

薬液注入に伴う近接施工影響における数値解析手法に関する研究

中央復建コンサルタンツ 正会員 ○橘 直毅
 鉄道総合技術研究所 正会員 仲山 貴司
 鉄道総合技術研究所 正会員 岡野 法之

1. 目的

薬液注入工法は、注入圧や地盤の透水性によっては周辺地盤や近接構造物に重大な変形を与えることが数多く報告されている。薬液注入に伴う地盤変形予測法は、粘性土地盤の割裂注入を対象とした赤木らの研究¹⁾等があるが、浸透注入に関しては数値解析例がほとんどなく、簡易的に予測できる手法が求められている。

本研究では、浸透注入における地盤変形解析手法として、Maag 式を用いた簡易計算手法より算出される浸透圧力を FEM モデルに等価節点外力として作用させる変形解析手法を提案し、粘性に依存する浸透流-移流拡散解析に基づく数値解析結果と比較することにより適用性について検証した。

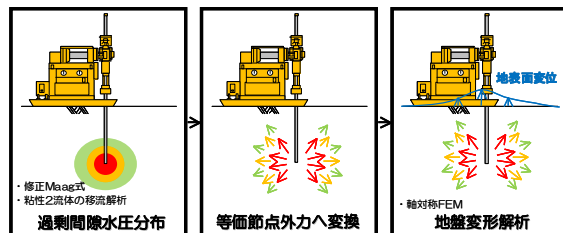


図1 薬液注入の地盤解析の流れ

地盤変形解析の流れを図1に示す。Maag の式を用いて注入時に発生する過剰間隙水圧を算定し、それを地盤変形解析の節点荷重に変換することにより地盤変形を算出するものである。

Maagの式は無限遠で静水圧と釣り合うが(図2②)、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うことから(図2①)、下式が得られる。

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

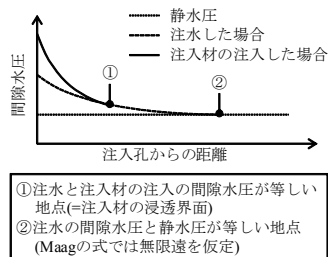


図2 間隙水圧分布概念図

ここに、 $p(r)$:半径 r での圧力(kPa), γ :水の単位重量(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 における浸透半径(m)

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

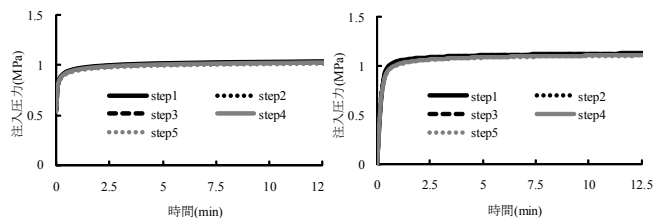
表1 間隙水圧計算条件

地盤条件	水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	10
	水の透水係数 k_w (m/sec)	1.0×10^{-5}
	間隙比 e	0.92
	比貯留係数 S_c (1/m)	1.80×10^{-4}
注入材	拡散係数 κ	0
	粘性係数比 μ_w / μ_g	0.5

3. 浸透圧力の算定

表1の条件において簡易計算手法より算出した結果を図3(a)と、別途実施した粘性2流体の移流解析により算出した過剰間隙水圧を図3(b)に示す。

いずれもほぼ同じ推移を示し、最終圧力は約 1MPa となる。なお、遷移後の圧力増加は約 0.15MPa で、現場の管理値で多く用いられる 0.1~0.3MPa の範疇となった。式1により要素内の任意点における過剰間隙水圧値を算出し、形状関数を用いて等価節点外力を求めた。



(a) 簡易計算手法 (b) 粘性2流体移流解析

図3 注入圧力の経時変化

4. 地盤変形解析

各 Step の注入孔直上の鉛直変位量を図5に示す。粘性2流体の移流解析では、Step が増すごとに隆起量が増加し、最終的に 4mm 程度隆起するが、簡易計算手法では沈下する傾向を示し、現実の隆起挙動とは矛盾している。

キーワード 薬液注入, 浸透注入, 注入圧, 軸対称 FEM, Maag 式, 近接施工

連絡先 〒530-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10 中央復建コンサルタンツ株式会社 TEL 06-6160-3206

最終ステップにおける注入孔からの水平距離 ($x=5\text{m}$) と水平変位量の関係を図 6 に示す。水平変位は注入孔から遠ざかる方向に生じていることが分かる。また、平均的に簡易計算法の水平変位は大きく、特に注入孔以深においても水平変位量が著しく大きい結果となっている。これは、実際の挙動では、下方ほど 3 方向の拘束圧が強く、下方の注入済みの箇所は充填、硬化するため、上方に解放される。一方、簡易計算法では、注入孔から同心円状に等しい荷重を与えるため、実際より上方向のベクトルが過小で、下方向のベクトルが過大となっている。このことが簡易計算手法の沈下挙動の一因と考える。

そこで、図 7 に示すように注入深度より上方向と下方向の上下荷重バランスの変更を試みた。その結果、簡易計算手法においても移流解析結果に非常に近い結果が得ることができた。ただし、上下荷重のバランスの割合については、基準となる結果が必要となり今後の検討課題と考える。

6. 近接構造物への影響評価

注入孔より水平離隔 2.5m 離れた地下鉄 RC ボックスの近接影響について考える。地盤変形解析より得た注入孔より水平離隔 2.5m 離れた地盤の水平変位分布および地下鉄に作用する地盤の相対変位は図 8 に示すとおりである。その結果、以下のとおり注入圧による影響は、許容値内となった。

弾 性: $\theta = 0.78\text{mm}/6,000\text{mm} = 1.3 \times 10^{-4} < 1/100$

弾塑性: $\theta = 1.45\text{mm}/6,000\text{mm} = 2.4 \times 10^{-4} < 1/100$

7. 結論

薬液注入工法に伴う地盤の変形量算定には、簡易計算法では、等価節点外力の上下の荷重バランスを実験や計測等により厳密に評価できれば、簡易に周辺地盤の変状、近接構造物への影響を評価することは可能とわかった。ただし、注入圧により地盤の破壊が進むため弾性解析では過小評価となり解析モデル(弾塑性)の検討が必要である。

参考文献

- 1) 赤木ら: 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.
- 2) 仲山ら: 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(トンネル工学)特集号 Vol.66, No.1, pp.137-143, 2010.

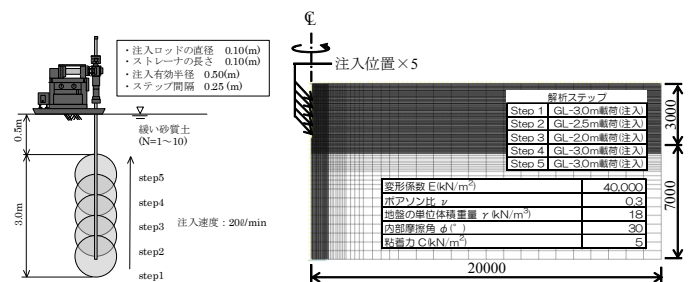
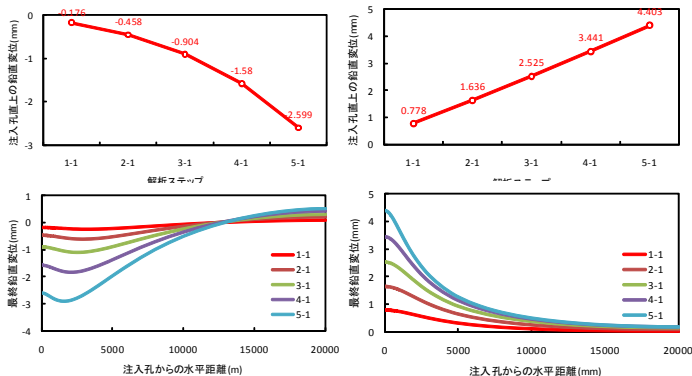
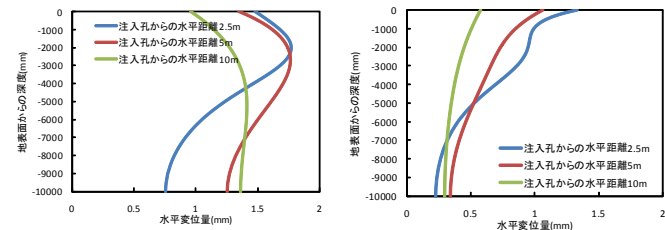


図 4 解析モデル(軸対称弾性 FEM)



(a) 簡易計算手法 (b) 粘性 2 流体移流解析
図 5 各 Step の注入孔直上の鉛直変位量



(a) 簡易計算手法 (b) 粘性 2 流体移流解析
図 6 注入孔からの水平距離 ($x=5\text{m}$) と水平変位量

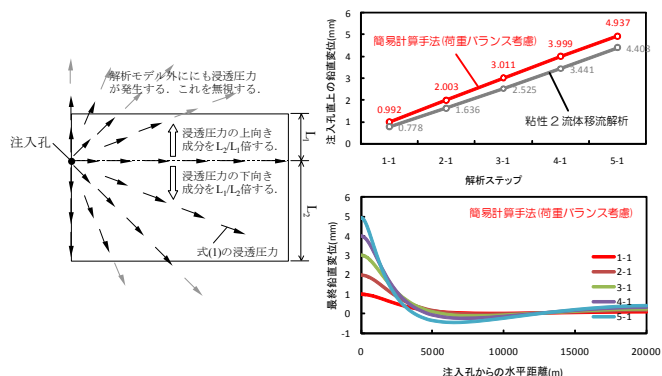


図 7 鉛直バランスを変更した場合の解析結果

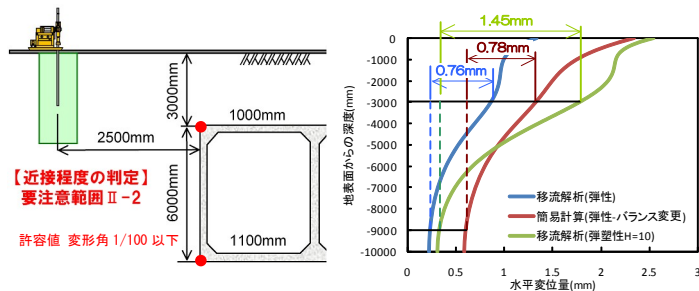


図 8 近接地下鉄 BOX への影響評価