

# 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

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

## Dispersion Characteristics of Microfine Cement Grout in Saturated Sand

by

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

(Received on Mar. 14, 2013 and accepted on May 16, 2013)

### Abstract

The dispersion phenomena of microfine cement grout in saturated sand are studied to elucidate the permeation mechanism in soils. Three different water-cement ratio grouts are injected into a saturated sand column, and the degree of dispersion is evaluated through breakthrough curves obtained from the relative concentration change with the effluent pore volume. Experimental results are then analyzed by the transport equation based on the Two-Region model which takes into account the dissolution of the cement constituents from mobile water to immobile water in soil pores. The dispersion coefficients, effective porosities and mass transfer coefficients are evaluated to predict the degree of improvement. A numerical simulation model associated with the concentration dependent flow equation and the pore-water pressure dependent transport equation is demonstrated, and the results showed a realistic feature of the permeation process in soils.

**Keywords:** Ground Improvement, Grouting, Microfine Cement, Dispersion Phenomena, Two-region Model

### 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、地下鉄・上下水道・共同溝などの地下建設工事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>。また、近年注目されている飽和砂地盤の液状化対策工法としても有力な工法の一つである<sup>2)</sup>。

注入材には水ガラス(ケイ酸ナトリウム)を主体とした溶液型注入材やセメント・微粒子シリカを主体とした懸濁型グラウトが用いられるが、溶液型注入材は浸透性に優れ、硬化剤(無機系・有機系硬化剤)の添加によりゲル化のコントロールが容易に行える半面、改良土の強度や耐久性に劣るため主として短期の仮設工事を中心に使用されている<sup>1)</sup>。

一方、セメント系の懸濁液型グラウトは長期強度や耐久性に優れているため、ダム基盤への岩盤注入(カーテングラウチング)やトンネル止水工事、杭基礎の根固め等に用いられるが、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。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や超微粒子シリカ系の注入材が開発され、浸

透性に優れた恒久的な固結材として地盤改良工事に広く供せられている<sup>1,2)</sup>。

注入材の土中における浸透過程を力学的機構として見ると、飽和多孔質体中のセメント成分の輸送現象ととらえることができる。溶液型や懸濁液型のグラウトが飽和土中に注入されると、Fig.1に示すように間隙中の実流速分布の変化、間隙流路の不均一性による流れの分岐と合流、濃度差による溶質の拡散等によりグラウト成分の分散が生じる。この分散の程度は流速が大きくなるほど増大することが知られており<sup>3,4)</sup>、注入工法では注入材の浸透流速が非常に大きいことから、注入過程においてかなりの分散が生じることが予測される。

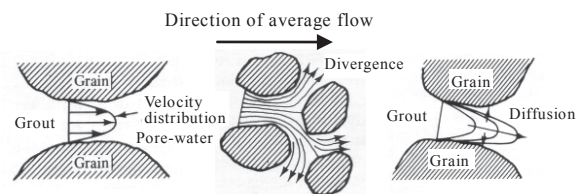


Fig.1 Spreading of grout in soil pores due to dispersion<sup>4)</sup>.

また、実際の注入工事では注入グラウトの配合や注入圧とともに注入管の打設間隔が設計上重要な要素となるが、その場合にも改良範囲に対する注入グラウトの充填率(セメント成分分布)の予測が重要となる<sup>5,6)</sup>。

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、その飽和砂中における分散機構を室内における鉛直次元注入実験と溶質輸送解析を通じて検討したものである。

\*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

2. 実験の概要

実験装置は Fig.2 に示す内径 3.0cm、長さ 30cm のアクリル管の下端にグラウト送液用定量ポンプを接続した鉛直一次元注入カラムである。カラムの下端には断面全体にグラウトが浸透するよう径 2mm のガラスビーズを厚さ 2.0cm 充填し、注入圧測定用の小型圧力変換器を同位置に設置した。このカラム内に山砂(市販園芸用砂;  $D_{50}=0.48\text{mm}$ )を一定密度になるよう充填し、試料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。

実験に用いた注入材は、地盤改良材として広く用いられている太平洋マテリアル(株)製アロフィックス MC で、平均粒径  $4\mu\text{m}$ 、ブレン比表面積  $9,000\text{cm}^2/\text{g}$  以上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飽和砂質地盤の改良に用いる際の標準的水セメント比  $W/C = 400, 500, 600\%$  で懸濁液を作成し、スターラーで攪拌しながら飽和砂中に注入した。注入流量は飽和砂中での浸透流速が  $v_{av}=0.05\sim 0.2\text{cm/s}$  となるよう  $q=0.3, 0.8, 1.3\text{cm}^3/\text{s}$  の 3 通りとした。現場での注入工事ではストレナーからの 3 次元放射状注入となり、標準的な注入流量は  $q=5\sim 20\text{L}/\text{min}$  であるが、本研究では 1 次元注入状態における浸透流速の変化に伴うグラウト成分の分散を把握するため上記の注入流量を設定した。Table2 に 3 種類の  $W/C$  グラウトの濃度、密度および粘性係数の測定結果を示す。なお、懸濁液中のセメント粒子の凝集を防止するため、セメント量に対し質量比 1% の分散剤(アルキルアリルスルホン酸)を添加した。

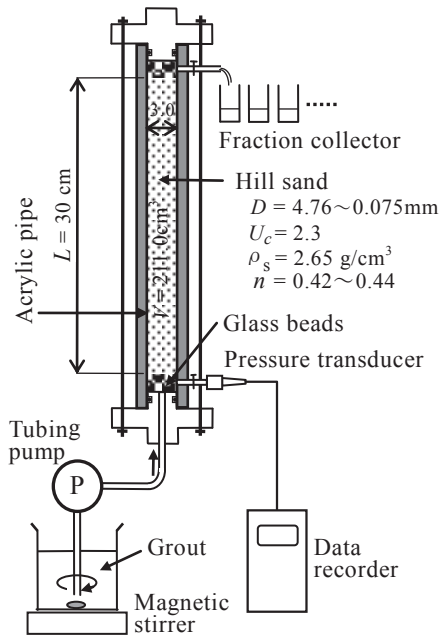


Fig.2 Experimental apparatus.

Table1 Chemical property of microfne cement<sup>7)</sup>. (%)

Ig.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

Table2 Physical property of microfne grouts.

W/C (%)	400	500	600
Concentration $C_g$ (g/L)	250	200	167
Density $\rho_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.09	1.07	1.06
Dynamic viscosity $\mu_g$ (Pa·s)	0.0058	0.0050	0.0042

Notes)  $\rho_w=1.00\text{ g/cm}^3$ ,  $\mu_w=0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$

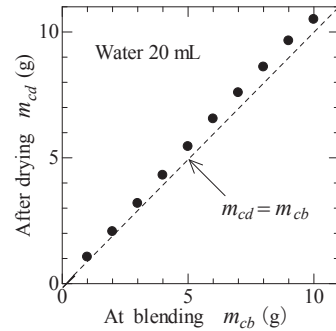


Fig.3 Change in the cement mass due to hydration.

注入開始とともにカラム上端からの排出液を 10mL ずつ採取し、排出液中のセメント量を以下の方法で測定した。セメント成分が水に溶解すると、水和反応により水和生成物が生成しそれらが絡み合っって硬化体の骨格を構成していくが、凝結前の懸濁液の状態を蒸発させ、残った水和生成物の質量を測定することにより懸濁液中のセメント量を定量した。Fig.3 は水 20mL に超微粒子セメントを 1.0g~10.0g 加えた懸濁液を 24 時間炉乾燥し、水分蒸発後の水和生成物の質量との関係を示したものである。これによると水和生成物の質量は配合時の添加セメント質量より若干増加するが、その差は小さく、乾燥後の水和生成物の質量より排出液中のセメント量を推定することとした。

Fig.2 に示したカラム実験に続いて、アクリルカラムの内部に内径 2.4cm( $t=3\text{mm}$ )、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

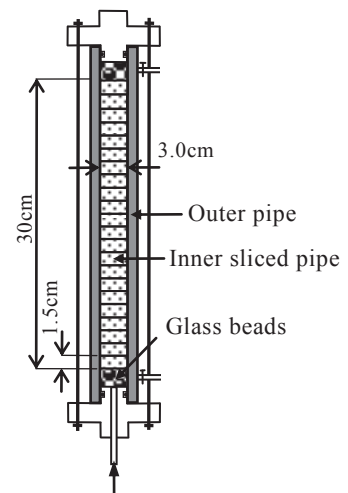


Fig.3 Injection experiment with sliced pipe.

を充填して下端からの注入実験を行った(Fig.3). 注入量はカラムの中央付近までグラウトが到達した際の前後の分散の程度を把握できるように注入時間を事前に計算した. 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のカラム内のセメント量分布を求めた.

### 3. 超微粒子注入材の土中分散特性

Fig.4 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. 上段の(a)(b)(c)は注入量  $q=0.3\text{cm}^3/\text{s}$ , 注入材濃度は順に  $C_{g0}=167, 200, 250\text{g/L}$ , 中段(d)(e)(f)は  $q=0.8\text{cm}^3/\text{s}$ , 下段(g)(h)(i)は  $q=1.3\text{cm}^3/\text{s}$ の結果である(注入材濃度は同順). 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  $V_p$  は間隙流体の流出間隙体積(effluent pore volume; 無次元量)を示しており, その量は充填砂の乾燥密度  $\rho_d$ と土粒子の密度  $\rho_s$ から間隙率  $n$ を求め,  $V_p=V \times n$  ( $V$ はカラム体積),  $V_p=V_f/V_v$ により算出した( $V_f$ は累積流出体積).

Fig.4によると, 全てのケースにおいて  $V_p \approx 0.5$  から排出液濃度が上昇し始め,  $V_p=1 \sim 2$  で一定濃度に達しているが, その上限は  $C_g/C_{g0}=0.6 \sim 0.8$  までであり, 注入材の原液濃度  $C_{g0}$  には達していない.  $V_p \approx 0.5$  以降の濃度上

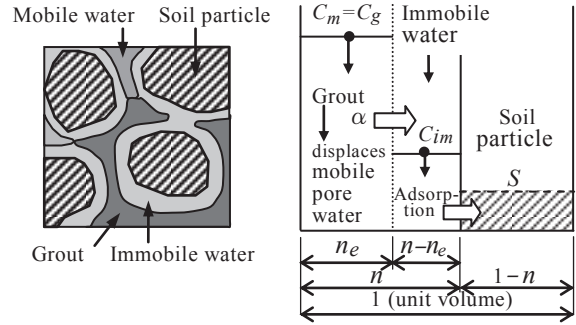


Fig.5 Displacement of water by injected grout in soil pores.

昇の傾きは, グラウトが土間隙を移動する際の分散の度合いを表している. Fig.4の実験結果によると, 流速が小さいケース(a)(b)(c)において分散の度合いが大きく, 流速の大きい(e)~(i)ではむしろ濃度の分散が小さく現れている. これは注入グラウトの浸透流速が増すと間隙流路の中央部分をグラウトが通過し, 間隙水全体との混合分散が減少するためと推測される.

すなわち, Fig.5に示すように土間隙中には注入グラウトによって置換されない不動水(immobile water)が存在し, 移動可能な自由水(mobile water)をグラウト懸濁液が置換しながら浸透が進行しているものと推察される. 同時に, 自由水部分に浸透したグラウト中のセメント成分は水和反応を伴いながら不動水部分へと溶解し, さらに不動水

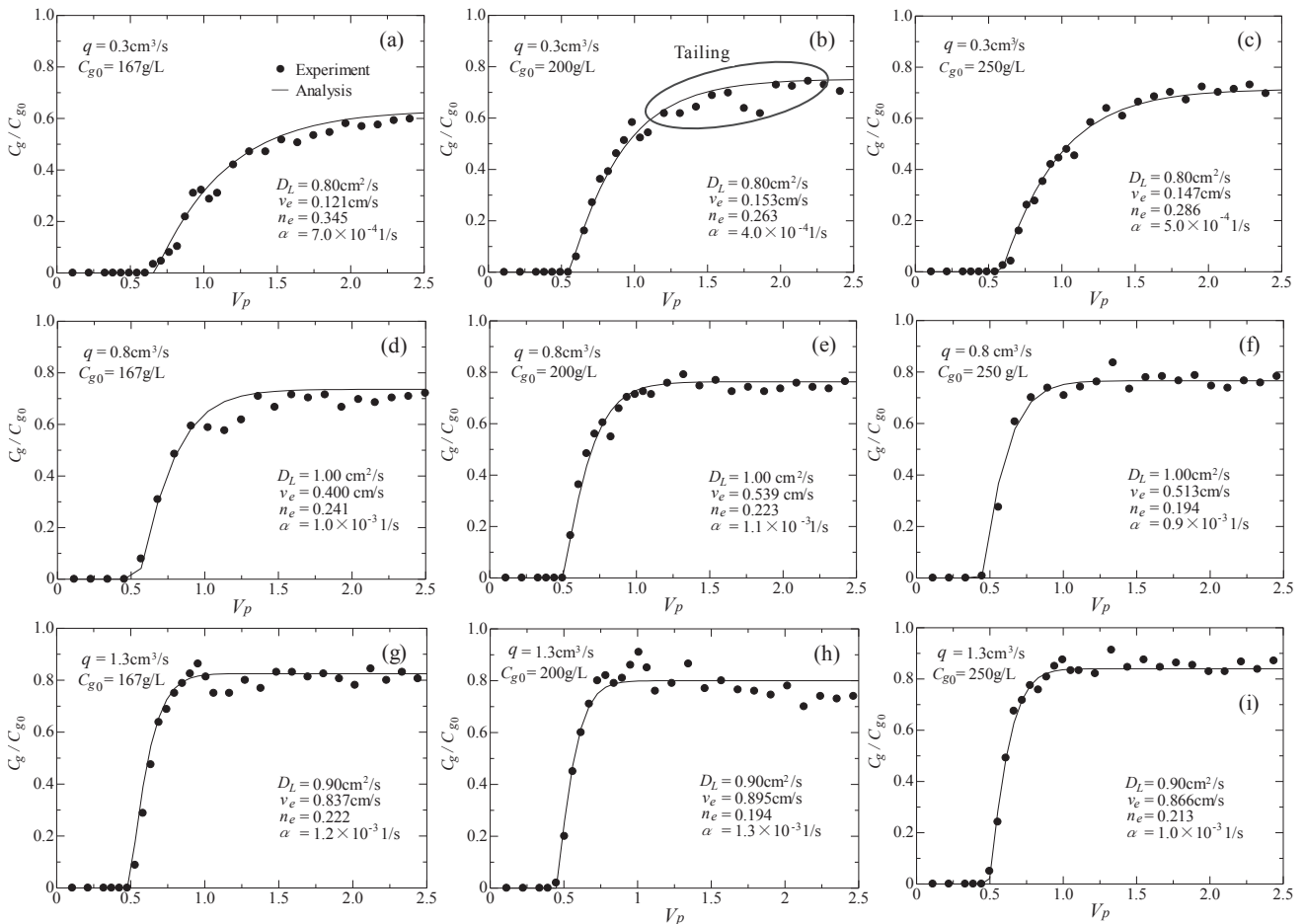


Fig.4 Breakthrough curves of one-dimensional grout injection experiment.

部から土固相骨格部分への吸着と凝結が進行する結果、破過曲線後半部分での濃度の低下(Tailing)が現れると考えられる。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モデルはTwo-Regionモデル<sup>8)</sup>と呼ばれ、この溶質輸送モデルを飽和砂中へのグラウト注入実験に適用して破過曲線の定量的評価を行った。

自由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>9)</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)、 $\alpha$  はセメント成分の自由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>10)</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、 $v_e$  は自由水部分の実流速、 $\gamma = \sqrt{1+4\lambda a_L/v_e}$ 、 $\operatorname{erfc}$  は補誤差関数である。カラム試験では試料端における濃度変化が測定されるので、距離  $z$  をカラム長  $L$  とし、動的ペクレ数  $P_e = L/a_L = v_e L/D_L$ 、累積流出間隙体積  $V_p = v_e t/L$  を導入すると、ペクレ数が大きい場合 ( $P_e > 10$ )、式(2) は次のように近似される<sup>10)</sup>。

$$\frac{C_g}{C_{g0}} = \frac{1}{2} \exp\left\{\frac{P_e}{2}(1-\gamma)\right\} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{P_e}}{2} \frac{1-V_p \gamma}{\sqrt{V_p}}\right) \quad (3)$$

式(3)による実験結果に対する輸送パラメーターの同定結果を Fig.4 中に示した。Fig.4 中に示した諸数値によると、分散係数  $D_L$  は注入流量  $q$  および注入材濃度  $C_{g0}$  にはさほど影響されず  $D_L=0.8\sim 1.0\text{cm}^2/\text{s}$  の値を示してい

Table3 Hydrodynamic properties found by the analysis.

Effective velocity $v_e$ (cm/s)	Dispersion coefficient $D_L$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	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

るが、有効間隙率  $n_e$  は  $q$  の増加に対して減少している。すなわち、注入量が増加するにつれ、注入グラウトは Fig.5 に示した間隙流路の中央部を主に通過するため、 $n_e$  は減少しそれに伴い間隙内実流速  $v_e$  は増大する。実流速が増大すると土粒子周辺の不動水部分との混合希釈が進み、グラウト成分の自由水部から不動水部への物質移動も増加するものと推測される。したがって、グラウトの浸透フロントが前進するにつれ、浸透方向へのグラウト成分の輸送量は次第に低下していくと考えられる。解析によって得られた輸送パラメーターの特性を Table3 に示した。Table3 より、飽和砂中へグラウトが浸透する有効間隙体積は間隙体積のおおむね 50~70%であることがわかる。

次に、Breakthrough 前の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、Fig.3 に示した輪切り管による実験の結果と解析結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a)(b)(c) は順に注入グラウト濃度  $C_{g0}=167, 200, 250\text{g/L}$ 、注入量  $q=0.6\sim 0.8\text{cm}^3/\text{s}$ 、注入開始後 25 秒におけるセメント量分布である。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。カラム下端では濃度の低下とばらつきが大きい、これは注入点付近ではセメント成分の土粒子への吸着と凝結がいち早く進行する結果、分解洗浄後の間隙水中のセメント成分が減少したものと考えられる。

この注入過程におけるセメント成分の移流分散現象を式(2)を用いて解析した。グラウトの実流速  $v_e$  は、注入量が近い Fig.4(d)(e)(f)の有効間隙率の平均値  $n_e=0.22$  を

用いて  $v_e=q/An_e$  より算出し、分散長  $a_L$  は分散係数  $D_L=1.0\text{cm}^2/\text{s}$  (Table3) として  $a_L = D_L/v_e$  から求め、物質移動係数は  $\alpha = 0.001\text{s}^{-1}$  とした。これらの値を用い、式(2)の注入点からの距離  $z$  を変えて  $t=25\text{s}$  における各位置の相対濃度  $C_g/C_{g0}$  を計算した結果を Fig.6 中に示した。

解析結果は実験結果をおおむね良好に再現しているが、注入点近傍においては実験で測定された濃度より高い値となり、グラウトの浸潤フロントでは浸透方向への分散がみられる。そこで、物質移動係数を 5 倍の  $\alpha=0.005\text{s}^{-1}$  として再計算すると、Fig.6 中に破線で示した分布が得られた。この場合、注入点近傍での濃度低下は再現できるが、全体的な濃度分布は実験結果と離れる結果となる。物

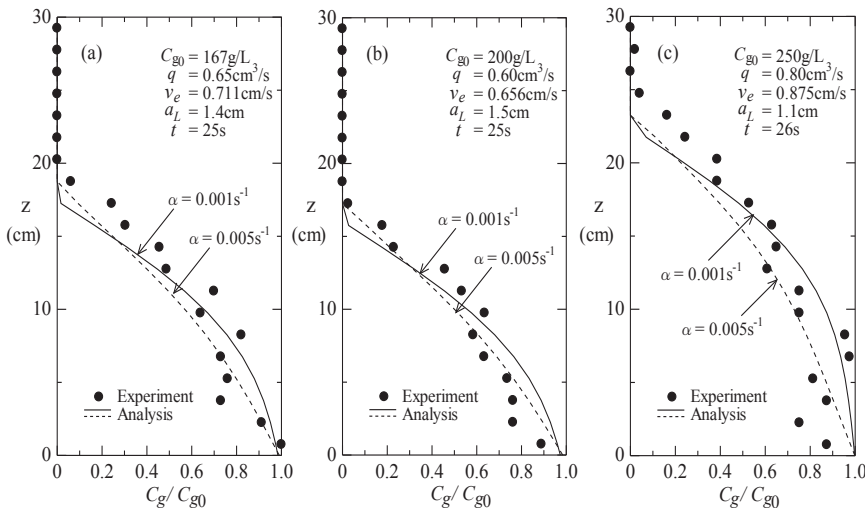


Fig.6 Concentration profiles of grout solution by experiment and analysis.

質移動係数は自由水部を浸透するグラウトの濃度の大きさによって変化する可能性もあるが、破過曲線から得られた一定値を用いるのが妥当であるように思われる。

#### 4. グラウチングシミュレーション

前述の実験と解析では、間隙中のグラウトの実流速  $v_e$  を一定として、式(1)の一次元輸送方程式に基づいてセメント懸濁液濃度  $C_g$  の移流分散を検討した。実際には、一定濃度のグラウトを地盤中に注入した場合の土中の間隙水圧分布や浸透流速は流れの方程式から求められる。したがって、定量注入または定圧注入によるグラウトの土中浸透現象の解析には、流れ方程式と輸送方程式とを組み合わせた解析が必要となる。多孔質体を通過する密度  $\rho_l$ 、粘性係数  $\mu_l$  の流体の鉛直方向への流れ方程式は次式で与えられる<sup>11,12)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{k \rho_l}{\mu_l} \left( \frac{\partial p_l}{\partial z} + \rho_l g \right) \right\} = \beta \rho_l \frac{\partial p_l}{\partial t} \quad (4)$$

ここに、 $k$  は多孔質体の固有透過係数、 $p_l$  は間隙流体圧力、 $\beta$  は多孔質体の圧縮率である。式(4)を規定注入圧または既定注入量境界条件のもとで解けば、間隙流体圧力  $p_l$  の時間的分布が得られ、その圧力分布より実流速  $v_e$  が次式で求められる。

$$v_e = -\frac{k}{\mu_l n_e} \left( \frac{\partial p_l}{\partial z} + \rho_l g \right) \quad (5)$$

ただし、式(4)(5)中の  $\rho_l$ 、 $\mu_l$  は流体濃度  $C_l$  によって変化し、実験で用いた超微粒子セメント懸濁液では Fig.7 に示すような関係 ( $\rho_l = f(C_l)$ ,  $\mu_l = f(C_l)$ ) がある。また、濃度  $C_l$  の輸送方程式は

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_l}{\partial z} - D_L \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2} + \lambda C_l = 0 \quad (6)$$

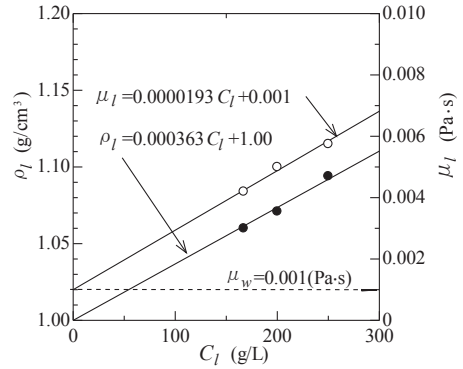


Fig.7 Change of density and viscosity with concentration of the fluid (from Table2).

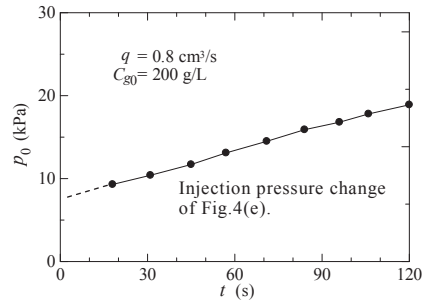


Fig.9 Change of injection pressure in experiment.

で与えられるので、流体密度  $\rho_l$ 、粘性係数  $\mu_l$ 、浸透流速  $v_e$  が相互に関連する式(4)と式(6)を交互に数値計算し、各時間ステップで収束解が得られるまで演算を繰り返す必要がある。プログラムの作成においては、式(4)(6)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。また、移流が卓越する式(6)の移流項には上流差分を適用した。

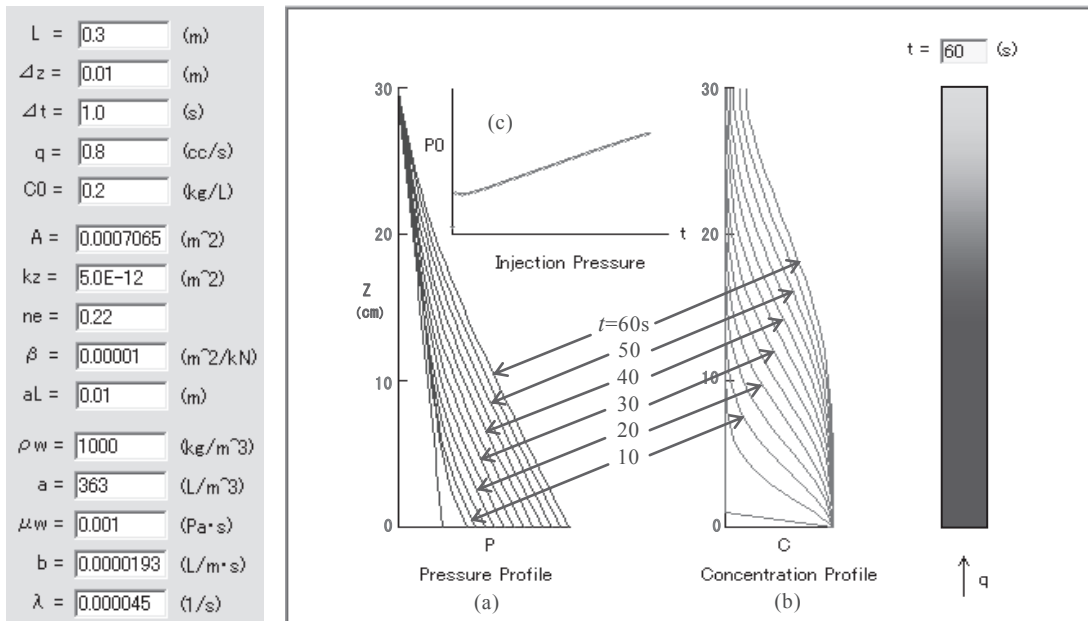


Fig.8 Computed profiles of pore-liquid pressure and concentration by numerical simulation.

Fig.8は原液濃度  $C_{g0}=200\text{g/L}$  ( $\rho_{g0}=1.07\text{g/cm}^3$ ,  $\mu_{g0}=0.005\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) のグラウトを流量  $q=0.8\text{cm}^3/\text{s}$  で飽和砂中へ注入した場合のシミュレーション結果である。試料の有効間隙率は注入量が同一の Fig.4(d)(e)(f)の平均値  $n_e=0.22$ , 物質移動係数は  $\alpha=0.001\text{s}^{-1}$  を用いた(減衰係数  $\lambda=0.000045\text{s}^{-1}$ )。Fig.8(a)は間隙水圧分布であり, グラウトが飽和砂中に浸透するとその部分の圧力勾配が増大し, 浸透グラウトのフロント部では圧力勾配が変化の様子がみられる。

注入圧  $p_0$  は(c)に示すとおり, 注入直後に急激な増加を示した後, 直線的に増加していくが, この変化は Fig.9に示した実験結果と符合している。(b)の濃度分布については, グラウトの浸透に伴う濃度の分散が再現されており, その大きさは Fig.6に示した実験結果と良く符合している。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。

注入停止後の間隙中のセメント量は, 改良土の止水性や強度と相関性を有すると考えられるので, 充填グラウト濃度を変えた供試体について, 一定養生後に室内透水試験及び力学試験を行うことにより改良地盤の力学特性を推定できると思われる。また, 実際のグラウチングでは注入管先端からの3次元放射状流となるが, 円筒土槽を用いた室内注入実験や球領域に対する移流分散解析を通じて注入と分布の過程を究明する必要がある。それらは今後の研究課題である。

## 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過程における分散機構を室内における鉛直一次元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。飽和砂中に注入された懸濁液グラウトは, 土間隙の自由水(可動水)部を通過してセメント成分が輸送されるため, 浸透フロントにおける濃度の分散希釈と破過曲線後半での濃度低下(Tailing)が発生する。
- 2) 間隙水を可動水と不動水に区分した Two-Region モデルを用いてセメント成分の輸送を検討したところ, 破過曲線の全体的な特徴をうまく再現し得た。可動水部から不動水部へのセメント成分の溶解は物質移動係数を用いて表現でき, その結果可動水におけるセメント成分の輸送は, 濃度減衰を伴う移流分散方程式(本文式(1))によって解析することができる。今回の実験で用いた山砂に対しては, 分散係数  $D_L=0.8\sim 1.0\text{cm}^2/\text{s}$ , 有効間隙率  $n_e=0.20$

$\sim 0.28$ , 物質移動係数  $\alpha=0.5\sim 1.3\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$  が得られた。これらの値を用いて計算した飽和砂中のセメント成分量の分布は, 実験による測定結果とよい一致を示した。

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(本文式(4))とそれより求まる移流速を用いた輸送方程式(本文式(6))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, 注入圧および間隙水圧の変化, 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 2012 年度卒研生の加藤洋樹君, 桂聡太郎君, 杉村亮平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) 東畑郁生・米倉亮三・島田俊介・社本康広:「地震と地盤の液状化一恒久・本設注入によるその対策」インデックス出版(2010)
- 3) Bear J.: Hydraulics of Groundwater, McGRAW-HILL (1979)
- 4) Dullien F.A.L.: Porous Media —Fluid Transport and Pore Structure—, Academic Press(1979)
- 5) 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)
- 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) 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>
- 8) 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)
- 9) 劉海成・本間重雄: 土中における吸着性溶質の輸送機構に関する一考察, 東海大学工学部紀要, Vol.51, No.1, pp.117-121 (2011)
- 10) Kinzelbach.W. : Groundwater modeling, Developments in water science 25, Elsevier(1986)
- 11) Freeze, R.A. & J.A.Cherry : Groundwater, Prentice-Hall, Inc.(1979)
- 12) Honma S.: A study on the seepage resistance of suspension-type grouts in soils, Int.Chemical Eng., Vol.33, pp.315-325(1993)