

III-205

土中へのケミカルグラウトの注入と分布
の解析のための浸透モデル

東海大学工学部 正会員 本間 重雄

1. まえがき

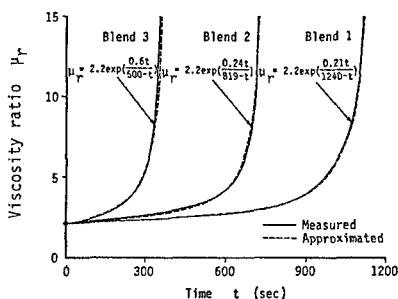
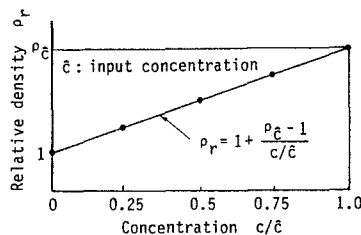
土中に注入されたケミカルグラウトの浸透挙動は多くの物理的・化学的要素が関与し、一般的な浸透水の浸透理論ではその流動を表現しつくせない面が指摘されている。地盤中に注入されたグラウト溶液は、ゲル化の進行による粘性係数の増加、浸透過程におけるグラウト成分の地下水への拡散や土粒子への吸着を伴いながら最終分布へと至るが、その間の非定常流動を的確に表現する理論式の展開が、薬液注入工法の広範囲な使用に伴って設計・施工面から要求されるものと思われる。本報告は、溶液型ケミカルグラウトの土中における濃度輸送を導入した非定常注入理論を提案し、これを実際の注入場に適用するためのパラメーターの相互関係と計算手法を述べ、FEMによるシミュレーション例を示して提案理論の有効性を示したものである。また、シミュレーションと同一設定条件下で実施した室内注入実験結果との比較を通じて、提案モデルの再現性を検証したものである。

2. 溶液型ケミカルグラウトの土中浸透モデル

土中に注入された溶液型ケミカルグラウトの浸透挙動を解析するため、グラウト溶液の間隙水への拡散および土粒子への吸着を考慮した混和置換浸透(miscible displacement theory)に基づく基礎微分方程式を展開した。まず、グラウト溶液の土中における流動に関しては一般化されたDarcyの方程式および完全飽和多孔質体における質量保存則との結合により得られる次の流れ方程式を採用した。

$$\left[\frac{K_{ij} \rho_r}{\mu_r} (\phi + \alpha), j \right]_{,i} = S_i \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 K_{ij} は土の飽和透水係数、 ρ_r および μ_r はグラウト溶液の水に対する相対密度および粘性比 ($\rho_r = \rho_g / \rho_w$, $\mu_r = \mu_g / \mu_w$)、 ϕ は注入グラウト溶液の土中における圧力水頭、 S_i は貯留係数 ($S_i = \alpha \rho_g g$, α は土の圧縮率、 ρ_g はグラウト溶液の密度) である。グラウト溶液の粘性係数の時間変化ならびに密度の溶液濃度に対する変化は、実験結果に基づいて図1、図2に示すような近似を行った。

図1 μ_r の時間変化図2 ρ_r の溶液濃度に対する変化

一方、注入グラウト溶液の濃度 c に関する輸送方程式(移流-拡散方程式)は次式で示される。

$$(D_{ij} c_{,j} - \frac{V_i}{\phi} c)_{,i} = \kappa \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

ここに、 D_{ij} は拡散係数、 V_i はグラウト溶液の浸透流速、 ϕ は土の間隙率、 κ は遅延係数である。拡散係数 D_{ij} は土媒体の性状および流速と次のように関係づけられる。

$$D_{ij} = \frac{D_r}{\phi} |V| \delta_{ij} + \frac{D_L - D_r}{\phi} \frac{V_i V_j}{|V|} + D_a \tau \delta_{ij} \quad (3)$$

ここに、 D_L 、 D_T は流れ方向およびその横断方向の拡散係数、 D_d は分子拡散係数、 τ は屈曲率、 V_i はダルシー流速の*i*成分、 $|V|$ は絶対ダルシー流速である。式(1)、(2)に対しては、次のような初期条件および境界条件が課せられる。

$$\text{初期条件} \quad \psi(x_i, 0) = \psi_0 \quad \text{in } R, \quad c(x_i, 0) = c_0 \quad \text{in } R \quad (4)(5)$$

$$\text{境界条件} \quad \psi(x_i, t) = \hat{\psi} \quad \text{on } S_1, \quad -\left[\frac{K_{ij} \rho_r}{\mu_r} (\phi + x)_{,j}\right] n_i = \hat{q} \quad \text{on } S_2 \quad (6)(7)$$

$$c(x_i, t) = \hat{c} \quad \text{on } S_3, \quad -D_{ij} c_{,j} n_i + q_i c = q \hat{c} \quad \text{on } S_4 \quad (8)(9)$$

式(4)(6)(7)の条件のもとで式(1)を標準Galerkin法により、また式(5)(8)(9)の条件のもとで式(2)をUpstream重み付き残差法により有限要素定式化し、鉛直1次元注入場に対して数値解析を行った。図3は長さ1.45mの円筒管の下端より、 $K=5 \times 10^{-2}$ cm/secの土に対して図1のBlend 2のグラウトを $q=20$ cc/secで定量注入した場合の解析結果を示したもので、これによると従来、単一の流れ方程式のみでは表現し得ないグラウト浸透フロントの圧力勾配の漸変(a)、希釈と吸着を含むグラウト溶液の土中濃度分布(b)等が合理的に解析し得た。

3. 室内注入実験結果との比較

提案モデルの現象論上の妥当性を検証するため、シミュレーションと同一設定条件による室内注入実験を実施した。実験装置は図4に示す内径10cm、長さ145cmのパイプの下端より水ガラスを主液とするA液と、硬化剤、助剤溶液B液をミキサーにより均一にブレンドし、注入管に圧送するものである。パイプ側壁には小型圧力計を設置し

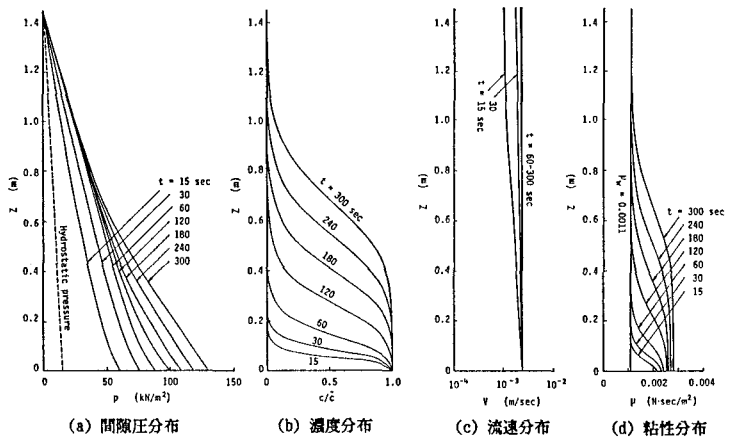


図3 1次元グラウト注入解析結果

て注入過程における間隙圧の経時変化を計測した。注入完了後、注入土を1週間養生して一軸圧縮試験を実施した。図5(a)は実験により得られた注入過程における間隙圧分布の変化を示したもので、解析結果とよい一致を示している。また、注入土の一軸圧縮強度と注入完了時の溶液濃度分布との間にも図5(b)に示すように一定の相関性が認められ、提案モデルにより溶液型ケミカルグラウトの注入過程における非定常流動挙動ならびに注入後の土の物性変化の予測が可能

と思われる。

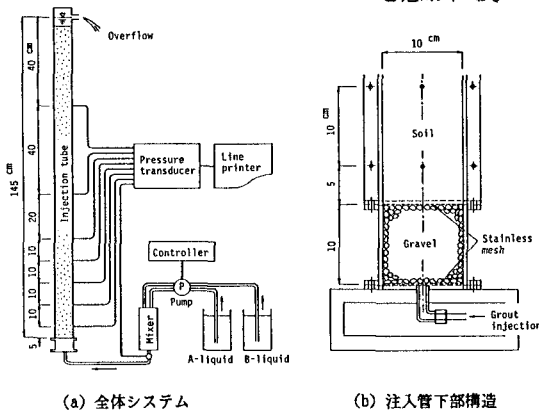


図4 実験装置

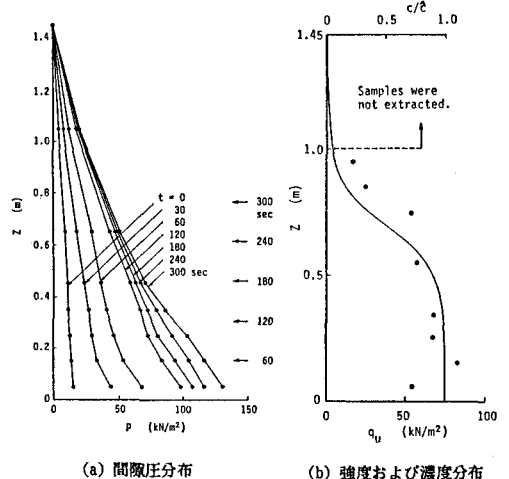


図5 1次元グラウト注入実験結果