

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

鉄道総研 正会員 ○石井 貴大 仲山 貴司
三輪 陽彦 清水 達貴

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）。作業空間や時間に制約の多い現場では、機械設備が小型で作業効率の良いこの工法は、数多くの実績を挙げている¹⁾。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・変形が生じる場合もある。そこで著者らは、これまでに浸透注入形態を対象とした 3 次元の地盤変形解析手法を提案している²⁾。本稿では、試験盛土への注水実験を通して解析手法の 2 次元化を試みた結果をまとめる。

2. 試験盛土への注水実験

盛土材料には細粒分の少ない稲城砂を使用し、浸透注入から割裂注入形態までを再現するため、締固め密度比の目標を 80%として弱い締固め管理を行った。表 1 に試験盛土の地盤物性値を示す。図 2 および図 3 に実験条件、実験状況を示す。注入方法は吐出口を設けたロッドを吐出口の深度が 500mm となるよう地盤内に挿入した。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、間隙率換算で吐出口を中心とした半径 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。

3. 解析手法の概要

本章では 2 章で示した実験を 2 次元地盤変形解析でシミュレーションを試みる。

浸透注入の場合、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 の理論式から求めた過剰間隙水圧を用いて算出する（図 4）。

なお、Maag の理論式では、過剰間隙水圧

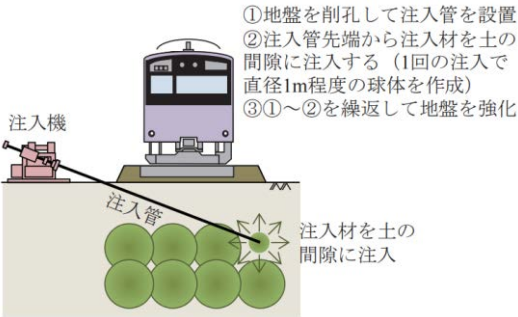


図 1 薬液注入工法の概要

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

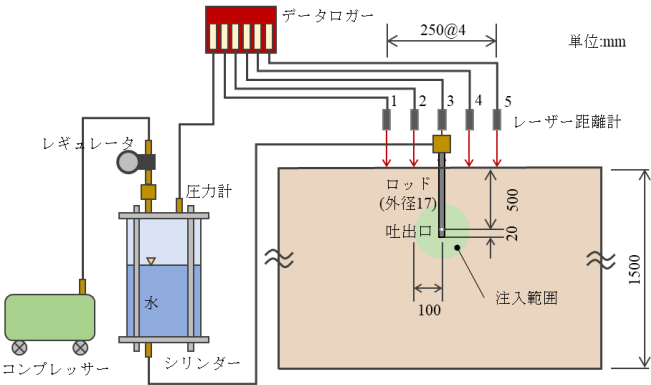


図 2 実験条件

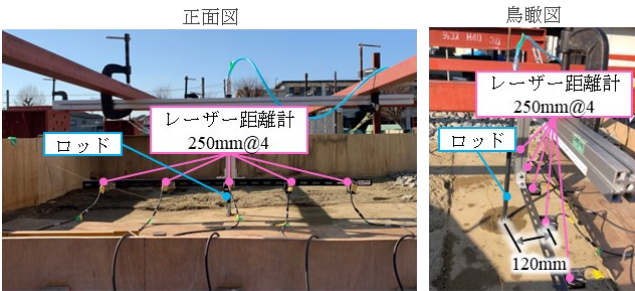


図 3 実験状況

キーワード 薬液注入，近接施工，地盤挙動，有限要素法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8 番地 38 (公財)鉄道総合技術研究所 トンネル TEL 042(573)7266

が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を用いている。そのため、提案手法では静水圧や土の上載荷重に対する補正も加える。

薬液注入における浸透は3次元現象であり、Maagの理論式で求められる過剰間隙水圧分布は球状となる。このため従来は3次元モデルを使用していたが、本稿では、簡易に2次元の平面ひずみ場で解くため、回転補正を試みる(図5)。また、実験では浸透注入から割裂注入形態までを再現したため、Duncan-Changモデルにより地盤の非線形性を考慮する。

4. 実験結果およびシミュレーション解析

図6に、注水実験における注入圧をMaagの式での計算結果と比較する。実験は不飽和地盤への注入であるため、2.5L/min以上から勾配が立ち上がり注入の状態となった。クレガーの D_{20} 粒径と透水係数の関係表から試験盛土の透水係数は $3.9 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ であり、計算値が概ね一致する結果が得られた。また、実験結果は緩やかな曲線を描いており、浸透注入と割裂注入が混在する状態となっていると推察される。試験盛土は弱い締固め管理のもと作成したことで、実現場よりも小さい注入速度でこの状態に遷移させることができた。

図7に、地表面変位の実験結果と解析結果の一例を示す。透水係数は $5 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ とし、実験結果が曲線を描きながら徐々に外れていく図6のA、B、C点の各状態で比較した。この結果、図6で計算結果と近く、浸透注入が主体と考えられるA点についてはある程度の一致がみられ、図5の回転補正を加えた2次元解析でも地表面変位量をシミュレートできる結果が得られた。一方、B、C点では乖離が大きくなっていった。地盤に非線形性を考慮するのみでは浸透注入と割裂注入が混在した状態を再現しきれないという結果が得られた。

5. まとめ

本研究では、試験盛土への注入実験の浸透注入領域のシミュレーション解析を示した。今後は浸透水圧の作用方法等を修正し、解析手法の割裂注入への拡張を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル，一般財団法人研友社，2011。
- 2) 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.6，2013。

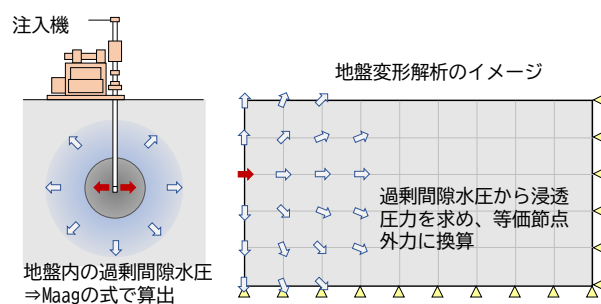


図4 解析手法の概要

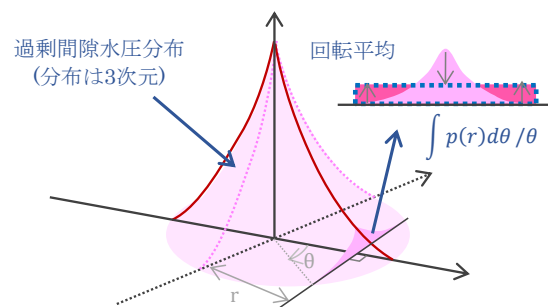


図5 3次元的な過剰間隙水圧分布の2次元への補正方法

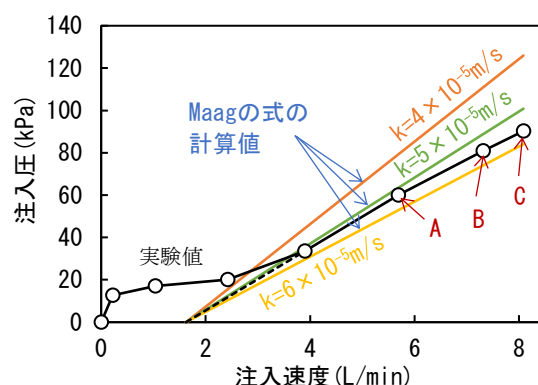


図6 注入圧の実験結果と計算結果の比較

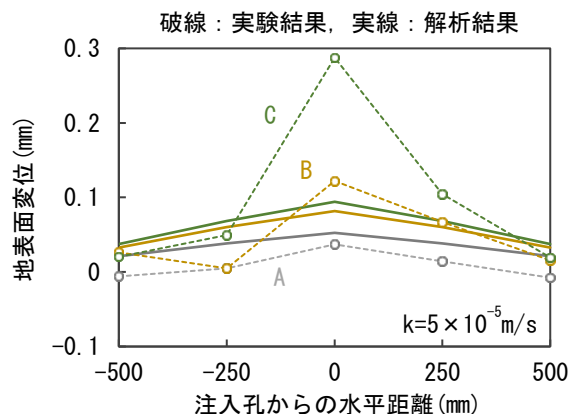


図7 地表面変位の実験結果と計算結果の比較