第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
（社）土木学会　2009 年１月　講演番号 25

結晶質岩中の地下坑道掘削を対象とした グラウト効果に関する研究(2) － グラウト施工時の透水試験手法の改良 －

安藤賢一[1]*・竹内真司[2]・松井裕哉[2]・田中達也[1]・橋本秀爾[1]・藤井治彦[1]

[1]株式会社 大林組 土木技術本部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
[2]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
（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1－64）
*E-mail: ando.kenichi@obayashi.co.jp

地下空洞掘削時には，必要に応じ空洞内への湧水を抑制するためにグラウチングが実施される．一方，高レベル放射性廃棄物の地層処分では，グラウチングに用いるセメントが人工バリアに与える影響が重要視されている．本報ではセメントグラウトの浸透範囲や効果を把握・評価する手法の構築を主目的として，日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所で深度200mにおける坑道掘削時に実施したプレグラウチング領域に用いた，新たな透水試験手法の適用結果について報告する．ここでは，提案した透水試験手法が，ボーリング孔近傍において10^{-4}～10^{-9}m/s程度の幅の広い透水性を有する岩盤の透水係数を取得する上で有効な手法であることを示した．

Key Words : *grouting, hydraulic test, type curve, low permeable rockmass*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では，地下施設の建設時において，掘削した施設内に流れ込む地下水の湧水量や化学組成，および地下施設の建設が周辺の地下水環境へ及ぼす影響を確認しつつ，情報化施工を進めることが想定される．さらに，地下施設の建設時に多量の湧水に遭遇した場合のグラウチングなど，地下施設の周辺岩盤に工学的な対策を実施した場合には，対策後の岩盤の特性調査を実施し，工学的対策による岩盤への影響の程度を把握することも重要と考えられる．この影響の要素の一つが透水性であるが，グラウト材の注入後の分布状況と透水性の関係についての現場での測定事例は極めて少ない．

日本原子力研究開発機構は，経済産業省資源エネルギー庁の受託事業として，瑞浪超深地層研究所内の地下200mの横坑で，グラウチングの効果や影響を把握するための調査・評価技術の確立を目指した調査研究を実施した[1)]．本報告では，透水試験により，プレグラチング後の坑道周辺岩盤の透水係数などを取得するとともに，グラウチング時のルジオン試験で評価できない低透水性岩盤に対して，既存のグラウチングの工期，工費へ影響を大きく与えない範囲で透水性を概略評価する透水試験手法を提案，実施し，その適用性について確認した結果を示す．

2. 提案する透水試験手法

提案する透水試験手法は，10^{-4}～10^{-9}m/sまでの幅の広い透水性を有する岩盤を対象として，プレグラウチングの標準的な施工設備を活用，改良することで，岩盤の透水性（透水係数）を概略評価することを目標とする．透水試験の試験シーケンスを**図-1**に示す．主要な試験シーケンスは，水押し試験（降圧過程を省略した簡易ルジオン試験）と，水押し試験後に試験区間を閉鎖した圧力回復試験から構成される．水押し試験にて透水性が低いことが確認された場合には，圧力回復試験により取得する圧力の経時変化データを活用し，１ルジオン（透水係数で約1×10^{-7}m/s）を下回る岩盤の透水係数を評価する．

本透水試験は，通常のグラウチングの施工設備に対して，圧力回復試験を実施するためのシャットインバルブ

と，孔内の圧力を計測する計器（プレッシャーゲージ等）を送水ラインに追加することで，容易に実施可能であることが特徴である．さらに，圧力回復試験による取得データを現場で簡易に評価する手法について検討し，試験実施から概略の透水係数算定までを一連に実施する試験システムとすることも特徴である．

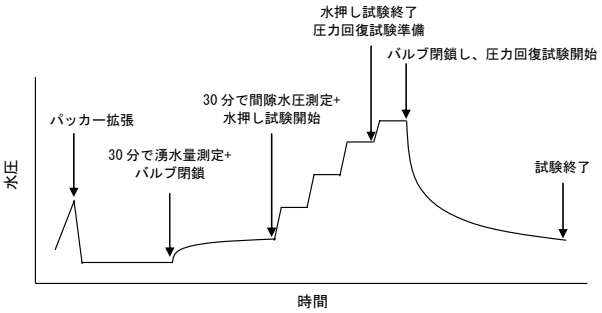

図- 1 試験シーケンス

3. 原位置での適用と結果

(1) 試験の目的と条件

本調査研究は，グラウチング後の避難所周辺岩盤の透水係数などを取得し，グラウチングに伴う岩盤への影響評価への基礎的なデータを提供することを目的とした．さらに，ルジオン値の評価が可能な水押し試験を試験シーケンスに含む，本透水試験手法を採用，実施し，試験対象区間のデータを取得するとともに，その適用性について検討した．

図-2 に本透水試験手法を適用したボーリング孔 10 孔の配置を示す．避難所は瑞浪超深地層研究所の深度 200 m レベルに掘削した水平坑道（予備ステージ）中央に位置し，掘削前にグラウチングされている [2]．地質は花崗岩であり，岩芯観察では，避難所北・主立坑側の側壁より 3m までの範囲でグラウトの浸透を確認した [1]．

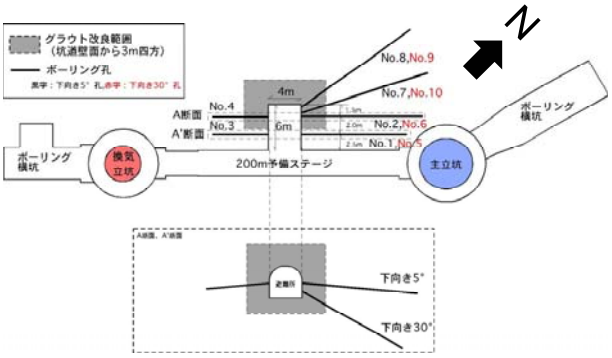

図- 2　グラウト改良範囲とボーリング孔の配置

1 区間あたりの試験時間は，グラウチングを含めた工事工程を考慮して 3 時間程度を目安とした．

(2) 試験区間の設定

試験点数は各孔 5 区間を目安に合計 40 区間とした．試験区間の設定は，上記の試験目的と試験条件に加えて，透水試験装置の仕様（パッカー長（1.0m），ロッド長（0.3，0.5，1.0m の組み合せで区間長を形成）等）を与条件として，以下の考え方で行なった．

① 岩芯観察で判明したグラウトの浸透領域を基準としその内外に試験区間を配置する．

② 結晶質岩中の地下水は限定された割れ目を流動経路とすることから，ボーリング掘削時の湧水量測定結果で確認した高透水性の割れ目を，異なる試験区間となるよう配置する [1]．

③ 避難所北・主立坑側のボーリングにて深度約 10m 以深に分布する強変質帯の透水特性の取得は，グラウチングの岩盤への影響を評価する観点からは重要度が低いことから，シングルパッカーによる長区間の測定とし，①での試験点数を増やす．

以上の考え方に基づき，避難所北では，グラウトの浸透領域内に区間長 1.8m の試験区間を少なくとも 1 点配置し，グラウト浸透領域外に変質帯を避けて，区間長 1.8m 又は 2.8m の試験区間を 3～4 点配置した．

(3) 試験手法

標準的な試験手順を**図-3** に，試験装置のシステム概要を**図-4** に示す．本試験で用いた試験装置では，グラウチング時に一般的に使用している機器と比較して，圧力データ取得記録頻度，圧力計測精度等に対して高い品質のデータが得られる機器（サンプリング間隔 1 秒，圧力計精度±0.1%（FS），分解能±0.005%（Fs））を用いた．それにより，本透水試験の目的を達成すると同時に，グラウチング機器にて本透水試験手法を適用する場合の品質上の留意点についても検討した．

透水試験期間中は，隣接するボーリング孔の口元にシングルパッカーを設置するとともに，パッカーで閉鎖される区間の圧力をモニタリングした．

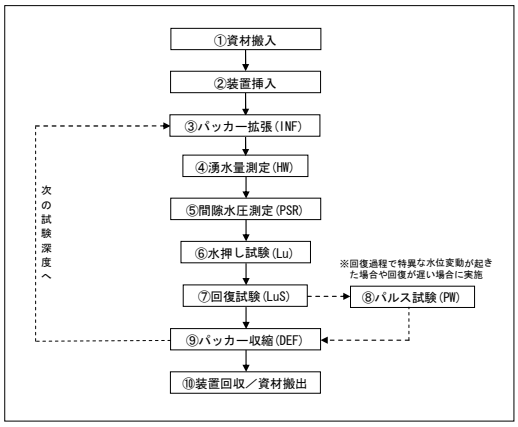

図- 3　試験手順

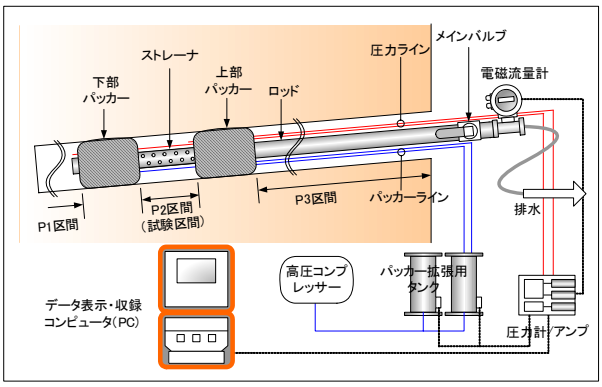

図- 4　試験装置のシステム概要図

(4) 評価手法

水押し試験では，ルジオン試験と同様に，3 段階の昇圧ステップ（初期間隙水圧に対して+0.3, +0.6, +1MPa）を加え，試験区間の有効圧力および単位長さあたりの注入流量を P-Q グラフにプロットすることで，換算ルジオン値を求めた．また，式(1)[3]を用いて透水係数を算出した．

$$k = \frac{\gamma_w q}{2\pi p} \cdot Ln(2L/D) \qquad 式(1)$$

k：透水係数（m/s）
q：単位長さ当たりの注水流量（$m^3/(s \cdot m)$）
L：試験区間長（m）
D：試験孔の孔径（m）
p：有効注水圧力（Pa）
γ_w：水の単位体積重量（Pa/m）

圧力回復試験では Agarwal 法 [4]を適用し，試験区間の圧力の時間変化データを，水位回復量と Agarwal の経過時間を片対数および両対数（圧力微分曲線）のグラフにプロットすることで式(2)，(3)及び(4)により，試験区間の透水量係数と貯留係数を算定した [4]．

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta Sr} \qquad 式(2)$$

$$S = \frac{2.25 \cdot T}{r_w^{\,2}} \cdot t_{equiv} \qquad 式(3)$$

$$t_{equiv} = \frac{t_p \cdot \Delta t}{t_p + \Delta t} \qquad 式(4)$$

T：透水量係数 (m^2/sec)
S：貯留係数 (-)
ΔSr：1 サイクル間における水位回復量 (m)
r_w：試錐孔半径 (m)
Q：平均流量 (m^3/sec)
t_{equiv}：Agarwal の経過時間(sec)
tp：積算注水量／平均注水量 (sec)
Δt：回復過程の経過時間 (sec)

(5) 試験結果

水押し試験による換算ルジオン値が 1 ルジオンを下回る試験区間は全 40 点中 16 点となった．水押し試験データから算出した透水係数と圧力回復試験データより算出した透水係数を比較して**図-5** に示す．圧力回復試験では，圧力変動の初期の時間で得たデータの勾配に基づく透水係数と，圧力変動の後期のデータを活用した透水係数の 2 つを整理している（詳細は(6)にて示す）．圧力回復試験の初期勾配の透水係数が水押し試験と近い結果となることが確認できる．

グラウトの浸透が確認された避難所北・主立坑側の透水係数の深度分布を**図-6** に示す．透水係数は 10^{-4}～10^{-9}m/s オーダーまで幅広く分布する．変質の程度が大きい深度 10m 以深では 10^{-6}～10^{-8}m/s と低い透水係数を示すが，その他の領域ではグラウト浸透領域およびそれ以外の領域でも同等の分布を示す．

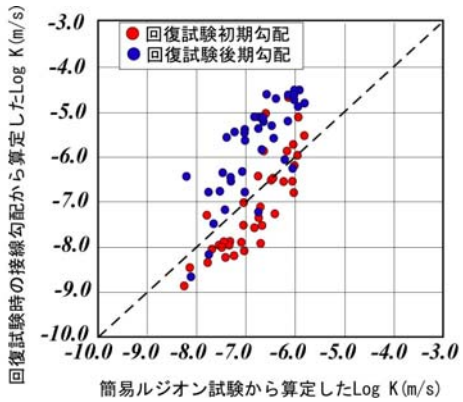

図- 5　水押し試験と圧力回復試験結果の比較

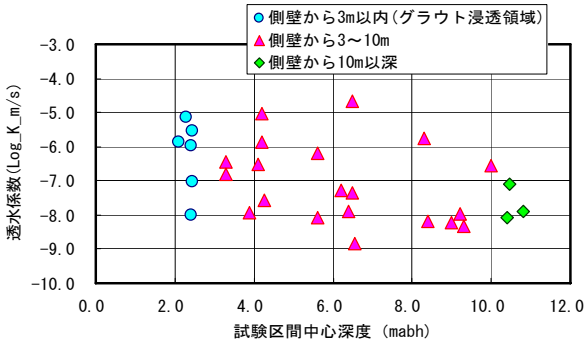

図- 6　避難所北の透水係数の深度分布

(6) 地下水の流動概念

a) 高透水区間

有効圧力が 1MPa の時の圧力回復データを利用することにより，試験区間周辺岩盤の地下水の流動概念について検討した．高透水性（K>10^{-7}m/s）を示した試験データの一例として，透水係数が 2.9×10^{-6}m/s（初期勾配）となるボーリング孔 No.2 の区間 1（試験 No.2-1）の圧力経時変化および圧力変化時間微分値の片対数および両対数

プロットを図-7 と図-8 にそれぞれ示す．

両図より，シャットイン後 5 秒程度までに井戸貯留の影響が確認できる．その後の圧力データは，岩盤の透水特性を反映した結果となる．図-7 のとおり，圧力データの勾配は前半部と後半部の 2 つに分類できる．他区間についても同様の結果が多く，上記の(5) 試験結果ではその両方の透水係数の算定結果を示した．図-8 の圧力変化微分値より，経過時間 10 秒付近にて，孔壁近くと遠方の特性が異なることを示すと思われる変曲点が明瞭に確認できる．また，経過時間 2000～3000 秒付近にて，定水圧の水理境界もしくは平衡水位への回復の影響が推察できる．初期勾配のデータは，ボーリング孔に近いグラウチングの影響等を含む岩盤領域の透水特性を反映していると考えられる．

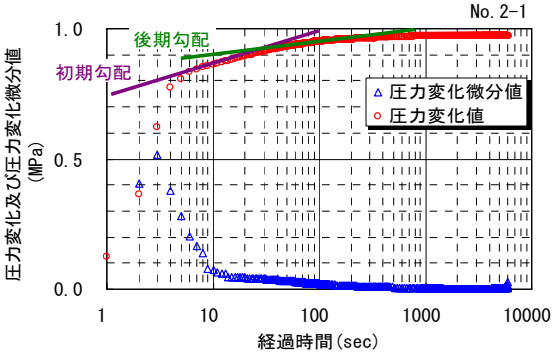

図- 7　圧力変化と圧力の時間微分（片対数プロット）

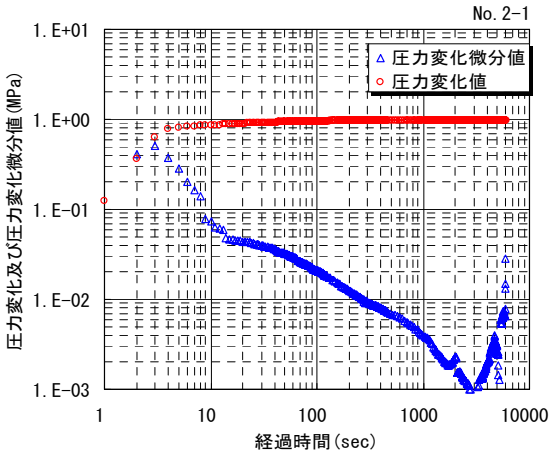

図- 8　圧力変化と圧力の時間微分（両対数プロット）

b）低透水区間

低透水性（K<10^{-7}m/s）を示した区間の一例として，透水係数が 4.6E-9m/s（初期勾配）となるボーリング孔 No.7 の区間 4（試験 No.7-4）の圧力経時変化および圧力変化時間微分値の片対数プロットおよび両対数プロットを図-9 と図-10 に示す．

低透水区間のデータでは井戸貯留の影響後の勾配が比較的明瞭であり，初期勾配と後期勾配に区分した場合にもその差が小さい．また，経過時間が 100 秒程度で平衡水位に達し，その後数 100 秒で定水圧の水理境界の影響が推察される．

透水性が小さいことに反して，短期間で平衡水位まで回復する要因として，高透水区間と比較して小さい貯留性を有することや，試験の影響半径（影響圏）が小さいことが推察される．井戸試験シミュレータ nSIGHTS[5]を用いて評価した対象母岩の水理特性は，透水係数が 9.2×10^{-10}m/s，比貯留係数が 1.0×$10^{-12}$$m^{-1}$，影響半径は 50m の定水圧境界となった（図-11）．

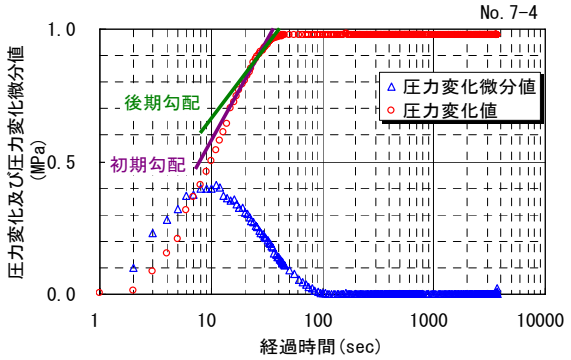

図- 9　圧力変化と圧力の時間微分（片対数プロット）

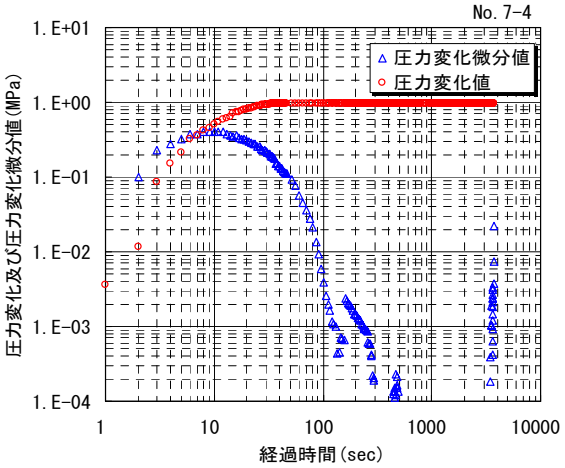

図- 10　圧力変化と圧力の時間微分（両対数プロット）

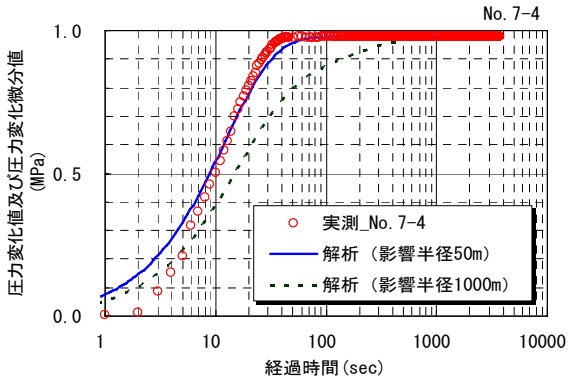

図- 11　井戸試験シミュレータによる解析結果

間隙水圧の測定結果を図-12 に示す．透水係数の大小に係らず，間隙水圧は 0.4MPa 以上となり，避難所坑壁

近傍でも高い圧力を維持している．

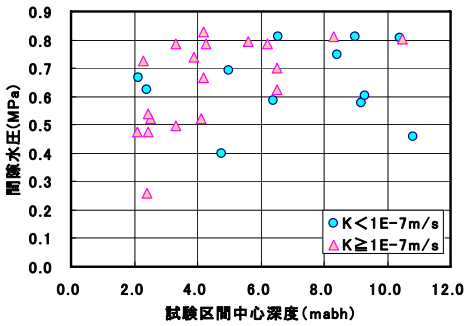

図- 12　間隙水圧の深度分布

有効圧力 1MPa の圧力回復試験により，高透水性の区間では高い透水性に加えて，広い影響領域が確認された．これにより，相互に連結性が大きい高透水性割れ目のネットワークが地下水の主要な流れ場を構成していることが推察される（**図-13**）．一方，透水性の低い割れ目は，その割れ目密度は高いものの，連結性が小さいことから，低透水性の区間では，試験に伴う影響半径や貯留性が小さい岩体の特性を示すことが推察される．避難所周辺岩盤を数十 m の評価スケールで表現する場合の流動概念を構築する上での根拠を提供するものである．

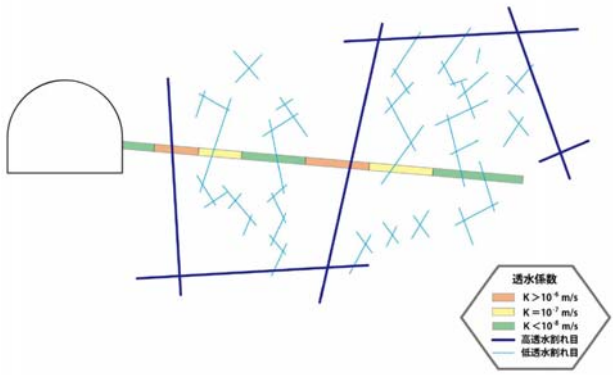

図- 13　避難所周辺の岩盤内の割れ目ネットワーク概念

(7) 低透水性岩盤での簡易的な評価手法

圧力回復試験のデータを用いて，現場にて簡易に透水係数を評価する試みとして，理論曲線の重ね合わせによる方法について検討した．

理論曲線は井戸試験シミュレータ nSIGHTS を用いて，**表-1** に示すパラメータで順解析により作成した．影響半径や境界条件は，(5)で整理した低透水性の試験区間の評価結果に基づいた．低透水性の結果を示した 3 点の試験区間の圧力回復データを用いて，作成した理論曲線への重ね合わせを実施した．結果を**図-14** に示す．**表-2** のとおり，理論曲線により透水係数の概略評価が可能であることが確認できた．

表- 1　理論曲線作成のパラメータ

パラメータ	単位	設定値
試験区間長	m	2.8
ボーリング孔半径	m	0.058
流れの次元	－	2
影響半径	m	20
境界条件	－	定圧境界
試験区間圧縮率	1/Pa	1.00E-10
試験開始時の有効圧力	MPa	1
透水係数	m/s	10^{-7}～10^{-10}
比貯留係数	1/m	10^{-6}～10^{-12}

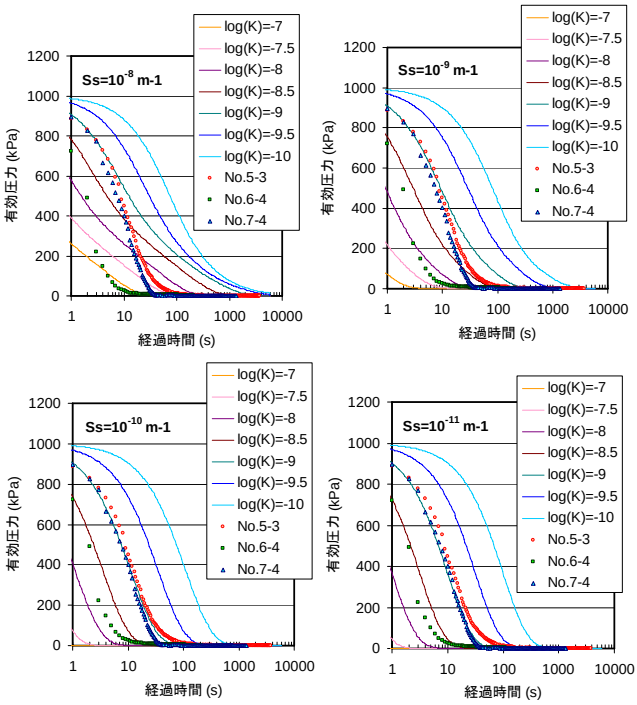

図- 14　理論曲線と実測値（3 点）の重ね合わせ

表- 2　解析的評価と理論曲線に基づく透水係数との比較

試験区間	解析的評価 Agarwal法初期勾配	理論曲線による概略評価	
		対応する理論曲線	透水係数(m/s)
No. 5-3	1. 4E-09	log(K)=-9	1. 0E-09
No. 6-4	6. 6E-09	log(K)=-8. 5	3. 2E-09
No. 7-4	4. 7E-09	log(K)=-9	1. 0E-09

4. まとめと課題

本報告では，グラウチング時のルジオン試験では評価できない低透水性岩盤に対して，工期や工費へ影響を大きく与えない範囲で透水性を概略評価する手法として、プレグラウチングの標準的な施工設備を活用・改良した透水試験方法及び圧力回復試験による取得データを現場

で簡易に評価する手法を提案した．ここで得られた主な知見を以下に整理する．

1）提案した手法を適用することにより，グラウト材の分布に応じた岩盤の透水係数が取得できることが分かった．さらに孔近傍のグラウチングの影響を含む領域とその周辺領域の岩盤の透水性が短時間で把握できる見通しを得た．なお，より高品質なデータ取得を想定した透水試験を実施する場合には，試験時間を長くとり，パルス試験，湧水試験と圧力回復試験，定流量試験と圧力回復試験等，複数の試験を予定し，試験区間の透水性を確認しつつ最適な手法を適用する必要がある[6]．

2）グラウチングを想定した場合には，提案した手法を適用することで，工程に大きな影響を及ぼさず，かつ，施工設備を大きく変更せずに，1 ルジオン以下の低透水性の岩盤の透水係数を概略計測することが可能と考えられる．課題としては，圧力回復時のデータ記録頻度を多くする（約 1 秒毎）ことが必要であり，計測機器の選定時に考慮が必要と考えられる．また，理論曲線を用いた重ね合わせ手法については，1 オーダー以内の精度で評価できる見通しを得たが，理論曲線は汎用のものではなく，試験孔の仕様，試験区間長の他，水理的な影響半径等の水理特性を考慮した地点毎の作成が必要である．現場での適用には，グラウチングの初期段階に調査担当者とモデル化解析担当者が連携する期間を設け，当該地点の理論曲線を作成することが必要である．

さらに，本試験では，亀裂性岩盤を対象として 1.8～2.8m の短区間の圧力回復試験データを複数点取得した．それらの圧力回復試験データを利用し，フローモデルに関する検討を実施することで，岩盤の評価スケールを数十 m とする地下水流動の概念構築に資する情報を得ることができた．推定した割れ目ネットワークの概念に対して，異なる調査により得た，地質学的，水理学的な情報を考慮した総合的な評価を実施するとともに，割れ目ネットワークを考慮したモデル化がグラウトの影響評価に有用となるかの検討が必要と考えられる[7]．さらに，このようなアプローチは放射性廃棄物の地層処分で対象とする深部岩盤の地下水流動場の理解および地下水流動概念モデルの構築に適用できるものと考える．

参考文献

1) 松井裕哉，田中達也，藤井治彦，竹内真司，弥富洋介，杉原弘造: 結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2009（投稿中）.

2) 松井裕哉，見掛信一郎，竹内真司，野田正利: 瑞浪超深地層研究所の深度 200m レベルにおけるプレグラウトの概要, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, pp.783-784,2008.

3) (社)地盤工学会 :地盤調査の方法と解説，pp.438-447, (社)地盤工学会，2004.

4) Agarwal,R.G.: *A New Method to Account for Producing Time Effects When Drawdown Type Curves are Used to Analyze Pressure Buildup and Other Test Data*, paper SPE9289, 55th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, Sep.21-24,1980.

5) 橋本秀爾，田中達也，安藤賢一，竹内真司，三枝博光，金亨穆: 単孔式の水理試験による透水特性パラメータの評価手法に関する研究, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp419-424，2007.

6) 竹内真司，中野勝志，平田洋一，進士喜英，西垣誠: 深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法の開発と適用, 地下水学会誌, 第 49 巻第 1 号，pp17-32, 2007.

7) 田中達也，松井裕哉，橋本秀爾，安藤賢一，竹内真司，三枝博光: 結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究(3) プレグラウトによる湧水抑制効果の数値解析的検討, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2009（投稿中）.

STUDY ON GROUTING PERFORMANCE IN THE MIZUNAMI UNDERGROUND RESERCH LABORATORY
-MODIFICATION AND APPLICATION OF HYDRAULIC TEST FOR GROUTING-

Kenichi ANDO, Shinji TAKEUCHI, Hiroya MATSUI, Tatsuya TANAKA, Shuuji HASHIMOTO and Haruhiko FUJII

Evaluation of the effect of grouting on the geological environment is important for quality control of the construction of underground facilities. Step-up injection test has been commonly used to estimate the hydraulic characteristics for deciding necessity of grouting. The aim of this study is to develop a hydraulic test method which can be applied to obtain hydraulic conductivities of low permeable rockmass (e.g. 10^{-7}-10^{-9}m/s) during grouting. The proposed hydraulic test method with test sequences of water injection and pressure recovery has been carried out in Mizunami URL. The developed type curve matching methodologies have been applied to evaluate hydraulic conductivity in-situ in a simple manner. Lessons learned for future application for grouting have been addressed.