

液状化の数値解析的アプローチ

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

地盤は土粒子 (固体), 間隙水 (液体), 空気 (気体) から成る三相系であり, 液状化はこれらの連成問題である. 本研究では, 密度の違いから空気を無視した飽和砂地盤 (二相系) を対象として, 砂粒子には個別要素法を, 間隙水には間隙率を考慮した流体の基礎方程式を適用することにより, 二相間の相互作用を考慮した数値解析¹⁾を行って液状化現象へのアプローチを試みた.

2. 支配方程式

砂粒子を図-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.

$$M\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_g \quad (1)$$

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

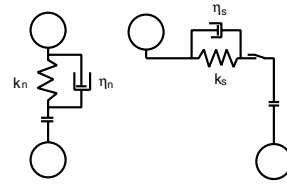


図-1 個別要素モデル

ここに, M, \mathbf{u} , はそれぞれ要素の質量および変位である. $\mathbf{F}_c, \mathbf{F}_d, \mathbf{F}_g$ 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.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad , \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\varepsilon p)}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\varepsilon \tau_{ij})}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} f_{di} + \varepsilon f_{gi} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2)$$

ただし, 間隙水の運動方程式の左辺にあるべき慣性項と移流項は無視している (粘性の卓越). ここに, ε, v, p, ρ 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 は間隙水の粘性係数, τ 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_g は間隙水に働く外力である. f_d は砂粒子と間隙水の相互作用項であり, 砂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, Ergun の式²⁾を利用した. したがって, 砂粒子が間隙水から受ける力 F_d は砂粒子の粒径を d_p , 体積を V , 検査面内粒子の平均速度を v_p とすれば, 次の式で表すことができる.

$$F_{di} = \left[\frac{-\beta}{(1-\varepsilon)} (v_{pi} - v_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \right] V, \quad \text{ただし } \beta = \frac{1-\varepsilon}{d_p \varepsilon^2} \left[150 \frac{(1-\varepsilon)\mu}{d_p} + 1.75 \rho \varepsilon |v_{pi} - v_i| \right] \quad (4)$$

3. 解析モデル

今回の解析に用いた物性値を表-1に, 解析モデルを図-2に示す. なお, 境界条件は図-2に示すとおりである. 水面を除く各境界上での間隙水圧は, 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. 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. 振動外力として振幅が 200 gal , 周波数が 10 Hz の正弦波を水平方向に入力した. 時間刻みは $3 \times 10^{-5} \text{ s}$ とし, 流体計算格子の間隔 $\Delta x, \Delta y$ はそれぞれ, $10.24 \text{ mm}, 5.33 \text{ mm}$ とした.

Key Words: 液状化, 個別要素法, 流体の基礎方程式

〒305-0006 つくば市 天王台 1-1-1 筑波大学 機能工学系

表-1: 解析に用いた物性値

粒子径	2~3mm
粒子密度	2600 kg/m ³
粒子間摩擦係数	0.7
ばね定数 (垂直, せん断)	1000, 370 N/m
減衰定数 (垂直, せん断)	0.3, 0.3
間隙水密度	1000 kg/m ³
間隙水粘性係数	1.52×10 ⁻³ Pa·s

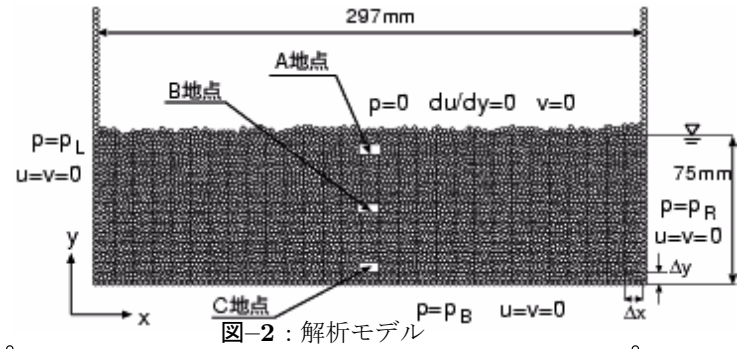


図-2: 解析モデル

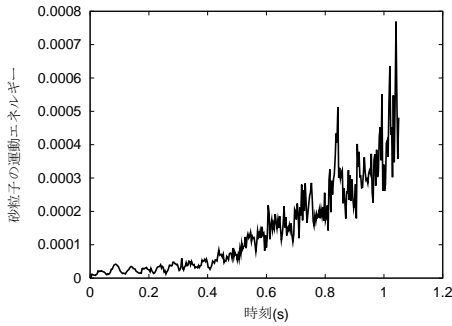


図-3: 砂粒子の運動エネルギー

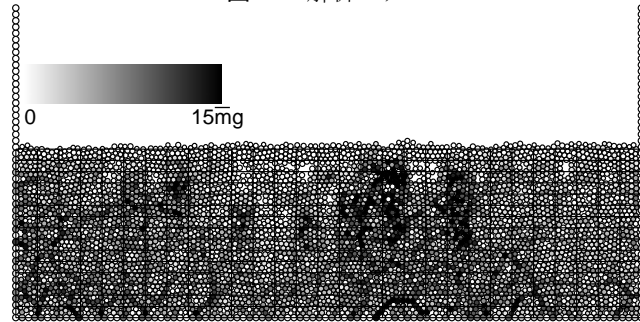


図-4: 圧縮力分布 (0.843 秒後)

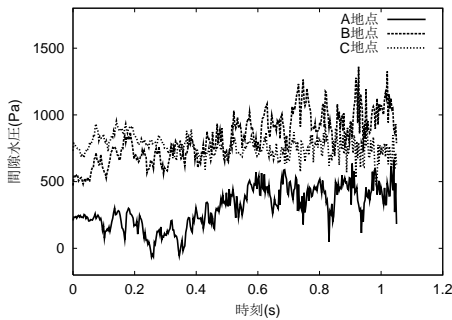


図-5: ABC各地点の間隙水圧

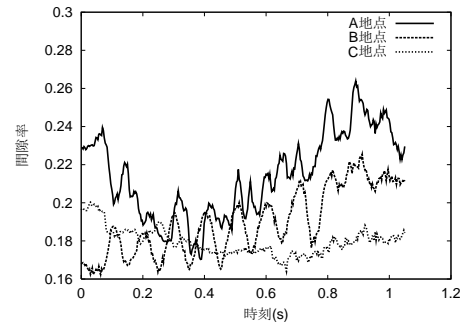


図-6: ABC各地点の間隙率

4. 解析結果

液状化が起こると砂粒子同士の結合がはずれ、砂粒子運動エネルギーが大きくなると考えられる。この考えに基づき、砂粒子の運動エネルギーを監視して液状化の開始を推定する。図-3より、今回の場合については、砂粒子の運動エネルギーが $5 \times 10^{-4} J$ (0.843 秒後) に達した時に液状化が始まったとした。この時刻における解析モデルの圧縮力分布を示したものが図-4であり、色が濃いもの程強い圧縮を受けていることを表している。粒子間圧縮力は有効応力に対応する力であるから、粒子間圧縮力の小さい領域が、液状化していると考えられる領域である。図-2中に示した A,B,C 各地点における間隙水圧の経時変化を図-5に、間隙率の経時変化を図-6に示す。間隙水圧、間隙率ともにモデル底面からの距離が大きくなればなる程、激しく変動していることがわかる。

5. おわりに

個別要素法と間隙率を考慮した流体の基礎方程式を用いて、液状化現象に対し数値解析によるアプローチを試みた。その結果、砂粒子の運動エネルギーと圧縮力分布に着目することにより、液状化が始まったと考えられる時刻と液状化したと考えられる領域を明らかにすることができた。

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) 日本流体力学会：流体力学ハンドブック第2版，丸善，1998.
- 3) 竿本英貴・西岡隆：土木学会年次講演集，III-B377，2000.