

II-54 個別要素法による海底地盤の波浪応答の数値解析

京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤仁志
 京都大学大学院工学研究科 正会員 酒井哲郎
 ニュージェック 正会員 川崎順二

1. はじめに 波浪による変動水圧に対する海底地盤の応答の理論解の多くは、海底地盤を連続体として取り扱ったものであり、液状化現象のように砂粒子骨格が大変形をする場合への適用性は疑問視される。一方、Cundallの提案した個別要素法(DEM)は、地盤を土塊の集合体として離散的に取り扱う方法であり、独立した個々の土塊の運動方程式を連立させて解く手法である。従って、地盤の液状化時に土粒子が離れて地盤骨格が大変形するような状態の解析も可能である。そこで本研究では、地盤骨格の挙動と間隙水の流動の相互作用を考慮した間隙水連成型個別要素法を用いることにより海底地盤が液状化するような状態での地盤内間隙水圧分布特性や砂粒子の運動特性の再現を試みた。

2. 間隙水連成型個別要素法の概要 間隙水連成型個別要素法は、地盤骨格の運動と間隙水の流動の相互作用を考慮した解析手法である。計算手順は、図-1に示すようにまず個別要素法により計算される地盤骨格の変形に伴う間隙の体積変化量と間隙水流動モデルにより計算される時間ステップあたりの間隙への流出入量から各間隙の過剰間隙水圧を求める。次に、こうして求めた過剰間隙水圧を新たな外力として、個別要素法を用いて新たに地盤骨格の変形計算を行う。これらの計算を繰り返し行う。

時刻 t における間隙 m の過剰間隙水圧（静水圧からの偏差、以下、間隙水圧と略記）を p_m とし、間隙間の水の流れににダルシー則を仮定すると、間隙 lm 間および間隙 mn 間の流入量 Δq_{lm} 、 Δq_{mn} は次式で与えられる。

$$\Delta q_{lm} = \frac{p_l - p_m}{L\gamma_w} kS\Delta t \quad ; \quad \Delta q_{mn} = \frac{p_m - p_n}{L\gamma_w} kS\Delta t \quad (1)$$

ここに p_l 、 p_m 、 p_n ：各間隙の過剰間隙水圧、 L ：流路抵抗長、 k ：透水係数、 γ_w ：水の単位体積重量である。 S は流路断面積であり、要素間距離の変化に伴う地盤の透水性の変化が S を通じて考慮される。また、微小時間 Δt 間に間隙 m の体積が ΔV_m だけ減少し、微小時間 Δt 間の間隙 m への隣り合う間隙 l と間隙 n からの総流出入量が Δq_m であるとする、間隙 m の Δt 時間後の過剰間隙水圧の増分は次式で与えられる。

$$\Delta p_m = E_w \frac{\Delta V_m + \Delta q_m}{V_m} \quad (2)$$

間隙 m への Δt 時間の流出入量は $\Delta q_m = \Delta q_{lm} - \Delta q_{mn}$ と表せて、これを式(2)へ代入すると次式を得る。

$$\Delta p_m = E_w \frac{\Delta V_m}{V_m} + E_w \frac{(p_l - 2p_m + p_n)}{V_m L \gamma_w} kS\Delta t \quad (3)$$

時刻 t における過剰間隙水圧 p_m' は、 Δt 時間の増分 Δp_m を用いて $p_m' = p_m + \Delta p_m$ と書ける。要素 i が間隙 m から受ける水圧の鉛直成分 $F_{p_m z_i}$ は次式で計算できる。

$$F_{p_m z_i} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} p_m r_i \cos \theta d\theta = p_m r_i (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \quad (4)$$

ここに、 r_i ：要素 i の半径、 θ ：要素 i が間隙 m から受ける間隙水圧の作用面の角度、 α_1, α_2 ：水平と間隙水圧の作用面の始点と終点がなす角度である。結局、要素 i に働く力の合力は次式で与えられる。

$$[Fz_i]_t = \Sigma \{ -[f_n] \sin \alpha_{ij} \} + \Sigma \{ -[f_s] \cos \alpha_{ij} \} + \Sigma [F_{p_m z_i}]_t - (\sigma - \gamma_w) \pi r_i^2 g \quad (5)$$

ここに、 f_n, f_s ：要素間応力の鉛直方向成分および水平方向成分、 σ ：砂粒子の単位体積重量であり、式中

の Σ は要素 i に接触する全ての要素と間隙に関する総和を表す。

解析対象の地盤は水平方向に一樣な状態のものとした。これにより水平方向の作用力は相殺され、鉛直方向の地盤骨格の運動のみを解けばよいこととなる。計算対象とした地盤の間隙比は $e=0.70$ であり、地盤の透水係数に関しては、間隙間の局所透水係数を $k_i=0.1\text{cm/s}$ とした。数値的な透水試験により地盤全体の透水係数を求めると $k_g=0.04\text{cm/s}$ が得られた。水の体積弾性率に関しては $E_w=2.0\text{kgf/cm}^2$ としたが、これは通常よりも小さい値となっている。表-1に解析条件を示した。

3. シミュレーション結果 図-2は、水圧変動振幅 4.0m 、周期 3.0s の条件下で要素間距離の時間変化を抽出した結果の一部で、位相 $5\pi/3$ の場合を示したものである。なお、図の右下の補助図には地盤表面の作用水圧の変化を基準に位相 $5\pi/3$ を示している。また、図中の点線は要素が接触状態にあるときの要素間距離に相当し、この点線より右側が非接触を表している。これによると、水圧変動振幅が最小値をとる直後の位相 $5\pi/3$ で要素間距離が拡大し深さ $z=10\sim 20\text{cm}$ 程度の範囲で地盤の液化化が生じたと考えられる。図-3は、同様の条件における地盤内間隙水圧分布の時間変化を示したものであるが、地盤表面の水圧に対する地盤内間隙水圧の応答遅れ（位相差）が明瞭に表れており、これが減圧時の圧力勾配を増大させ、土塊（要素）の浮上を促しているものと考えられる。

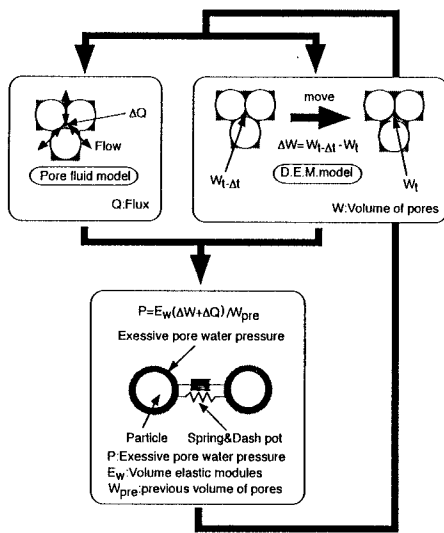


図-1 計算手順

表-1 モデル定数

Element size D (cm)	1.0
Coefficient of permeability k (cm/s)	0.1 (0.04)
Volume elastic modulus E_w (kgf/cm ²)	2.0
ρ_o (kgf/cm ³)	1.0
L (cm)	0.1
Δt (s)	1.0×10^{-5}

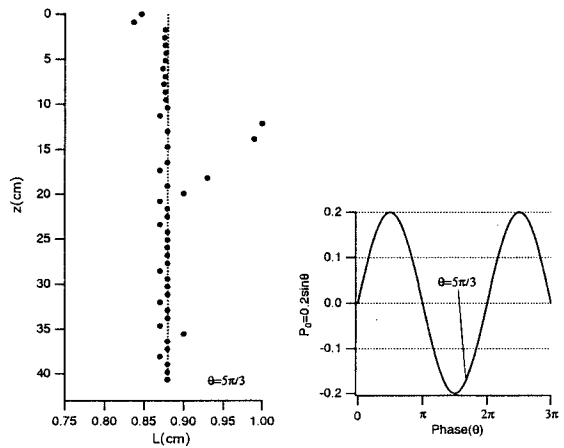


図-2 要素間距離

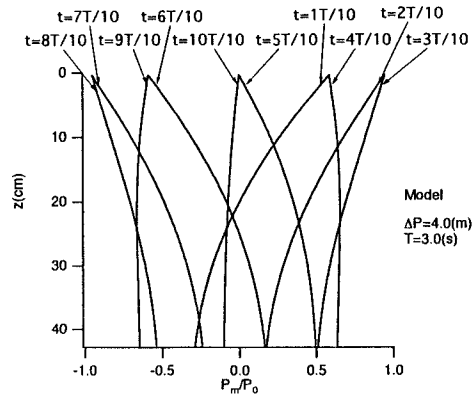


図-3 地盤内間隙水圧分布