

流体の基礎方程式を考慮した個別要素法による液状化解析

筑波大学 学生会員 竿本 英貴
筑波大学 正会員 西岡 隆

1. はじめに

液状化が起こるかどうか、あるいは起こった場合にどの程度構造物に被害を及ぼすのかを定量的に把握することは耐震設計において重要な課題の一つである。この問題へのアプローチとしては模型実験および数値解析等が挙げられる。ここでは二次元の数値解析を行った。川口ら^{1)~3)}は高濃度固気混相流の数値解析手法として、気体を連続体として、固体を離散体として連成解析を行う手法を提案し、流動層を対象とした一連の数値解析を行っている。本研究では、この手法を液状化解析に流用する。すなわち、間隙が水で完全に飽和された砂地盤を土粒子と間隙水から成る固液二相系であると考えて、土粒子には離散体の解析手法の一つである個別要素法を、間隙水には土粒子よりは十分大きく、流れの場合全体から見れば十分小さいという中間的な大きさの空間について成り立つ間隙率を考慮した流体の基礎方程式⁴⁾を用いて数値解析を行う。

2. 支配方程式

土粒子を図1に示す個別要素でモデル化する。この要素の運動方程式(並進, 回転)は次のように表すことができる。

$$m\ddot{u}_i = f_{ci} + f_{fi} + f_{gi} \quad (1)$$

$$I\ddot{\phi} = N \quad (2)$$

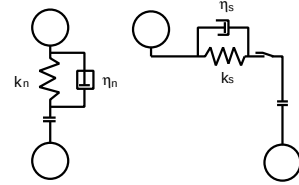


図-1 個別要素モデル

ここに、 m, u_i はそれぞれ要素の質量および変位。 f_{ci}, f_{fi}, f_{gi} はそれぞれ周囲の要素による接触力、間隙水から受ける力ならびに外力である。 I, ϕ, N はそれぞれ、要素の慣性モーメント、回転変位、そして要素に働くトルクの総和である。トルクは接触力の接線方向力のみによって発生するものとし、間隙水の影響は考えない。

他方、間隙水の支配方程式である連続の式および運動方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad , \quad \frac{\partial(\varepsilon v_i)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial(\varepsilon p)}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial(\varepsilon \tau_{ij})}{\partial x_j} + f_{pi} + \varepsilon f_{gi} \quad (3)$$
$$\tau_{ij} = \mu_f \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

ただし、間隙水の運動方程式中において移流項は小さいとして無視している。ここに、 $\varepsilon, v_i, p, \rho_f$ はそれぞれ、間隙率、間隙水の流速、間隙水圧、そして間隙水の密度である。 μ_f は間隙水の粘性係数、 τ_{ij} は非圧縮性ニュートン流体の粘性応力テンソルであり、 f_{gi} は間隙水に働く外力である。 f_{pi} は土粒子と間隙水の相互作用項であり、粒子の速度と間隙水の流速の相対速度の関数である。今回の計算では、この相互作用項 f_{pi} は土粒子と間隙水が一体となり運動すると仮定し、 $f_{pi} = 0$ とした。したがって、土粒子が間隙水から受ける力 f_{fi} は土粒子の体積を V とすれば、次の式によって与えられる。
$$f_{fi} = -V \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

3. 解析モデル

今回の計算に用いた物性値を表1に、解析モデルを図2に示す。境界条件は間隙水について、左右両端と下端において流速が0、上端では鉛直方向流速が0、水平方向流速の鉛直方向への勾配を0とした。間隙水圧については水面で間隙水圧が0、残りの各境界上では運動方程式を境界に適用することにより求まる間隙水圧とした。この各境界での間隙水圧 (p_L, p_R, p_B) は次の式で与えられる。

表-1

粒子径	2~3mm
粒子密度	2700 kg/m ³
内部摩擦角	35°
ばね定数 (垂直, せん断)	600, 300 N/m
減衰定数 (垂直, せん断)	0.5, 0.25
間隙水密度	1000 kg/m ³
間隙水粘性係数	1.52×10 ⁻³ Pa·s
時間刻み	1.0×10 ⁻⁵ s

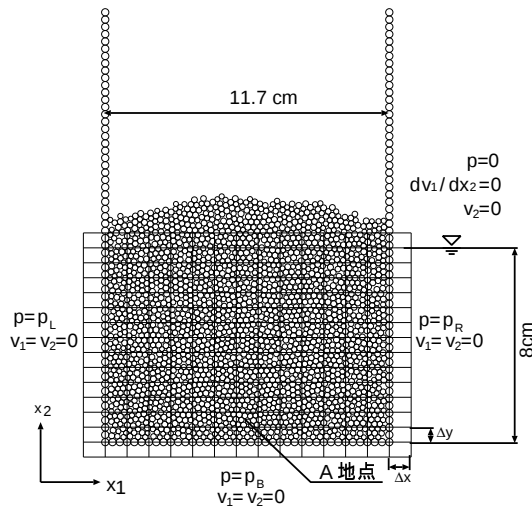


図-2 解析モデル

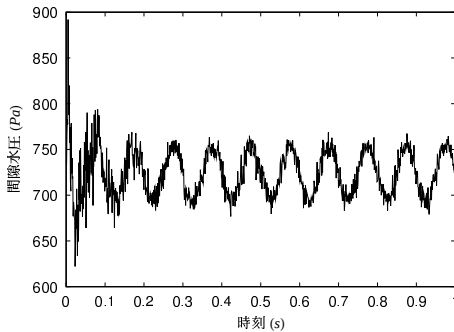


図-3 A 地点の間隙水圧

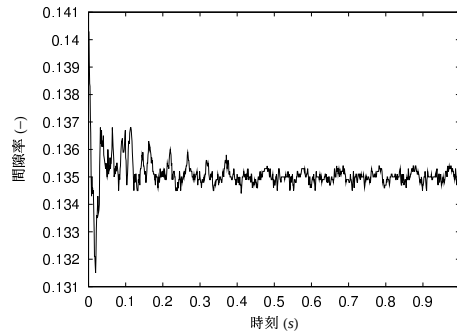


図-4 A 地点の間隙率

$$p_L = p_{in} - \frac{\mu_f}{\Delta x} v_{1in} - \rho_f f_{g1} \Delta x, \quad p_R = p_{in} + \frac{\mu_f}{\Delta x} v_{1in} + \rho_f f_{g1} \Delta x, \quad p_B = p_{in} - \frac{\mu_f}{\Delta y} v_{2in} - \rho_f f_{g2} \Delta y \quad (5)$$

ここで, p_{in} は, 各境界に隣接する間隙水圧であり, v_{1in}, v_{2in} は各境界に最も近い流速を表す. また, 初期条件は流速が 0, 間隙水圧が静水圧であるとした. 個別要素については, 要素数が 2400, 粒径分布は 2~3mm の一様分布であり, 左右両端および下端は固定端とした. 加振は振幅が 200gal, 周波数が 10Hz の正弦波を水平方向に入力した.

4. 解析結果

図 2 の A 地点における間隙水圧の経時変化を図 3 に, 間隙率の経時変化を図 4 に示す. 加振ははじめてから 0.2 秒までは間隙水圧, 間隙率ともに変動は激しい. 間隙水圧は 0.2 秒以降は静水圧 724Pa まわりを振幅が約 30Pa で加えた外力と同じ周期で振動しており, 振幅 200gal の加振では上昇傾向は見られなかった. 間隙率に関しては, 振動により締め固められ, 初期値が 0.139 であったのが約 0.135 付近を振動している.

5. おわりに

今回の手法によって間隙の変化, および間隙水圧の変動を定量的にとらえることができた. 今後は今回流体の基礎方程式中で無視した移流項と相互作用項を加え, 実際の粒度分布を用いた解析を行う.

参考文献

- 1) 川口寿裕・田中敏嗣・辻裕: 日本機械学会論文集, 58-551B, 1992.
- 2) 川口寿裕・田中敏嗣・辻裕: 日本機械学会論文集, 61-589B, 1995.
- 3) 川口寿裕・坂本昌穂・田中敏嗣・辻裕: 日本機械学会論文集, 64-619B, 1998.
- 4) Anderson, T.B. and Jackson, R.: Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 6, pp.527 - 539, 1967.
- 5) 日本流体力学会: 流体力学ハンドブック第 2 版, pp.1053 - 1064, 丸善, 1998.
- 6) 伯野元彦: 破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー, 森北出版, 1997.