岩盤が有する本来の透水特性からの変化を確認することにより、周辺領域も含めた将来的な水理挙動を予測することが可能になるものと考えられる。そこで、本研究では、比較的、深地層の堆積軟岩地盤を対象として、空洞掘削から 10 数年経過した地下空洞周辺岩盤の透水特性を把握し、さらに、同種軟岩供試体におけるせん断時の透水特性の変化について検討を行った。

2. 原位置および室内試験概要

本研究で対象とした地点は、相模川から約 500m 離れた神奈川県相模原市郊外の段丘地に位置する上総層群泥岩内に構築された地下実験施設¹⁾である。

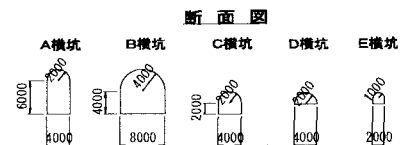
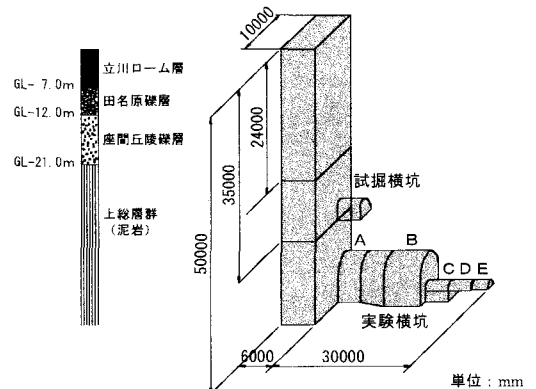


図-1 地下実験施設概要¹⁾

* 正会員 博士 (工学) 東電設計株式会社 技術開発本部 技術企画部
 ** 正会員 工学修士 東電設計株式会社 技術開発本部 土木技術部
 *** 正会員 修士 (工学) 東電設計株式会社 第一土木本部 地下環境技術部
 **** 正会員 博士 (工学) 東急建設株式会社 営業推進本部 土木エンジニアリング部

この地下実験施設の地下実験横坑の概要は、図-1に示すように、50mの立坑から水平方向にA横坑～E横坑までの5つの異なる形状の空洞が掘削されている。また、掘削時の各横坑の壁面近傍の変位（地中変位計）は、図-2に示すように空洞内空幅の50%程度から非弾性挙動を示し、空洞内空幅の25%、10%の領域では、さらに顕著な非弾性挙動が認められている。本研究では、この地下実験横坑のうちC横坑壁面の支保スパン（横坑軸方向スパン長1.4m）中央部、底盤から高さ0.8mの位置から図-3に示すような横坑断面方向に水平下向き約3°のボーリング孔を掘削（調査孔、径86mm、長さ11.0m）し、当該ボーリング孔および採取したボーリングコアを用いて、原位置試験（物理探査、短区間透水試験）および室内試験（物理試験、フローポンプ法透水試験）を実施した。

なお、原位置での電気検層（比抵抗値測定）と室内物理試験（含水比、飽和度）の結果によれば、当該地点では壁面近傍まで飽和状態にあり、風化による空洞壁面近傍の劣化はないものと考えられる。

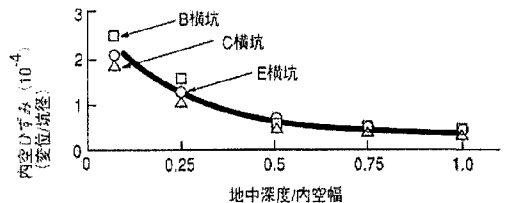
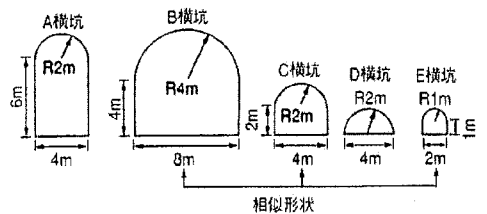


図-2 空洞周辺岩盤の変形挙動

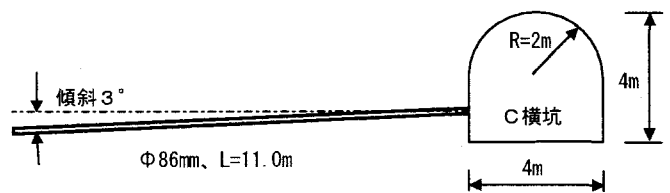


図-3 C横坑断面図および原位置試験ボーリング位置

3. 原位置試験による空洞周辺岩盤の透水特性

原位置での空洞周辺岩盤の透水係数分布を求めるため、短区間透水試験を実施した。これと合わせて、原位置での岩盤物性の分布状況を把握するため、音波探査による弾性波速度測定を実施した。短区間透水試験の概要を図-4に示す。

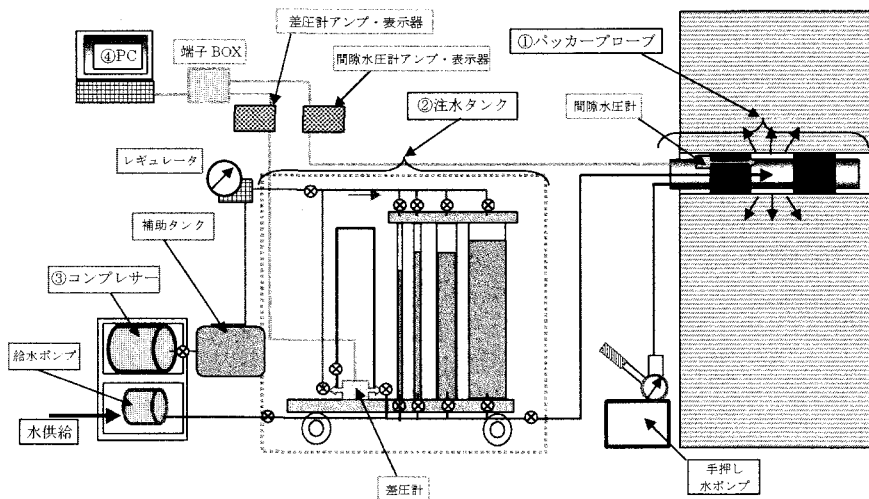


図-4 短区間透水試験装置の概要

短区間透水試験は、注水タンクよりパッカープローブ内に水を注入し、タンク内の水位変動から注水量を、また、パッカープローブ内に設置してある間隙水圧計により圧力を測定するものである。注水タンクは4本あり、それぞれφ0.6, 2, 6, 15cmの内径を有している。透水量に応じて注水タンクを切り替えることで、 $10^{-2} \sim 10^{-10}$ cm/s オーダ

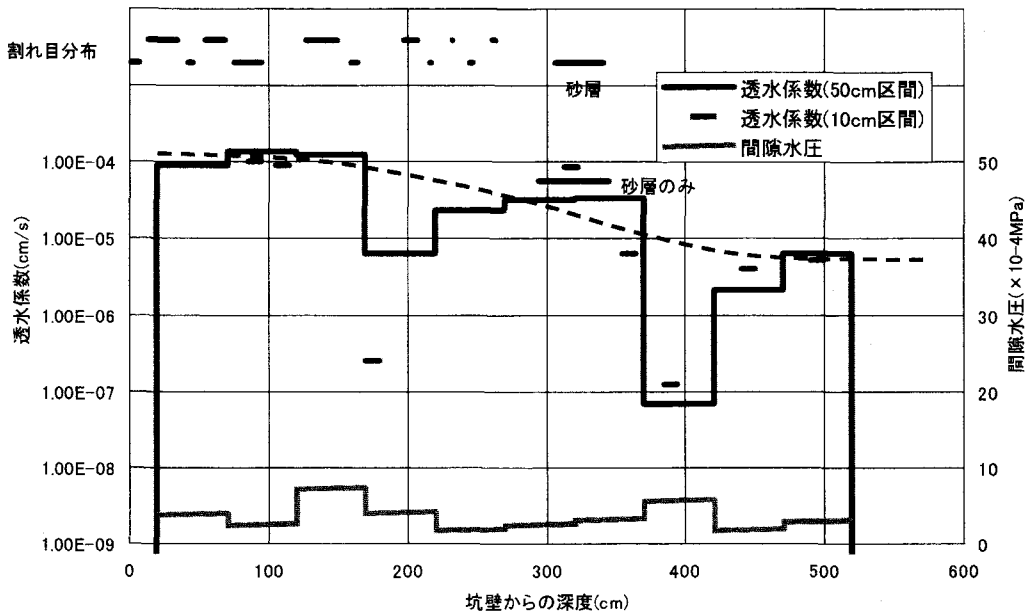


図-5 短区間透水試験による空洞周辺の透水係数分布

一の広範囲な透水係数を測定²⁾することが可能である。

短区間透水試験による深度方向の透水係数分布を図-5に示す。図によれば、部分的に透水係数の小さい領域や大きい領域が階段状に分布している。しかし、図中破線で示した泥岩部の透水係数のアウトラインには、深くなるに従って、透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 程度から 10^{-6} cm/s オーダーまで低減する傾向が認められる。特に、透水係数の大きい $0.2 \sim 1.7 \text{ m}$ 区間においては、同図上部に示したコアの割れ目が多く確認されていることから、掘削によるゆるみの影響が表れているものと考えられる。この透水係数が深部より2オーダー大きい範囲(約2m以浅)は、図-2に示した空洞掘削時の壁面近傍変位が非弾性挙動を示す領域とほぼ一致している。透水係数の階段状の分布については、深度3m近傍で透水係数が大きくなる領域は砂層が分布しており、その影響によるものと考えられる。また、2m近傍と4m近傍で透水係数の小さい領域が存在しており、この位置の室内試験結果では、母岩の透水係数も小さい結果が得られている。この位置の物理特性変化に着目し、図-6に原位置における音波探査検層結果を示す。図によれば、弾性波速度は2mおよび4m近傍で速い領域が存在し、図-5に示した10cm区間透水試験(短い線で表示)での透水係数($1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$)の小さい領域と整合している。図-5に破線で示した大きい透水係数のアウトライン分布によると4m以浅で透水係数が大きくなることから、この近傍以浅は空洞掘削の影響を受けており、破壊には至らなくとも構造が変化(間隙の増加、密度の低下)していることが考えられる。また、2m以浅では、弾性波速度が急激に低下すること、4m近傍に比べて透水係数が1オーダー以上増加することおよびコア観察から割れ目が多く存在することから掘削時に破壊強度に抵触して応力を解放した破壊領域になっているものと考えられる。

以上のことからC横坑周辺岩盤のゆるみ領域は、図-7に示すような状況が推測される。なお、図-5に示した

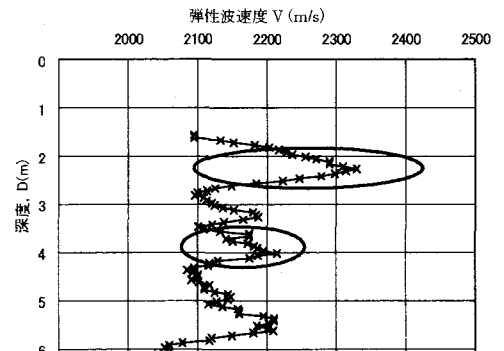


図-6 音波探査検層結果

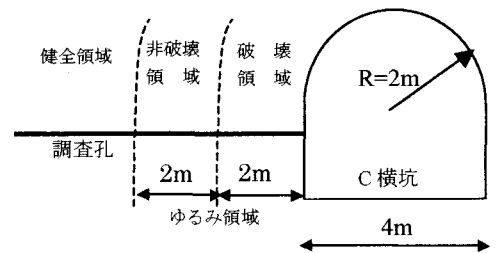


図-7 空洞周辺岩盤のゆるみ領域

深度方向の間隙水圧の分布は、 3×10^{-4} MPa（水頭に換算して 30cm）程度と非常に小さく、当該地点のトンネル形状の影響を受けているものと考えられる。

4. 室内試験による岩石供試体のせん断時の透水特性

空洞周辺の透水係数の変化は、前述したように空洞掘削による応力変化に伴うゆるみ領域の影響を受けるものと考えられる。空洞周辺のゆるみ領域については、中硬岩の場合、掘削に伴う応力再配分あるいは発破により潜在的あるいは新たに発生したクラックが開口し、その結果として地山の力学特性が変化した状態³⁾と考えられている。しかし、軟岩地盤の場合は、一般的に潜在クラックが少ないため、塑性挙動や破壊時のせん断面の形成が影響するものと考えられる。そこで、前述の原位置での挙動を評価するために、空洞掘削時の応力変化過程に基づき、岩石供試体のせん断過程における透水係数を測定することとした。

掘削による空洞周辺の応力状態は、空洞法線方向の応力解放により周方向応力が増加してせん断応力が発生し、岩盤の破壊強度に達した領域では、軟化して残留状態に至る。そして、空洞周辺岩盤の変化は、先の図-7に示す状況になるものと推察される。したがって、ゆるみ領域と考えられる空洞周辺岩盤の透水特性を把握するには、図-8に示す岩盤のせん断過程において構造の変化する非破壊領域と破壊領域（軟化および残留状態）における透水特性の変化を評価すれば良いものと考えられる。そこで、せん断過程での透水係数を求めるため、フローポンプ法透水試験を実施した。図-9にフローポンプ法透水試験装置の概要を示す。この試験は、飽和させた供試体の一端から一定流量の水を注入した時の注入圧力から透水係数を求める方法であり、難透水性の材料に対して精度の高い結果が得られる方法⁴⁾として適用されている。この方法では、圧力測定精度の向上や非定常解の適用により相対的に短時間で測定が終了すること、注水量を抑えることにより動水勾配（発生する間隙水圧）を低く抑えることが可能である。

ここでは、空洞掘削時周辺岩盤の応力状態を考慮して、対象地点の泥岩および比較のために市販の凝灰岩（田下石）を用いて、それぞれ4種類の拘束圧条件によるせん断透水試験を実施した。本検討で採用した拘束圧は、 $\sigma_{30}' = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ MPaである。

表-1 各岩種・拘束圧に対する設定せん断応力

	泥岩	凝灰岩
破壊強度	$c=0.99$ MPa $\phi=44.8^\circ$	$c=3.1$ MPa $\phi=22.2^\circ$
$\sigma_{30}'=0.1$ MPa	5.2MPa	9.4MPa
$\sigma_{30}'=0.5$ MPa	7.1MPa	10.3MPa
$\sigma_{30}'=1.0$ MPa	9.5MPa	11.4MPa
$\sigma_{30}'=2.0$ MPa	14.3MPa	13.6MPa

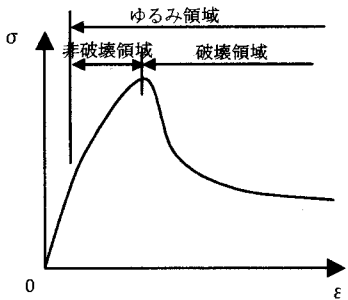


図-8 せん断過程とゆるみ領域の関係

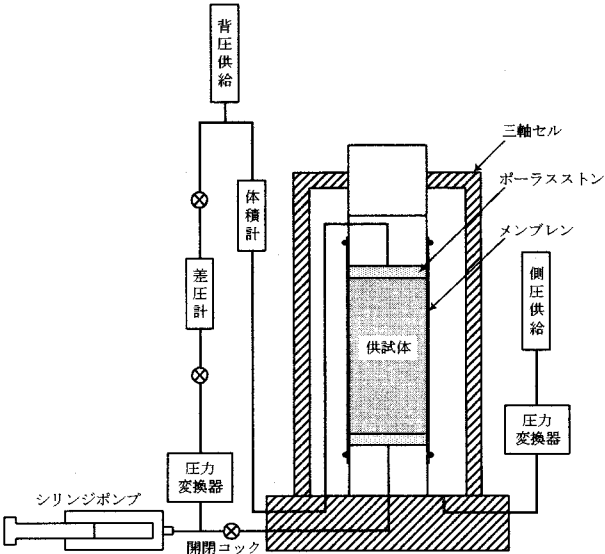


図-9 透水試験装置の概要

難透水性の材料に対して精度の高い結果が得られる方法⁴⁾として適用されている。この方法では、圧力測定精度の向上や非定常解の適用により相対的に短時間で測定が終了すること、注水量を抑えることにより動水勾配（発生する間隙水圧）を低く抑えることが可能である。

ここでは、空洞掘削時周辺岩盤の応力状態を考慮して、対象地点の泥岩および比較のために市販の凝灰岩（田下石）を用いて、それぞれ4種類の拘束圧条件によるせん断透水試験を実施した。本検討で採用した拘束圧は、 $\sigma_{30}' = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ MPaである。

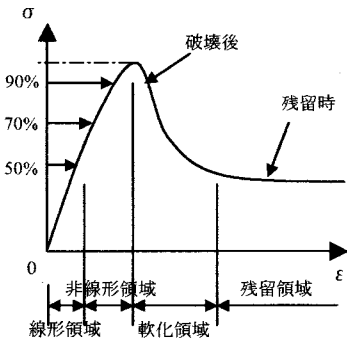


図-10 透水試験時の設定せん断応力

フローポンプ法透水試験の透水試験時のせん断応力は、表-1に示すように、三軸CD試験による排水強度の c 、 ϕ から得られる偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を基準に設定した。フローポンプ法透水試験の破壊強度に対する設定せん断応力の割合（破壊強度比：せん断応力/破壊強度）は、図-10に示すように、0(等方拘束圧時)、50%、70%、90%、破壊後、残留時を目安として、その時の応力～ひずみ関係等の状況を判断して設定した。

試験結果の一例として、図-11に泥岩 $\sigma_{30}'=0.1\text{MPa}$ における軸差応力、軸ひずみおよび排水量の経時変化を示す。設定したせん断応力で排水量の安定状況を確認した上で透水試験を実施した。この試験では、設定強度の90%で破壊強度に達して急激な軸ひずみが発生し、吸水に転じている。

試験結果として、泥岩および凝灰岩の各拘束圧毎の破壊強度比～透水係数関係を図-12、図-13示す。破壊強度比は、それぞれの破壊時の強度を1.0として正規化した。破壊後の透水係数については、便宜上、破壊強度比1.2の位置に表示した。なお、透水係数は15℃における値とした。

図-12に示した泥岩の破壊強度比と透水係数の関係に着目する。せん断過程における破壊までの透水係数の変化は、拘束圧の最も低い0.1MPaの場合、設定破壊強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の80%までは、初期値と同じ $2.2 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 程度でほとんど変化せず、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の90%で $3.9 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ と初期値の2倍の値となり、破壊後は、 $4.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と初期値に対して3オーダー、透水係数が大きくなっている。0.5MPaの拘束圧条件では、破壊まで初期値と同じ $7.0 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 程度でほとんど透水係数の変化はなく、破壊後は、 $4.2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ と初期値に対して2オーダー、透水係数が大きくなっている。1.0MPaおよび2.0MPaの拘束圧条件では、破壊直傍でそれぞれ初期値に対して30%および20%程

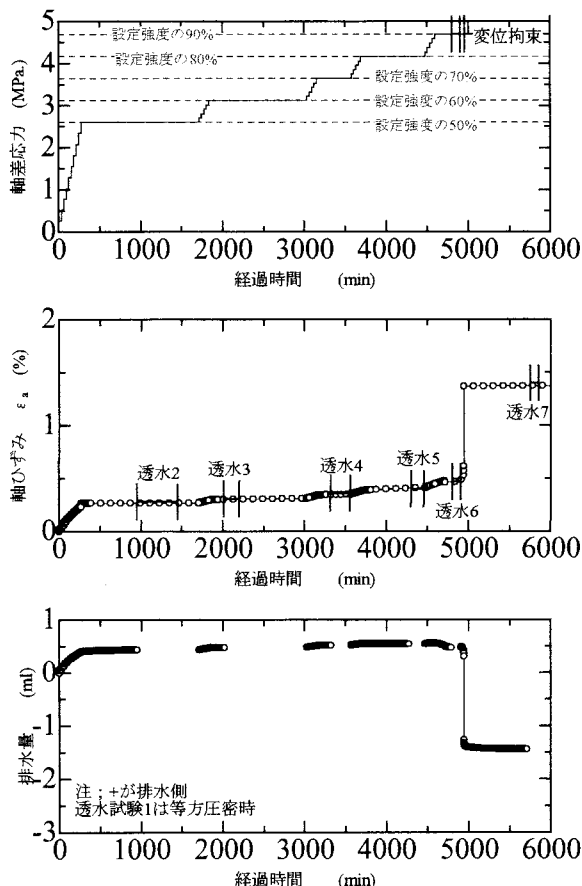


図-11 応力～ひずみ～排水量の経時変化

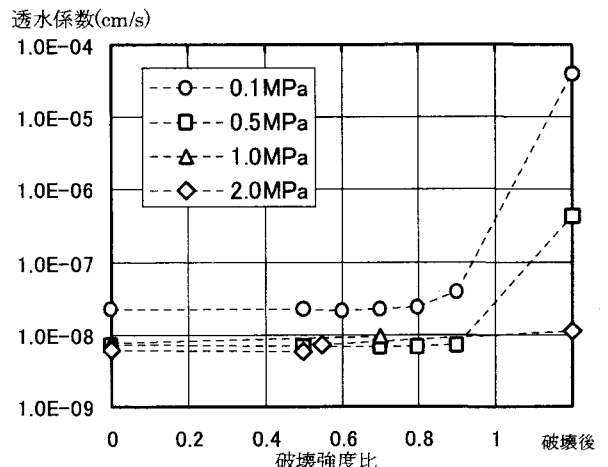


図-12 破壊強度比と透水係数の関係(泥岩)

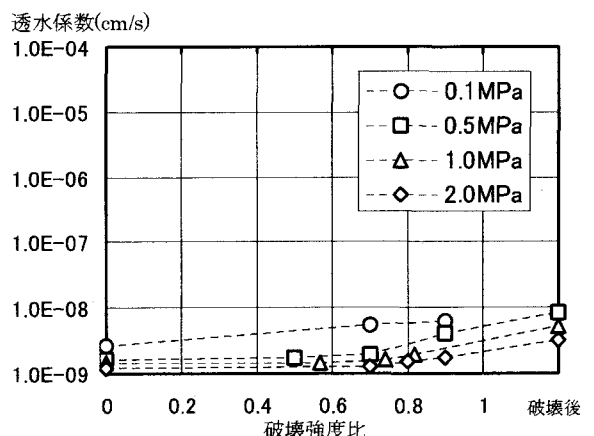


図-13 破壊強度比と透水係数の関係(凝灰岩)

度透水係数が大きくなる。なお、2.0MPaでの破壊後の透水係数は、破壊前の1.5倍程度しか大きくならず、低拘束圧条件のような急激な変化は見られない。これは、0.1MPa、0.5MPaの低拘束圧条件での供試体は、せん断面がペDESTALからキャップまで通過しており、1.0MPa、2.0MPaの供試体は、供試体途中にせん断面が留まっていることが影響しているものと考えられる。

次に、図-13に示した凝灰岩の破壊強度比と透水係数に着目する。拘束圧の最も低い0.1MPaでは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の70%で 5.6×10^{-9} cm/sと初期値 2.6×10^{-9} cm/sの2倍の透水係数となり、さらに、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の85%では 6.3×10^{-9} cm/sまで透水係数が変化している。また、拘束圧0.5MPaでは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の63%までは、 $1.6 \sim 1.9 \times 10^{-9}$ cm/s程度で透水係数はほとんど変化せず、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^*$ の82%で 4.0×10^{-9} cm/sと初期値の2倍、破壊後は、 8.3×10^{-9} cm/sと初期値の4倍程度の透水係数の変化が見られる。一方、拘束圧の高い1.0MPa、2.0MPaの結果では、破壊前の応力レベルで若干、透水係数が変化するものの、破壊後も同じ透水係数のオーダーに留まっている。

上記のような岩石の違いによる異なる透水特性については、せん断時の力学特性に関連があるものと考えられる。破壊以前に透水係数が変化する低拘束圧条件下での凝灰岩は、透水試験を実施するせん断応力レベルで吸水状態にあり、正のダイレイタンスが生じており、見掛けの空隙が大きくなっているものと考えられる。一方、高拘束圧条件下での凝灰岩や泥岩（全拘束圧）は、透水試験時のせん断応力レベルにおいて排水状態で圧縮されており、せん断面以外の母岩が密実になっているものと考えられる。

したがって、透水係数の変化は、せん断時のダイレイタンス特性と破壊後のせん断面の形成に影響されるものと考えられる。

5. まとめ

堆積軟岩地盤を対象として、掘削に伴う地下空洞周辺岩盤の原位置での透水係数分布と岩石供試体による空洞掘削時の応力変化を考慮したせん断過程による透水係数の変化について検討した。その結果、原位置での空洞周辺岩盤では、空洞壁面近傍で透水係数の大きい領域が観測され、掘削時の変位計測に基づくゆるみ領域と整合することが確認された。また、同地点の岩石供試体による室内試験では、低拘束圧条件下で破壊時および残留状態で透水係数の顕著な増加が認められた。したがって、原位置での1.7m以浅の空洞壁面近傍では、空洞掘削時に破壊強度に抵触し、破壊に伴い透水係数が増加したものと考えられる。今後、原位置での空洞掘削と室内試験での環境条件の違いを考慮に入れながら、これらの関係を解明する必要があるものと考えられる。

謝辞

本研究におけるフローポンプ法透水試験の実施に当たっては、応用地質株式会社の亀谷裕志氏、岩本健氏の甚大なご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 吉川和夫, 宇野晴彦, 伊藤晋, 高倉望: 堆積軟岩中に掘削して13年経過した地下空洞周辺のゆるみ・風化領域調査, 土木学会, 第9回地下空間利用シンポジウム, 投稿中, 2004.
- 2) 谷智之, 池谷貞右, 小山俊博, 南将行, 日比野悦久: 短区間透水試験・蒸発量試験による坑道周辺岩盤の水理特性評価, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-7, 2003.
- 3) 宇野晴彦, 田坂嘉章, 石田毅, 水田義明, 工藤奎吾: 空洞掘削時挙動計測結果に基づく岩盤のゆるみ領域評価と解析手法, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.13-24, 2002.
- 4) 亀谷裕志, 徳永朋祥: フローポンプ透水試験における装置の貯留性の影響に関する研究, 資源と素材, Vol.119, No.8, pp.508-513, 2003.