

液状化地盤における直接基礎建物の有効応力解析による応答と沈下量評価

正会員 福武毅芳* 堀田洋之* 馬淵倉一**

液状化 直接基礎 沈下
重力 有効応力解析

1.はじめに 液状化時には地盤の大きな変形が問題となる。最近では性能設計の観点から特に残留変形の評価は重要である。ここでは三次元の有効応力解析プログラム HiPER^{1),2)}に、重力の効果を簡便に組込むことにより、液状化時の地盤や構造物の残留変形を有効応力解析のみによって評価する方法を提案した。さらに遠心模型実験のシミュレーションによりその妥当性を検証した。

2.解析手法の概要 地盤や構造物の残留変形に関する要因としては、負のダイレイタンス(乾燥地盤)、圧密沈下(飽和地盤)、応力・ひずみ関係のラチェッティング(初期せん断応力の方向にせん断ひずみが徐々に蓄積する効果)、重力効果：運動方程式の中に重力効果を考慮、などがある。上記の中で震動中に効果の大きなものはである。～によっても沈下は生じるがに比べれば一般に小さい(文献3)～5)参照)。

有効応力解析において重力効果を考慮するには、(a)980 Galを鉛直下方に載荷した状態で解析、(b)初期の自重応力状態との釣合いを考慮して不釣合い力を算出し、増分系運動方程式を解く(収斂させる)、などの方法がある。ここではHiPERに(b)の方法を組み込み、～に加えの重力による変形も評価できるように改良した。重力場の処理の流れを以下に示す。

解析ステップの前処理として、初期応力に釣合う初期変位 u_0 を算出する。 u_0 は、初期応力から算出した節点力を荷重項とした自重解析を行って算出する。

$$K_0 \cdot u_0 = W_0 \quad (1)$$

K_0 : 初期の剛性マトリックス, W_0 : 初期応力 σ_{ij} から算出した節点力 = $[B]^T \{ \sigma_{ij} \} dv$ 。

次に、解析ステップの処理を以下に示す。

- 1) 運動方程式(3)より変位を算出し、応力・ひずみを算出。
- 2) 応力 - ひずみ関係より応力の修正。
 - ・ - 関係に三次元R-Oモデルを適用し接線剛性 G を算出。
 - ・ 算出した G から、ポアソン比一定でヤング率 E を算出し、 D マトリックスを作成。
 - ・ D マトリックスより応力を修正。
- 3) ダイレイタンスモデルであるおわんモデル²⁾を用いて、有効応力や過剰間隙水圧 (σ'_m, P_w) を算出。
- 4) σ'_m から次ステップのR-Oモデルの骨格曲線を決定。
- 5) 初期の自重状態との釣合いを考慮して不釣合い力 R_e を算出。(次式は、トータル系の表現で記述)

$$\begin{aligned} R_e &= F_t - \left(M \ddot{u}_t + C \dot{u}_t + K u_t \right) + \text{重力場の影響} \\ &= F_t - \left(M \ddot{u}_t + C \dot{u}_t + K u_t \right) + (W_0 - W_t) \\ &= F_t - \left(M \ddot{u}_t + C \dot{u}_t + K u_t \right) + (K_0 \cdot u_0 - K' \cdot u_0) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 W_t : 初期変位 u_0 に時々刻々変化する割線剛性マトリックス K' をかけて応力を算出し、その応力から求めた節点力、 F_t : トータル外力、大カッコ内: 内力。

重力項を考慮した増分系の運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} K_e \cdot \Delta u &= \Delta F + \Delta W + R_e + M \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \ddot{u}_t + \frac{1}{2\beta} \dot{\ddot{u}}_t \right) + C \left\{ \frac{1}{2\beta} \dot{u}_t + \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{u}_t \right\} \\ \Delta W &= (W_0 - W_t) - (W_0 - W_{t-1}) \quad (3) \end{aligned}$$

割線剛性 K' の算出方法は種々の方法が考えられるが、ここでは簡便に R-O モデルのパラメータであるせん断剛性 G_0 を参照している。すなわち G_0 は時々刻々算出される有効応力に基づいた次式より算出され、その値を割線剛性として用いる。

$$G_0 = G_{0i} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mi}} \right)^{0.5} \quad (4) \quad , G_{0i} : \sigma'_m = \sigma'_{mi} \text{ における } G_0$$

3.解析条件 上記手法の適用性を検証するため、遠心模型振動実験⁶⁾のシミュレーションを実施した。実験概要を図1に示す。土槽奥行きは38cm、構造物奥行きは30cmであり、変形場は二次元状態に近い。解析に用いた二次元FEMモデルや土質パラメータは文献7)とほぼ同じである。今回の解析で沈下に関する要因としては、重力効果のみ

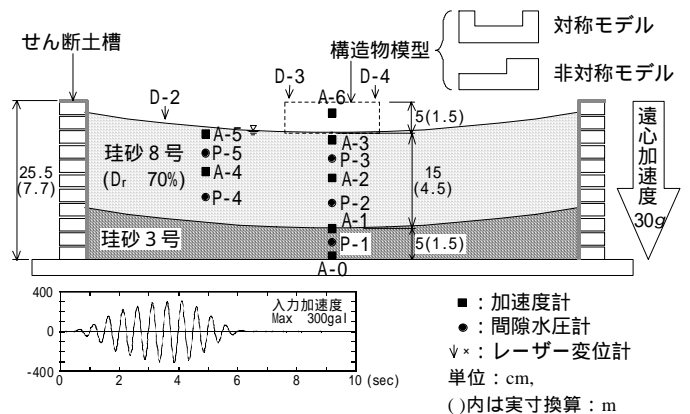


図1 遠心模型実験概要

に着目し、圧密沈下やラチェッティングについては考慮していない。

4. シミュレーション結果と考察 対称モデルにおける加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴を図2, 3示す。解析・実験ともに水圧比より2秒以降で液状化に至っている。その時刻以降で加速度振幅が小さくなる傾向は再現できているが、地盤では解析値の方が大きめ、構造物では解析値の方が小さめである。図4には対称・非対称モデルの時刻15秒における最終変形形状を示す。図5, 6には沈下の時刻歴を示す。最終沈下量は計算値の方がやや小さめとなっている。ただし、加振中の沈下の勾配や、5秒以降は一定となる傾向は良く再現できている。非対称モデルでは不同沈下しておりその傾向も説明できているが、解析では傾斜角がやや小さい。これは基礎の右下地盤で正のダイレイタンスが生じ剛性が回復したためである。また構造物直下では、沈下によるせん断によって間隙水圧が一旦低下するなどの複雑な現象は良好に表現できておらず、今後の検討課題である。

5. おわりに 今回の示した解析方法により、液状化時の残留変形をある程度の精度で予測できることが分った。ただし、解析の沈下量は実験値よりやや小さくなっている。この理由としては、軟化後の割線剛性 K' として G_0 を参照している(応力・ひずみ関係をマクロに見れば実際の K' はもっと小さい値となる)、実験ではわずかに三次元的に(紙面直行方向に)変形している、解析では地盤と構造物とは節点共有としており構造物が地盤に大きくめり込むような変形は表現できない、などが考えられる。今後は K' の見直しや三次元解析により複雑な基礎形式に応用してゆく予定である。

参考文献：1) 大槻ほか：液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.101-110, 1994 2) 福武：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997 3) 福武ほか：3次元解析による多方向入力下の動的沈下の評価, 第27回土質工学研究発表会, pp.831-834, 1992 4) 福武・大槻・佐藤・社本・亀岡：遠心載荷振動台実験のシミュレーションとせん断土槽フレームの影響, 第28回土質工学研究発表会, pp.1151-1154, 1993 5) 藤川・福武・大槻：

初期せん断作用時の応力・ひずみ関係と加振中における残留変形解析, 第27回土質工学研究発表会, pp.1111-1114, 1992 6) 堀田・社本・杉本・田村：地盤液状化後の基礎の沈下に関する遠心模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.435-436, 2004 7) 堀田・福武・社本：液状化後の砂の残留変形理論と2次元有効応力解析による沈下量評価, 第40回地盤工学研究発表会, 2005

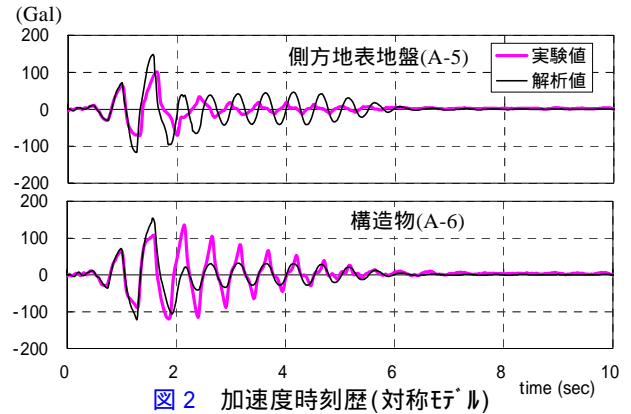


図2 加速度時刻歴(対称モデル)

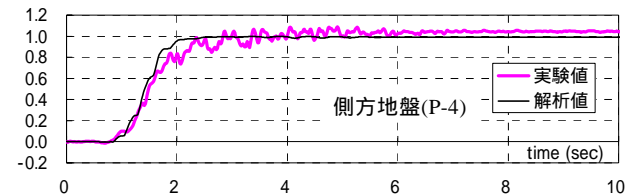


図3 砂地盤の過剰間隙水圧比時刻歴(対称モデル)

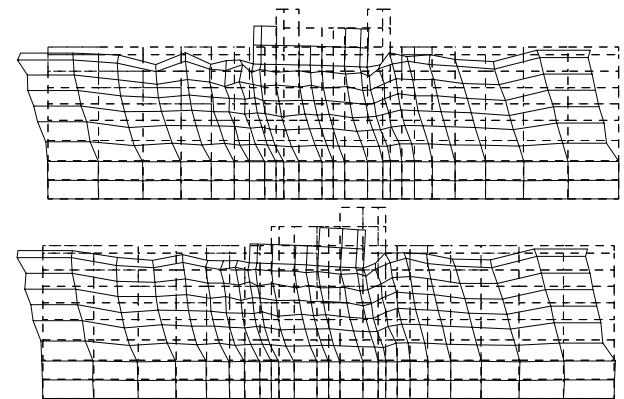


図4 最終変形図(15秒)

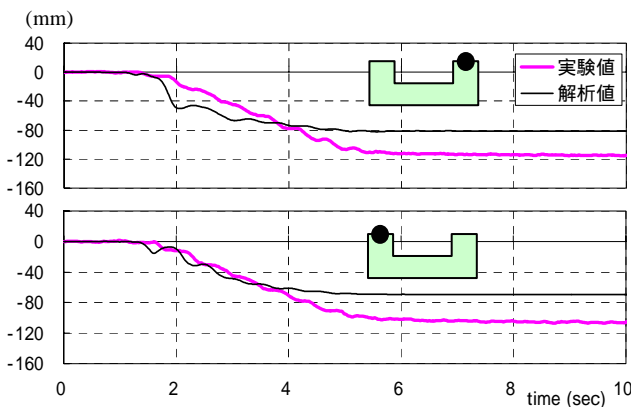


図5 対称構造物の沈下時刻歴

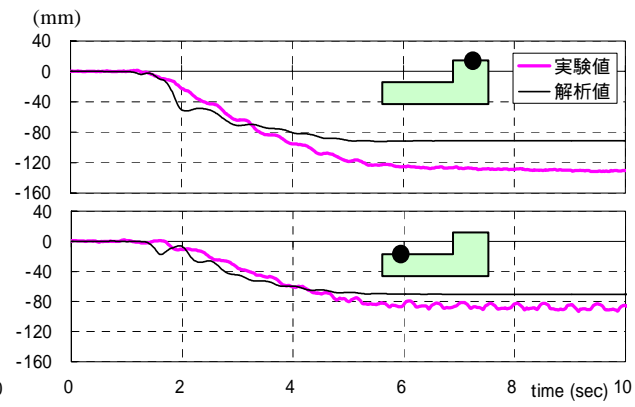


図6 非対称構造物の沈下時刻歴