

I-452 不透水層を有する液状化地盤の地震応答解析

神戸大学大学院 学生員 孫 建生

神戸大学工学部 正会員 高田至郎

千代田生命 加藤恵三

1. 解析手法 液状化地盤の地震応答解析は2次元FEMによる初期有効応力解析、動的液状化解析、過剰間隙水圧消散・沈下解析の3つの部分によって構成されている。

(a) 非線形振動方程式 地盤剛性と減衰は時々刻々に変化するため、増分形で表した(1)式を用いる。数値積分にはWilsonの θ 法を使用している。

$$[M] \cdot \{\Delta y\} + [C] \cdot \{\Delta y\} + [K] \cdot \{\Delta y\} = -[M] \cdot \Delta \alpha \quad (1)$$

ここに、 $[M]$; 質量マトリックス、 $[C]$; 減衰マトリックス、 $[K]$; 剛性マトリックス、 α ; 基盤加速度で、 $\{y\}$ 、 $\{\dot{y}\}$ 、 $\{\ddot{y}\}$; 節点の加速度、速度、変位である。

(b) 応力比-ひずみ関係 土の非線形応力-ひずみ関係として(2)式示す履歴型H-Dモデルを用いている。

$$\eta = \frac{G_0' \gamma}{1 + |\gamma / \gamma_r|} \quad (2) \quad \left| \begin{array}{l} \text{ここに、} G_0' = G_0 / \sigma_0' \cdot \eta; \text{せん断応力比} (\tau / \sigma')、G_0'; \eta - \gamma \text{ 関係の骨格曲線の初期勾配、} \end{array} \right.$$

γ_r ; 規準ひずみ (η_r' / G_0')、 η_r ; 破壊せん断応力比 (τ_r / σ_0')、 τ_r ; 破壊せん断応力である。

(c) 載荷-除荷基準 従来のMasing載荷-除荷規準では、履歴曲線は同じひずみの場合に一本となっており、実際の室内実験結果と矛盾している。本文は文献(1)に提案された修正Masing規準を用いている。履歴曲線と移動骨格曲線はそれぞれ(3)、(4)式で示される。

$$\eta - \eta_m = \frac{G_0' (\gamma - \gamma_m)}{1 + |\gamma - \gamma_m| / n \gamma_r} \quad (3) \quad \left| \quad \eta = \frac{G_0' (\gamma - \Delta \gamma)}{1 + (|\gamma - \Delta \gamma| / \gamma_r)} \quad (4) \right.$$

ここに、 γ_m 、 η_m ; 折り返し点の座標、 $\Delta \gamma$; 直前のひずみ履歴、 n ; 双曲線の漸近値に関する係数である。

(d) 過剰間隙水圧の予測方法²⁾ 時間ステップの過剰間隙水圧発生量 d_u はせん断による体積ひずみ dv_d と砂の体積圧縮係数 m_s の比で表す。

$$dv_d = \frac{\partial v_d}{\partial \sigma'} d\sigma' + \frac{\partial v_d}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial v_d}{\partial N} dN \quad (5) \quad \left| \quad v_d = m^* \sigma' \eta^n \frac{N}{N+A} \quad (6) \right.$$

ここに、 m^* 、 A は材料定数で、 N は繰り返しの回数である。

(e) 間隙水圧消散・沈下解析 間隙水圧の消散とそれに伴う地盤沈下をBiotの圧密理論を用いて求めた。

(f) 入力加速度 入力加速度は振動数 2Hz、最大振幅100galの過渡正弦波を用いている。

2. 解析結果 (a) 間隙水圧の上昇及び載荷-除荷曲線のシミュレーション結果 図1は図4b)のA点の間隙水圧比変化を示している。間隙水圧の上昇曲線では砂のダイレイタンスーと関係しており、他の実験で知られるような入力振動波形の2倍の振動数で変化している傾向が認められる。図2は図4b)の要素a

振動開始後6秒間のせん断応力比~せん断ひずみ関係を示している。繰り返しせん断によるせん断応力の低下がよく表されている。図3は同要素のせん断応力比、せん断ひずみの時刻歴であり、載荷-除荷関係に修正のMasing曲線を使っているため、間隙水圧比が0.8以上に達しても安定な解が得られている。

(b) 部分液状化地盤の応答解析 液状化領域の上部両側に非液状化領域がある場合の解析を砂の透水係数は 10^{-6} m/sとして行った。図4、5は振動開始後3秒及び10秒後の水圧分布で、水圧が急激に上昇している最中の3秒時には、2つの場合の水圧分布

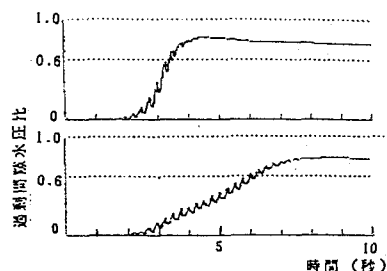


図1. A点の過剰間隙水圧の変化

に大差はなく、タテ型に近いMODEL-A では水圧比0.5～0.6の範囲が広がっている。10秒時には、タテ型に近いMODEL-A では、水圧もタテ型に広がっていて、MODEL-bでは水平方向へ広がっている。

(c) グラベルドレーン対策地盤の解析結果 図

6のように不透水層及びグラベルドレーンを配した地盤について解析を行った。図7は各モデルのA、B、C、D点の間隙水圧比の時刻歴を示している。図7a) の砂の透水係数が 10^{-6} m/s、ドレーンの透水係数が 10^{-4} m/sの場合では1m離れている点ではドレーンによる排水効果がほとんどなく、図7b)の砂の透水係数が 10^{-5} m/s、ドレーンの透水係数が 10^{-2} m/sの場合では1mに離れている各点で消散の効果がはっきりと見える。また、A点の間隙水圧比は図7a)の場合では0.7を越えてから緩やかに上昇しているが、図7b)の場合では砂の透水性によって間隙水圧が相対に高い下部からの浸透によってただちに1.0に達しており、他の実験による地下水位に近いところが先に液状化するという結果と一致している。図7b)の場合ではA点では一旦液状化して、ドレーンの排水効果によってすぐ間隙水圧比が減少しており、図7a)に比べて液状化する時間ははるかに短くなっている。

3. 結論 1)修正Masing則を載荷－除荷関係へ導入することにより、土の有効応力がゼロに近づいても、液状化過程中的地盤応答の安定な解が得られた。2)間隙水圧発生予測式を提案し、実験結果とよく一致する間隙水圧上昇曲線が得られた。3)部分液状化地盤はタテ型に近いほど、液状化しやすい傾向を示している。4)砂とグラベルの透水係数の組合せによって、グラベルドレーンの効果を調べた。参考文献：1)龍岡文夫ら：砂の液状化と有効応力、土と基礎、36-6、1988。2)西好一ら：地震時における基礎地盤の安定性評価（その1）動的解析に基づく砂・砂礫地盤の安定性評価手法の開発、電力中央研究所研究報告、1986.9。

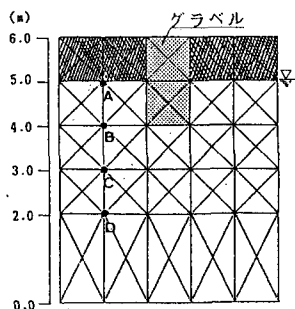
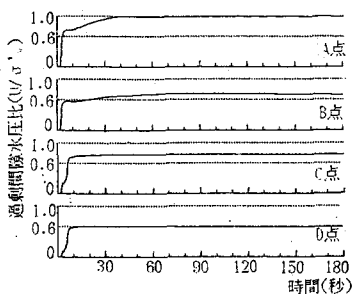
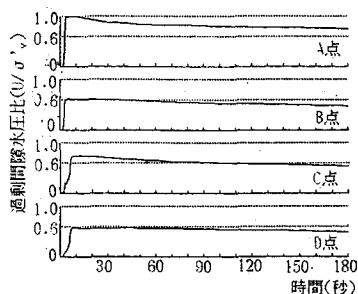


図6. 解析モデル



a) 透水係数 砂 10^{-6} m/s,
ドレーン 10^{-4} m/s



b) 透水係数 砂 10^{-5} m/s,
ドレーン 10^{-2} m/s

図7. グラベル対策後の過剰間隙水圧比変化

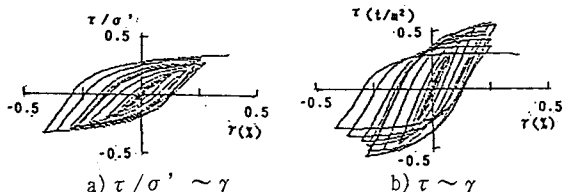


図2. MODEL-Bの要素aの応力－ひずみ関係

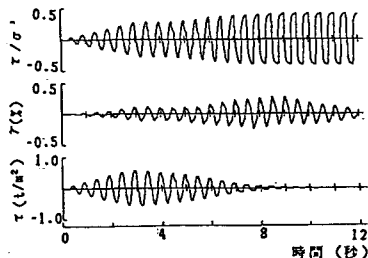
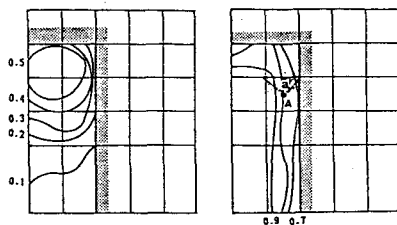
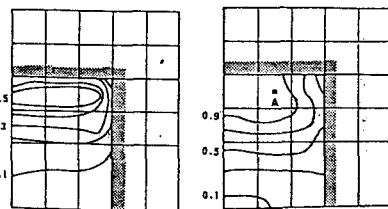


図3. MODEL-Bの要素aの地盤応答値



a) 振動開始後3秒 b) 振動開始後10秒

図4. MODEL-Aの過剰間隙水圧比分布



a) 振動開始後3秒 b) 振動開始後10秒

図5. MODEL-Bの過剰間隙水圧比分布