

# 溶液型グラウト材料の浸透性に関する室内実験と解析的評価

杉山 博一 米山 一幸  
(技術研究所) (技術研究所)

## Experimental and Numerical Evaluation of the Permeability of Silica Sol

by Hirokazu Sugiyama and Kazuyuki Yoneyama

### Abstract

The permeability of silica sol to narrow rock fracture and low permeable sand layer was studied by means of laboratory tests and numerical analysis. Parallel plate tests and sand column tests were conducted to evaluate penetrability of silica sol. Particle size distribution tests revealed that the silica sol was comprised of particles which were larger than the aperture of the rock fracture or the void diameter of sand, and clogging may have reduced the penetration length of silica sol. The measured penetration lengths were properly reproduced by the flow analysis which took into account the variations in the viscosity over time and the permeability reduction by clogging of grout particles.

### 概要

微細な岩盤亀裂や細粒分の多い砂地盤を対象とした止水グラウトとして溶液型グラウト材料に着目し、その適用性を浸透実験で評価するとともに、解析モデルによる再現を試みた。溶液型グラウトの粒度分布測定を行ったところ、岩盤亀裂の開口幅や地盤の間隙孔径分布よりも大きな粒子が存在し、それが目詰まりすることにより流量低下が生じる可能性があることが判明した。この大きな粒子を事前にふるいで取り除いて浸透実験を行ったところ、浸透性が大幅に改善する効果があることが分かった。また、グラウト粘度の時間変化と目詰まりによる浸透率低下をモデル化した浸透流解析により室内浸透実験のグラウト浸透長が適切に再現され、予測評価手法としての有効性が示された。

### §1.はじめに

地下水の豊富な我が国において、大深度トンネルやLPG地下備蓄施設等のエネルギー貯蔵施設、さらに将来の高レベル放射性廃棄物処分施設を大深度地下岩盤に掘削する場合には、掘削作業の安全性、周辺地下水への環境影響、施設の機能確保等の観点から湧水を抑制することが望ましい。

高レベル放射性廃棄物等の地層処分の分野では、地下坑道の施工時、および操業時にわたって湧水量が厳しく制限されるため、地下深部の高水圧環境下に対応できるグラウト技術の開発が進められている。具体的には、微細な岩盤亀裂に対して注入可能で、かつ岩盤への影響が少なく、耐久性の高いグラウト材料が求められており、低アルカリ性セメントグラウト(超微粒子セメントグラウト)、超微粒子球状シリカグラウト、溶液型グラウトを対象とした研究<sup>1)</sup>が行われている。

また近年、首都圏に大深度地下トンネルを構築す

る計画があるが、その多くは土丹と呼ばれる固結シルト層が主な掘削対象地盤となっている。土丹は堆積過程で介在砂層と呼ばれる数cm～数10cm程度の砂層を何層が挟んでおり、介在砂層は土丹に比べてトンネル掘削時の安定性に乏しいため、止水改良、あるいは強度改良が求められている。介在砂層は一般的な砂層に比べて細粒分を多く含むために透水性が低く、セメント系グラウト材料を用いての注入は困難であるとされ、薬液タイプの注入材の検討が行われている<sup>2)</sup>。しかし、薬液系グラウト材料は一般的に耐久性が低く、長期止水性に問題が生じる可能性が高い。

筆者らは、微細な岩盤亀裂や地盤の間隙への浸透性が高く、耐久性に優れるコロイダルシリカを主材料とする溶液型グラウト<sup>3)</sup>に着目し、岩盤亀裂や、透水性の低い砂地盤を対象とした浸透性に関する実験的評価を行った<sup>4),5)</sup>。また、ゲル化に伴うグラウト粘度の上昇を考慮したグラウト浸透挙動をシミュレーションするため浸透解析を行った<sup>5),6)</sup>。その結

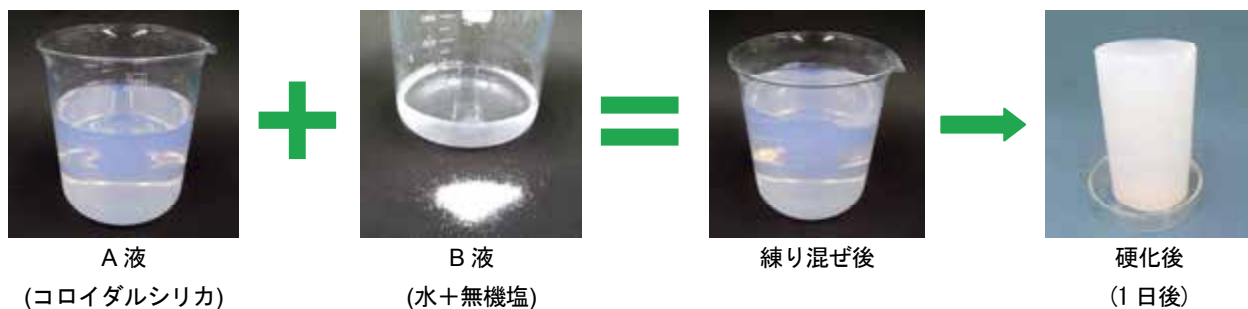


図-1 溶液型グラウト材料の配合状況

表-1 溶液型グラウトの基本配合

		A 液		B 液		合計
		コロイダルシリカ	硬化促進材 (KCl)	工業用精製水		
基本配合	(g)	970.4	14.7	192.7	1177.8	
	(mL)	800.0	7.3	192.7	1000.0	
リファレンス配合	(g)	970.4	—	192.7	1163.1	
	(mL)	800.0	—	192.7	992.7	

果、溶液型グラウトはナノ(nm)オーダーのコロイダルシリカが主材料であるにも関わらず、マイクロ( $\mu\text{m}$ )オーダーの岩盤亀裂や地盤の間隙を通過せずに、解析より得られた浸透量よりも低い結果となった。しかしながら、上記の研究ではその原因を十分に検証できていなかった。そこで、本研究では、溶液型グラウトの粒度分布と、岩盤の開口亀裂幅や地盤の間隙孔径との関係を検証し、浸透量が低下した原因について検証する。次に、その結果に基づく浸透性の改善方法を提案するとともに、その効果について検証した。さらに、グラウト浸透長の予測手法として、グラウト粘度と目詰まりを考慮したモデルによる浸透解析手法を検討し、予測手法としての有効性を検証する。

なお、活性シリカコロイドを用いた溶液型グラウトは特殊な材料であり、現段階では名称が統一して使用されていない。商品名としての恒久グラウトや、材料分類としての活性シリカコロイド系溶液型グラウト、あるいは特殊シリカ系溶液型グラウトと記述されることもあるが、本論文では溶液型グラウト(あるいは単にグラウト)と記す。

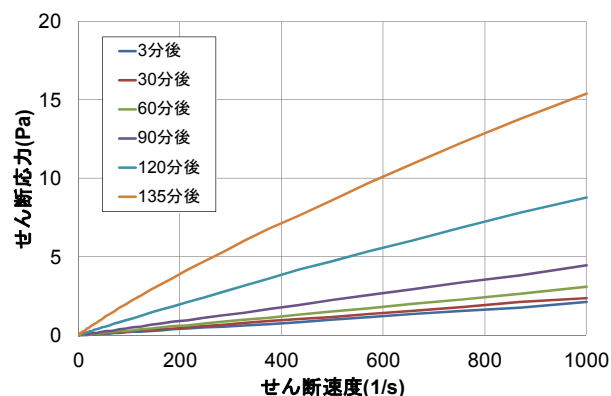


図-2 溶液型グラウトのレオロジー特性 (せん断速度とせん断応力の関係)

## §2.室内浸透実験

### 2.1 溶液型グラウト材料

溶液型グラウトは、水ガラスのNaをイオン交換で取り除き、さらに平均粒径を10~20nm程度に増粒したコロイダルシリカが主成分である。コロイダルシリカ表面のシラノール基群は(OH<sup>-</sup>)の陰電荷を示して互いに反発するため、安定したゾルの状態を保っているが、これに無機塩を加えるとコロイドの外側にある電気二重層が破壊され、シラノール基の間で縮重合が起こり、ゲルを生成する。図-1に溶液型グラウト材料の配合状況を示す。また、表-1に溶液型グラウトの基本配合を示す。溶液型グラウトは硬化促進材(塩化カリウム)の添加量に応じて硬

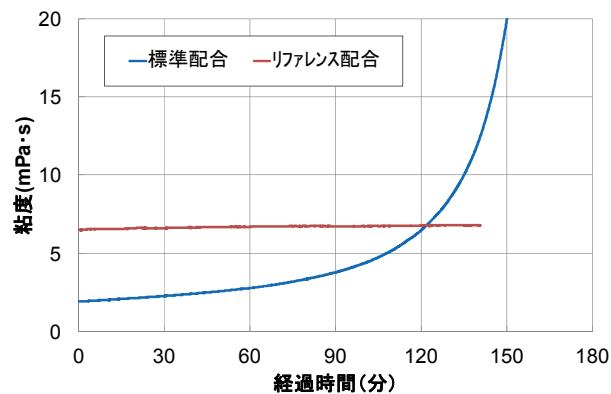


図-3 グラウト粘度の経時変化

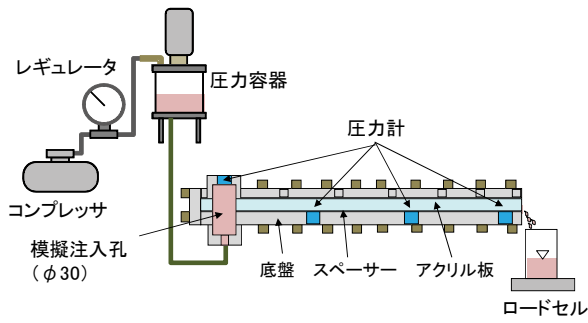


図-4 岩盤亀裂への浸透実験の全体模式図

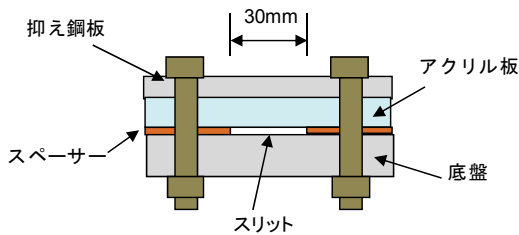


図-5 浸透一般部の断面図

化速度を調整することができる材料である。本研究では施工性を考慮して、ゲルタイム(粘度が  $20\text{mPa}\cdot\text{s}$  に達する時間)が 150 分程度となるような配合とした。

図-2に溶液型グラウトのレオロジー特性として、高精度のレオメーター(Anton-Paar 社、Physica MCR-301)を用いて所定の時間ごとに測定したせん断速度とせん断応力の関係を示す。図から分かる通り、溶液型グラウトはゲルタイムに達するまでの 120 分間はニュートン流体であると評価できる。なお、本測定装置では粘度を計測するのに数分を要するため、より簡易に粘度を測定するために音叉型振動式粘度計(A&D 社、SV-10)を用いてリアルタイムに溶液型グラウトの粘度を測定した。図-3に配合後の時間経過に伴う粘度変化の測定結果を示す。なお、後述の介在砂層を対象とした浸透実験では目詰まりを起こさないグラウトとしてリファレンス配合を用いており、表-1、および図-3に併せて示してある。

## 2.2 岩盤亀裂を対象とした浸透実験

微小な岩盤亀裂へのグラウトの浸透性を評価するため、平行平板で亀裂を模擬したスリットへの浸透実験を行った。浸透実験装置の全体模式図を図-4に示す。ボーリング孔を想定した模擬注入孔から岩

表-2 岩盤亀裂への浸透実験結果(浸透の可否)

スペーサーの厚さ ( $\mu\text{m}$ )	水理学的亀裂開口幅 ( $\mu\text{m}$ )	練り混ぜ後 経過時間			
		3分	30分	60分	90分
100	95	—	○	—	—
50	45	—	○	—	—
38	34	○	○	○	○
23	18	×	×	△	×
12	6	—	×	—	—



写真-1 スリット内でゲル化した溶液型グラウト

盤亀裂を模擬したスリットにグラウトを浸透させる形式となっており、スリットの長さは  $1000\text{mm}$  となっている。図-5の断面図に示すようにアクリル板と底盤の間に幅  $30\text{mm}$  離してスペーサー(ポリエチレンフィルム)を挟み込み、このスペーサーの厚みを変えることによって亀裂開口幅が調節できるものとなっている。

実験では、所定の厚みに調整したスリットに溶液型グラウトを加圧( $0.5\text{MPa}$ )して浸透させ、スリット終端から出てくるグラウト重量を計測することにより浸透性を評価した。溶液型グラウトは前述のとおり時間経過とともに粘度が上昇するため、練り混ぜ後 3分、30分、60分、90分経過した状態での浸透性も確認した。

表-2に実験結果として、スリット終端までグラウトが通過できたか否かの判定結果を示す。なお表には、グラウトを浸透させる前に実施した水押し試験から求めた水理学的亀裂開口幅が示しており、この値が実際の亀裂開口幅であると考えている。表から分かる通り、 $34\mu\text{m}$ 以上の亀裂開口幅であれば溶液型グラウトは通過できたが、 $18\mu\text{m}$ 以下になると写真-1に示すようにスリット内でゲル化による目詰まりが発生し、浸透しない結果となった。

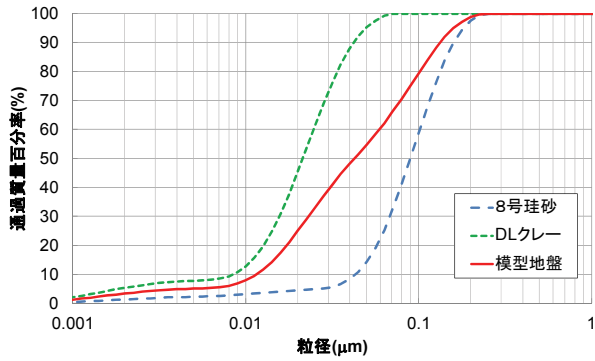


図-6 模型地盤の粒度分布

表-3 模型地盤の諸元

項目	値
最大粒径 (mm)	0.250
60%粒径 (mm)	0.059
50%粒径 (mm)	0.043
30%粒径 (mm)	0.023
10%粒径 (mm)	0.012
均等係数	4.9
細粒分含有率 $F_c$ (%)	68
土粒子密度 ( $g/cm^3$ )	2.642
最大密度 ( $g/cm^3$ )	1.707
最小密度 ( $g/cm^3$ )	1.128

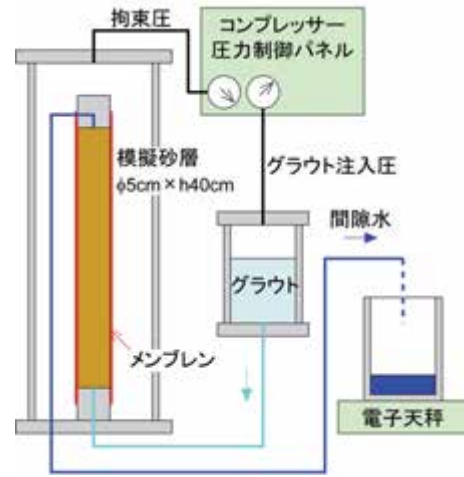


図-7 浸透実験装置の全体模式図

表-4 浸透実験の条件

実験 ケース名	地盤条件			グラウト条件	
	乾燥密度 ( $g/cm^3$ )	間隙率 $\phi$ (%)	透水係数 K(m/s)	グラウト 種類	注入圧 (kPa)
G300-1	1.553	41.2	$1.3 \times 10^{-6}$	基本 配合	300
G300-3	1.613	38.9	$7.9 \times 10^{-7}$		
R300	1.561	40.9	$1.2 \times 10^{-6}$	リファレンス 配合	

### 2.3 介在砂層を対象とした浸透実験

介在砂層を対象としたグラウトの浸透実験を行った。介在砂層は細砂が主体であるが、浸透実験ではより厳しい透水条件とするため、細砂(8号珪砂)とシルト(DLクレー)を重量比1:1で混合したものを模型地盤の材料として用いた。図-6にレーザー回折式粒度分布測定機により測定した模型地盤の粒度分布を示す。また、表-3に粒度分布測定結果から得られた粒度特性と、土粒子密度、および最大・最小密度試験の結果を示す。

図-7に介在砂層を対象とした浸透実験装置の全体模式図を示す。模型地盤は、三軸試験の負圧法と同様の手順で、直径5cm×高さ40cmのモールドにメンブレンを設置した後、乾燥状態の模型地盤材料を10層に分けて突き棒で締固めて作成した。なお、最下層(注入側)には模型地盤の流出防止と、グラウトの目詰まり防止を目的として、8号珪砂より粒径の大きい豊浦砂を1cm程度撒きだしてある。

模型地盤を脱気水で飽和させた後、地下40m相当の有効拘束圧として400kPaを作用させて圧密排水を行い、排水量から供試体の乾燥密度の補正を行った。次に、変水位透水試験を行って模型地盤の透水係数を求めた。表-4に圧密後の地盤条件(乾燥密度、間隙率と透水係数)と、浸透実験の条件を示す。実験

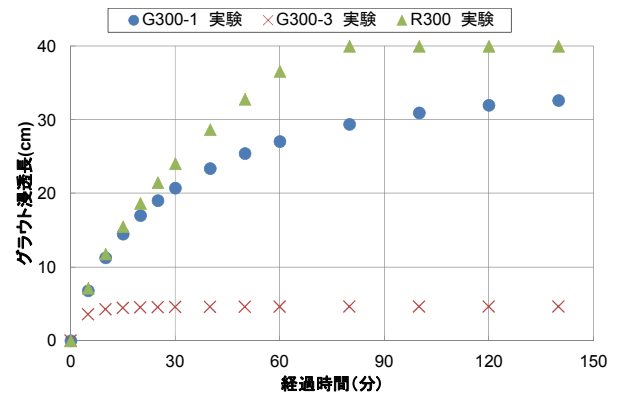


図-8 グラウト浸透実験の結果  
(グラウト浸透長の経時変化)

名 G300-1、および G300-3 は、地盤の透水係数が異なる条件で、基本配合の溶液型グラウトを圧力300kPaで浸透させる実験を行ったものである。また、実験名 R300 は、グラウト粘度が時間変化せず、また目詰まりが起こらない条件でグラウトを浸透させる実験であり、コロイダルシリカを水で希釈しただけのリファレンス配合のグラウトを浸透させた。

図-8に浸透実験での注入開始後からの経過時間とグラウト浸透長との関係を示す。グラウト浸透長は、一定時間ごとに模擬砂層から排水される間隙水

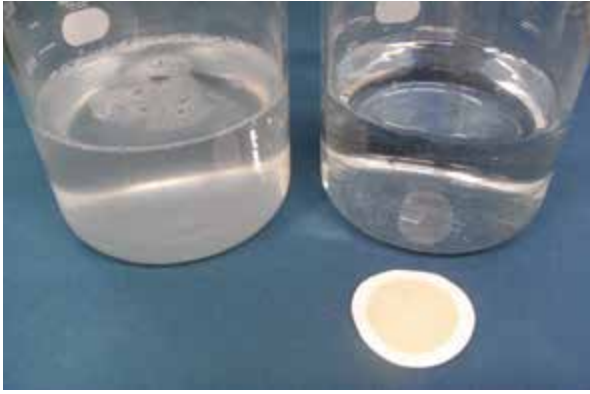


写真-2 B液(左;ろ過前、右;ろ過後)

の重量から体積を求め、供試体の断面積と模型地盤の間隙率 $\phi$ で除して算定した。まず透水係数が $10^{-6}$ m/s オーダーのG300-1は、30cm程度浸透したもののグラウトは全通しなかった。これがグラウト粘度の上昇によるものか目詰まりによるものか不明である。また、透水係数が $10^{-7}$ m/s オーダーのG300-3はグラウトが約5cm浸透したところで停止しており、これはほぼ目詰まりが原因と思われる。一方、粘度の時間変化やゲル化しないグラウト(リファレンス配合)を浸透させたケース(R300)では、浸透距離の増加に伴い浸透速度は遅くなるものの、供試体を全通する結果となった。R300の模型地盤の密度や透水係数はG300-1とほぼ同程度であるため、G300-1ではグラウトの目詰まりによる浸透量の低下があったものと推察される。

### §3.浸透量の低下原因と浸透性向上方法の検討

2種類の浸透実験における溶液型グラウトの浸透量低下の原因を詳細に検討するため、溶液型グラウトの粒度分布測定と、模型地盤の間隙孔径分布測定を行った。また、その結果に基づいて発想した浸透性向上方法の検討を行った<sup>7)</sup>。

#### 3.1 溶液型グラウト材料の粒度分布

溶液型グラウト材料はナノ(nm)オーダーのコロイダルシリカが主材料であるため、それらを測定できる動的光散乱方式の測定機(Malvern社、ゼータサイザーナノ、測定可能範囲0.6nm~6 $\mu$ m)を用いて粒度分布を測定した。しかし、グラウト配合中に粗粒分が含まれる可能性が高いため、マイクロ( $\mu$ m)オーダーの粒径が測定できるレーザー回折式の測定機(セイシン企業、SKレーザーマイクロサイザーLMS-2000e)、測定可能範囲0.2~2000 $\mu$ m)による計

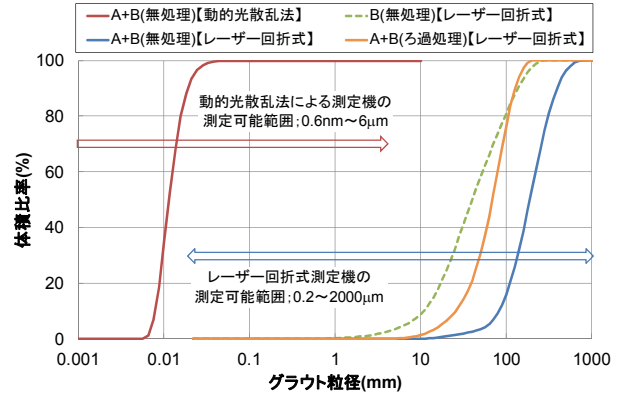


図-9 溶液型グラウトの粒度分布

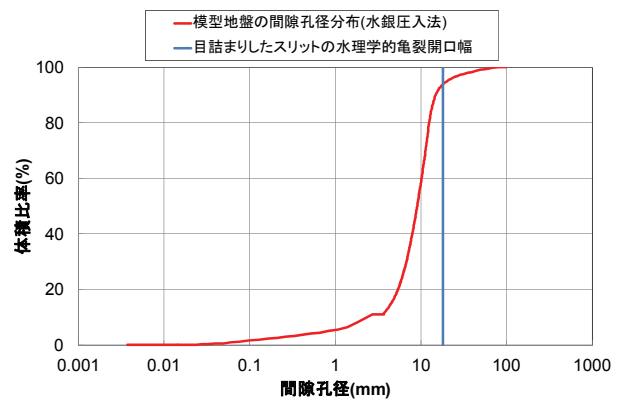


図-10 模型地盤の間隙孔径分布

測も併せて実施した。

また、硬化促進材(塩化カリウム)に不純物が含まれていることを疑い、試験的にろ紙(保留粒子径0.45 $\mu$ m)によるろ過処理を行ってみたところ、写真-2に示すような不純物が確認され、これらが目詰まりを起こす物質となっている可能性が示唆された。そこでB液単体の粒度分布を確認するため、レーザー回折式測定機による計測も実施した。なお、B液の塩化カリウム濃度(7.6g/100mL)は、水への溶解度(34.0g/100mL、20 $^{\circ}$ C)より下回っていることを確認している。

また、B液に含まれる不純物がグラウト中に粗粒分を含む結果となることを排除するため、前述のろ過処理したB液でグラウトを配合し、そのグラウトの粒度分布をレーザー回折式測定機で測定した。

図-9に粒度分布測定結果を示す。まず、A液とB液(無処理)を2種類の測定機で測定したものを比較する。両者とも同じグラウトでありながら全く違う結果が得られており、測定範囲外の粒径のものが検出されていないことが分かる。現段階では、広範囲



の粒度分布を一度に測定することはできないが、溶液型グラウトを目開き 25 $\mu\text{m}$  のふるいに通過させてもほとんど残らないことから、基本的には動的光散乱方式で測定される 10~20nm 前後の粒径が主体であり、レーザー回折式測定機で検出されている 10 $\mu\text{m}$  以上の粗粒分は微量であると考えている。また、ろ過した B 液で作液したグラウトは、無処理の B 液で作液したグラウトよりわずかに粒径が小さくなったが、依然として 10 $\mu\text{m}$  以上の粒径のものが含まれている。つまり、溶液型グラウトに存在する粗粒分は、B 液に含まれる不純物の影響もあるが、配合時に生成される微量のゲルが検出されたものと考えられる。

### 3.2 間隙孔径の計測

模型地盤の間隙孔径分布を把握するため、水銀圧入法により計測した。試験結果を図-10 に示す。計測時の地盤条件は、乾燥密度が 1.41g/cm<sup>3</sup>、間隙率は 46.8% であり、浸透実験の模型地盤の密度よりも少し緩い条件である。図から分かる通り、模型地盤の間隙孔径は 9 $\mu\text{m}$  を平均としたマイクロ( $\mu\text{m}$ )オーダーの部分に分布している。

また、図には、岩盤亀裂を模擬した浸透実験においてグラウトが目詰まりした亀裂開口幅(18 $\mu\text{m}$ )も併せて示した。

### 3.3 目詰まり原因と浸透性向上方法の検討

図-9 と図-10 を比較すれば分かる通り、溶液型グラウトは大部分がナノ(nm)オーダーの粒子であるが、10 $\mu\text{m}$  以上の粗粒分が微量含まれているために浸透実験においてそれらが目詰まりを生じ、浸透性が低下したと判断できる。この結果を踏まえ、溶液型グラウトに含まれる微量の粗粒分をあらかじめ取り除いておけば、さらなる浸透性の向上が期待できると考えた。そこで、試験的に 32 $\mu\text{m}$  のふるいでろ過処理したグラウトを図-6 と同じ方法で浸透させる実験(ケース名; S300)を実施した。ちなみに、地盤条件は、乾燥密度 1.554g/cm<sup>3</sup>、間隙率 41.2%、透水係数  $6.1 \times 10^{-7} \text{m/s}$  である。図-11 に実験結果を示す。比較のため、模型地盤の密度や透水係数が同等で、ろ過処理していないグラウトを浸透させた G300-3 の実験結果を併せて示す。図から分かる通り、事前のろ過処理により浸透長が大幅に向上していることが分かる。

今回は試験的に 32 $\mu\text{m}$  のふるいを用いたが、さらに細かいふるいでろ過処理することにより浸透性が向上することが期待される。なお、目開き 10 $\mu\text{m}$  のふるいによるろ過処理も行ってみたが、水でも自

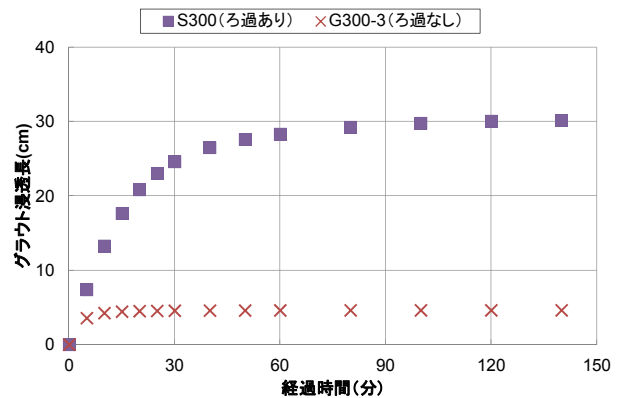


図-11 グラウトのろ過処理の有無による浸透実験結果の比較

然流下しないほどろ過効率が悪い。小さいふるいでろ過する場合には圧力をかけるなどの工夫が必要であろう。

## §4. グラウト浸透挙動の数値解析

溶液型グラウトの注入設計をする上で、グラウト注入範囲を精度良く予測できる解析技術が必要である。特に、溶液型グラウトは粘性が経時変化する材料であり、また、前節に示したように、粗粒分を含む場合は目詰まりによる浸透性の低下が生じる可能性がある。そこで、本節ではこれらのモデルを組み込んだ浸透流解析プログラムを新たに開発し、前述の介在砂層を対象とした浸透実験の結果の再現解析を実施し、その妥当性の検証を行った。

### 4.1 解析手法

グラウト材料として用いたコロイダルシリカは水と混和性を有し、飽和地盤へ注入した場合、地下水と明瞭な境界面を形成せずに地盤中を浸透する。このため、解析ではグラウト材料と水を混合流体としてモデル化し、その流動は次式に示す混相流のダルシー則に従うものと仮定した。

$$q = \frac{k\rho_m}{\mu_m} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

$$\rho_m = c\rho_g + (1-c)\rho_w \quad (2)$$

$$\mu_m = c\mu_g + (1-c)\mu_w \quad (3)$$

ここで、 $q$  は単位断面積当たりの流量、 $p$  は圧力、 $x$  は流動方向の座標、 $c$  は混合流体中のグラウト材料の

質量当量( $0 \leq c \leq 1$ )である。 $\rho$ 、 $\mu$ は流体の密度と粘度であり、添字の  $g$ 、 $w$ 、 $m$  は、それぞれグラウト、水、混合流体を示す。また式(1)の  $k$  は浸透率と呼ばれる地盤固有の物性値であり、水以外の流体に拡張されたダルシー則で用いられる。浸透率  $k$  と、地盤の透水性評価で一般的に用いられる透水係数  $K$  との間には、次式の相関がある。

$$k = \frac{\mu_w}{\rho_w g} K \quad (4)$$

ここで、 $g$  は重力加速度を示す。

式(1)~(3)において、圧力  $p$  とグラウト質量当量  $c$  を基礎変数とし、グラウトおよび水の質量保存則に基づく連立方程式を解くことにより、各変数値が求められる。グラウト材の粘度  $\mu_g$  は、図-3に示す測定結果を多項式でフィッティングして時間  $t$  の関数として定義することにより経時変化をモデル化する。 $\mu_g$  が  $t$  の関数となるため、式(1)は時間  $t$  に対して非線形な方程式となる。

解析は1次元の非定常浸透流解析とし、解析ツールとしては TOUGH2 / EOS11 を用いた<sup>8),9)</sup>。TOUGH2 は積分差分法(IFDM)による汎用型多相流解析プログラムであり、EOS11 は TOUGH2 用の状態方程式モジュールで、粘度の経時変化を伴う流体をモデル化することができる。

#### 4.2 解析モデル

解析モデルの概念図を図-12に示す。図-7に示す模型地盤(直径 5cm × 高さ 40cm)を解析対象領域とし、1次元の差分要素を用いて全体を 200 要素に分割した。室内浸透実験の試験ケースに対応し、表-4に示した間隙率  $\phi$  と透水係数  $K$  から求めた浸透率  $k$  を各要素に設定した。モデルの下端(流入側)と上端(排水側)は等圧境界とした。

初期状態では全要素とも水飽和( $c=0$ )とし、圧力は静水圧分布とした。時刻  $t=0$  よりモデル下端から圧力 300kPa でグラウト材( $c=1$ )を注入し、グラウト浸透範囲の変化を計算した。

#### 4.3 実験結果と解析結果の比較

供試体下端からのグラウト浸透距離の経時変化の実験結果との比較を図-13に示す。

基本配合のグラウトを浸透させた実験(G300-1 と G300-3)では供試体内で浸透停止しているのに対し、解析では供試体を全通する結果となっており、グラウト浸透挙動が粘度の経時変化のみでは説明できないことがわかる。また、初期の浸透率が小さい G300-3 の方が実験と解析の乖離が大きいことから、

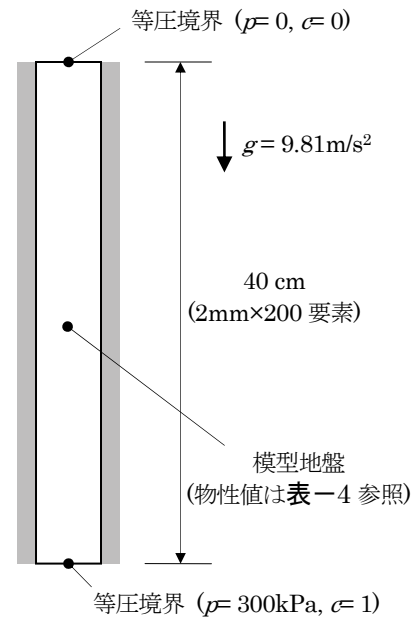


図-12 解析モデル

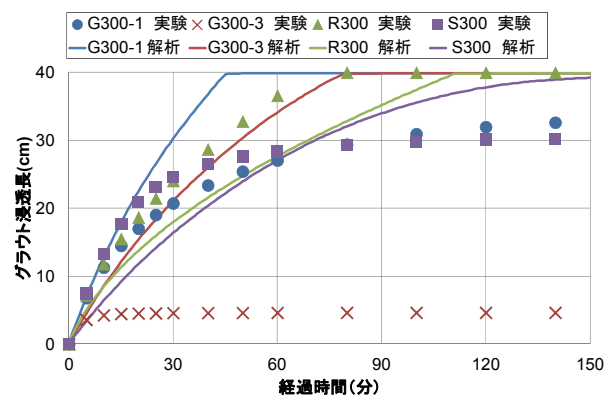


図-13 浸透実験と解析結果の比較

目詰まりによる浸透率低下は低透水性の地盤でより顕著になることが予想され、これは、地盤中の間隙孔径の平均寸法が小さいことに起因すると考えられる。

ろ過したグラウトを浸透させた実験(S300)では、注入後の初期段階では解析結果が実験結果を下回るが、注入開始から約 60 分後に逆転し、実験結果ではそれ以降、浸透があまり進展していない。実験と解析の変化傾向が異なるために判断が難しいが、実験結果における 60 分以降の浸透挙動では、無ろ過のグラウト材を用いたケースと同様に、目詰まりによる浸透性の低下が生じていることが推察される。注入初期の浸透距離が解析による予測を上回る原因は、現段階では不明であり、今後検討する予定である。

一方、目詰まりを起こさせないようにリファレンス配合を浸透させた実験(R300)では目詰まりによる浸透低下は生じていないが、解析による予測値を一貫して上回っている。原因は不明であるが、溶液型グラウトが模型地盤中の塩分と反応することにより粘度が低下し、浸透速度が上昇している可能性が考えられる。

以上の結果、溶液型グラウトの浸透挙動の予測評価においては、地盤やグラウト配合などの条件により、グラウト中の粗粒分の目詰まりによる浸透率低下の影響を考慮する必要があることが示された。

#### 4.4 目詰まり効果のモデル化の検討

前項の検討より、溶液型グラウトの浸透挙動の予測評価においては、地盤やグラウト配合など条件により、グラウト材中の粗粒分の目詰まりによる浸透率低下の影響を考慮する必要があることが示された。ここでは、浸透流解析による予測解析手法において、目詰まり効果をモデル化する方法について検討する。

筆者らは過去の研究において、グラウトによる目詰まり効果の影響に関し、微粒子セメントによる亀裂グラウトを想定した室内モデル実験の結果に基づき、グラウト材の積算流量に比例して局所的な浸透率を低下させるモデルを提案している<sup>6)</sup>。本検討でも同様に、浸透率の低下がグラウト材料の積算流量の関数で与えられると仮定し、式(1)のダルシー則を次式のように修正することにより、目詰まりの効果をモデル化する方法を採用した。

$$q = \frac{k_e \rho_m}{\mu_m} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

ここで、 $k_e$  は地盤の本来の浸透率に目詰まりによる効果を加味した有効浸透率である。前報ではグラウト材の積算流量に比例して  $k_e$  が線形に低下するモデルを提案したが、本検討では浸透実験結果の再現に関するパラメータスタディの結果、次式に示すモデルを用いることとした。

$$k_e = \frac{1}{1 + a \left( \int_t q \cdot c \right)^b} k \quad (6)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  は目詰まりによる浸透率低下の効果をあらわすパラメータであり、その値が大きいくほど低下量が大きくなる。解析では各計算時間ステップにおいて、全差分要素について要素に流入したグラウト材の積算量を算出し、式(6)により各要素の浸透率を再定義することにより、目詰まりによる浸透率の経時変化をモデル化する。

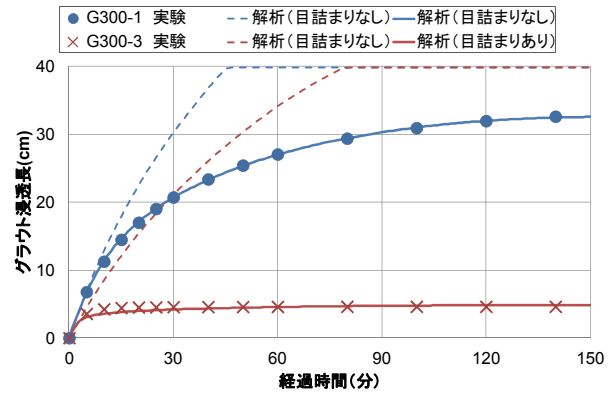


図-14 目詰まりモデルによる浸透距離の解析結果

表-5 目詰まりパラメータの設定値

実験名	$a$	$b$
G300-1	6.5e-3	1.5
G300-3	3.0e-5	6.0

式(5)、(6)による目詰まりモデルを新たに導入した解析プログラムを用い、室内浸透実験の再現解析を再度実施した。図-14 は実験 G300-1、G300-3 について、提案モデルによる浸透距離のマッチングを行った結果を示す。また、表-5 には各ケースで設定したパラメータ  $a$ 、 $b$  の値を示す。パラメータの設定において、単位面積当たり流量  $q$  の単位は  $\text{kg/m}^2\text{s}$  を用いた。目詰まりモデルを用いた場合の解析結果は実験結果と良好に一致しており、式(6)のパラメータを適切に設定することにより、地盤中のグラウト材料の浸透挙動を精度よく予測できることが示されている。なお、パラメータ  $a$ 、 $b$  と浸透特性との相関については、 $b$  が図-14 の浸透曲線の曲率、 $a$  が縦軸の倍率に影響することが示された。目詰まりによる浸透性の低下が、模型地盤内の間隙の局所的な閉塞により生じると仮定した場合、上記の傾向は  $b$  が閉塞が発生する頻度、 $a$  が閉塞による流量低下の効果を表していることが推測される。今後、このような浸透性低下の物理モデルの検証を行うことが望まれる。

#### §5.まとめ

溶液型グラウトの低透水性の岩盤亀裂や地盤への適用性を評価するため、室内浸透実験、グラウトの粒度分布測定、および地盤の間隙孔径分布の測定を



行い、浸透性の評価を行った。また、その結果から発想した浸透性の向上方法について実験的に検証した。さらに、グラウト粘度の経時変化や目詰まりを考慮した浸透解析手法を検討し、浸透実験の再現解析を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

- ① 溶液型グラウトの粒径はナノ(nm)オーダーに分布しているとされてきたが、レーザー回折式測定機による測定の結果、作液に伴い10～500 $\mu\text{m}$ 程度の粗粒分(ゲル)が微量生成されることを確認した。
- ② グラウトの粒度分布と、浸透実験での岩盤亀裂の開口幅や地盤の間隙孔径分布と比較したところ、作液時に生成された粗粒分(ゲル)が目詰まりの原因となって、浸透性の低下、あるいは浸透が停止する結果となっていることを確認した。
- ③ 作液時に生成された粗粒分(ゲル)をあらかじめろ過処理によって取り除くことにより、浸透性が大幅に改善されることを明らかにした。
- ④ グラウト粘度の経時変化と、目詰まりによる浸透性低下の効果をモデル化したグラウト浸透解析を実施したところ、パラメータを適切に設定することにより浸透実験の結果を再現できることを確認した。

#### <参考文献>

- 1) (独)日本原子力研究開発機構：“平成 22 年度 地層処分技術等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 地下坑道施工技術高度化開発 報告書”，2011
- 2) 羽田哲也、鈴木喜久、金丸清人：“低透水模擬試料における溶液型注入材の一次元浸透試験”，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.905～906，2012
- 3) 例えば、米倉亮三、島田俊介、木下吉友：“恒久グラウト注入工法”，山海堂，2000
- 4) 川口昌尚、岸裕和、延藤遵、杉山博一：“地層処分におけるグラウト技術の高度化開発(その2)グラウト材料の浸透特性に関する室内試験”，土木学会第 66 回年次学術講演会，CS3-034，pp.67～68，2011
- 5) 杉山博一、米山一幸：“特殊シリカ系グラウトの低透水性地盤への浸透改良効果に関する検討”，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.803～804，2012
- 6) Yoneyama, K. , Okuno, T. , Nakaya, A. and Tosaka, H. : “Experimental and numerical study on fracture grouting by fine particle cement”, Proceedings of 7th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS7), pp.1468-1476, 2012
- 7) 杉山博一：“特殊シリカ系グラウトの目詰まり原因と浸透性向上方法”，土木学会第 67 回年次学術講演会概要集，VI-323，pp.645～646，2012
- 8) Pruess, K. , Oldenburg, C. and Moridis, G. : “TOUGH2 user’s guide, version 2.0”, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, 1999
- 9) Finsterle, S. , Moridis, G. J. and Pruess, K. : “A TOUGH2 equation-of-state module for the simulation of two-phase flow of air, water, and a miscible gelling liquid”, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-36086, 1999

今後の課題として、本研究で提案した浸透性向上方法については、現場で適用可能な効率的、かつ経済的な事前ろ過処理方法などを検討することが望まれる。また、グラウト浸透挙動の予測評価手法については、現在のところ実工事に適用された例はほとんどないが、今後の情報化施工の進展や CIM などによる施工管理技術の高度化に伴い、配合設計や注入計画の合理化のために有効なツールとして利用されていくことが期待される。実工事へ本手法を適用する場合、事前に採取した地盤試料を用いて本検討と同様の室内浸透実験によりパラメータを設定して解析に用いる方法が考えられるが、実用化のためには目詰まりパラメータの定量的評価とその物理的意義の検討を行うとともに、室内実験のモデルを実スケールへ適用する場合の相似性を確認する必要がある。これらについては、今後、現場実験などによる検証が必要と考えられる。

#### 謝辞

浸透実験の実施、分析にあたり、日本原子力研究開発機構川口様、岸様、ならびに清水建設延藤主査にご指導、ご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

