

# 薬液注入に伴う地盤変形の 数値解析手法に関する研究

仲山 貴司<sup>1</sup>・橘 直毅<sup>2</sup>・岡野 法之<sup>3</sup>・赤木 寛一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:nakayama@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社

(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

<sup>3</sup>正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 創造理工学部

(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 西早稲田キャンパス58号館205室)

過去にゲルタイムの短い注入材が数多く使用されていた時代の注入形態は「割裂注入」となる場合が多く、「浸透注入」を対象とした理論的な計算手法が研究される機会は少なかった。しかし、近年では注入方式や注入材の開発も進み、砂質地盤では「浸透注入」に近い注入形態とすることが可能になってきている。今後は、現場情報の少ない場面などにおいて、浸透注入に対する計算手法も有用なツールとなるものと考え、著者らは、注入材の地盤中の浸透形状や注入圧力などの経時変化を求める理論的な計算手法と、浸透注入を対象とした地盤変形解析手法を開発し、これらの適用性を検証した。

**Key Words :** chemical grouting, advection, diffusion, finite element analysis, ground deformation

## 1. はじめに

薬液注入工法は機械設備が小型であり、作業の方向性に自由度があるなどの利点から、鉄道工事では作業空間や作業時間に制約が多い開削工やシールドトンネル工、線路下横断工の補助工法として数多く用いられている<sup>1)</sup>。ただし、一方では注入材を土の空隙に圧入する工法原理に起因して、注入材のゲルタイムや地盤の透水性次第で周辺地盤に変位・変形が発生する場合がある。

例えば、シールドトンネル通過時の防護工として、高架橋近傍で注入した事例では、1日当たり約2~3mmの隆起が報告されている<sup>2)</sup>。また、駅舎近傍の砂質地盤に注入した事例では、橋台が約70mmの隆起をした計測結果が報告されている<sup>3)</sup>。この事例では対策方法を検討するために試験注入を実施しており、ゲルタイムの長い注入材を注入速度7.5ℓ/minで注入した場合、注入圧力0.6~1.2MPaで隆起量が約1mmに抑えることができることも確認している。

したがって、このような薬液注入に起因した周辺地盤の変位・変形を最小限に抑制するために、理論的な計算

手法や数値解析手法を開発する研究が、これまでも数多く行われてきた。

例えば、森、福井ら<sup>4), 5)</sup>は室内実験や現場データをもとに割裂注入の発生および進展と注入圧力の関係式を提案している。赤木ら<sup>6)</sup>は、実現場のシミュレーションを通して、割裂注入で発生する亀裂をジョイント要素でモデル化し、この亀裂に注入圧を作用させる地盤変形解析手法を提案した。また、軌道直下の注入に際して、低減係数を掛けた注入圧を載荷する地盤変形解析を行った事例もある<sup>7)</sup>。

ただし、これらの多くはゲルタイムの短い注入材を使用していた時代に実施されたため、割裂注入を研究対象としたものが大半を占める。現在は、新たな注入方式やゲルタイムの長い注入材の開発が進んだため<sup>例えは8)</sup>、透水性のよい砂質地盤では浸透注入が主体となっており、浸透注入についても理論的な計算手法や数値解析手法を必要とする場面が徐々に増えてきている。

しかし、浸透注入については、依然として、簡素化された地盤条件下、かつ、単一孔から注入した場合の注入圧力を求める理論的な計算手法<sup>9)</sup>しかないのが現状であ

り、実際の複雑な地盤を対象とした注入材の浸透形状や注入圧力、周辺地盤の変位・変形量などを求める理論的な計算手法や数値解析手法の開発が要望されている。

このような背景を踏まえ、本研究では、まず、注入材の浸透に関する検討方法として、簡易計算手法と粘性に依存する浸透流-移流拡散解析を提案し、その適用性を検討した。次に、地下水の流れを等価節点外力として作用させる土水非連成解析手法<sup>10,11)</sup>を浸透注入を対象とする地盤変形解析に応用し、その適用性を検証した。

## 2. 注入材の浸透に関する検討

### (1) 概要

浸透注入に関する上記の理論的な計算手法として、代表的なものに「Maagの式」がある。これは、以下の①～⑥の仮定をもとに式展開したものである<sup>9)</sup>。

- ①注入材の流れは層流であり、Darcy則に従う。
- ②注入材の比重は水と大差なく重力の項は無視できる。
- ③注入材の粘性はゲルタイムまでは一定不変である。
- ④発生する過剰間隙水圧は無限遠で静水圧と釣合う。
- ⑤地盤は均質で無限に続き拘束するものではなく、注入材は球状に浸透する。
- ⑥注入範囲は地下水位以下にあり地下水は静止している。

この式の問題点として、現場は注入圧力の時間変動(例えば、 $t-p-q$ チャート)を管理しているのに対して、④で注入材の浸透過程を無視しているため、注入圧力の経時変化を計算できないこと、また、⑤、⑥は地層境や地下構造物、地下水面、前ステップで注入した注入材など近傍に浸透を遮るものがある地盤への適用を制限していること、が挙げられる。本研究では、これらの問題点を解決する手法として、④を修正した簡易計算手法と④、⑤、⑥を有限要素法に置換える手法を以下のように考察した。

#### a) 簡易計算手法

Maagの式では無限遠で静水圧と釣合うという仮定を用いているが(図-1中の②)、さらに注入材の浸透界面では、注水した場合の過剰間隙水圧分布と注入材を注入した場合の過剰間隙水圧は釣り合っているはずである(図-1中の①)。そこで、この浸透界面の釣り合いと①～⑥の仮定を用いて、改めて式展開すると式(1)となる。これは時刻 $t$ における間隙水圧 $p(r,t)$ と注入材の浸透半径 $R(t)$ の関係を表すものであり、 $r$ に注入孔半径 $r_a$ を代入した $p(r_a,t)$ が注入圧力となる。

$$\begin{cases} p(r,t) = \frac{\gamma \cdot q}{4\pi \cdot k_w} \cdot \left\{ \left( \frac{\mu_g}{\mu_w} \right) \frac{1}{r} + \left( 1 - \frac{\mu_g}{\mu_w} \right) \frac{1}{R(t)} \right\} + \gamma \cdot h_w & (r \leq R(t)) \\ p(r,t) = \frac{\gamma \cdot q}{4\pi \cdot k_w} \cdot \frac{1}{r} + \gamma \cdot h_w & (r > R(t)) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $p(r,t)$ :半径 $r$ 、時刻 $t$ での圧力(kPa)、 $\gamma$ :水の単位重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $h_w$ :吐出口近傍の地下水位(m)、 $q$ :注入量(m<sup>3</sup>/sec)、 $k_w$ :水の透水係数(m/sec)、 $\mu_w$ :水の粘性(Pas)、 $\mu_g$ :注入材の粘性(Pas)、 $R(t)$ :時刻 $t$ における浸透半径(m)

また、球状浸透を仮定した場合、時刻 $t$ の注入材の浸透半径 $R(t)$ は式(2)となる。

$$q \cdot t = \frac{n_e}{100} \cdot \frac{4}{3} \pi (R(t)^3 - r_a^3) \Leftrightarrow R(t) = \sqrt[3]{r_a^3 + \frac{300 \cdot q \cdot t}{4\pi \cdot n_e}} \quad (2)$$

ここに、 $n_e$ :間隙率(%),  $r_a$ :注入孔半径(m)

この①～⑥の仮定に浸透界面の過剰間隙水圧の釣り合いの仮定を追加した式(1)、式(2)は、Maagの式では計算できない、注入材の浸透半径、注入圧力、間隙水圧の経時変化を求めることができる。ただし、この方法を用いた場合でも、依然として⑤、⑥の制約は受けることになる。

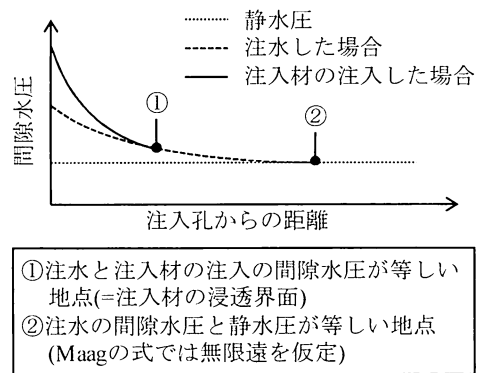


図-1 間隙水圧分布の概念図

#### b) 有限要素法

##### (粘性に依存する浸透流-移流拡散解析)

①から、有限要素法としてDarcy則に基づく支配方程式(式(3))を離散化する解法(浸透流解解析)を用いればよいが、③から、薬液注入は粘性の異なる混合流となるため、注入材の浸透領域の透水性(式(3)中の $K$ )を地下水および注入材の粘性に合わせて逐次修正する必要がある。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) - q = \frac{\partial}{\partial t} (S_w \cdot n_e) \quad (3)$$

ここに、 $K$ :透水係数、 $h$ :水頭、 $S_w$ :飽和度、 $n_e$ :間隙率

本研究では、注入材の浸透挙動については、浸透流解析から求まる流速場を用いた移流拡散解析<sup>12)</sup>を連成させて行い、濃度分布として求めるものとした。なお、移流拡散解析とは式(4)に基づく有限要素法である。

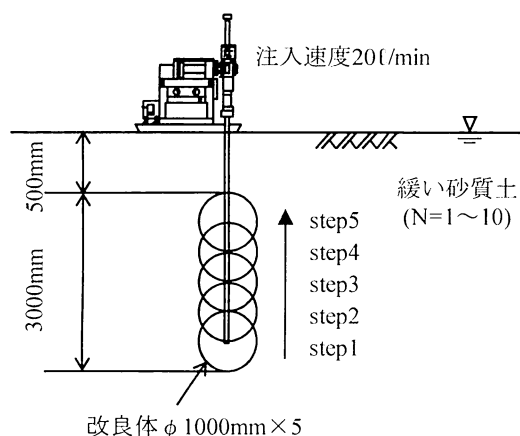


図-2 検証モデル

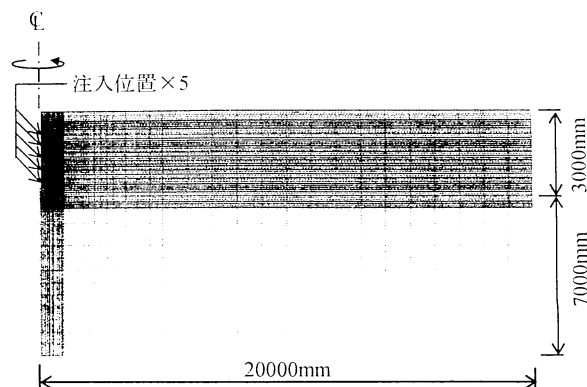


図-3 解析メッシュ(軸対称モデル)

表-1 施工条件

|                    |         |
|--------------------|---------|
| 注入量 $q$ (l/min)    | 20.0    |
| 注入ロッドの直径(mm)       | 100     |
| ストレーナの長さ(mm)       | 100     |
| 注入有効半径 $R(t)$ (mm) | 500     |
| 注入順序               | 後退(上昇)式 |
| ステップ間隔(mm)         | 250     |

表-2 計算パラメータ

|      |                                          |                       |
|------|------------------------------------------|-----------------------|
| 地盤条件 | 水の単位体積重量 $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 10.0                  |
|      | 水の透水係数 $k_w$ (m/sec)                     | $1.0 \times 10^{-5}$  |
|      | 間隙比 $e$                                  | 0.92                  |
|      | 比貯留係数 $S_d$ (1/m) <sup>**</sup>          | $1.80 \times 10^{-4}$ |
|      | 拡散係数 $\kappa$ <sup>**</sup>              | 0.00                  |
| 注入材  | 粘性係数比 $\mu_w/\mu_g$                      | 0.50                  |

※非定常浸透流解析で使用する値

表-3 水の粘度<sup>13)</sup>

| 温度(°C) | 粘度( $\times 10^{-3}$ Pa·s) |
|--------|----------------------------|
| 0      | 1.793                      |
| 5      | 1.521                      |
| 10     | 1.308                      |
| 15     | 1.139                      |
| 20     | 1.002                      |
| 25     | 0.89                       |

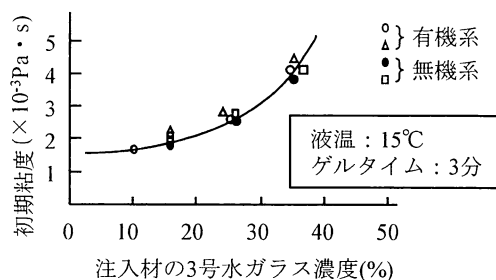


図-4 注入材の粘性<sup>14)</sup>

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} + u \frac{\partial C(t)}{\partial x_i} = \kappa \left( \frac{\partial C(t)}{\partial x_i} \right)^2 + q \quad (4)$$

ここに、 $u$ :流速、 $C(t)$ :時刻 $t$ の濃度(Max=1, Min=0),  $\kappa$ :拡散係数

また、透水係数の濃度に対する粘性依存性は線形式(式(5))で定義した。

$$K = \left( \left( \frac{\mu_g}{\mu_w} - 1 \right) C(t) + 1 \right) \cdot k_w \quad (5)$$

ここに、 $k_w$ :水の透水係数、 $\mu_g$ :注入材の粘性、 $\mu_w$ :水の粘性

この解析手法は、注入材の浸透形状、注入圧力、間隙水圧の経時変化を求めることができるほか、複雑な地盤、連続する注入ステップにも理論上の制約を受けないものである(この解析手法を浸透流-移流拡散解析と記す)。

## (2) 計算条件

立坑土留め欠損部における止水を目的とした薬液注入を想定して、検証モデルを図-2、施工条件を表-1のように設定した。注入範囲は深さ0.5~3.5mであり、後退(上昇)式で1つの注入孔から5ステップ(0.5mピッチ)で単相の注入を行う。注入速度は2重管ストレーナ、2重管ダブルパッカ工法で想定される最大値の20l/minとした<sup>2)</sup>。

浸透流-移流拡散解析では、注入材の3次元的な浸透を表現するため、図-3の軸対称要素による3次元モデルを用いた。解析領域は下方10m、半径20mとし、地盤は均一であるものとした。境界条件は、浸透流解析では地表面および側面を自由排水境界とし、ストレーナ位置には注入速度に相当する水平方向の流量境界を与えた。また、移流拡散解析では、同位置に濃度境界( $C=1$ )を与えた。

簡易計算手法は、理論上、このような連続する注入ステップを表現できないが、各ステップの注入が個別に行われたものとした。

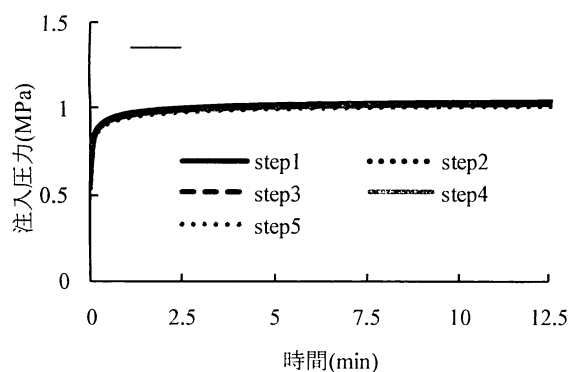


図-5 注入圧力の経時変化(簡易計算手法)

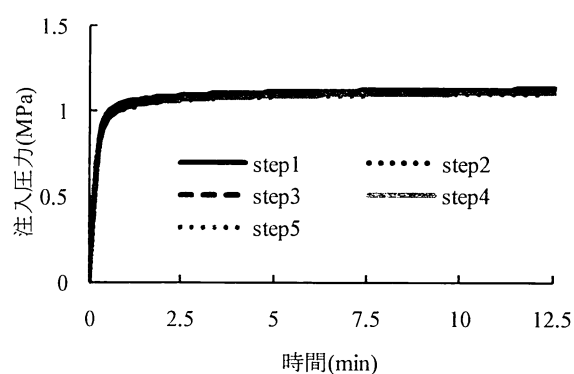


図-6 注入圧力の経時変化(浸透-移流拡散解析)

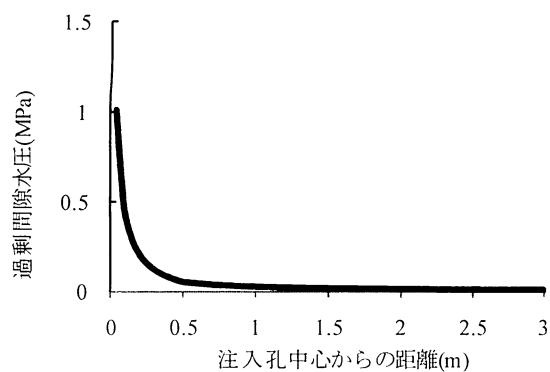


図-7 過剰間隙水圧分布(12.53(min), 簡易計算手法)

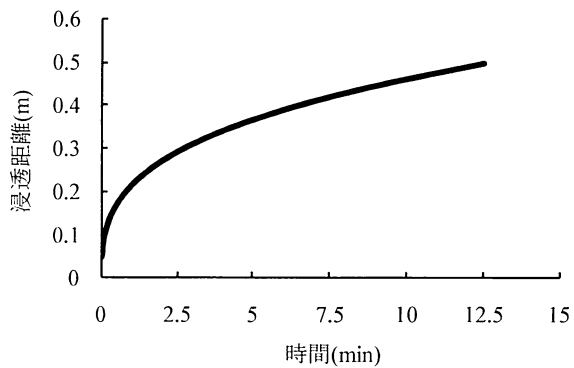


図-8 浸透距離(12.53(min), 簡易計算手法)

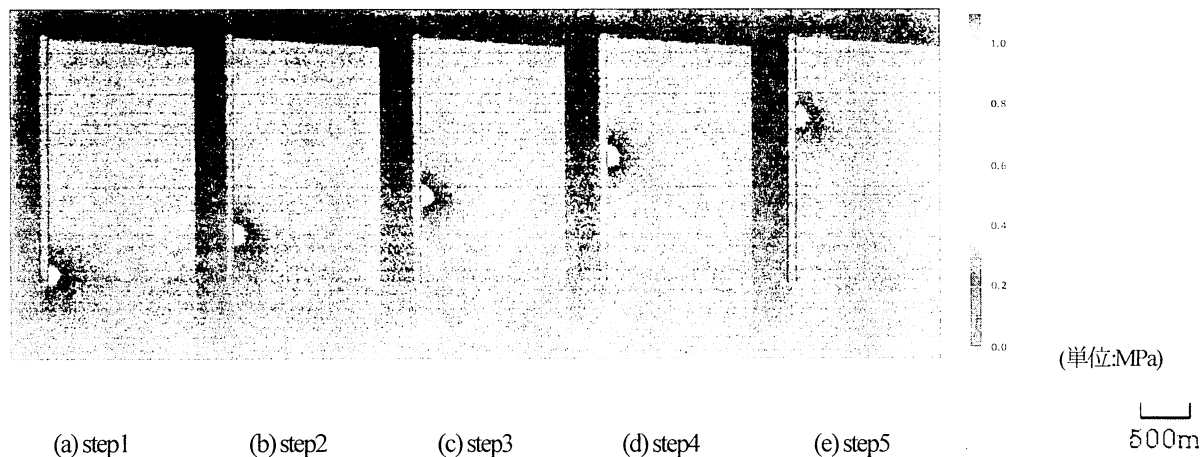


図-9 過剰間隙水圧分布(各ステップ開始後12.53(min), 浸透流-移流拡散解析)

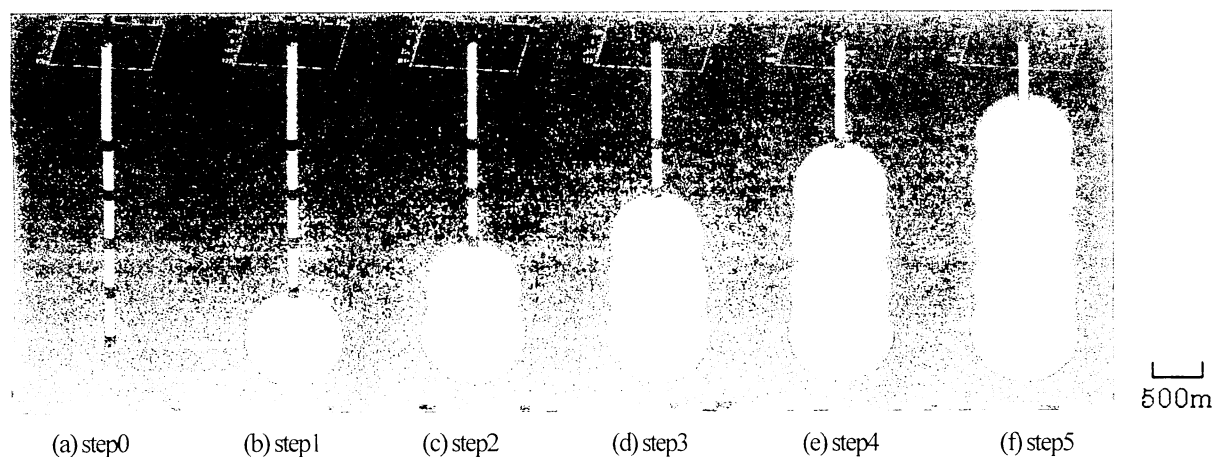


図-10 濃度分布( $C=0.5$ の等値面図)(各ステップ開始後12.53(min), 浸透流-移流拡散解析)

地盤および注入材の計算パラメータは表-2とした。簡易計算手法、浸透流-移流拡散解析では水と注入材の粘度の決定が重要となる。一般に水の粘度は表-3で与えられる<sup>13)</sup>。また、注入材の粘度には図-4の関係があることが知られている<sup>14)</sup>。一般的な注入材の水ガラス濃度は20～25%であるため<sup>1)</sup>、図-4から15℃における注入材の粘性は $2.0 \sim 2.5 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$ となる。これらの値を参考にして検証に用いる粘性係数比(水の粘度 $\mu_w$ /注入材の粘度 $\mu_g$ )は0.5に決定した。なお、注入材のゲルタイムは非常に長く、最終ステップまでゲル化しないものとしている。

また、薬液注入は移流が卓越することから移流拡散解析における拡散係数はゼロとした(移流卓越問題)。このため、移流項に起因する数値振動が生じないように時間差分にはSUPG法(流線風上差分法)を使用した。

### (3) 計算結果

#### a) 注入圧力

注入圧力の経時変化を図-5、図-6に示す。簡易計算手法と浸透流-移流拡散解析の注入圧力はほぼ同じ推移を示した。注入に要する時間は12.5minであり、どちらも最初は急激に圧力が上昇するが、約1分で緩やかな増加に遷移して最終圧力は約1.0MPaとなる。なお、遷移後の増加量は約0.15MPaである。実際の砂質地盤で計測される注入圧力の推移も同様に、ある一定圧で緩やかな増加に安定する傾向を示すことが多く<sup>11,15)</sup>、遷移後の増加量は実現場の管理値として多く用いられる0.1～0.3MPaの範疇<sup>1)</sup>に収まる。

#### b) 過剰間隙水圧

過剰間隙水圧分布の経時変化を図-7、図-9に示す。浸透流解析では、ストレーナ位置に水平方向の流量境界を設定したが、流速が小さいことから、球状に近い過剰間隙水圧分布となった。コンター図から、注入孔付近での過剰間隙水圧は約1MPaである。また、注入孔から遠ざかるにつれて急激に減少しており、注入孔からの距離が1m程度でほぼ消散して0MPaとなる。

浸透流-移流拡散解析では、前ステップで注入した注入材の影響で圧力が同心円状に分布しないなど、細かくは簡易計算の値と異なる。しかし、注入材と地下水の透水係数の差が小さいため、過剰間隙水圧を比較するうえで、この差は無視できる程度であり、注入圧力と同様に簡易計算手法と浸透流-移流拡散解析は、ほぼ同じ分布として取り扱うことができるものと考えられる。

なお、浸透流-移流拡散解析からは、前ステップの注入で発生した過剰間隙水圧が、次ステップの注入の時点で消散することも分かる。

#### c) 注入材の浸透

簡易計算手法で求めた注入孔からの浸透距離の経時変

化を図-8に示す。浸透距離が遠ざかるにつれ浸透速度は小さくなることが分かる。また、浸透流-移流拡散解析から得られた濃度分布の等値面( $C=0.5$ )を図-10に示す。ステップ1では等値面がほぼ球体となるが、ステップ2以降では前ステップの注入材の影響を受けて、上側に逃げるような縦長の形状となった。また、前ステップに注入した注入材は後続する注入による流れの影響を少なからず受けるものの、ほぼその場に留まる。最終的には現地試験の試掘等で確認される形状<sup>15)</sup>と同様に、球体同士が連続する形状となった。

簡易計算手法は、理論上、無限遠の地盤、かつ、単一孔からの注入にしか適用できないが、注入圧力、過剰間隙水圧は、浸透流-移流拡散解析との差が無視できる程度の値となった。これは過剰間隙水圧が注入孔近傍の約1mでしか発生しないため、周囲の地盤条件や境界条件の影響を受けにくいことが原因と考えられる。

以上の検証結果から、提案する簡易計算手法、浸透流-移流拡散解析ともに、注入圧力の経時変化は実現象に近い推移を示しており、設計、施工段階において注入速度および注入圧力を設定する際の目安として用いることができるものと考えられる。さらに、浸透流-移流拡散解析では、注入材の浸透形状も確認できた。

## 3. 地盤変形解析

### (1) 概要

地盤に発生する過剰間隙水圧は、粘性土の場合には直接地盤に作用し圧密を発生させる。この現象は時間依存性が高いため、通常、有限要素法ではcam-clayモデルなどを用いて土水連成問題として解かれる<sup>6)</sup>。これに対して、砂質土の場合には即座に浸透流に置き換わり、浸透圧力として地盤に作用する。例えば、ボーリングや浸透崩壊などの現象がこれにあたる。この現象は時間依存性が低いため、通常、有限要素法では、浸透圧力を物体力として取り扱い、等価節点外力に近似する土水非連問題として解かれる場合が多い<sup>10,11)</sup>。

薬液注入における注入材の浸透を考えると、注入材の粘性変化次第で、上記どちらの挙動も示す可能性がある。ただし、近年のゲルタイムが長い注入材に限定すれば、浸透流-移流拡散解析の結果から、粘性変化が生じる前に過剰間隙水圧は消散するものと考えられる。

このため、本研究では等価節点外力に近似する土水非連成の解析手法を応用して、浸透注入を対象とした地盤変形解析手法を考察した。

### (2) 解析手法

有限要素法では、地盤を分割した要素内の任意点の過

剰間隙水圧と浸透圧力の関係は、形状関数を用いて(6)式で表される。これを(7)式のように要素内でガウス積分すれば各節点の等価節点外力が求められる<sup>10)</sup>。

$$\{\gamma \cdot i\} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial p}{\partial x} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sum_{i=1}^N \frac{\partial N_i}{\partial x} p_i \\ -\sum_{i=1}^N \frac{\partial N_i}{\partial y} p_i \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\gamma \cdot i$ ：浸透力、 $\gamma$ ：単位体積重量、 $i$ ：動水勾配、 $p_i$ ：剰間隙水圧、 $N$ ：形状関数

$$\begin{aligned} f_x &= -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial x} d\Omega \\ f_y &= -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial y} d\Omega \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $f_x$ 、 $f_y$ ：等価節点外力

### (3) 計算条件

検証モデル、解析モデルは、注入の浸透に関する検討と同様に図-2、図-3とした。表-5に地盤剛性に関する解析パラメータを示す。地盤は降伏基準および流れ則をMohr-Coulomb則とした関連流れを仮定する弾塑性体とした。塑性挙動は加工硬化とし、完全弾塑性に近い硬化係数 $H=1.0$ と弾性挙動に近くなる硬化係数 $H=100.0$ の2ケースとした。解析ステップは初期応力解析を行った後、各注入ステップの剰間隙水圧に相当する等価節点外力を順々に載荷するものである。

なお、簡易計算手法で算定される地下水面以浅の剰間隙水圧は考慮することができないため、これを無視してモデル内で各節点に等価節点外力を作用させた。

表-5 解析パラメータ

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 変形係数 $E(\text{kN/m}^2)$           | 40000      |
| ポアソン比 $\nu$                       | 0.3        |
| 地盤の単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$ | 18.0       |
| 内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$            | 30         |
| 粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$            | 5.0        |
| 硬化係数 $H$                          | 1.0, 100.0 |

### (4) 解析結果

#### a) 注入孔直上の地表面変位

注入孔直上の地表面の鉛直変位を図-11、図-12に示す。簡易計算手法の場合、硬化係数に関わらず全ステップで地表面沈下が進行する。これに対して、浸透流-移流拡散解析の場合、地盤が弾性体に近い場合(硬化係数 $H=100.0$ )では全ステップで地表面に隆起が進行し、また、完全塑性体に近い場合(硬化係数 $H=1.0$ )ではステップ1では地表面隆起が生じるが、ステップ2以降ではその隆起量が徐々に減少した。

簡易計算手法で生じた地表面沈下は、既往事例<sup>23)</sup>と異

なる傾向である。これは簡易計算手法では注入孔を中心として放射状に均等な剰間隙水圧が発生するため、今回のように下方領域が大きい場合には、モデル全体としては下向きの力が大きく作用したためと考えられる。

これに対して、浸透流-移流拡散解析から求まる剰間隙水圧を用いる場合には、既往の事例と同様に、微少な地盤隆起が発生する結果となった。これはモデル内の浸透を精緻に解いたためと考えられる。

#### b) 水平方向への影響範囲

硬化係数 $H=100.0$ の場合の地表面変位の水平方向の分布を図-13、図-14に示す。水平方向への分布も浸透流-移流拡散解析では隆起傾向にあるのに対して、簡易計算手法を用いた場合には沈下傾向を示している。鉄道における近接施工マニュアル<sup>2)</sup>では注入孔からの水平距離が注入深度の1.5倍までは特に地盤変状が大きく、10～20m程度まで影響が及ぶ可能性があるとしている。計算結果も同様に、注入深度の約1.5倍(4.5(m))までは隆起が大きく、注入孔から離れるにつれて急激に変位が小さくなるものの、広域にわたり変位が発生していることが分かる。

以上の結果から、等価節点外力に近似する地盤変形解析を行うためには、浸透流-移流拡散解析で事前に浸透圧力を解析する必要があることが確認された。

また、隆起量は地盤の塑性挙動により異なるため、地盤変形解析では地盤は弾塑性体として考慮する必要があることが確認された。

## 4. 結論

本研究での結論は以下のように要約できる。

- ①注入圧力の経時変化を容易に求める方法として、簡易計算手法を提案した。また、この簡易計算手法は、注入孔から約1(m)以内に地層境や地下構造物、地下水面などが存在しなければ、連続的な注入ステップに対しても適用できることを確認した。
- ②複雑な地盤における注入圧力の経時変化、注入材の浸透形状を求める方法として、注入材の粘性に依存した浸透流-移流拡散解析手法を提案した。また、この注入材の粘性に依存した浸透流-移流拡散解析手法の計算結果から得られる注入圧力および浸透形状の経時変化は実挙動を模擬できることを確認した。
- ③注入材の浸透により発生する剰間隙水圧を物体力に置き換え、等価節点外力として作用させる地盤変形解析手法を提案した。また、この地盤変形解析に使用する剰間隙水圧は、注入材の粘性に依存する浸透流-移流拡散解析で算定すれば、実挙動を模擬できることを確認した。

浸透注入は注入材や地下水の流れに連続性があるため、

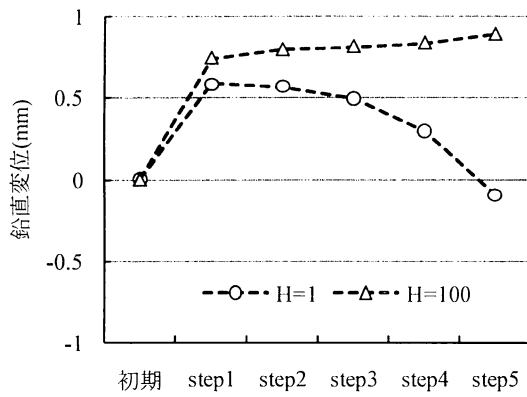


図-11 注入孔直上の地表面変位(浸透流-移流拡散解析)

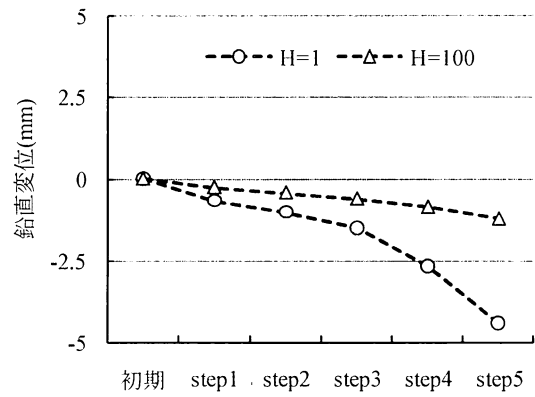


図-12 注入孔直上の地表面変位(簡易計算手法)

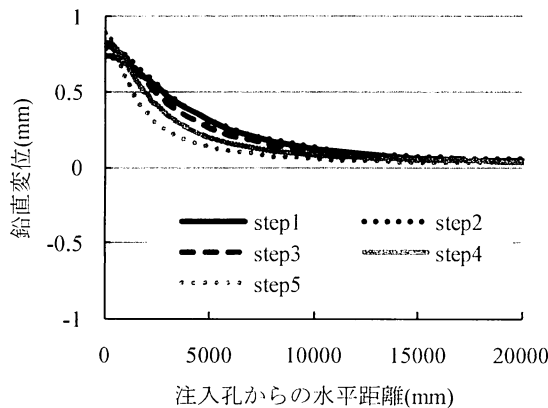


図-13 地表面変位の分布(浸透流-移流拡散解析,  $H=100.0$ )

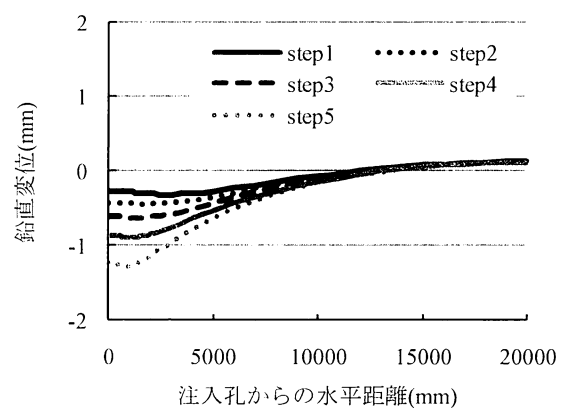


図-14 地表面変位の分布(簡易計算手法,  $H=100.0$ )

理論的な計算方法なども実現場とある程度は対応するものと考えられる。本研究で提案した手法が、現場の情報が少ない計画、設計段階の検討や効率的な施工計画を策定するうえで有用なツールとして役立てば幸いである。

#### 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：薬液注入工法実施例集, pp.II-1, 2009
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, pp.179-182, (財)研友社, 2007
- 3) 土質工学会：近接施工, pp.362-374, 1989
- 4) 森, 田村, 小峰, 小川：薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法, 土質工学論文報告集, Vol.33, No.3, pp.159-169, 1993
- 5) 福井, 森, 赤木：薬液の限界注入速度決定の問題点とその改善に関する研究, 土木学会論文集, No.658, VI-48, pp.81-92, 2000
- 6) 赤木, 小宮, 鈴木, 山崎, 森：軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次注入に伴う地盤変形状況と沈下防止効果, 土木学会論文集, No.511, III-30, pp.13-21, 1995

- 7) 佐藤工業株式会社：技術資料, 1983
- 8) 内藤, 桑原：線路下横断工事における超多点注入工法の施工, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009
- 9) 草野 一人：薬液注入工法ハンドブック, pp.15-18, 産業図書, 1983
- 10) 小西, 田村：トンネル掘削における地下水位低下の効果に関する研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.307-316, 2002
- 11) 仲山, 豊田, 北川, 中山, 小西：地下水の影響を考慮したトンネル安定の評価法, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.3, Vol.60, pp.233-232, 2005
- 12) 西垣, 菱谷, 橋本, 河野：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 511, III-30, pp. 135-144, 1995
- 13) (社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説, 2009
- 14) 蒔田：現在使用されている主な薬液注入, 基礎工, Vol.18, No.10, 1980
- 15) 日本国有鉄道：注入の設計施工指針, pp.187-206, 1996
- 16) 田中忠次：地盤の三次元弾塑性有限要素解析, 丸善, 1996

## A STUDY ON BEHAVIOR OF GROUND DURING CHEMICAL GROUTING

Takashi Nakayama, Naoki TACHIBANA, Noriyuki OKANO and Hirokazu Akagi

In this Study, the numerical analysis to evaluate the behavior of ground due to pore water pressure during chemical grouting were proposed. First, theoretical analysis and the finite element analysis were carried out taking account of grouting material flow and groundwater flow. As a result, a grouting pressure, a pore pressure and a solidified shape in ground were simulated. Second, the geotechnical finite element analysis was carried out due to the pore pressure. Result, the ground deformation patterns were simulated.