

薬液注入に伴う地盤変形予測法の構築

仲山 貴司* 岡野 法之*

Prediction Method of Ground Displacement Caused by Chemical Grouting

Takashi NAKAYAMA Noriyuki OKANO

This research proposed the numerical analysis method to predict ground displacement accompanying the execution of chemical grouting. In this method, the excessive pore pressure caused by the chemical grouting is calculated by means of Maag's formula at the first step. Then, the ground displacement is calculated by finite element analysis, in which the excessive pore pressure is used as load. This paper describes the simulation results, which are to correspond to field measurement. The proposed method was proven to be able to predict the ground displacement by taking into account the balance of pore pressure by Maag's formula and hydrostatic pressure.

キーワード：薬液注入工法，近接施工，地盤変形，有限要素法，シミュレーション

1. はじめに

1.1 薬液注入工法の現状と課題

薬液注入とは地盤改良工法の一つであり，固化時間を調整できる材料（注入材）を土の間隙に注入して，地盤の強度や止水性を向上させるものである（図1）。

その歴史は古く，19世紀初頭にフランスの Berigny によって開発され，日本では1915年に長崎県松浦炭鉱で利用されたことが最初の記録として残されている¹⁾。鉄道工事では，丹那トンネル（1934年開通）で初めて採用され，青函トンネルの建設では坑内への湧水抑止のために利用され，極めて重要な役割を果たした。

現在は，線路下横断工事や改良工事において，軌道や近接構造物の変位抑止のために利用する機会が多い。特に，作業空間や時間に制約が多い現場では，機械設備が小型で作業効率が良いこの工法は，膨大な施工実績を挙げている^{2) 3)}。

ただし，このような近接工事で利用する場合，この薬

液注入工法自体の施工にあたって十分な注意が必要となる。例えば，高架橋直下のシールドトンネル通過時の変位抑止のために注入した事例⁴⁾では，軌道が1日当たり約2～3mm隆起したこと，また，同じく変位抑止のため駅舎直下に注入した事例⁵⁾では，橋台が約70mm隆起したことなどが報告されている。

「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」（以下，「近接マニュアル」）⁴⁾では，注入範囲および既設構造物との離隔に応じた影響区分と対策を示している。概して，通常の施工をした場合に有害な影響が及ぶのは，既設構造物との離隔が注入深度の1.5倍以下とされ，この範囲内では，土被りや地盤条件によらず，事前の対策や数値解析などによる影響予測が必須とされている。

一般に，軌道近傍では，影響のない夜間の線路閉鎖間合いでの施工とする対策が講じられるが，薬液注入工法の工期やコストが工事全体に占める割合が高くなるという課題がある。

これに対して，近年では，周辺地盤への影響が小さい浸透注入（土の骨格構造を変えずに注入材を間隙に充填する注入形態）を主体とした新しい工法や固化時間の長い材料も利用され始めている⁶⁾。ただし，注入を対象とした理論的な影響予測手法は体系化されておらず，夜間施工という対策も併せて行っているのが現状である。

1.2 本研究の目的

これまでにも，影響予測に関する研究は実施されている。例えば，森ら^{7) 8)}は室内実験や現場データをもとに，有害な地盤変位が発生しやすい割裂注入（地盤に亀裂を生じさせながら，脈状に注入材が充填される注入形態）における亀裂の発生および進展と注入圧力の関

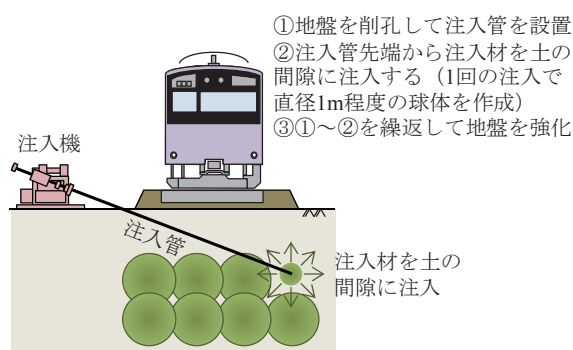


図1 薬液注入工法の概要

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

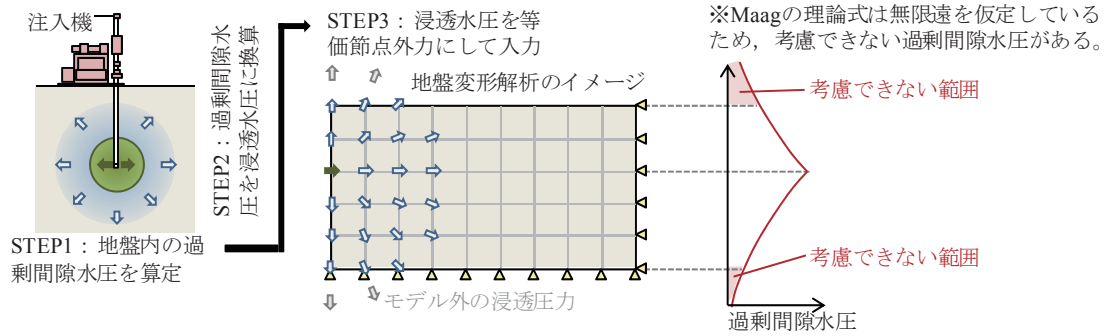


図2 仮定した地盤変形解析 (Maag の理論式を用いた場合)

係式を提案している。赤木ら⁹⁾はジョイント要素を用いて割裂注入で発生する亀裂をモデル化し、この亀裂に圧力を作用させる地盤変形解析手法を提案している。ただし、これらの検討は固化時間の短い注入材を使用したため、割裂注入を対象としたものが大半を占める。

そこで本研究では、浸透注入を対象とした地盤変形解析手法を構築することとした。ここでは、まず、浸透注入を想定した場合の地盤変形解析手法を構築し、その妥当性を既往の計測事例のシミュレーション解析から検証した結果を報告する。

2. 地盤変形解析手法の仮定

2.1 解析の流れ

浸透注入の場合には、注入材と間隙水が周辺地盤に浸透することで土粒子骨格に作用する圧力（浸透水圧）が発生する。そのため、単に注入孔位置に注入圧力を作用させる解析でなく、トンネル切羽の浸透崩壊に対する数値解析¹⁰⁾などのように、以下の手順で解析を行う必要がある（図2）。

STEP1：薬液注入に伴って地盤全体に生じる過剰間隙水圧を求める。

STEP2：求めた過剰間隙水圧を浸透水圧に換算する。

STEP3：浸透水圧を等価節点外力にして、有効応力として土粒子骨格に作用させた地盤変形解析を行う。

なお、STEP1の過剰間隙水圧は、有限要素法による数値解析の精度が高いため、これを用いる方法の検討も行ってきた^{11) 12)}。ただし、注入材料と間隙水は粘度が異なるので、二相混合流体として取扱わなければならない。浸透流解析は複雑かつ時間を要するものとなる。したがって、STEP1では注入に伴う過剰間隙水圧が簡易に求められる“Maagの理論式”¹⁾を用いることができるよう改良した。

2.2 Maagの理論式

Maagの理論式とは、過剰間隙水圧は注入孔から放射状に発生して無限遠で静水圧と釣り合うという仮定のも

と、注入圧力を求めるものである（式(1)）。なお、式(1)の 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。

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

ここに、 $p(r)$ ：半径 r での圧力（kPa）、 γ ：水の単位体積重量（kN/m³）、 h_w ：注入孔近傍の地下水位（m）、 q ：注入量（m³/sec）、 k_w ：水の透水係数（m/sec）、 μ_w ：水の粘性（Pa・s）、 μ_g ：注入材の粘性（Pa・s）、 $R(t)$ ：時刻 t の浸透半径（m）

なお、時刻 t の浸透半径 $R(t)$ はKarolらの研究¹⁾から式(2)が与えられている。

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

ここに、 n ：間隙率（%）、 r_a ：注入孔半径（m）

地盤変形解析を利用するにあたっては、Maagの理論式が無遠の注入材の浸透を前提としているのに対し、解析モデルは有限であるため、解析上考慮できない過剰間隙水圧があるという課題があった（図2）。ただし一方で、例えば表1の条件で、注入孔からの距離と過剰間隙水圧の関係をMaagの理論式から求めると図3のようになる。過剰間隙水圧は、注入材が浸透している範囲内で急激に減少する傾向を示すため、前述した解析モデル範囲外の浸透水圧は非常に小さく、その影響を無視できる可能性も示唆された。

表1 計算条件

地盤の透水係数 k_w	1 × 10 ⁻⁵ m/sec
注入速度 q	20 ℓ/min
水と注入材の粘性比 μ_g/μ_w	2.0
注入孔半径 r_a	0.05m
水の単位体積重量 γ_w	10.0kN/m ³

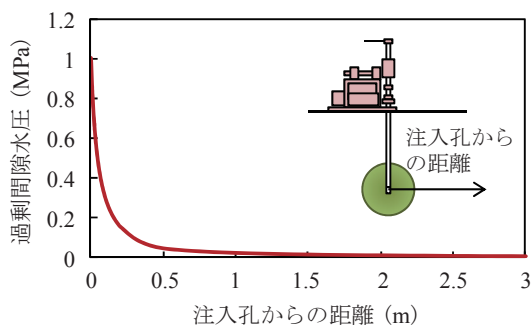


図3 過剰間隙水圧の算定例
(注入材が半径0.5mまで浸透した時)

2.3 地盤変形解析

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水圧の関係は、形状関数を用いて(3)式で表される。つまり、浸透水圧は過剰間隙水圧の勾配と考えることができる。

$$\{\gamma \cdot i\} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial p}{\partial x} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial x} p_j \\ -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial y} p_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $\gamma \cdot i$:浸透水圧、 γ :単位体積重量、 i :動水勾配、 p_i :過剰間隙水圧、 N :形状関数、 n :節点数

これを式(4)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を求めることができる¹³⁾。

$$f_x = -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial x} d\Omega, f_y = -\int_{\Omega} N^T \frac{\partial p}{\partial y} d\Omega \quad (4)$$

ここに、 f_x, f_y :等価節点外力

なお、注入孔以浅では、浸透水圧は上向きに、地盤の自重は下向きに作用するため、これらの釣合いを考慮する必要がある。つまり、図4に示すように、注入孔以浅の範囲では、静水圧からの増分の過剰間隙水圧と有効応力との差分から、上向きとなる浸透水圧を求める必要がある。

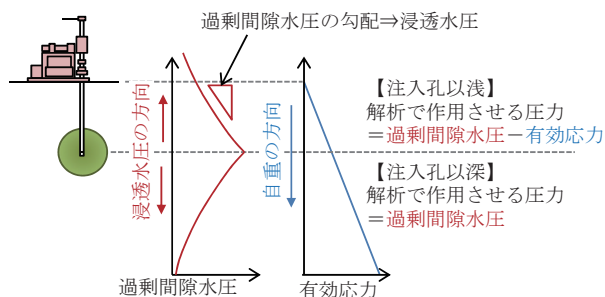


図4 注入孔以浅の等価節点外力の考え方

3. シミュレーション解析

3.1 対象事例

1.1で述べた高架橋直下のシールドトンネル通過時の防護注入を行った事例⁴⁾を対象とした。これは、近接マニュアルに掲載される薬液注入工法の近接判定区分図の作成根拠となったものである。

注入深度は約15~25mであり、二重管ストレーナ工法、水ガラス溶液型を用いて注入速度10ℓ/minで施工された。

詳細な施工順序は注入孔毎に異なるが、二重管ストレーナ工法の標準的なステップ間隔は0.5mで、1ステップあたり15分程度を要するため、簡単に、1孔あたり平均20ステップとし、1日あたり1孔/台であったものとする。

図5は、注入時に高架橋で測定された隆起量であり、注入範囲中心から隆起測定点までの水平距離と1日あたりの隆起量の関係を示すものである。注入範囲中心では1日当たり約1~3mmの隆起が生じ、隆起量が顕著な範囲は注入範囲中心から約50~60mの範囲まで達していることがわかる。なお、当該事例では割裂注入の形態も同時に確認された。

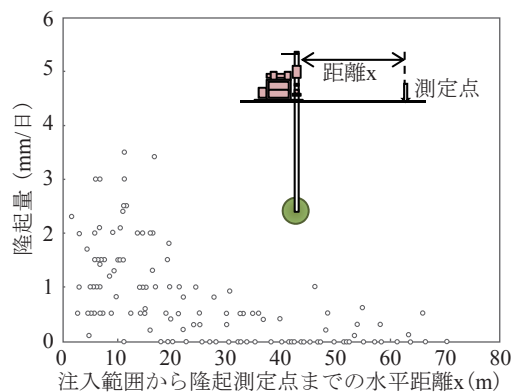


図5 注入による地表面隆起の測定結果⁴⁾

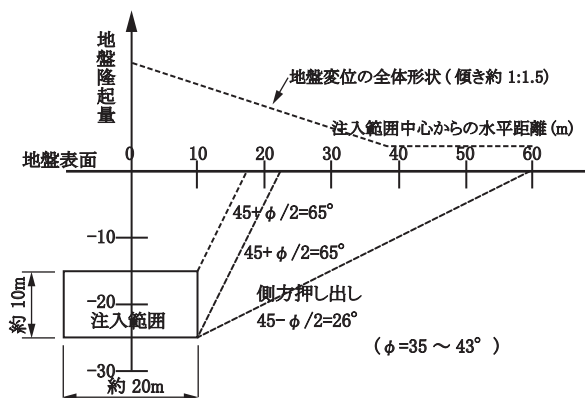


図6 受働崩壊角の観点からの考察⁴⁾

特集：構造物技術

受働崩壊角の観点から、地盤隆起量の発生範囲を推定する場合には、図6に示すように20m程度の範囲となるため、このような簡易な方法では注入の影響範囲を把握できないことが明らかになった事例でもある。

3.2 解析条件

注入条件、地盤条件を表2、表3に示す。変形係数は地盤のN値に基づき算定した。また、注入機材の諸元は二重管ストレーナ工法の標準的な値³⁾とした。

注入深度は、土被りが大きい場合一律深度20mで注入されたものとし、地盤変形量は、深度20mの1ステップあたりの値を求め、これを注入ステップ倍(20倍)した。

解析モデルを図7に示す。注入材の3次元的な浸透を考慮するため注入孔と地表面を結ぶラインを中心軸とした軸対称モデルとし、解析領域は高さ30m、半径90m、節点数は1488、要素数は1410である。拘束条件は、底

表2 注入条件

注入深度 (m)	12
注入速度 q (ℓ/min)	10
注入有効半径 R (t) (m)	0.50
注入ロッドの半径 (m)	0.05
粘性係数比 μ_w/μ_g	0.50

表3 地盤物性

変形係数 E (MN/m ²)	50
ポアソン比 ν	0.3
水の透水係数 k_w (m/sec)	6.29×10^{-6}

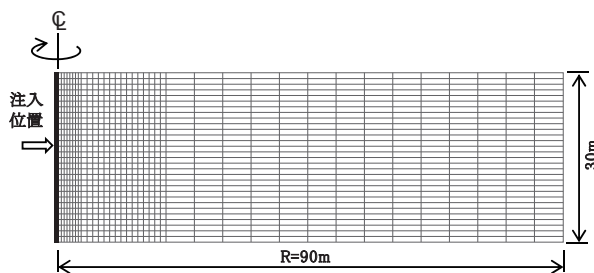


図7 解析モデル

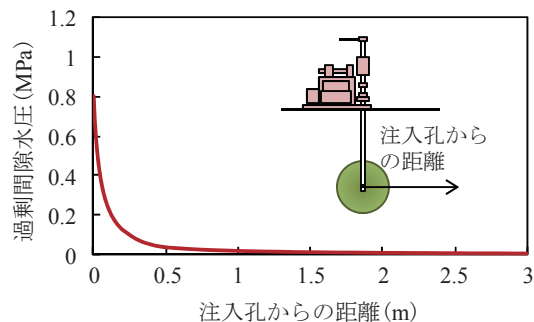


図8 対象事例における過剰間隙水圧 (注入材が半径0.5mまで浸透した時)

面は鉛直方向固定、側面は水平方向固定とした。

なお、この条件下でMaagの式から求まる過剰間隙水圧は図8となる。注入孔付近では0.8MPaの過剰間隙水圧が生じ、注入材が浸透している0.5m付近までではほぼ消散していることがわかる。

3.3 Maagの理論式の値を直接使用した場合の解析結果

1ステップあたりの変形コンター(水平、鉛直)を図9に、注入孔中心からの水平距離と地表面鉛直変位量との関係を図10に示す。これらの図から、注入孔直上の地表面に大きな沈下が生じていることがわかる。この結果は図5の測定結果と大きく乖離する傾向である。

解析で沈下が生じた原因として、図2に示したように放射状の浸透水圧を用いたこと、注入孔以浅よりも注入孔以深のほうが大きい解析領域としたことで、下向きの浸透水圧が卓越したためと考えられる。

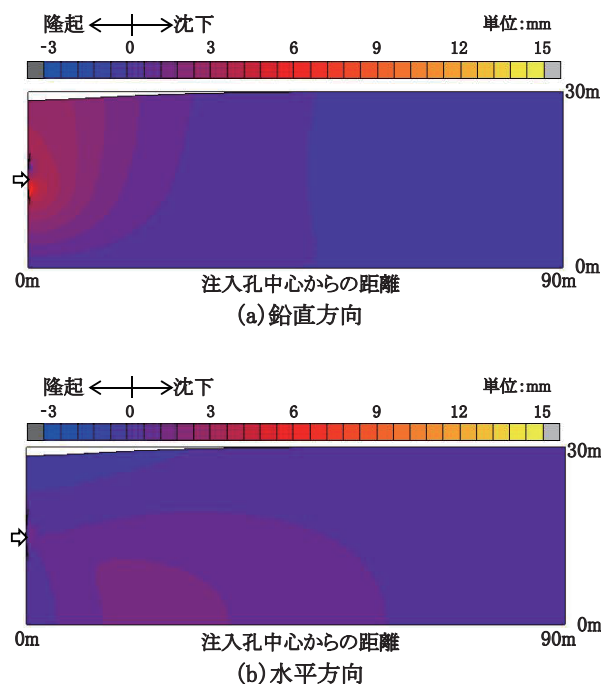


図9 1ステップあたりの変形コンター

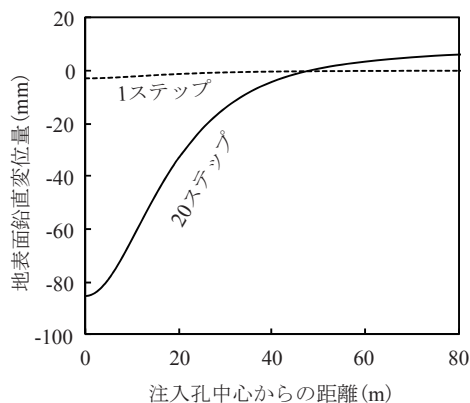


図10 地表面鉛直変位量

つまり、注入材の浸透範囲外の浸透圧力は非常に小さいものの、地盤変形解析で無視できない値であり、式(1)で求めた浸透水圧は補正の必要があることがわかる。

3.4 解析手法の修正

3.3の結果を踏まえ、浸透水圧を注入孔以深についても修正を加えることとした。注入孔以深の下向き浸透水圧は、深度が増すにつれて静水圧の抵抗を受けるため、図11に示すように、注入孔以深では過剰間隙水圧と静水圧との差分から浸透水圧を求めることができる。

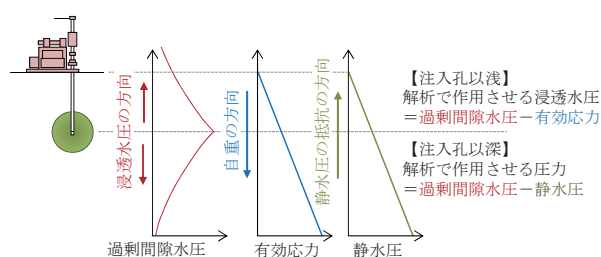


図11 注入孔以深の等価節点外力の考え方

具体的には、以下の手順で地盤変形解析を行う。

Step1-1 : 式(1)で注入孔から放射状の過剰間隙水圧を求める。

Step1-2 : 注入孔以深は静水圧増分を加える(式(5))。

ただし、上向きとなる浸透水圧は考慮しない。

$$\begin{cases} P = \Delta P + (H - h) \cdot \gamma_w & H > h \\ P = \Delta P & H \leq h \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 P : 浸透水圧を求める過剰間隙水圧、 ΔP : 式(1)から求まる過剰間隙水圧、 γ_w : 水の単位体積重量、 H : 浸透水圧を求める位置の深度、 h : 注入孔の深度

STEP2 : 求めた過剰間隙水圧を浸透水圧に換算する。

STEP3 : 浸透水圧を等価節点外力にして、有効応力として土粒子骨格に作用させた地盤変形解析を行う。

3.5 修正した解析手法による解析結果

1ステップの変形コンター(水平、鉛直)、注入孔からの水平距離と地表面鉛直変位量の関係を図12、図13に示す。これらから注入孔直上の地表面に隆起が生じ、注入孔から離れるにつれて減衰していることがわかる。この結果は、図5の測定結果と同傾向である。

そこで、図13は注入孔中心からの水平距離との関係であるのに対して、図5の測定結果は注入範囲中心からの距離との関係であるため、図14に、解析結果を測定結果に対応できるように整理して、重ね合わせて描いた。

この図から解析結果は注入範囲付近の隆起をほぼ包括していることがわかる。ただし、水平距離40~70mで生じている約1mmの一部の隆起は表現できていない。

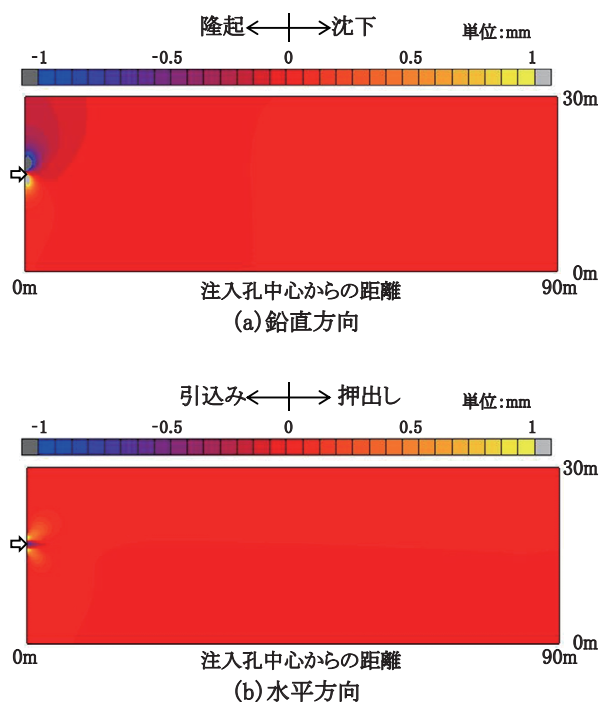


図12 1ステップあたりの変形コンター

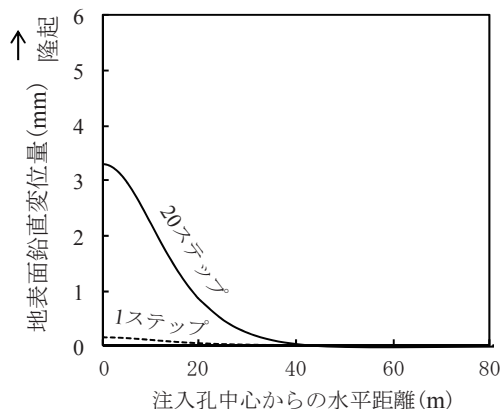


図13 地表面鉛直変位量

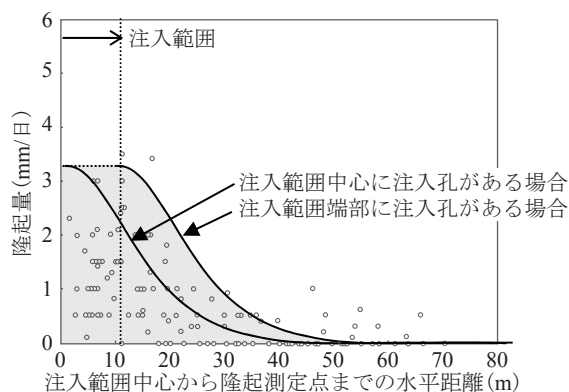


図14 地表面の鉛直変位量

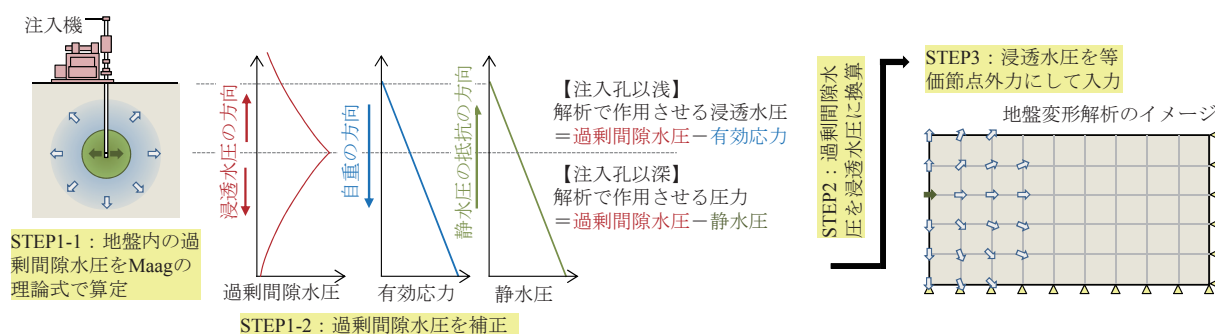


図 15 提案する解析の流れ

これは、当該現場では割裂注入も確認されているのに対して、本研究の解析手法が浸透注入のみ対象としているためと考える。

4. まとめ

本報告では、浸透注入に伴う地盤変形解析について検討した。この結果、Maagの理論から求まる過剰間隙水圧を補正して浸透水圧を求めることで、簡易に地盤変形解析を行う方法を新たに構築した。具体的には、図15に示す手順で解析を行うものである。

この提案した手法が、現場の情報が少ない中での計画、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。

謝辞

本検討を行うにあたり、中央復建コンサルタンツ(株) 橘直毅氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

文献

- 1) 草野 一人:薬液注入工法ハンドブック, pp.15-18, 産業図書, 1983
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所:薬液注入工法実施例集, 2009
- 3) 仲山貴司, 牛田貴士, 焼田真司, 岡野法之:近年の注入工事例と改良体の強度特性, 第21回トンネル工学研究発表

会報告集, Vol.21, pp.136-148, 2011

- 4) 財団法人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, 財団法人研友社, 2007
- 5) 土質工学会:近接施工, pp.362-374, 1989
- 6) 内藤圭介, 桑原清: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
- 7) 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, 土質工学会論文報告集, Vol.33, No.3, pp.159-169, 1993
- 8) 福井義弘, 森麟, 赤木寛一: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
- 9) 赤木寛一, 小宮一仁, 鈴木修一, 山崎博文, 森麟: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
- 10) 仲山貴司, 豊田浩史, 北川隆, 中山範一, 小西真治: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
- 11) 仲山貴司, 橘直毅, 岡野法之, 赤木寛一:薬液注入に伴う地盤変形の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.66, pp.137-143, 2010
- 12) T. Nakayama, N. Tachibana, N. Okano and H. Akagi, A study on numerical simulation during chemical grouting, Ground Technology and Geo-Information (IS-AGTG2011), pp.351-361, 2012.
- 13) 田中忠次:地盤の三次元弾塑性有限要素解析, 丸善, 1996