

液状化土塊の水中重力流れのダイナミクス

佐々真志・宮本順司・ 関口秀雄

1. 研究目的と内容

本研究の目的は、沿岸域における液状化堆積物の重力流れ過程を予測しうる数値モデルを提案することである。具体的には、堆積物重力流れの内部において発生する凝固過程(図1参照)を考慮して、液状化土の流れダイナミクスを記述できる解析フレームワークを開発している。

液状化堆積物の水中重力流れ過程における凝固領域の伝播過程に焦点をあてている。解析に際しては、流れ表面と流体土/凝固領域の間に形成される内部堆積土境界の双方が同時に発達する移動境界条件の下で、ナビエ-ストークス式系と圧密式の連成システムを数値的に解いている。重力場における液状化土塊の外部流体への流動解析により、液状化堆積物流れは、流動中の液状化土と堆積物内で進行的に凝固する領域間の動的相互作用の帰結として、徐々に減速し停止することを明らかにしている。

以下では、理論モデル及びその数値解析手法の要点について述べる。

2. 液状化堆積物の水中重力流れ・凝固/圧密過程の理論モデル

液状化土は、高密度 ρ_2 の粘性流体と仮定している。無次元の定式化のために、代表長さを H 、代表速度を $U_r = \sqrt{gH}$ とすると、無次元時間は $T = U_r t / H$ 、無次元過剰間隙水圧は $P_e = p_e / (\rho_2 - \rho_1) U_r^2$ となる。流れ表面の境界条件が $P_e = 0$ となることに留意すると、水中液状化流れのダイナミクスを記述するための、過剰間隙水圧 P_e の効果を考慮した二次元ナビエ-ストークス式系は、次のように表現できる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1) \quad ; \quad \frac{\partial U_i}{\partial T} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{\partial P_e}{\partial X_i} + \frac{1}{R_e} \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_j} - \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} n_i \quad (2)$$

ここに、 $U_i = u_i / U_r$ は無次元速度ベクトル、 R_e は流動中の液状化土のレイノルズ数、 $n_i = (0, 1)$ である。

液状化流れ過程における凝固プロセスは、二次元圧密式によって記述することができる。無次元透水係数を $K_D = k_D / U_r$ 、土骨格の無次元体積弾性係数を $M = m / (\rho_2 - \rho_1) U_r^2$ とすると、貯留方程式は次式の形となる。

$$\frac{\partial(\sigma_m - P_e)}{\partial T} = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} M \cdot K_D \frac{\partial^2 P_e}{\partial X_i \partial X_i} \quad (3)$$

ここに、 σ_m は凝固中の堆積物の無次元平均全応力である。凝固領域の体積弾性係数 $M = (Z_s - Z) M_r$ としている。 M_r は1無次元厚さの堆積物に対する M 値、 Z_s は凝固フロント深さ(図1参照)である。

3. 二面移動境界を考慮した一体解析フレームワーク

上述のような重力流れ全体システムは、流れ表面及び凝固表面の位置を未知変量として数値的に解く必要がある。ナビエ-ストークス式-連続式系(式(1),(2))は、スタガードグリッド上の差分法すなわちSMAC法を、圧密式(3)は後退差分法を用いて解いている。外部流体/液状化土間の移動境界ならびに液状化土/内部凝固域間の移動境界は、VOF手法を活用して追跡している。液状化土塊の最下層に有効応力ゼロであるが僅かな剛性をもつ遷移層を仮定して、上述の全体系を連成して解くことにより、液状化流れ・凝固/圧密の発達過程と内部速度構造を予測することを可能としている。予測した液状化堆積物流れの過程において発達した有効応力分布の例を図2に示しておく。

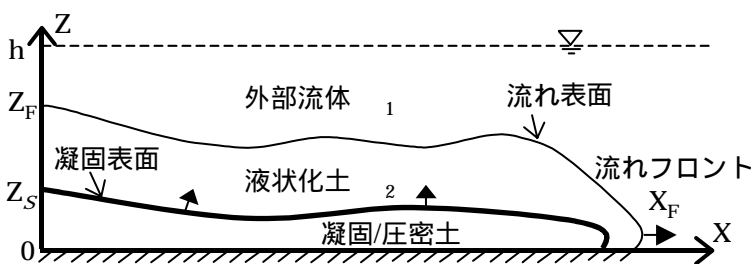


図1 水中液状化流れの概念図

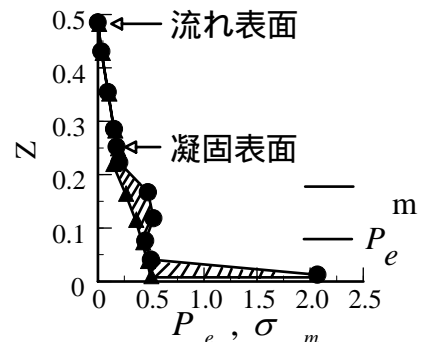


図2 予測された有効応力の鉛直深さ分布