

# 溶液型薬液による浸透注入時の移流分散現象

林 健太郎<sup>1</sup>・善 功企<sup>2</sup>・山崎 浩之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社土木企画部 部長 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>3</sup>正会員 (独) 港湾空港技術研究所地盤・構造部 室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

砂地盤に溶液型の薬液を浸透注入した場合、注入点からの距離が大きくなるに従い、固化強度が低下する現象が認められている。この強度低下の原因の一つとして間隙に充填される薬液の希釈現象が考えられる。本論文では、薬液注入時の薬液濃度の希釈現象について移流分散理論によるモデル化を行っている。検討項目として一次元モデル地盤を用いた薬液注入実験による移流分散理論の検証、薬液注入工事の移流分散現象によるモデル化、現地実験によるモデルの検証を取り上げた。この結果、現地実験で測定された溶液型薬液注入時の分散係数は、室内における一次元の浸透実験の結果に比べ大きい、薬液濃度の希釈現象は提案したモデルで説明されることが分かった。

*Key Words* : diffusion, advection, grouting, field test, sand, permeability

## 1. はじめに

近年、すぐれた浸透性と耐久性をもつ溶液型薬液が開発され、従来の薬液注入工法では適用が難しかった恒久的な強度が求められる分野での使用が可能となった<sup>1)</sup>。これらの分野で特に注目を集めたのが、液状化対策の分野である。これまで永久構造物の液状化対策の分野では、懸濁型の薬液しか使用できなかったため、浸透性が悪く、高価な工法となり、現実的に液状化対策に薬液注入工法が使用されることは非常に稀な事例であった。

これに対して耐久性を持つ溶液型の薬液は、浸透性が良く改良強度も自由に設定できるため、従来、施工法や施工費用の面で不可能であった既設構造物直下地盤の液状化対策に可能性を与えた。著者らは、1994年より、耐久性を持つ溶液型の薬液を使用した液状化対策技術の研究を行ってきたが、新潟における現地実験では、注入孔からの改良半径が2mの改良体の作成に成功した<sup>2)</sup>。これにより、従来の懸濁型薬液に比べて安価にかつ効果的に既設構造物の直下を改良できる可能性があることが明らかになった。これらの結果、実用的な施工法が開発されて以来、十数件の現場で液状化対策に使用された<sup>3), 4)</sup>。

しかしながら、これまでの実験結果や現地における施工事例から、溶液型の薬液を地盤に注入した場合、地盤内の間隙水と薬液が接触することで溶液が希釈されることが明らかとなった<sup>5)</sup>。この希釈現象は浸透距離が大きくなるに従い顕著となる。すなわち、従来工法のような浸透距離0.7m程度ではそれほど問題にならないが、改良直径4m程度で浸透距離が2mを越えるような場合、強度低下が顕著になる。この強度低下の原因である薬液の希釈量を、定量的に予測することができれば、あらかじめ注入する濃度を段階的に調整することで、均質な強度の改良が可能になるが、このような研究はきわめて少ない。

これらの薬液が浸透するメカニズムは、注入圧により薬液が多孔質中を流れる移流問題と薬液が間隙水と接触するときの混合などにより濃度が変化する分散問題とに分けられる。本論文では、薬液が地盤内に浸透注入するメカニズムを移流・分散問題としてとらえ、これらの現象を数式化した後、現地実験と比較を行い、これらの数値解について検討を行っている。

なお、本研究で用いた耐久性を持つ溶液型の薬液は水ガラスから劣化成分を除去した「特殊シリカ」である<sup>6)</sup>。特殊シリカの物理特性を表-1に示す。表より分かるように、比重は水に比べて3%程度の

違いしかないが、粘性は20℃の水に比べて3倍程度であるため、この薬液を注入したときの見かけ上の透水係数は、水を注入した場合の1/3程度の値となる。

表-1 特殊シリカの物性値

SiO <sub>2</sub> 濃度	6.00%
粘性	$2.9 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$
比重	1.027

## 2. 溶液の移流分散問題に関する従来の研究

溶液型薬液の浸透特性や改良形状については、森らにより室内実験<sup>7)</sup>が行われている。それによると均一な改良形状を得るためには、注入時にいわゆる割裂注入状態ではなく、浸透注入となることが重要であり、均一な改良形状を得るための施工条件が明らかにされている。本論文で実施した注入はこれらの件に基づき、局所的な割裂はあるが、全体的には、浸透注入を満たす注入速度(注入流量)で行われている。

崔らは大型モールドを用いた溶液型薬液による注入実験<sup>8)</sup>を行い、固結体の形状や体積を厳密に測定し、拘束圧や注入速度との関係を検討している。この実験では、上載圧が大きくなると、薬液のゲルタイムが浸透距離より短い場合でも、浸透注入が進行し、球状の改良体が見られることが明らかになっている。興味深い点は、固結体の直径が300mm程度と比較的小さいにもかかわらず、間隙を薬液で100%充填した時の体積より、厳密に測定された改良体の体積が、14%程度小さくなっている点である。崔らは、この原因として薬液の希釈の影響と推定している。

溶液型の薬液を浸透状態で注入した場合、改良径が大きくなると、注入点の近傍と周辺部とは固結体の強度が異なり、周辺部に行くほど強度は低下する傾向が見られる。本論文では、これらの強度低下の原因と考えられる固結体内部の薬液の濃度分布について、移流分散現象の観点から検討を加えている。これまでの薬液注入では、浸透距離が0.7m程度であり、強度低下の範囲は小さいため、移流分散理論から薬液の希釈メカニズムの解明を試みた研究はきわめて限られている。

一定の濃度の溶液が地盤のような多孔質の物質に浸透するときの「移流・分散」現象はこれまで古くから多くの研究がなされている。特に地盤の分野では有害物質による地下水汚染に関して古くからいろいろな溶液の移流分散現象について研究がなされており、単純なケースについては移流分散に関する輸送方程式を解くことにより解析的な解が得られている。

1966年に、Elrickら<sup>9)</sup>は除草剤の汚染を対象に、土中の一本の井戸から同心円状に広がる場合

の濃度変化の理論解を求め、小型模型実験により解の検証を行っている。本研究では、この研究とは異なり、土中の一点から放射状に広がる場合の薬液の濃度変化を、解析解と注入実験による計測結果について比較している。

これらの理論において、解に最も影響を与えるのが分散係数の設定である。この分散係数は、溶液の濃度や流速によって変化する値であり、これまでに多くの研究がなされている。大西ら<sup>10)</sup>と中島ら<sup>11)</sup>の実験では、粒状体の間隙内部の実流速 $v$  ( $v_d/n$ ; Darcyの法則で表すことのできる断面平均流速、 $n$ :間隙率)と粒子径 $d$ が、分散係数 $D$ に影響を与えることが明らかにされた。

汚染物質の分散係数については、この他にも多くの研究がなされている。特に旧建設省が行った実験<sup>12)</sup>では、NaCl溶液、六価クロム、砒素、消石灰およびトリクロロエタンについて、いわゆるカラム実験を行い、分散係数の同定を実施している。この研究では、塩水以外の重金属に関しては、砂粒子への吸着による遅延効果が認められている。また、分散係数は、実流速に比例し、砂粒子への吸着が無いNaCl溶液の場合、実流速0.04cm/sでは、分散係数 $D$ は0.01~0.02cm<sup>2</sup>/s程度の値となり、また、NaCl溶液の濃度が高くなるに従い、分散係数は若干小さくなる傾向を示している。

## 3. 一次元モデル地盤注入実験による分散係数の同定

改良土の一軸圧縮強さは、薬液注入により増加したシリカ含有率に比例して大きくなる<sup>9)</sup>。このため、注入による地盤内のシリカ分の増加メカニズムを知ることが、改良後の強度を予測するさいに重要となる。

注入時の特殊シリカ薬液の分散係数を測定するために、図-1に示す一次元モデル地盤を用いて、注入実験を実施した。実験より得られた濃度分布を用いて、数値解析により、分散係数の同定を行った。一次元の地盤に対して、端部より一定濃度の溶質が浸透する場合の輸送方程式として以下

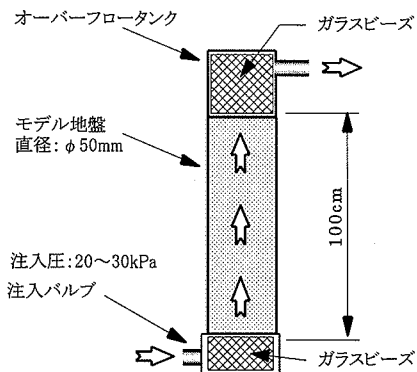


図-1 一次元注入実験装置

の式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 $t$  は時間、 $C$  は  $t$  および距離  $x$  に関して変化する溶質の濃度、 $v$  は浸透する溶液の実流速、 $D$  は分散係数である。

一連の実験では、表-2の物性を有する福島産の相馬砂を使用している。モデル地盤は、乾燥砂を一定高さから落下させ、側面から振動を与え、相対密度60%になるように作製した。所定の高さまで充填した後、容器下部より二酸化炭素ガスを注入し、さらに水道水を低速で充填して飽和状態にしている。薬液の注入に際しては、溶液と水の比重差による混合を避けるため、容器の下端より行い、一定量の薬液を、注入圧力を調整しながら、一定速度で注入した。モデル地盤内にシリカ濃度6%の特殊シリカ薬液を注入し、モデル地盤の1/2程度まで浸透した段階で注入を止めた。7日間養生後、数cm毎に固化した供試体を切り出し、土中のシリカ分含有量を測定し

表-2 相馬砂の物性値

比重	Gs	2.644
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.545
最小乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.184
平均粒径 D <sub>50</sub> (mm)		0.31
均等係数	Uc	2.33
細粒分	F <sub>c</sub> (%)	1.5

表-3 注入実験ケース

	case1	case2
砂	相馬砂 (Dr=60%)	相馬砂 (Dr=60%)
薬液濃度	6%	6%
配合強度 $q_{u0}$	107.7kN/m <sup>2</sup> (14日)	87.7kN/m <sup>2</sup> (14日)
ゲル化時間	0.5時間	3時間
注入時間	0.5時間	1時間
注入速度	0.0239cm/s	0.0147cm/s
浸透距離 L <sub>0</sub>	43cm	53cm

た。シリカ分含有量の測定では、試料をアルカリ溶液に浸し、固結分を溶解する事前処理を行った後、遊離したケイ酸 (SiO<sub>2</sub>) イオンを吸光度法により計量した<sup>1)3)</sup>。この方法は、土粒子を粉砕しないため、土粒子に含まれる SiO<sub>2</sub> 量の影響が小さく、薬液の充填によるシリカの増分を高い精度で測定することが可能である。

これらの実験では、薬液の固結時間に着目した2つのケースについて比較を行った。実験ケースの諸元を表-3に示す。ゲル化時間と注入時間が等しいcase1では、注入終了直前に急激にゲル化が始まるものであり、ゲル化時間が注入時間より十分大きいcase2では、注入時間を通して十分な溶液状態にある。

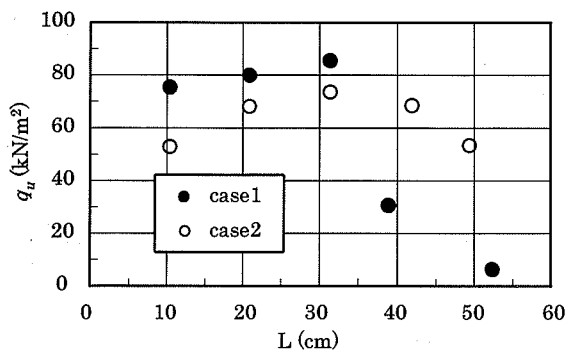


図-2 浸透距離と固化強度の関係

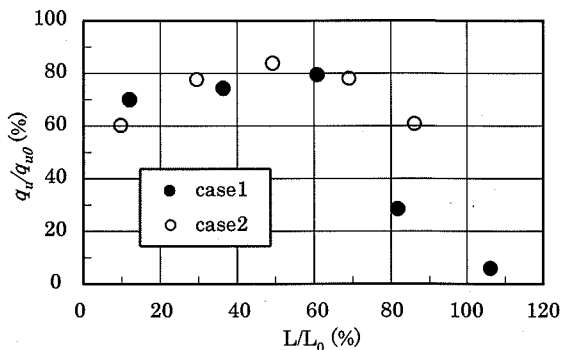


図-3 相対距離と強度発現率の関係

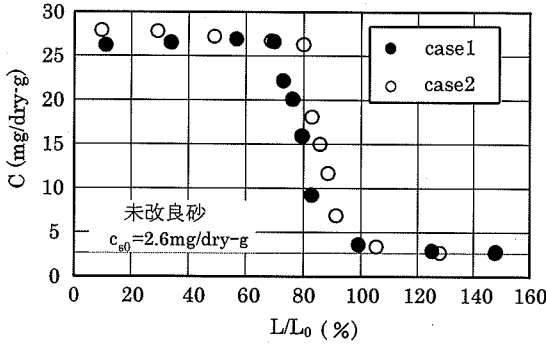


図-4 シリカ含有量と相対距離の関係

注入後、7日養生した後、地盤の解体を行い、一軸圧縮強さを測定し、その後、各試料からシリカ含有量の測定を行った。浸透距離(L)と一軸圧縮強さ( $q_u$ )の関係を図-2に示す。実験結果では、ゲル化時間の短いcase1の方が、改良強度は若干大きくになっている。

これらのケースは、浸透距離や配合強度が異なるため、14日養生時の配合強度 $q_{60}$ と想定される浸透距離 $L_0$ で正規化を行い、強度発現率( $q_u/q_{60}$ )と相対距離( $L/L_0$ )としてとりまとめたものを図-3に示す。図中の相対距離( $L/L_0$ )は、試料の採取位置(L)を注入した薬液量と試料の間隙量から予想される到達距離 $L_0$ で正規化した値である。この結果を見ると、強度発現率はいずれのケースも70%程度であり、相対距離80%程度の先端部分では、ゲル化時間が遅いcase2の方が強度発現率( $q_u/q_{60}$ )が大きくなっている。

上記の一軸圧縮試験の供試体から測定されたシリカ含有量の測定結果を、図-4に示す。図中のシリカ含有量は乾燥土1g当りの重量(mg/dry-g)で表されている。 $L/L_0=70\sim 100\%$ の区間では、供試体を厚さ2cm程度に切り分けてシリカ含有量の測定を行った。図-4より、シリカ含有量は、相対距離100%まで到達しておらず、 $L/L_0=80\%$ 程度のところで、急激にシリカ含有量が低下していることが分かる。また、薬液が到達していない、相対距離が100%を越える地点のシリカ含有量は2.6mg/dry-gとほぼ一定値となっている。これは、測定の際に未改良砂に含まれる微細な粒子のシリカ量を検出したものであり、この量をブランク値( $C_{60}$ )と称す。

すべての間隙が注入時のシリカ分濃度6%の薬液により飽和された理想状態の、乾燥試料1g当たりのシリカ含有量の増分( $C_0$ )は19.0mgと計算され、ブランク値( $C_{60}$ )と合わせると21.6mgとなる。計測された相対距離( $L/L_0$ )が0~60%の区間のシリカ含有量は26~28mg/dry-g程度あるため、両ケースとも $C_0$ を上回っている。注入した薬液に含まれるシリカの重

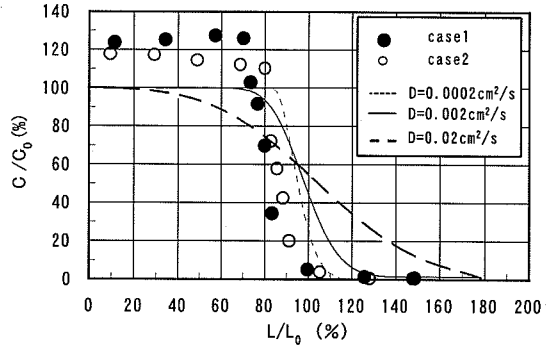


図-5 正規化したシリカ含有率と相対距離の関係

量と、計測されたシリカ含有量と浸透距離から求めた地盤内の総シリカ重量とを比較すると、case1の場合100.3%、case2の場合、113.0%となった。case2の場合、13%程度、計測値の方が大きい傾向にあるが、今回の計測方法は注入した薬液中のシリカ量をほぼ適正に表していることが分かる。

図-4より、注入口より70%までの範囲で、注入薬液中のシリカ分に比べ、15~25%程度濃縮されており、注入薬液量から想定される相対距離( $L/L_0$ )が100%の位置まで到達していないことが分かる。

シリカ含有量の増分(C)を、 $C_0$ により正規化したものと、相対距離( $L/L_0$ )の関係を図-5に示す。case2に関しては、シリカ含有量の測定値が注入した薬液に含まれるシリカ分の重量に比べ、13%程度大きめの値となったため、両者が等しくなるように、地盤内のシリカ含有量の測定値(C)を補正している。また、図中の曲線は、式(1)の分散係数(D)を変化させた時の理論曲線を示している。

蓄積・濃縮による遅れの傾向が認められるものの、シリカ含有率は、先端付近では分散係数 $D=0.0002\sim 0.002\text{ cm}^2/\text{s}$ の理論曲線と同様な低下傾向となっている(付録A参照)。また、case1と2を比べると、ゲル化時間の短いcase1の方がシリカ分の蓄積の傾向が大きく、到達した相対距離も小さくなっている。

これらのことから、一次元の地盤に対する薬液注入によるシリカ含有量の分布は式(1)の移流分散モデルでほぼ説明することが可能であり、強度の分布もこのモデルにより予測することが可能であると考えられる。

#### 4. 薬液注入工事における移流・分散現象のモデル化

##### (1) 検討モデル

溶液型注入工法の施工イメージを図-6に示す。同

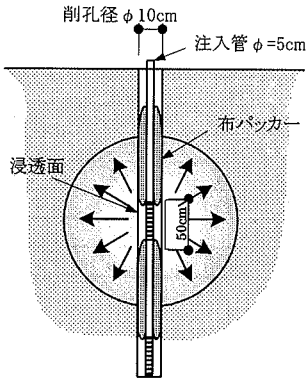


図-6 溶液型注入工法の施工イメージ図



写真-1 松坂現地実験:試掘状況

図より分かるように、薬液は削孔された孔の中で、上下を布パッカーで塞がれた円筒状の接地面（浸透面）から土中に浸透する。薬液は、注入圧力を制御することにより、流量一定の状態では放射状に浸透し、浸透径は、1～2 m程度となる。試掘調査により確認された固化体の形状は、地下水位以下では、ほぼ球状になることが確認されている。

写真-1に松坂における試験施工で確認された、2つの注入孔より注入された直径2.4 mの改良体の試掘形状を示す。

これらの薬液の注入を、3次元的な移流分散現象と考え、モデル化を行った。モデル化に当たり、以下に示す仮定を設けた。

- ・分散係数( $D$ )は、流速や方向によらず地盤内で一定である。
- ・地盤は均一であり、 $x, y, z$ 方向の分散係数や透水係数、間隙率は等しい。
- ・深度方向の水圧分布は一定値で、勾配は無視できる。
- ・地下水の流れはなく、注入時の薬液の流速は $r$ のみに依存し、 $\theta, \phi$ 方向に変化しない。
- ・注入点での流速は一定である。

上記の仮定のうち、特に分散係数( $D$ )は、流速に比例すると言われているため、浸透距離が増えるに従い、先端部では流速が低下し、分散係数は小さくなり、希釈の影響は小さくなる。しかしながら、これまでの実測された現象では、先端部において希釈の影響が大きいことから、モデル化に当たっては、分散係数を一定値として取り扱った。なお、流速によって分散係数( $D$ )が変化する場合の計算結果を付録に示す。

これらの条件もと、薬液注入を、注入点から球状

に広がる移流分散問題としてとらえると、浸透する薬液の濃度と流速は、極座標( $r, \theta, \phi$ )上で、以下のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_r \frac{\partial C}{\partial r} + D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2)$$

ここに、 $C$ :薬液濃度、 $V_r$ :半径方向の実流速

地中の一点から注入した場合、 $r$ の位置の流速 $V$ は、 $r$ の関数となり、換算半径 $r_0$ と $r_0$ における流速 $V_0$ を用いて以下の式で表される。なお、換算半径 $r_0$ とは図-6に示すストレーナー部分の接地面積を、球状に換算した時の半径である。

$$V = \frac{r_0^2}{r^2} V_0 \quad (3)$$

式(2)および(3)より、均質な地盤へ、一点より放射状に浸透注入させる場合の薬液濃度に関する移流・分散現象は、以下の式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left( \frac{2 \cdot D}{r} - \frac{r_0^2}{r^2} V_0 \right) \frac{\partial C}{\partial r} + D \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (4)$$

ここに、 $C$ :薬液濃度

$D$ :分散係数

$r$ :中心からの距離

$r_0$ :浸透面の換算半径

$V_0$ : $r_0$ における初期の実流速

表-4 計算条件

吐出速度 (ℓ/min)	10
ダルシー流速 (cm/min)	浸透距離で変化
注入時間 (min)	460
シリカ濃度 (%)	10
予定浸透長 (cm)	130
間隙率 (%)	50
初期浸透面積 (cm <sup>2</sup> )	1000

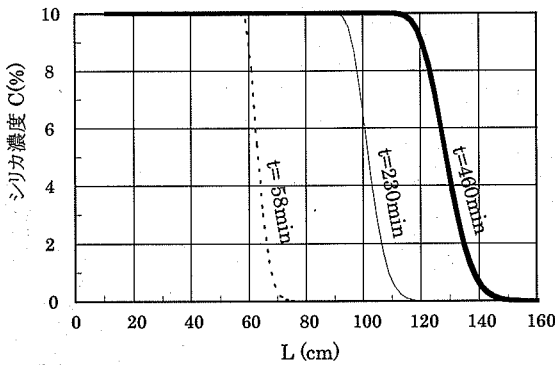


図-7 数値解析結果

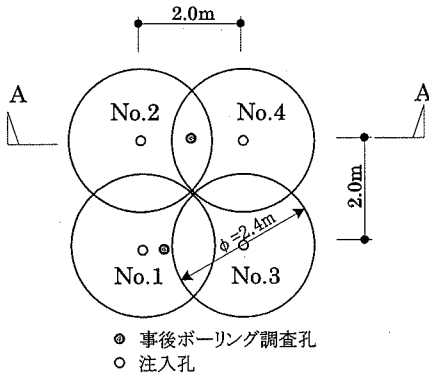


図-8 施工平面図

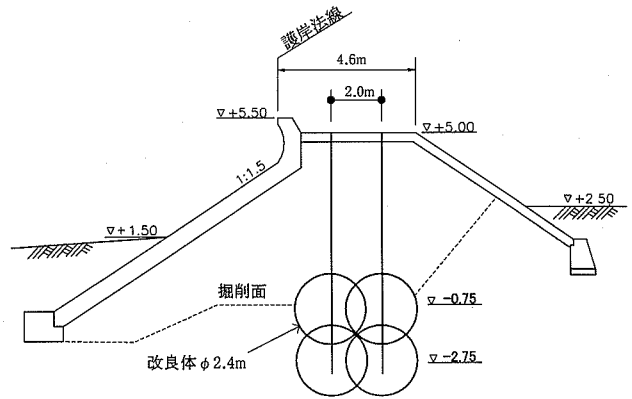


図-9 施工断面図(A-A)

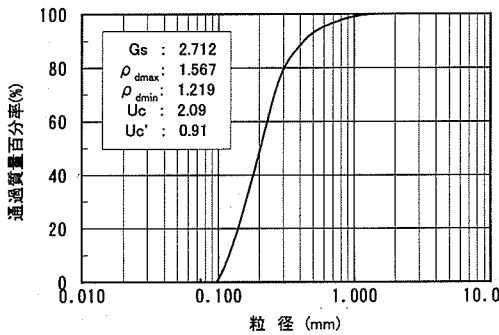


図-10 原位置砂の粒度特性

式(4)は、動水勾配や圧力の項を含まず、流速 $V_0$ と分散係数 $D$ のみの関数となっている。式(4)を分散係数一定( $D=0.002\text{cm}^2/\text{s}$ )の条件で、差分法により計算した場合の浸透距離( $r$ )と薬液濃度( $C_0$ )の関係を図-7に示す。計算条件を表-4に示す。計算例では、実際の施工現場における注入条件を考慮して、吐出量 $10\ell/\text{min}$ で、直径 $2.6\text{m}$ の改良体を作成する場合を一例としてとりあげている。

図-7によると、経過時間が大きくなり、浸透距離が大きくなるほど薬液の濃度低下の勾配が緩や

かになっているのが分かる。分散現象が無い場合の到達距離を予定浸透長( $r_{max}$ )とすると、460分後の予定浸透長は $130\text{cm}$ である。すなわち、分散現象がない場合、浸透距離 $130\text{cm}$ まで、シリカ濃度 $10\%$ の薬液で間隙が充填されるはずである。しかしながら、分散現象のため、薬液の到達距離は、 $130\text{cm}$ を越え、 $130\text{cm}$ におけるシリカ濃度は $4\%$ に低下している。すなわち、浸透距離が大きくなるほど、分散現象による希釈の影響が大きくなることがわかる。

## (2) 現地注入実験におけるシリカ濃度の分布

現地で注入施工された土のシリカ含有率の測定結果と数値解析結果との比較を行った。原位置試験は、溶液型薬液注入工法の施工性確認を目的として護岸堤防直下で行われた。施工平面図と断面図をそれぞれ図-8および図-9に示す。現地の砂は、図-10に示すように、粒径の均一な細砂であった。

注入を行うにあたり、原位置に設置した注入孔より、水道水を注入し、注入圧力と注入速度の関係を

求めた。測定結果を図-11に示す。図-11より、注入速度を大きくすると注入圧力が大きくなっているが、15 ℓ/minを越えたあたりから、注入圧力の勾配が低下していることが分かる。このことから、15 ℓ/minを越えた段階で、注入孔の周囲に割裂面が発生し、注入圧が低下したと考えられる。施工では、浸透注入させることを目的としているため、注入速度を15 ℓ/minと設定した。

実験では、正方形に2 m ピッチで設置された4本の注入管より、26.5 m<sup>3</sup>の薬液が地盤内に注入された。注入の諸元を表-5に示す。予定の改良体の直径は2.4 mであり、上段4個、下段4個の改良体が造成された。注入施工は、下段の球を造成した後、上段に移り、図-8中の番号の順番で造成された。

2週間の養生期間の後、図-9の断面図に示す形状で掘削が行われ、上段の改良体の形状が確認された。改良体は、平均一軸圧縮強さ( $q_u$ )で117kN/m<sup>2</sup>程度の強度を持ち、写真-1に示すように注入点を中心とした球状になっていることが確認された。これは、注入された薬液が割裂を起こさずに浸透注入状態で地盤内に入っていることを表している。注入管より改良体の外周に向けて測量された改良体の半径を表-6に示す。

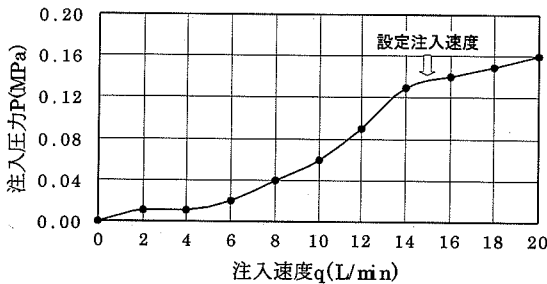


図-11 現位置における有効注入圧力と注入速度

表-5 注入諸元

注入速度	$q$ (ℓ/min)	15
注入時間	$t$ (min)	221
薬液濃度	$C_0$ (%)	6.0
薬液の比重		1.027
薬液のゲル化時間	(min)	300
到達予想距離	$L_0$ (cm)	125
換算浸透面積	$A_0$ (cm <sup>2</sup> )	3925
実流速(注入口付近)	$V_1$ (cm/s)	0.1415
実流速(中心より1.25m)	$V_2$ (cm/s)	0.0038

計測された改良体の形状には、改良半径で100~185 cm程度のばらつきが見られた。また、掘削により確認された改良体の上面の形状は、いずれも、鉛直方向よりも水平方向への薬液の広がりが大きい、楕円状の改良体が計測された。特に、水平方向の広がりが大きいNo.3およびNo.4の改良体では、掘削による確認の際に改良体の中央に廃棄された貝殻の層が見つかり、そちらへ薬液が流れていたことが考えられる。

事後調査で実施した図-9に示す位置のボーリング試料と、注入位置で水平に掘削した、上段No.2の改良体から、ブロックサンプリングした試料についてシリカ含有量試験を実施した。注入点からの各相対距離( $L/L_0$ )におけるシリカ含有量比( $C/C_0$ )の分布を図-12に示す。予定される到達距離( $L_0$ )には、地盤間隙への充填率を100%としたときの予定改良半径を使用した。また、すべての間隙が注入時の薬液により飽和された理想状態の、乾燥試料1g当たりのシリカ含有量の増分( $C_0$ )の計算値は19.0mgである。地盤の間隙量は、事前に実施した不攪乱試料より求めた土質試験値から算定した。

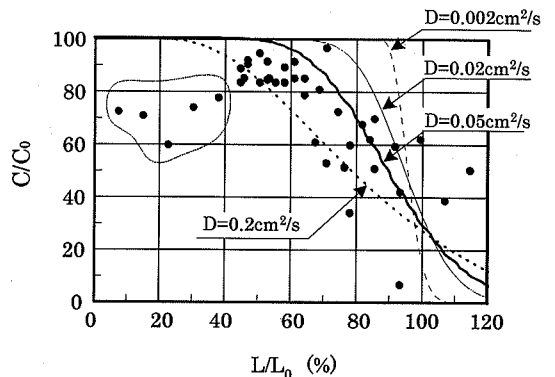


図-12 相対距離とシリカ含有量比の分布

表-6 改良体の寸法計測結果

高さ	番号	改良体半径		縦横比 (%)
		水平方向(cm)	鉛直方向(cm)	
上段	No.1	110	87.2	79
	No.2	100	73.5	74
	No.3	120	71	59
	No.4	125-135	48.5	36-39
下段	No.1	130	—	—
	No.2	125	—	—
	No.3	145	—	—
	No.4	130-185	—	—

図-12より、測定された地盤内のシリカ含有率比( $C/C_0$ )は、一次元模型浸透実験に比べて、ばらつきが大きくなっている。この原因として、現地砂では、密度分布のばらつきが大きいこと、注入時の局所的な割裂面発生による浸透形態の相違などが考えられる。しかしながら、 $L/L_0$ が60%を越えた地点から、 $C/C_0$ はなだらかに減少しており、先端部ほど薬液が希釈されている傾向は、模型および現地実験とも一致している。また、一次元の模型浸透実験では、相対距離40%以下の所では濃縮現象が認められたが、現地実験では、注入孔の近傍で採取した試料の $C/C_0$ が70~80%と低めの数値となり、薬液が希釈して充填される傾向が認められた。

図-12に示す4本の曲線は、分散係数を変えて式(4)を差分法で計算したものである。計算結果では、分散係数が大きくなるに従い、濃度の減少が始まる距離が短くなっている。一次元模型浸透実験の結果では、分散係数は、おおよそ $0.0002\sim 0.002\text{cm}^2/\text{s}$ 程度であった。現地実験の結果では、分散係数( $D$ )が $0.002\text{cm}^2/\text{s}$ の場合、 $L/L_0$ が90%を越えると急激にシリカ含有量が減少する結果となり、実験結果のように60%から徐々に減少する現象は再現できていない。今回の現地実験では $L/L_0$ が60%を超えた点よりなだらかに低下しており、実測値を直接表現するには、 $D=0.05\text{cm}^2/\text{s}$ が妥当であるとの結論が得られた。この分散係数は、一次元模型浸透実験から得られた値に比べ、10~100倍ほど大きい値となった。

この原因について、注入口付近の薬液の流れが乱流状態であることが考えられた。しかしながら、施工条件より求めたレイノルズ数は、注入孔と地盤の境界で2程度であり、距離とともに急速に小さくなることから、ほぼ、層流状態で浸透しており、この可能性は否定された。

また、カラム実験に比べて、観測規模の大きい現地計測では、分散係数が大きくなるという報告<sup>14)</sup>もあり、現地における地盤のばらつきや施工上の不確実性を考慮した上で、大きめの分散係数を採用することが必要だと考える。これは、安全側の分散係数の設定となるが、さらに予測精度を向上させるためには、今後とも現地におけるデータの集積が必要である。

以上のように、注入点からの距離が大きくなるに従い、薬液が希釈されながら充填されることが確認され、適切な分散係数を用いるという前提条件つきではあるが、式(4)を用いて薬液の濃度を予測することが可能であることが明らかとなった。また、シリカ含有量の測定結果にばらつきが大きい、シ

リカ含有量の低下が、図-4~図-6および図-12から改良体外周域の強度低下の原因となっていることが確認された。これらのことから、式(4)を用いて、あらかじめ希釈量を予測し、注入時に薬液濃度を段階的に調整することで、間隙への均一な濃度の薬液の充填が可能となり、より均質な強度の改良体が作成できると考えられる。

## 5. 結論

今回の研究により以下の結論が得られた。

- (1) 一次元の地盤に薬液注入を行った場合の、シリカ含有量の分布は、式(1)の移流分散モデルでほぼ説明することが可能であり、強度の分布もこのモデルにより予測することが可能である。
- (2) 一次元モデル地盤の注入実験と比較すると、現地実験ではシリカ含有量の測定値のばらつきが大きく、希釈される傾向が大きいことが分かった。この原因として原位置砂の密度分布のばらつきと割裂面の発生などによる浸透形態の相違などが考えられる。
- (3) 現地実験によるシリカ含有量の測定結果では、注入点からの相対距離が60%を超えるところからシリカ含有量が徐々に低下している。この傾向は、式(4)により説明される。
- (4) 現地実験において、溶液型薬液を注入した時の分散係数は、今回の研究では一次元浸透実験から求めたものに比べ、10~100倍程度大きな値であった。
- (5) 改良体外周域の強度低下の一因は、移流分散現象によるシリカ含有量の低下によるものである。

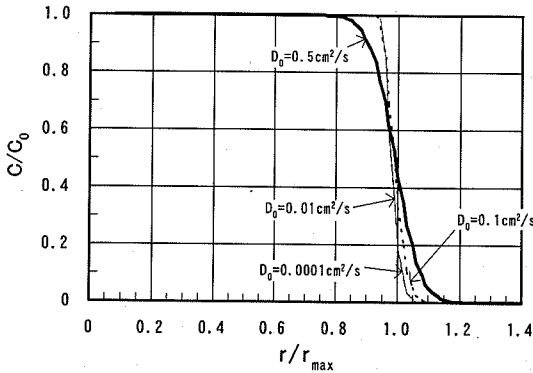
## 付録

### A. 吸着項を考慮した理論式による一次元模型実験結果の検討

一次元模型実験結果(図-5)を見ると、 $L/L_0$ が0~60%の範囲で、濃度の増加傾向が認められる。ただし、今回の実験の目的である、原位置での実験結果(図-12)では、同様の範囲で、このような現象は認められなかった。このため、研究の目的である濃度分布の予測の観点から見て、式(4)のような放射状に注入する場合への展開を考え、吸着項の影響は無視できるものと仮定した。

### B. 分散係数が速度に比例する非線形問題への修正 これまでの研究から、分散係数が速度に比例す





付図-1 相対距離( $r/r_{max}$ )と相対濃度( $c/c_0$ )の関係

ることが分かっている。このため、分散係数を速度の関数として、放射状の注入問題を考えると、以下のような式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{r_0^2}{r^2} (-V_0 \frac{\partial C}{\partial r} + D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}) \quad (\text{付-1})$$

ここに、 $D_0$ は、注入面 ( $r=r_0$ ) における分散係数

この式を、拡散係数を $0.0001 \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲で変化させ、表-4および図-7と同じ条件で、距離と濃度の関係を求めると以下のような結果が得られる。

上記の関係をみると、一次元試験でフィッティングして求めた分散係数が $0.002 \sim 0.0002 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であるため、 $250 \sim 2500$ 倍ほど大きい分散係数を用いても、数値解析結果では、先端部の濃度低下は大きくならない。実際の現場の現象を見ると、相対距離60%程度から、濃度が減少している。この理論式を用いて薬液注入時の濃度分布を求めることは、本理論の結果からみると適用性が低いと考えられる。

分散係数については、水理学で用いられるリチャードソンの $4/3$ 乗則のように、分散係数が、拡散の距離スケールに比例すると言う考えもある<sup>15)</sup>。今回の理論式が実際と合わなかった理由として、一次元的な流れと異なり、注入時の放射状の流れでは、拡散係数が、流速の他に点源からの距離などの影響を受けて理論式に比べ大きかったことが考えられる。

## 参考文献

- 1) 林健太郎, 藤原敏光: 薬液注入による液状化防止工法に関する研究, 第29回土質工学会研究発表講演集, pp.2169-2170, 1994.
- 2) 山崎浩之, 前田健一, 高橋邦夫, 善功企, 林健太郎: 溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発, 港湾技研資料, No.905, pp.1-29, 1998.
- 3) 林健太郎, 林規夫, 佐々木広輝, 神原昌彦, 川口民雄, 野谷斎: 溶液型薬液注入工法による既設滑走路直下の液状化対策, 五洋建設技術年報, Vol.30, pp.7-16, 2000.
- 4) 佐伯茂, 岸本秀隆, 小玉茂義, 長谷川英勝, 林健太郎, 河村健輔: 溶液型薬液注入工法による既設矢板岸壁背面の地盤改良, 第四回地盤改良シンポジウム概要集, pp.155-160, 2000
- 5) 林健太郎, 善功企, 山崎浩之, 林規夫: 溶液型薬液注入工法の浸透および強度特性に関する大型土槽実験, 土木学会論文集, 第694号/Ⅲ-57, pp.221-228, 2001.
- 6) 米倉亮三, 島田俊介: 恒久グラウトの恒久性のメカニズム, 土木施工, 40, 巻7号, pp.99-106, 1999.
- 7) 森麟, 田村昌仁, 平野学: ゲル化時間の長い薬液の砂質地盤における注入形態とその支配条件, 土木学会論文集, 第388号/Ⅲ-8, 1987.
- 8) 崔亢吉, 風間基樹, 柳沢栄司: 薬液注入条件による砂の固結形状の変化, 土木学会論文集, 第582号/Ⅲ-41, pp.109-123, 1997.
- 9) Elrick, D.E, Erh, K.T, Krupp, H.K : Applications of Miscible Displacement Techniques to Soils, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.2, No.4, pp.717-727, Fourth quarter, 1966.
- 10) 大西有三, 田中誠, 井尻裕二, 眞田達朗: 砂地盤における拡散係数の決定方法に関する研究, 第30回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.1853-1856, 1995.
- 11) 中島英夫, 廣岡明彦, 竹村次朗, 木村孟: 遠心模型実験による汚染物質の拡散現象のモデル化について, 第30回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.1857-1861, 1995.
- 12) 建設省土木研究所 材料施工部土質研究室 他: 地盤環境の性状保全型建設技術の開発, 平成11年度報告書, 2000.
- 13) 垂水尚志, 坂井宏行, 荒木進, 関口智之, 飯尾正俊: 注入固化土の化学分析に影響を及ぼす諸因子について, 第26回土質工学会研究発表会講演集, pp.1947-1948, 1991.
- 14) W. キツェルハッハ: パソコンによる地下水解析 (監訳: 上田年比古), pp.170, 1990.
- 15) 例えば, 土木学会 水理学公式集, pp.617, 1999.

(2002.8.23受付)

## DIFFUSION AND ADVECTION PHENOMENON OF SOLUBLE TYPE GROUTING

Kentaro HAYASHI, Kouki ZEN and Hiroyuki YAMAZAKI

The strength of sand improved by the soluble type of grouting decreases with the increasing distance of injection point. One of the reasons for this strength decrease is considered the dilution of grout that occurs as it fills the void of sand layer. In this study, model tests are performed to clarify the dilution at the time of grouting on the basis of the theory on advection and diffusion. Measures used were: 1) verification of the theory by one-dimensional model grouting test, 2) consideration on the application of a numerical model for soluble type grouting, and 3) verification of the model at a field test. As a result, it was found that the diffusion coefficient at the time of grouting, which was measured in the field test, was greater than the one from the one-dimensional model test. However, it was confirmed that the proposed model could explain the dilution of grout in grouting process.