

# 超微粒子セメント系注入材の地盤浸透機構

玉井 洋輔<sup>\*1</sup> 本間 重雄<sup>\*2</sup>

## Permeation Mechanism of Ultrafine Cementitious Grout in Soil

by

Yosuke TAMAI<sup>\*1</sup> and Shigeo HONMA<sup>\*2</sup>

(Received on Mar. 12, 2014 and accepted on May 15, 2014)

### Abstract

Laboratory experiments are carried out to investigate the permeation mechanism of ultrafine cementitious grout in saturated soil. Grouts with three different water-cement ratios are injected into a vertical water-saturated sand column, and the degree of dispersion is evaluated by using breakthrough curves obtained from the relative concentration change with the effluent pore volume. A three-dimensional spherical injection experiment is also performed to simulate in situ grouting. All of the experimental results are analyzed with the flow and concentration transport equations, which take into account the dissolution of the cement constituents in the soil pores. The dispersion coefficients, effective porosities, and mass transfer coefficients are the important parameters for predicting the degree of improvement in the target. Our approach could be used to develop rational and efficient design methods for grouting.

**Keywords:** Ground improvement, Grouting, Ultrafine cementitious grout, Transport phenomena, Dispersion phenomena

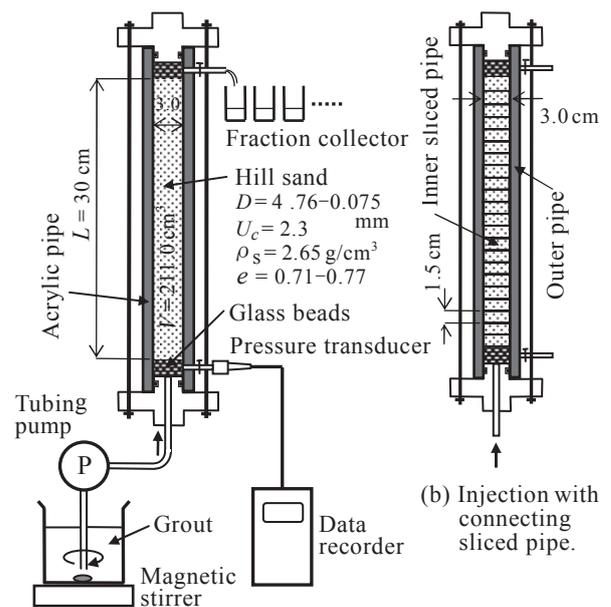
## 1. まえがき

都市土木工事において、地盤中に凝固材 (Grout) を注入して地盤を固結し、止水・強度増加を図る注入工法 (Grouting) が広く実施されている。注入工法は、基礎構造物や埋設管等の既設埋設物を撤去することなく周辺地盤を短期間に改良でき、また騒音や振動に対するトラブルが極めて少ないことから、海上空港等の埋め立て地における構造物基礎周辺地盤の改良や、地下鉄・上下水道・共同溝などの地下建設工事やトンネル工事などに伴う地盤改良工法の一つとして広く用いられている<sup>1)</sup>。注入材には長期強度や耐久性の観点からはセメント系注入材が用いられるが、セメント粒子と土間隙径の関係から注入可能な土質はおのずと限定され、主に礫地盤や砂地盤の改良工事に用いられている<sup>2)</sup>。しかし、近年ポルトランドセメントやコロイドセメントよりも粒子が微細な超微粒子セメント系注入材が開発され、浸透性に優れた恒久的な固結材として地盤改良工事に使用が広まりつつある。本研究は、恒久的地盤固結材として近年使用頻度が増している超微粒子セメント系注入材をとり上げ、その注入過程における注入材の土中分散機構と地盤改良効果を、室内注入実験と解析を通じて検討したものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 鉛直一次元注入実験

実験装置は Fig.1(a) に示す内径 3.0 cm、長さ 30 cm のアクリル管の下端にグラウト注入用送液ポンプを接続した鉛直一次元注入カラムである。このカラム内に山砂 (粒径 4.76~0.075 mm, 均等係数 2.3) を一定密度で充填し、充填砂を水で飽和させた後、カラム下端から所定の配合



(a) Vertical injection model.

Fig.1 Experimental setup.

\*1 工学研究科土木工学専攻修士課程

\*2 工学部土木工学科教授

Table1 Chemical properties of microfine cement<sup>3)</sup>. (%)

lg.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
0.3	29.0	13.2	1.2	49.2	5.6	1.2	99.7

の注入材を一定流量で注入した。実験に用いた注入材は太平洋マテリアル(株)製アロフィックス MC で、平均粒径  $4\mu\text{m}$  の超微粒子セメントである。その化学成分を Table1 に示す。この超微粒子セメントを水セメント比  $W/C = 400, 500, 600$  (%)で懸濁液を作製し、スターラー上で攪拌しながら定量ポンプにより飽和砂中に注入した。

注入開始とともにカラム上端からの排出液を 10 mL ずつ採取し、採液中の注入材量を以下の方法で定量した。セメント成分が水に接触すると、水和反応により水和生成物が生成しそれらが絡み合って硬化体の骨格を形成していくが、凝結前の懸濁液の状態を蒸発させ、残ったグラウト材の質量を測定することにより懸濁液中の注入材の量を定量した。Fig.2 は水 20 mL に超微粒子セメントを 1.0g~10.0 g 加えた懸濁液を 24 時間炉乾燥し、水分蒸発後の注入材の質量との関係を示したもので、これらの関係をもとに排出液中のセメント量を推定することとした。

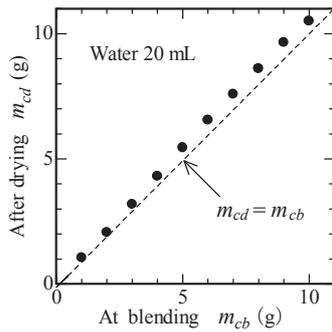


Fig.2 Change in the cement mass due to hydration<sup>4)</sup>.

Fig.1(a)のカラム実験に続いて、カラムの内部に長さ 1.5cm の輪切りアクリル管 20 個を隙間なく接着して挿入し、その内部に同じ山砂を充填して下端からの注入実験を行った (Fig.1(b)). 注入量はカラム中央付近までグラウトが到達する量を事前に計算した。注入完了後直ちに輪切り管を分解し、内部のセメント浸透砂を  $75\mu\text{m}$  ふるいで水洗いしてセメント成分を洗い出し、その液を炉乾燥してカラム内のセメント量分布を測定した。

### 2.2 注入砂の透水性・強度の測定

改良地盤の強度や止水性は土間隙中のセメント量の分布に大きく影響される。このため、濃度を変えた超微粒子セメント懸濁液を注入した改良土サンプルを数種類作成し、濃度と強度・透水性の変化を事前に把握した。Fig.3 に示す試料を充填した長さ 7 cm のアクリル管の下端から  $W/C = 400, 500, 600$  %のグラウトを吸引ポンプで吸い上げ、内部のセメント浸透砂を 1 週間水中養生し、その状態のまま変水位透水試験と押し出した試料について一軸圧縮試験を行い改良効果を測定した。

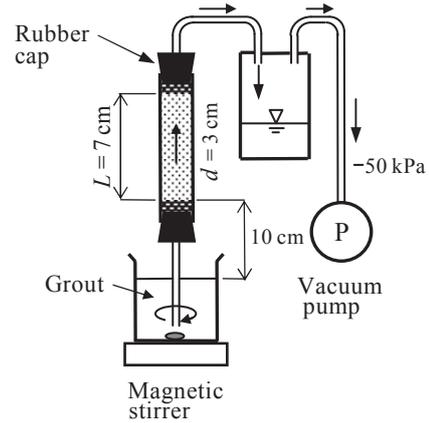


Fig.3 Preparation of the grouted soil samples.

### 2.3 3次元タンク注入実験

Fig.4 に示す内径 40 cm、高さ 60 cm の鋼製タンク内に山砂を一定密度で充填し、その中心に内径 1 cm の注入管を配置した。充填砂を水で飽和させた後、所定の配合のグラウトを一定流量で注入した。注入流量は  $q = 2.00\text{ cm}^3/\text{s}$ 、注入継続時間は 15 分とした。注入養生後、未固結部分の砂を取り除き、改良体の形状とその透水性・強度を測定した。

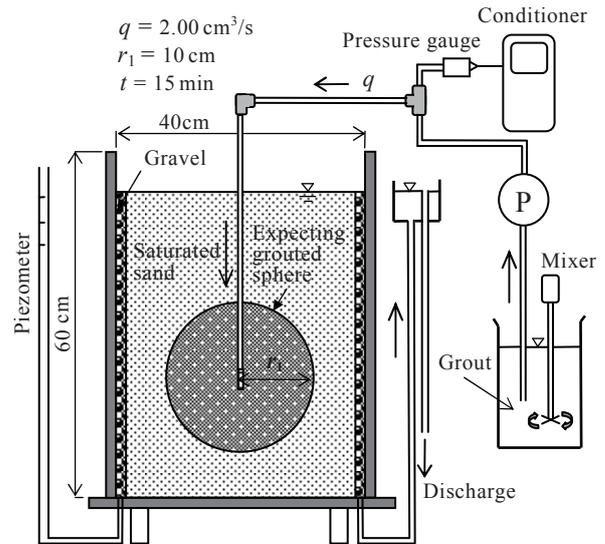


Fig.4 Spherical injection model.

## 3. 実験結果と解析

### 3.1 一次元注入実験

Fig.5 は鉛直一次元グラウト注入実験において測定された排出グラウト濃度の破過曲線を示したものである。図の縦軸  $C_g/C_{g0}$  はカラム上端からの排出液濃度  $C_g$  に対する注入材濃度  $C_{g0}$  の比率(相対濃度)を、横軸の  $V_p$  はカラム上端からの累積流出量を間隙体積で除した流出間隙体積 (effluent pore volume; 無次元量)を示している。Fig.5 によると、 $V_p \cong 0.5$  から排出液濃度が上昇し始め、 $V_p \cong 1$  で一定濃度に達しているが、その上限は  $C_g/C_{g0} = 0.7$  程度であり、注入材の原液濃度  $C_{g0}$  には達していない。 $V_p \cong 0.5$ ,

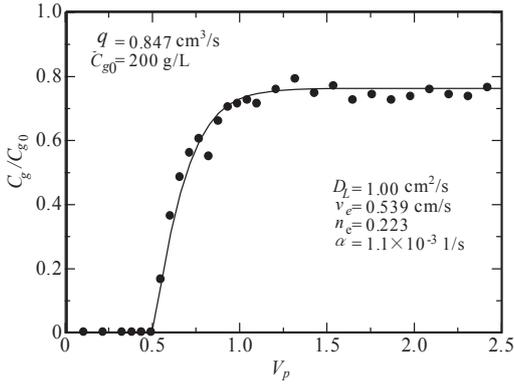


Fig.5 Breakthrough curve for one-dimensional grouting experiment.

以降の濃度上昇の傾きは、グラウト成分が土間隙を移動する際の分散の度合いを表している。この状況に対して、間隙水を可動水と不動水に区分して溶質の移流分散現象を説明する Two-Region モデル (Fig.6)を用いて破過曲線の定量的評価を行った。可動水部分の懸濁液濃度  $C_g$  に関する鉛直方向の輸送方程式は次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_g}{\partial z} - D_L \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} + \lambda C_g = 0 \quad (1)$$

ここに  $\lambda = \alpha/n_e$  は減衰係数(1/s)、 $\alpha$  はセメント成分の可動水部から不動水部への溶解を表す物質移動係数(1/s)、 $n_e$  は飽和砂の有効間隙率である。式(1)において初期条件  $C_g(z,0) = 0$ 、境界条件  $C_g(0,t) = C_{g0}$ 、 $C_g(\infty,t) = 0$  に対する解析解は次式で与えられ<sup>5)</sup>

$$\frac{C_g}{C_{g0}} = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{z}{2a_L}\right) \left\{ \exp\left(\frac{-z\gamma}{2a_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z-v_e t \gamma}{2\sqrt{a_L v_e t}}\right) + \exp\left(\frac{z\gamma}{2a_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z+v_e t \gamma}{2\sqrt{a_L v_e t}}\right) \right\} \quad (2)$$

ここに  $a_L = D_L/v_e$  は分散長、 $D_L$  は分散係数、 $v_e$  は可動水部分の実流速、 $\gamma = \sqrt{1 + 4\lambda a_L/v_e}$ 、 $\operatorname{erfc}$  は補誤差関数である。解析によって得られた輸送パラメータを Table2 に示す。Table2 より飽和砂中へグラウトが浸透する有効間隙体積は全間隙体積のおおむね 50%~70%であることがわかる。次に、注入過程における飽和砂中のセメント量分布を調べるため、輪切り管による実験の結果と解析結果を Fig.7 に示す。間隙中のセメント量は、注入点(下端)からの距離が増すにつれて減少し、輸送過程においてかなりの分散が生じていることがわかる。解析結果はセメント量の分布(測定結果)をおおむね良好に再現している。

Table2 Hydrodynamic properties found through analysis.

Effective velocity $v_e$ (cm/s)	Dispersion coefficient $D_L$ (cm <sup>2</sup> /s)	Porosity ratio $n_e/n$	Mass transfer coefficient $\alpha$ (1/s)
0.15	0.8	0.69	0.0005
0.50	1.0	0.52	0.0010
0.85	0.9	0.49	0.0012

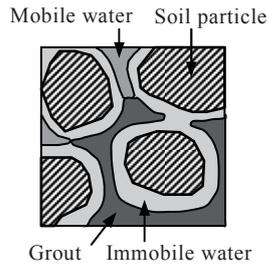


Fig.6 Two-region model.

### 3.2 注入砂の改良特性

Fig.8 は吸引実験から得られた注入砂の改良効果に関するデータである。濃度の高いグラウト注入土ほど、止水性・強度共に高い改良効果が得られることが明らかである。これらのデータを基に、土中の注入材濃度分布が知れば改良域の止水性や強度を推定することができる。

### 3.3 3次元球状注入実験

Fig.9 は一次元の注入サンプルと3次元注入実験における改良部分の砂の強度比較であり、3次元の注入塊の方が若干低い値となった。これは、3次元の改良体ではセメント成分の分散による影響が現れているものと考えられる。Fig.10 は3次元注入実験における1週間養生後の固結体の写真であり、直径は約19cmであった。

## 4. 注入理論

現在、グラウチングの設計にはダルシーの法則に基づいた単純な浸透理論式が用いられ

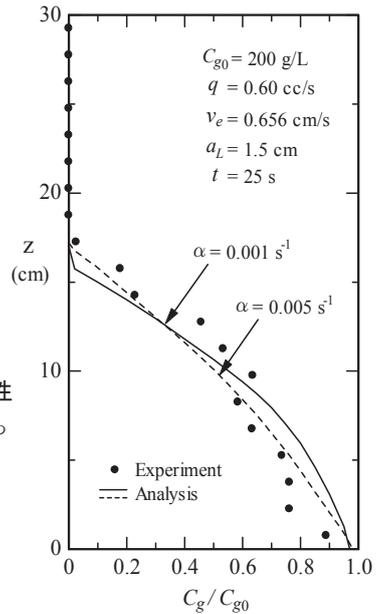


Fig.7 Concentration profiles of grout solution by experiment and analysis.

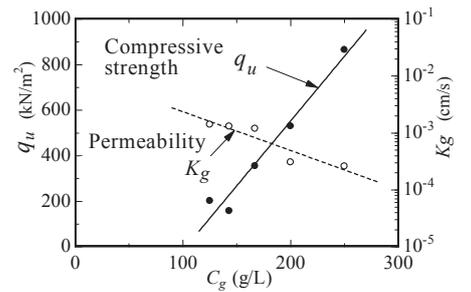


Fig.8 Change in compressive strength and permeability with concentration.

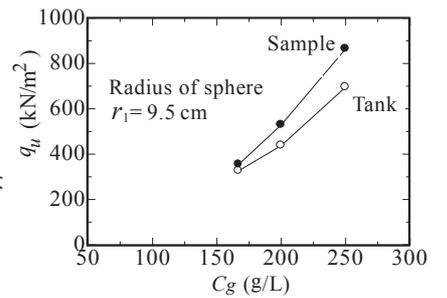


Fig.9 Compressive strengths of improved soils.



Fig.10 Shape of the solidified soil mass.

ており、代表的な Mag の式<sup>6)</sup>は次のとおりである。

$$q = K_g i A \quad (3)$$

$$i = -\frac{1}{\gamma_g} \frac{dp}{dr} \quad (4a)$$

$$K_g = \frac{K_w \mu_w}{\mu_g} \quad (4b)$$

$$A = 4\pi r^2 \quad (4c)$$

ここに  $q$  は注入流量,  $i$  は動水勾配,  $\gamma_g$  は注入材の単位体積重量,  $K_g$  は注入材の地盤に対する透過係数,  $\mu_g$  は粘性係数,  $A$  は浸透フロント表面積である。ここで,  $r = r_0$  (注入管半径) で  $p = P_0$ ,  $r = r_1$  (注入材の浸透半径) で  $p = P_1$  の条件で式(3)を積分すると (Fig.11)

$$P_0 = \frac{q \gamma_g}{4\pi K_g} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) + P_1 \quad (5)$$

なる関係式が得られ, 定量注入に対しては  $r_1$  の拡大に伴う注入圧の変化を計算することができる。しかし, 一定注入量  $q = \text{const.}$  による  $r_1$  の拡大と注入圧  $P_0$  の変化は, 単一の方程式(5)から同時に計算することはできない。さらに, 式(5)では注入材が既存の間隙水を外側へ完全に置換するという考え方であり, 注入材の土への吸着や間隙水への分散希釈は全く考慮されない。注入工法では, むしろ改良範囲における注入材成分の最終的な分布についての情報が必要とされる。そのためには, 注入材の浸透過程を表す非定常流れ方程式と注入材成分の土間隙中での輸送を考慮した理論的な解析が必要となる。

鉛直一次元流れ場に対する流れ方程式と輸送方程式は以下のように表される<sup>4)</sup>。

$$\text{流れ方程式: } \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{k_z \rho_l}{\mu_l} \left( \frac{\partial p_l}{\partial z} + \rho_l g \right) \right\} = \beta \rho_l \frac{\partial p_l}{\partial t} \quad (6)$$

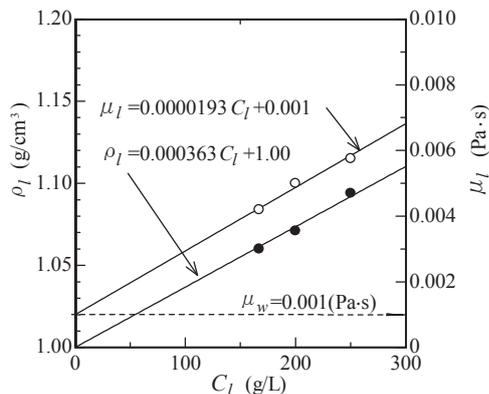


Fig.12 Change in density and viscosity with concentration<sup>4)</sup>.

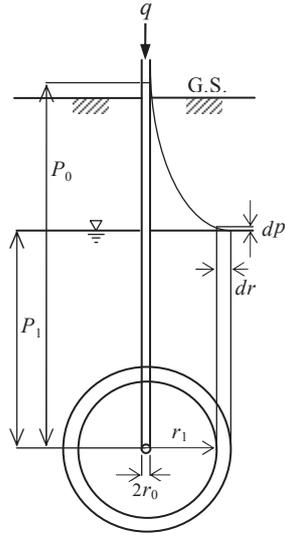


Fig.11 Pressure distribution by one-point injection.

$$\text{浸透流速: } v_e = -\frac{k_z}{\mu_l n_e} \left( \frac{\partial p_l}{\partial z} + \rho_l g \right) \quad (7)$$

$$\text{輸送方程式: } \frac{\partial C_l}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_l}{\partial z} - D_L \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2} + \lambda C_l = 0 \quad (8)$$

ここに  $\beta$  は土の圧縮率,  $D_L = a_L v_e$  は分散係数,  $a_L$  は土の分散長である。注入材の濃度と密度・粘性係数との間には Fig.12 に示す関係がある。解析は式(6)(8)を完全陰解法により差分化し, 差分格子間隔  $\Delta z = 1 \text{ cm}$ , 時間間隔  $\Delta t = 1 \text{ s}$  を用いた。Fig.13 は  $C_0 = 0.2 \text{ kg/L}$ ,  $q = 0.8 \text{ cc/s}$  に対する計算結果であり, 注入過程における圧力分布と注入材濃度分布の変化が良好に表現されている。

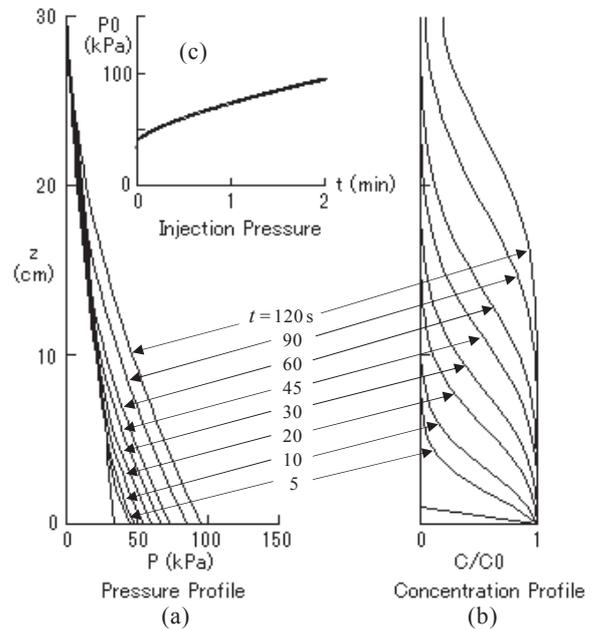


Fig.13 Results of the simulation for one-dimensional vertical injection<sup>4)</sup>.

鉛直注入の場合, 注入圧  $P_0$  は(c)に示すとおり注入直後に急激な上昇を示した後, ほぼ直線的に増加していく。カラム内のセメント成分の濃度分布と間隙水圧分布には一定の関係がみられ, 濃度の分散希釈に伴い間隙水の圧力勾配は緩やかになり, その結果, 間隙流体の実流速は一定に保たれると理解できる。

一方, 3次元球体注入に対する流れ方程式と輸送方程式は重力の影響を無視すると次式で表され

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{k_r \rho_l}{\mu_l} \frac{\partial p_l}{\partial r} \right) = \beta \rho_l \frac{\partial p_l}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 D_r \frac{\partial C_l}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{n_e} \frac{\partial C_l}{\partial r} - \lambda C_l = \frac{\partial C_l}{\partial t} \quad (10)$$

$C_0 = 0.25 \text{ kg/L}$ ,  $q = 2.0 \text{ cc/s}$  に対する計算結果を Fig.14 に示す。一次元注入と異なる点は, 土中の圧力分布は注入直後からほぼ一定の分布を呈し(浸透距離  $r$  に逆比例して減少), 注入圧もほぼ一定の大きさのまま推移することで

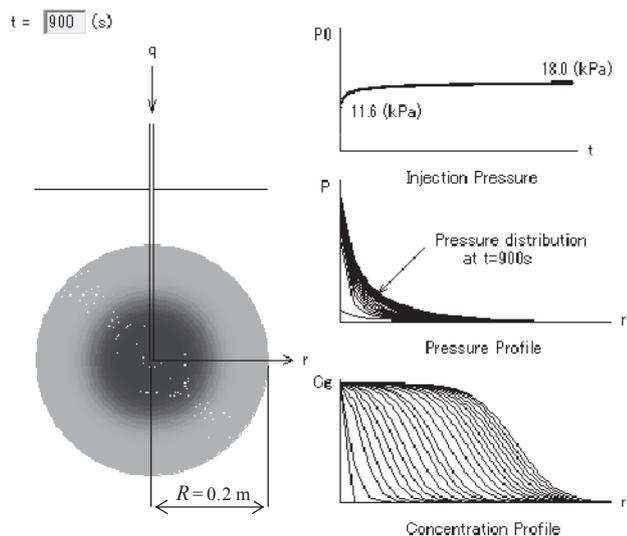


Fig.14 Results of the simulation for three-dimensional spherical injection.

ある。注入点からの浸透距離が増すにつれ浸透流速は大きく減少するため、間隙内実流速による注入材の機械的分散は減少し、一次元浸透に比べ浸透フロントにおける分散の度合いが小さくなることが窺われる。

3次元注入実験では、特に水セメント比が小さい(濃度の高い)注入材の場合、注入途中での注入圧の上昇がみられた。その原因として3次元注入の場合、浸透フロント部の浸透流速は半径の拡大に伴いほぼ停留状態に近づく結果、先端部でのグラウト材が閉塞し易くなるのではないかと推測される。懸濁液型のグラウトは土間隙中での流動の始発と停止に際し、懸濁液の有する降伏応力(ずり応力)が重要な働きを担うが、筆者の一人はその流動の始発と停止の機構を降伏応力を有する非Newton流体の流動特性に基づき理論的に説明している<sup>7,8)</sup>。また、今回の実験では改良土の強度は大きく増加したが、止水性はそれほど改善されなかったため、土間隙中における凝固材の固結状態についての分析が今後必要と思われる。

## 5. あとがき

本研究は、恒久的地盤固結材として近年使用頻度が増している超微粒子セメント系注入材をとり上げ、その飽和砂中への注入機構を室内における鉛直一次元および3次元球状注入実験と溶質輸送解析を通じて検討したものである。本研究により得られた知見を要約すると以下のとおりである。

1) 鉛直カラムを用いた一次元グラウト注入実験より、超微粒子セメント系注入材の土中浸透過程における分散の度合いは、カラム排出端における流出間隙体積  $V_p$  と相対濃度  $C_g/C_{g0}$  の関係、すなわち破過曲線を通じて評価できる。この破過曲線に対し、間隙中の可動水部から不動水部へのセメント成分の溶解と、土粒子への吸着を考慮し

た輸送方程式を用いて解析した結果、セメント懸濁液が浸透する有効間隙率は  $n_e=0.20\sim 0.28$ 、分散係数  $D_L=0.8\sim 1.0\text{ cm}^2/\text{s}$ 、物質移動係数  $\alpha=0.5\sim 1.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$  が得られた。

2) 3次元注入状態では、注入圧は初期に急激な上昇を示した後ほぼ一定の状態に推移する。注入点からの距離が増すにつれ浸透流速は大きく減少するため、間隙内実流速による注入材の機械的分散は減少し、一次元浸透に比べ浸透フロントにおける分散の度合いは減少する。凝固材の注入により改良域の土の強度は大きく増加したが、止水性については顕著な改善は見られなかったため、土間隙中での凝固材の固結状況の分析が必要である。

3) 定量注入条件に対するセメント成分の浸透と分布を予測するため、グラウトの粘性と密度変化を考慮した流れ方程式とそれより求まる移流速を用いた輸送方程式とを組み合わせたグラウチングシミュレーションを行ったところ、一次元および3次元球状注入ともに注入圧の変化、間隙水圧ならびにセメント成分の分布が合理的に再現できた。注入停止後の間隙中のセメント成分の分布は、改良地盤の止水性や強度を支配すると考えられるので、本研究から得られた知見はグラウチングによる改良効果や改良範囲の予測に対し有益な情報を提供し得ると思われる。

## 謝辞

本研究に係わる室内実験を精力的に実施した2013年度卒研生の武居正剛君、西原真一君に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 米倉亮三編集「最新 地盤注入工法技術総覧」産業技術サービスセンター(1997)
- 2) 地盤工学・実務シリーズ 11「地盤改良効果の予測と実際」地盤工学会(2000)
- 3) 地盤注入材アロフィックス MC の物性, 太平洋マテリアル株式会社, <http://www.taiheiyo-m.co.jp>
- 4) 玉井洋輔・本間重雄: 飽和砂中における超微粒子セメント系注入材の分散特性, 東海大学紀要工学部, Vol.53, No.1, pp.35-40(2013)
- 5) M. Th. van Genuchten and P. J. Wierenga : Mass transfer studies in sorbing porous media, 1. Analytical solutions, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.40, pp.473-480(1976)
- 6) 地盤工学・実務シリーズ 27「薬液注入工法の理論・設計・施工」地盤工学会(2009)
- 7) S. Honma: A study on the seepage resistance of suspension-type grouts in soils, International Chemical Engineering, Vol.33, pp.315-325(1993)
- 8) S. Honma and M. Inada: The seepage resistance of suspension-type grouts in soils, Grouting and Deep Mixing, Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, pp.37-40(1996)