

割裂注入状態を再現可能な薬液注入時の地盤変位解析手法

山下 雄大* 仲山 貴司* 石井 貴大*

Ground Displacement Analysis Method for Chemical Grouting Capable of Estimating Fracturing Grouting Conditions

Yudai YAMASHITA Takashi NAKAYAMA Takahiro ISHII

With the increasing utilization of underground spaces, the demand for chemical grouting around existing structures has been rising. This makes the control of ground displacement during grouting operations increasingly important. Therefore, a numerical analysis method capable of estimating ground behavior prior to construction is required. This study extends a numerical prediction model, previously limited to permeation grouting, to include fracturing grouting. The proposed method is validated through comparison with the results of water injection tests. The final section presents the results of a parametric study using the proposed model.

キーワード：薬液注入，浸透注入，割裂注入，パラメータスタディ，有限要素解析

1. はじめに

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）．薬液注入は，掘削土留め工，シールドトンネル工，線路下横断工等に伴い，地盤や近接構造物の変位抑止のために利用される場面が多い．機械設備が小型で作業効率が良いため，特に作業空間や時間に制約の多い現場では，数多くの実績を挙げている^{1) 2)}．

ただし，注入する際に液圧が地盤に作用するため，地盤条件によっては周辺の地盤および構造物に変位が生じる場合もある．例えば，鉄道高架橋直下のシールドトンネル通過時の変位抑制のために注入した事例³⁾では，軌道が1日あたり約2～3mm隆起したこと，また駅舎直下に注入した事例⁴⁾では，橋台が約70mm隆起したことなどが報告されている．そのため，例えば「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」³⁾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．例として，構造物の側方で注入を行う場合，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，事前対策や影響予測が必須とされている．

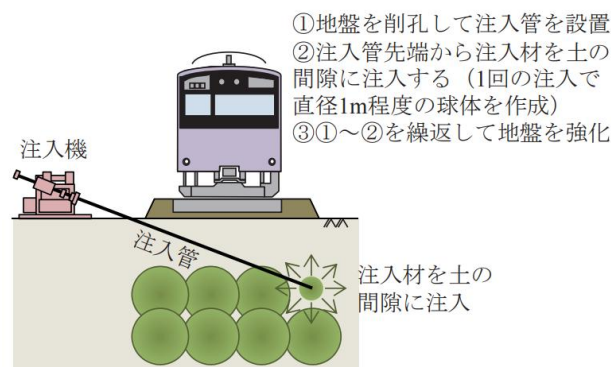


図1 薬液注入の概要

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

影響予測には、現地での注入試験によるものと数値解析によるものがあり、本研究は数値解析による影響予測手法に着目したものである。現地での注入試験に関する研究は、例えば、森ら⁵⁾や福井ら⁶⁾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における亀裂の発生、および進展と注入圧力の関係式を示している。数値解析に関する研究は、赤木ら⁷⁾が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。また、著者らはこれまでに浸透注入を対象とした3次元の地盤変形解析手法⁸⁾およびその2次元化手法⁹⁾を提案している。このように、数値解析に関する研究は注入形態に応じて行われてきたが、一連の薬液注入による地盤挙動を評価するための一般化された簡易な影響予測手法は確立されていない。

そこで本研究では、浸透注入を対象としたシミュレーション手法を簡易に補正することで割裂注入へ拡張する手法を提案した。まず、提案手法の検証のために実施した試験盛土への注水実験の概要と結果を示す。次に、提案手法の概要を説明した後、実験とシミュレーションでの地表面変位を比較した結果について報告する。最後に、一般的に用いられる薬液注入工法別に、地表面隆起量をパラメータスタディした結果について報告する。

2. 浸透注入と割裂注入を模擬した地盤への注水実験

2.1 注入試験の概要

本研究では、試験用盛土への注水実験を行った。表1に試験盛土の地盤物性値を示す。本実験では、低い注入圧力で浸透注入と割裂注入を再現できる地盤の物性値を設定した。図2および図3に注水実験の方法、注水実験の状況を示す。注入方法は、注入孔を設けたロッドを注入孔の深度が500mmとなるよう地盤内に挿入し、シリンダー内に水を充填して空気圧をかけることで定圧注入した。注入量は、間隙率換算で注入孔を中心とした半径100mmの範囲に球状に充填される量とした。地表面の変位量はレーザー距離計により計測し、ロッドの位置を中心として両側250mmの間隔に5箇所、ロッドとの離隔が120mmの位置に直列に配置した。

表1 試験用盛土の地盤物性値

平均粒径 D_{20} (mm)	0.142
土粒子密度 ρ_s (kN/m^3)	26.6
湿潤密度 ρ_t (kN/m^3)	16.1
乾燥密度 ρ_d (kN/m^3)	14.3
含水比 ω (%)	13.0
変形係数 E_{50} (CD)(kN/m^2)	12,000

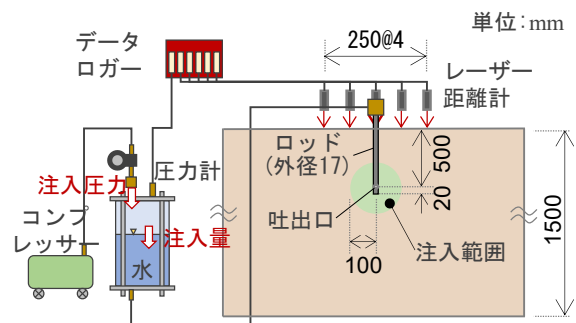


図2 注水試験の方法

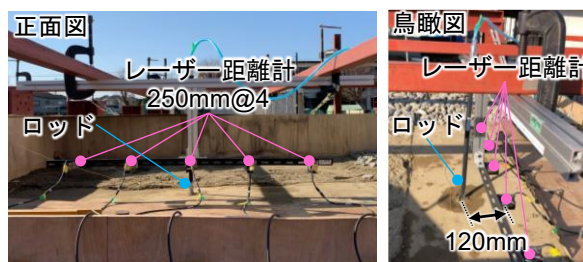


図3 注水試験の状況

2.2 注水試験の結果

(1) 注入速度と注入圧力の関係

注入速度と注入圧力の関係を図4に示す。また、図4中に Maag の式¹⁰⁾から計算した注入速度と注入圧の関係も併せて示す。Maag の式とは、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り、浸透注入の理論式である。試験盛土の透水係数は、クレガーの D20 粒径と透水係数の関係表から $3.9 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ であり、Maag の式による計算値と実験値が概ね一致する注入速度 4~6L/min 付近は Maag の式の仮定に近い浸透注入が再現できていることが分かる。

一方で、注入速度 4~6L/min の前後では、Maag の式による計算値と実験値の勾配が一致していない。注入速度 0~4L/min 付近は、試験用盛土が不飽和地盤であったことによる実験初期のなじみだと考えられる。注入速度 6L/min 付近以上では勾配が低下し、緩やかな曲線となっている。これは、この範囲では注入形態が、浸透注入から割裂浸透注入に移り始めていると推察される。

(2) 地表面変位量の分布と最大地表面変位量の推移

各レーザー距離計で計測した地表面変位量の分布を図5に示す。注入孔からの水平距離 0mm の位置で最も大きな地表面変位量が計測され、注入位置から離れるにつれて、地表面変位量は小さくなる結果が得られた。注入速度と最大地表面変位量の関係を図6に示す。図6中に、図4の注入速度と注入圧力の関係も併せて示す。注入速度 6L/min を超えると注入速度の増加に伴い隆起が発生する結果となった。なお、既往の知見では割裂注入が発生し始めると地表面変位量が大きくなるとされている。注入圧力の勾配の低下と隆起の発生がほぼ同時に生じていることから、注入速度 6L/min 付近から割裂浸透注入の初期の状態となっていると考えられる。

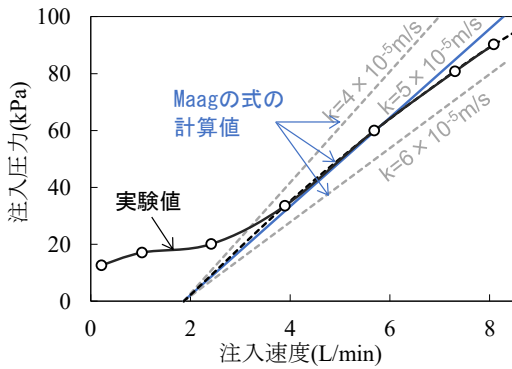


図4 注入速度と注入圧力の関係

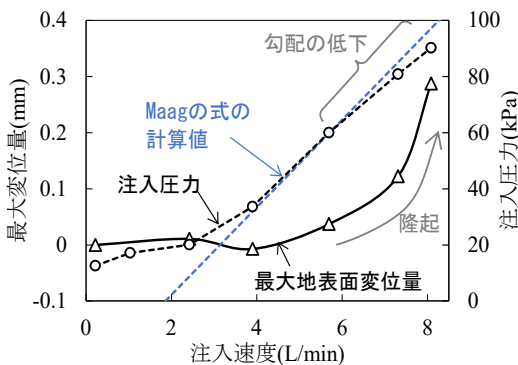


図6 注入速度と最大変位量の関係

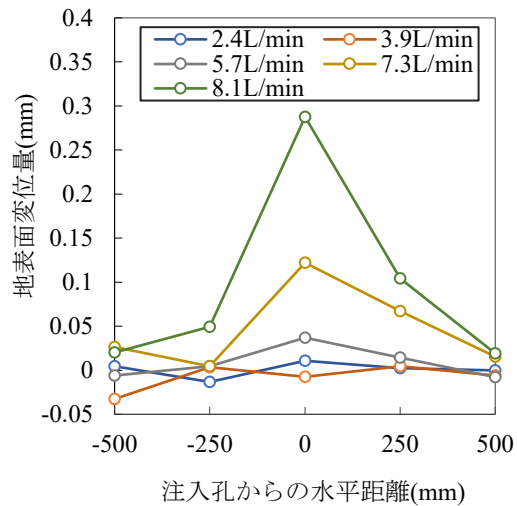


図5 注入孔からの水平距離と地表面変位量の関係

3. 周辺地盤挙動シミュレーション手法の割裂注入への拡張方法

3.1 従来の浸透注入を対象としたシミュレーション手法の概要

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液圧（浸透水圧）が発生する。著者らの提案手法では、この浸透と地盤変形の連成問題を全応力場で表現しており、浸透水圧は簡易に Maag の式から求めた過剰間隙水圧を用いて算出する（図7）。

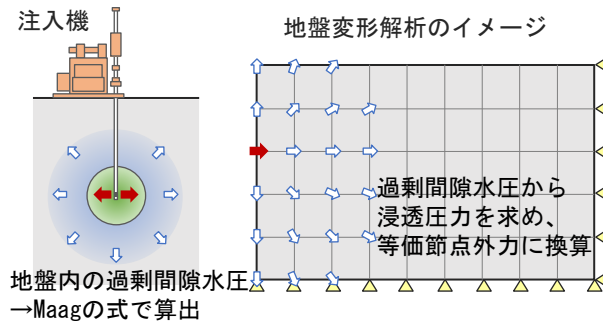


図7 過剰間隙水圧の計算と地盤変形解析の概要

Maag の式は、式(1)で表され、 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。

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

ここに、 $p(r, t)$: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 :注入剤の粘性 (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¹¹⁾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)

薬液注入における浸透は3次元現象であり、Maag の式で求められる過剰間隙水圧分布は球状となる。なお、この3次元の過剰間隙水圧分布の2次元への補正方法として、筆者らは回転補正による手法を提案している⁹⁾。

以上の手法により、浸透注入形態での地表面変位量は再現できる結果が得られていたが、割裂注入が発生し始めた際に生じる地表面変位量の増加を再現しきれないという課題があった。

3.2 新たに提案する割裂注入へ拡張するための改良点

薬液注入の注入形態は、注入速度の小さい状態では浸透注入となるが、注入速度を大きくしていくと注入圧により地盤が割裂し、浸透注入と割裂注入が混在した割裂浸透注入に遷移する。割裂浸透注入の初期の状態を図8に示す。割裂浸透注入時には、注入孔付近だけでなく割裂面も浸透面となる。この割裂による浸透面の増加や浸透の異方性を求めることは、割裂脈の本数や方向などを求めることと同義であり困難である。そこで本研究では、割裂範囲を簡易な円でモデル化し、その境界位置に注入圧力を作用させることで安全側の評価とした。

ここで、砂質土の割裂発生圧 P_f は森らの研究¹²⁾から式(3)が示されている。

$$P_f = m \cdot \sigma_3' + \sigma_t + R \tag{3}$$

ここに、 m :定数、 σ_3' :注入地点の最小有効主応力(kN/m²)、 σ_t :地盤の引張強さ(kN/m²)、 R :割裂進展抵抗

式(3)の割裂発生圧 P_f を式(1)のMaagの式による過剰間隙水圧 $p(r, t)$ が超えると地盤の割裂が発生し始め、その境界($P_f = p(r, t)$ の位置)より注入孔側は、図9のように割裂浸透注入に遷移すると仮定する。ここで、Maagの式は、注入孔半径の位置に浸透面があると仮定して、注入孔半径の位置の浸透圧を注入圧力としている。浸透注入と割裂浸透注入がある場合には、浸透面はこれらの境界の位置に移動すると考えられる。そこで、境界で注入圧力相当の浸透圧力が作用するようにMaagの式による過剰間隙水圧を移動することで補正した。

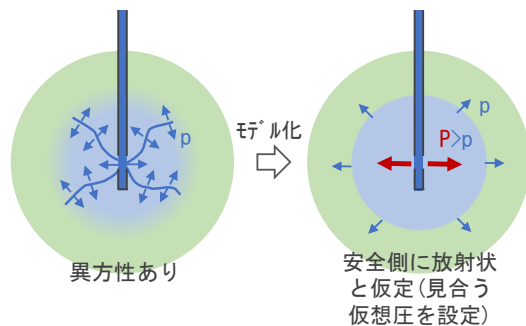


図8 割裂浸透注入初期の地盤への注入のイメージ

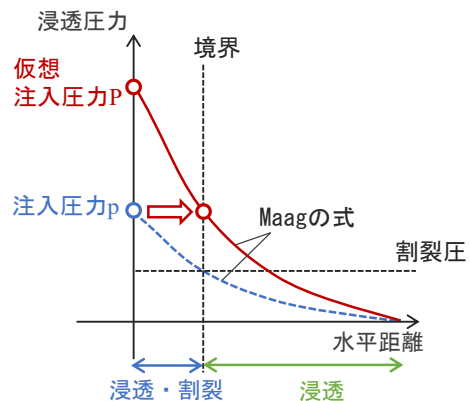


図9 割裂注入へ拡張するための浸透圧力の補正方法

なお、式(3)の定数 m は、一般的な砂質土では1~2の範囲とされている。一方で、砂質土を対象として定量注入を実施した結果、割裂が生じた場合の有効注入圧 P'_f (=割裂圧 P_f -初期間隙水圧 u_0)が有効拘束圧 σ_c (=拘束圧 $\sigma_c - u_0$)の4~5倍となったケースも報告されている¹³⁾。そこで本研究では、 $m=2$ と $m=5$ の2ケースで、注水実験のシミュレーションを行った。

4. 実験のシミュレーションによる提案手法の妥当性の検証

4.1 注入孔からの水平距離と地表面変位量の検証結果

シミュレーションの結果として、注入孔からの水平距離と地表面変位量の関係を図10に示す。シミュレーション結果も実験結果と同様に注入孔からの水平距離0mmで最も大きな地表面変位量が得られ、注入

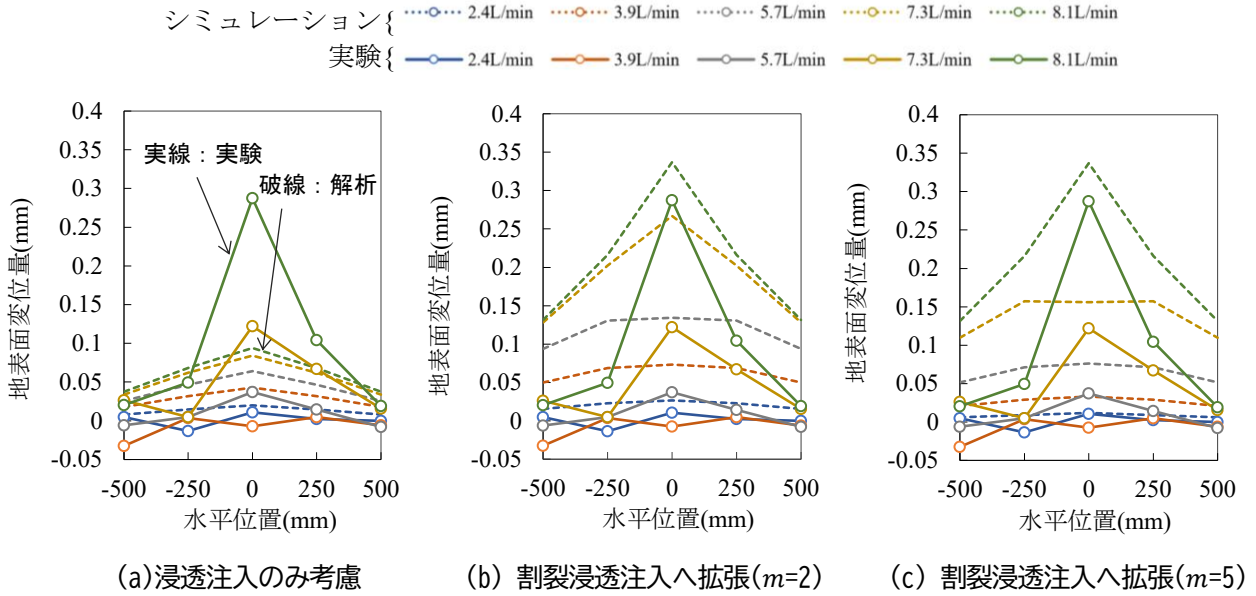


図 10 注入孔からの水平距離と地表面変位量の関係

孔から離れるにつれて地表面変位量は小さくなっている。

従来手法の結果（図 10(a)）は、注入速度が 5.8L/min 以下の浸透注入の状態では実験結果に対して解析結果の方が大きく、安全側となっているが、注入速度が 7.3L/min 以上の浸透注入と割裂注入が混在する状態では注入孔からの水平距離が近い位置で実験結果の方が大きい。これは、従来手法では割裂注入が発生し始めた際に生じる地表面変位量の増加を再現しきれないという知見と一致している。

提案手法の結果（図 10(b) , 図 10(c)）は、すべてのケースで実験結果に対して大きい値で、安全側となっている。本手法では、割裂範囲を安全側に簡易な円でモデル化していることで、実験値との乖離が生じている。そのため、割裂脈の進展やその影響をより精緻に評価することで解析精度の向上が期待できる。注入孔付近で地表面変位量の増加が小さくなっているのは、地盤が注入により局所的に塑性化したことが原因と考えられる。

4.2 注入速度と最大地表面変位量の検証結果

注入速度と最大変位量の関係を図 11 に示す。提案手法は実験より安全側の結果となっており、最大地表面変位量の推移傾向を表現できている。提案手法の $m=2$ と $m=5$ の場合で比較すると、今回の注水実験の条件では、既往文献で一般的な砂質土の範囲とされている $m=2$ より $m=5$ とした場合の方が実験と近い値となっている。これより、一般的な砂質土の範囲とされている $m=2$ で計算することで安全側の結果が得られるが、土質条件によって適切に m の値を設定することで、地盤挙動を忠実に再現できる可能性がある。

5. 提案手法によるパラメータスタディ

表 2 に示すように、透水係数を変化させた 5 種類の地盤を設定した。透水係数の値は一般にシルト層からレキ層に相当する。注入範囲は深度 2m から 8m の単列配置とし、注入ステップは下降式とした。注入工法は、二重管ストレーナー（注入速度：12L/min）、二重管ダブルパッカー（注入速度：8L/min）の 2 種類とした。

まず、解析結果の詳細について、二重管ストレーナー工法の地盤 C の場合を例にとり、図 12、図 13 に示

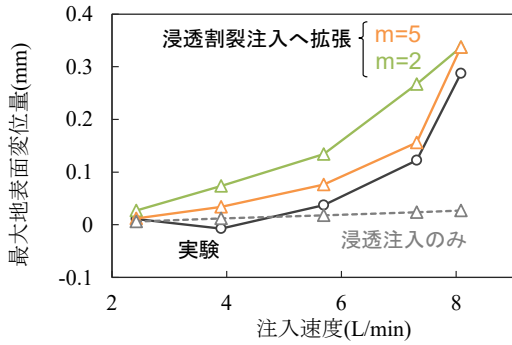


図 11 注入速度と最大変位量の関係

表 2 地盤条件

単位体積重量 (kN/m ³)	19	
変形係数 (kN/m ²)	32800	
内部摩擦角 (deg)	30	
透水係数 (m/sec)	地盤 A	8.410×10 ⁻⁶
	地盤 B	2.103×10 ⁻⁵
	地盤 C	4.205×10 ⁻⁵
	地盤 D	6.308×10 ⁻⁵
	地盤 E	8.410×10 ⁻⁵

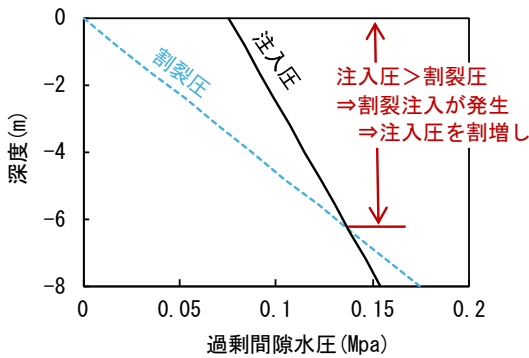


図 12 注入圧力と深度の関係

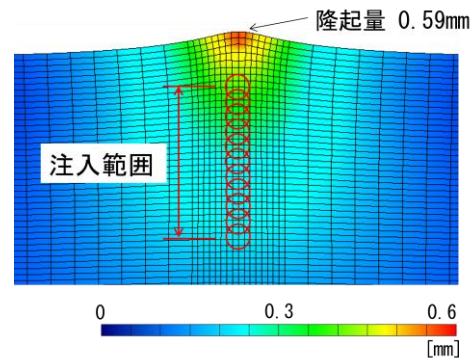


図 13 注入による地盤変位のコンター図

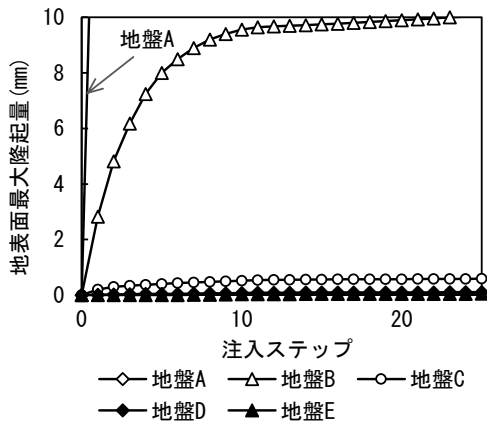


図 14 解析結果 (二重管ストレーナー工法)

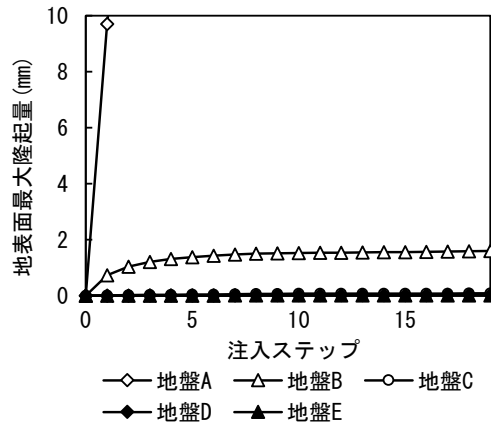


図 15 解析結果 (二重管ダブルパッカー工法)

す。図 12 は注入圧力と深度の関係を示したものであり、合わせて割裂圧との関係も示した。このケースでは深度 6m 以浅では注入圧が割裂圧を超えており、割裂注入となることが想定された。図 13 は地盤変位のコンター図であり、注入孔直上を中心として地盤隆起が発生していることがわかる。このときの隆起量は 0.59mm 程度であった。

図 14、図 15 には、地盤 A～地盤 E の全てのケースについて、注入孔直上の地表面最大隆起量をまとめた。この結果から、一般に想定されるように、透水係数が小さく、注入速度が大きいほうが、地表面の変位量はより大きい傾向が得られた。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 浸透注入を対象としたシミュレーション手法を簡易かつ安全側に補正することで、浸透注入から割裂注入までの地盤挙動を再現できた。
- (2) 提案手法を用いて、薬液注入工法別に地盤の透水係数を変えてパラメータスタディを実施した結果、簡易に地盤変位量の目安が分かるようになった。

今後は、実現場における地表面隆起量の結果と比較し、本研究の提案手法の精度向上を図りたい。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル，2011
- 2) 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
- 3) 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，2007
- 4) 土質工学会：近接施工，pp.362-374，1989
- 5) 森麟，田村昌仁，小峯秀雄，小川雄二：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，土質工学会論文集，Vol.33，No.3，pp.159-169，1993
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 仲山貴司，岡野法之：薬液注入に伴う地盤変形予測法の構築，鉄道総研報告，Vol.27，No.6，pp.19-24，2013
- 9) 石井貴大，仲山貴司，三輪陽彦，清水達貴：薬液注入に伴う周辺地盤挙動のシミュレーション手法の検討，第78回土木学会年次学術講演会講演概要集，2023
- 10) 坪井直道：薬液注入工法の実態，鹿島出版会，pp.155-173，1976
- 11) Karol, R.H. : Chemical Grouting, Dekker, pp.106-132, 1983.
- 12) 森麟，田村昌仁，千柄植：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，No.388/III-8，pp.61-70，1987
- 13) 建設省土木研究所：薬液注入の評価と開発に関する研究報告書，1979