

液状化地盤上の偏心直接基礎建物の遠心実験および有効応力解析による応答評価

Response of Eccentric Spread Foundation Structure on Liquefiable Ground in Centrifuge Tests and Analyses

福武毅芳¹, 堀田洋之¹, 社本康広¹, 馬淵倉一²Kiyoshi FUKUTAKE¹, Hiroyuki HOTTA¹, Yasuhiro SHAMOTO¹ and Souichi MABUCHI²¹ 清水建設, Shimizu corporation² CRC ソリュ - ションズ, CRC Solutions corporation

SUMMARY: A dynamic centrifuge model test of liquefiable sand and structure was conducted. The model contained in laminar container were laterally and sinusoidally shaken under a centrifugal acceleration of 30 g. Accelerations, pore water pressures, and settlements were monitored. The structure with spread foundation has eccentric center of inertia due to irregular shape. The structure settled and tilted in three-dimensional way. The test results were evaluated by three dimensional effective stress analysis.

1 はじめに

最近ではレベル 2 地震を想定した性能設計がなされつつある。そのため、液状化の発生をある程度許容した上で、必要に応じて対策を施し、地震後の変形量を許容値以内に制御することが合理的設計と言える。さらに液状化層をアイソレーターとして積極的に利用した設計・施工も行われている[1]。このような基礎の設計法を確立するためには、液状化地盤～構造物系の応答や、液状化後の変形量を適切に評価する必要がある。

このような情勢を受けて、筆者らは液状化地盤上の直接基礎構造物の二次元的挙動を実験と解析の両面から評価してきた[2-4]。ここでは水平 2 方向に偏心荷重のある構造物の三次元的な挙動に関する遠心模型実験とそのシミュレーション解析結果について報告する。

2 遠心模型振動実験

実験概要をFig. 1に示す。模型縮尺は1/30であり、遠心加速度30gの下で実験を行った[5]。

模型地盤は厚さ5cm(実寸換算1.5m)の礫の基盤層と、厚さ15cm(同4.5m)の細砂の表層からなる2層地盤である。基盤層は珪砂3号を締め固めて用いた。表層は珪砂8号を用い、空中落下法により相対密度60%となるように作成した。この地盤を真空中で脱気し、水の30倍の粘度を有するシリコンオイルを浸透させることにより完全に飽和させ、水位は地表面と一致させた。実地盤に換算すると表層の換算N値は約14となり液状化しやすい地盤である。

構造物模型は幅15cm×奥行き12cm×厚さ2.5cmのアルミニウム板の上部右側に3cm×12cm×2.5cmのアルミニウム棒2本、更にその上に6cm×4.8cm×2.5cmのアルミニウムブロックを奥側にそれぞれ寄せて取り付け、構造物荷重を2方向に偏心させた。実験時の単純支配面積毎の接地圧は25kPa, 39kPa, 59kPa、荷重偏心率はX(左右)方向で0.080、Z(奥行き)方向で0.029である。

計測器配置をFig. 1中に示す。水平方向の加速度計を土

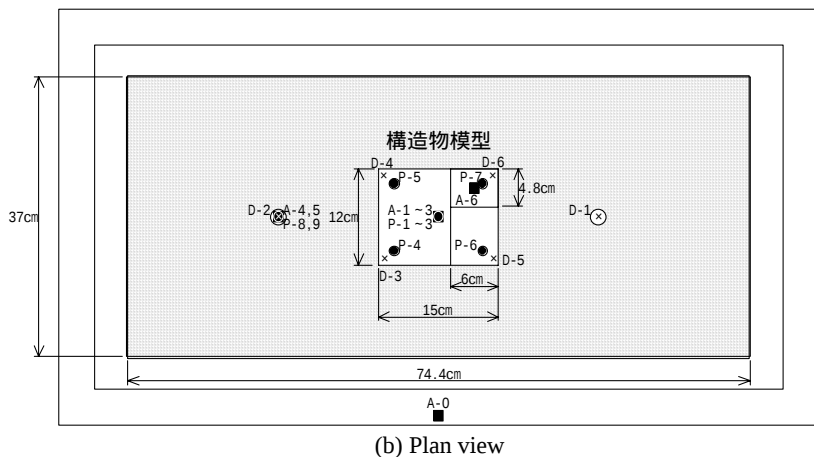
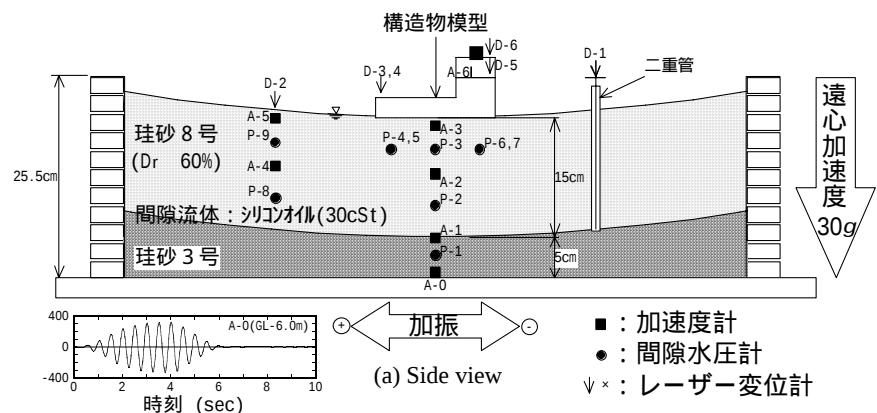


Fig. 1 Centrifuge model of eccentric spread foundation structure

槽底板，地盤内部の2箇所3深度（GL-1, -7, -15cm），及び構造物模型頂部に設置した．また，間隙水圧計を地盤内部の2箇所3深度（GL-4, -11, -17.5cm）に設置し，GL-4cmには構造物四隅から約2cm入った位置にも配置した．さらに非接触式のレーザー変位計を用いて基盤層上面，地表面，及び構造物四隅から約1cm入った位置の沈下量を測定した．

上記模型を遠心加速度 $30g$ の下で X 方向に水平加振を行った．加振波形は振動数 60Hz （実寸換算 2Hz ）の正弦波で，最大加速度は $11.0g$ （実寸換算 329Gal ）である．入力波形を Fig. 5 の下段に示す．

3 解析手法の概要

地盤や構造物の残留変形に關する要因としては，負のダイレイタンス（乾燥地盤），圧密沈下（飽和地盤），応力・ひずみ関係のラッチェティング（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，に比べればその影響は小さいようである（文献[6-8]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り合い力を算出し，増分系運動方程式を解く（収斂させる），などの方法がある．ここではプログラム HiPER[9-11]に(b)の方法を組み込み，～に加えの重力による変形も考慮した．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_i から算出した節点力 $= \int [B]^T \{ \sigma_i \} dv$ ．

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．
- ・ τ - γ 関係に三次元に拡張した R-O モデル[9-11]を適用し接線剛性 G を算出．
- ・算出した G から，ポアソン比 ν 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[9-11]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り合い力 R_e を算出．（次式は，トータル系の表現で記述）

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

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．

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

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．

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

4 解析条件

Fig. 2 に三次元 FEM と時刻歴出力点を示す．側方境界は対面の相対する節点を同変位条件とした．また土槽フレーム質量のは周囲の節点に質点として考慮した．ただし，この影響はほとんど無いことを確認している[7]．

初期応力は構造物を含めた線形自重解析により求めた．土質パラメータは文献[2]と同じである．今回の解析で沈下に関する要因としては，重力効果のみに着目し，過剰間隙水圧の消散による圧密沈下や，応力・ひずみ関係のラッチェティングについては考慮していない．

今回は加震中(6.0 秒間)のみを解析対象とした．ちなみに実験では加震終了後にも構造物の沈下はやや進行している．

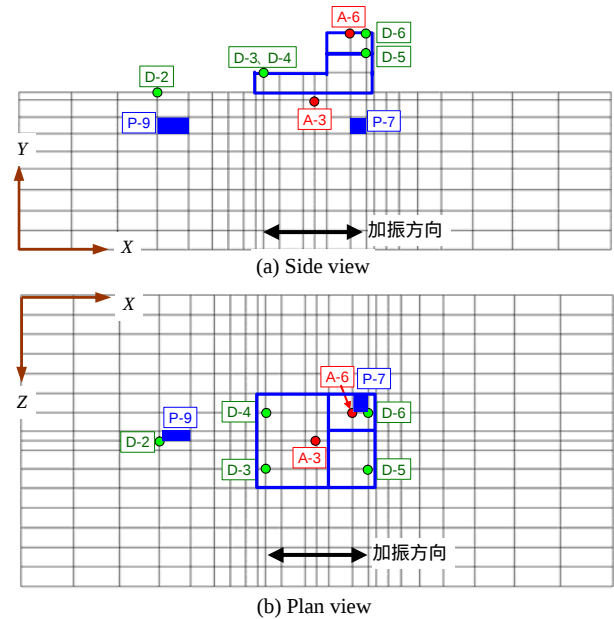


Fig. 2 FEM mesh and output point of time histories

5 実験結果とシミュレーション

加振により表層地盤は液状化し，構造物模型は加振方向 (X 方向) と加振直行方向 (Z 方向：奥行き方向) に傾斜した．Fig. 3 に加振終了時(6秒時点)におけるせん断ひずみ γ_{xy} のコンターと変形の解析結果を示す．変形は5倍に拡大して表示している．同図(a)は構造物近傍の鳥瞰図である．右

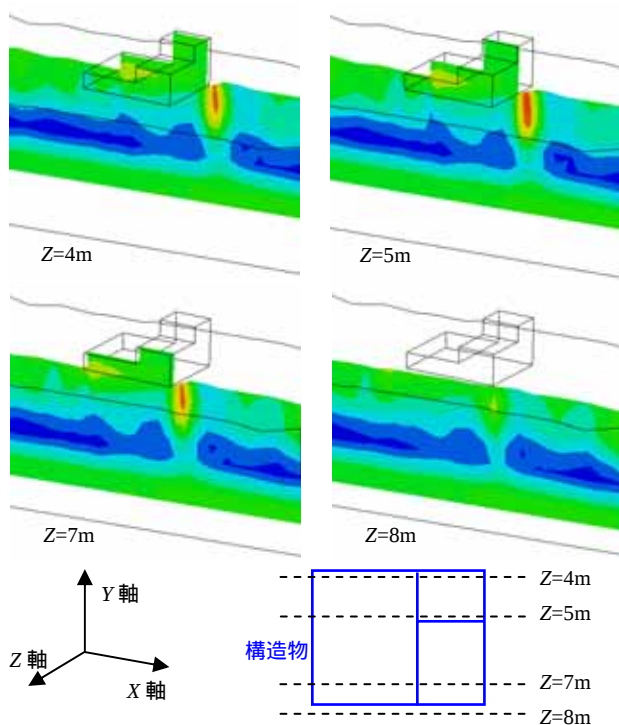
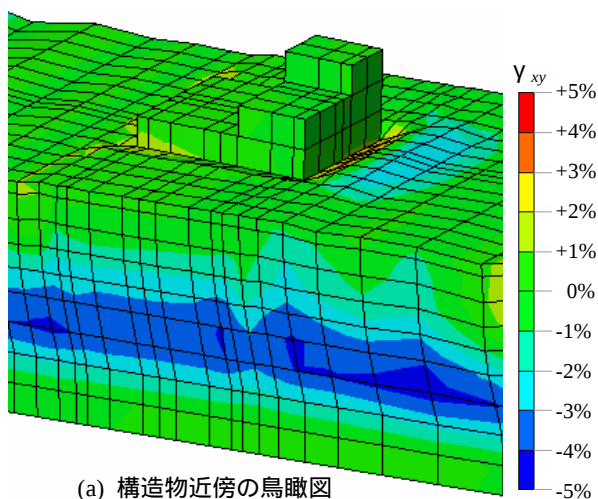


Fig. 3 Deformation and shear strain γ_{xy} contour at 6.0 sec. (Analysis, Deformation magnified 5 times)

奥の接地圧が大きい部分が最も沈下している様子が分かる。ただし解析は連続したFEMを用いているため、構造物が地盤にめり込む(貫入する)ような不連続的な沈下性状は表現できていない。実験では構造物であるアルミブロックが地盤に不連続に貫入しており、このような挙動を表現するには、構造物近傍のメッシュを非常に細かくするか、ジョイント要素などを用いる必要がある。同図(b)には構造物とその近傍を鉛直に切断した4つの断面における γ_{xy} のコンターを示す。構造物右側の下の地盤で大きなひずみが生じており、 $Z=5m$ で顕著である。その影響は深さGL - 3mまで達している。構造物から少し手前に離れた $Z=8m$ では γ_{xy} の影響は小さい。

Fig. 4には鉛直変位の時刻歴を示す。構造物の沈下量は解析値の方が小さめになっている。実験では加振中常に沈

下が進行しているが、解析では液状化に至る2秒付近で大きく沈下し、その後の沈下量はそれほど大きくない。そのため加振終了時の沈下量は解析値の方が小さくなっている。このように解析の沈下量が小さくなった理由としては、前述した地盤に貫入するようなモードが表現できていないことや、圧密沈下の影響、さらに応力-ひずみ関係のラチェティングの影響が考えられる。

Table 1には加振終了時(6秒)における構造物沈下量を、右奥のD-6の沈下量を基準とした(1.0とした)ときの、構造物4隅の沈下量の比を示す。D-6が最大でD-3が最小となる傾向は実験と解析で一致しているが、実験の方が4地点の沈下の差異が小さい。すなわち解析の方が傾斜が大きい。この原因の一つとして、実験では1g場から30場gになったとき構造物は既に傾斜してしまうことが考えられる。解析では構造物荷重の大きさに対応した沈下の差異が生じている。

Table 1 Settlement ratio of structure at 6 seconds.

	D-3	D-4	D-5	D-6
Test	0.93	0.97	0.95	1.0
Analysis	0.70	0.74	0.97	1.0

Fig. 5には構造物頂部(A-6)と構造物直下の地盤(A-3)の水平加速度および入力加速度(A-0)を示す。2秒以降の振幅は、液状化により小さくなっており、解析結果もそのことを表現できている。

Fig. 6に側方地盤の地表付近(P-9)と構造物右奥の最大接地圧付近の地盤(P-7)における過剰間隙水圧比を示す。側方地盤(P-9)では2秒付近で液状化に至っており、解析値もそ

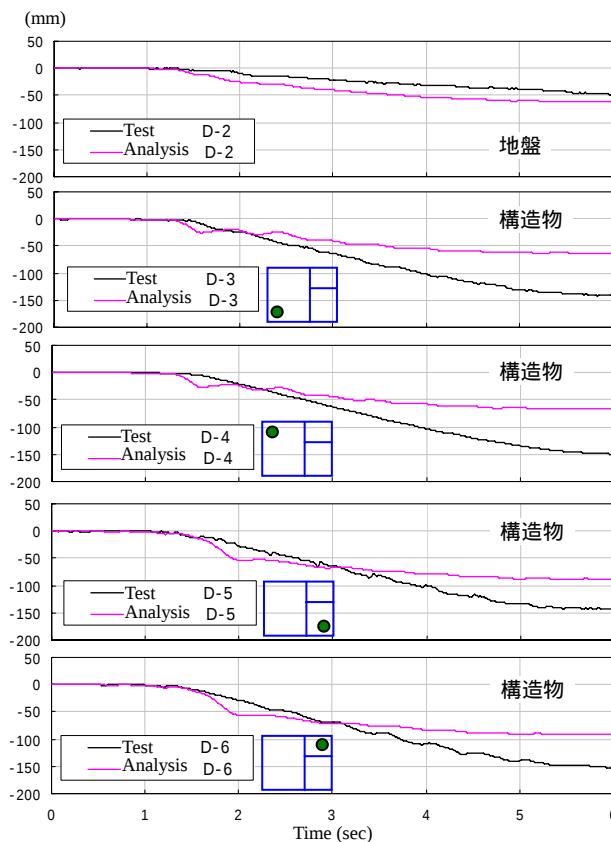


Fig. 4 Vertical displacements

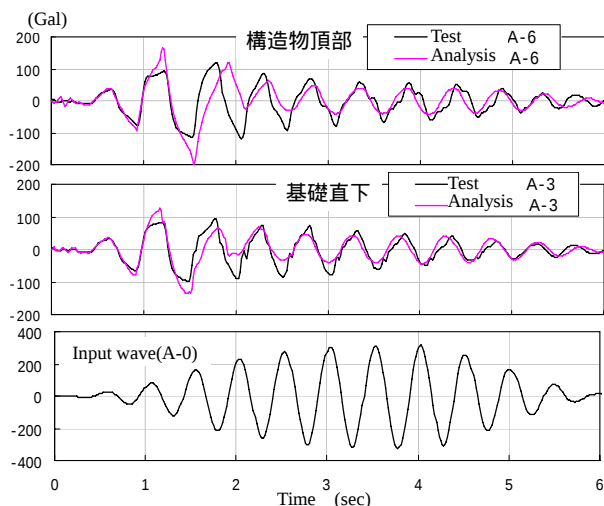


Fig. 5 Horizontal accelerations

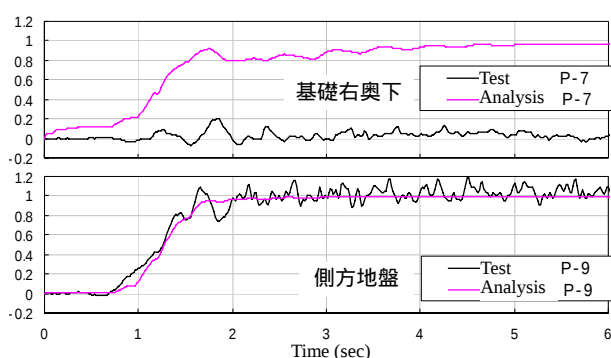


Fig. 6 Excess pore water pressure ratio

の傾向をよく説明している。構造物右奥下の地盤では、実験では水圧があまり上昇していない。これは常時の状態において自重による初期せん断により正のダイレイタンスが生じやすくなっていることや、加振中の著しい沈下により、単調載荷に近い状態となって有効応力が回復したためと思われる。解析でも側方地盤に比べてやや水圧上昇は抑えられてはいるものの、水圧抑制効果は小さい。これに関しては、解析において加振前の自重沈下による土粒子の変形を考慮して、適切な初期のダイレイタンス特性を考慮する必要があると思われる。

5 おわりに

左右方向と奥行き方向の2方向に偏心を持つ直接基礎構造物の液状化時の挙動を、動的遠心模型実験により把握し、さらに三次元有効応力解析によって模擬した。加速度応答は実験結果と解析結果がほぼ一致した。構造物は接地圧の高い所ほどよく沈下し、三次元的に傾斜した。この傾向は有効応力解析において重力の影響を考慮することで表すことができた。しかし沈下量は実験値に比べて小さ目の値であった。過剰間隙水圧は接地圧が大きく沈下量の大きい個所での水圧上昇抑制効果は定量的には表現できなかった。

以上のような現象を定量的に表現するためには、地盤と構造物の間の不連続的な挙動の表現、圧密沈下の考慮、応力-ひずみ関係のラチェティング現象の考慮、などが考えられる。

また今回は解析の対象としなかったが、実験では加振終了後の変形も少なからず生じており、このような変形はポスト液状化理論[12]に基づき検討する予定である。

参考文献

- [1] 福武毅芳：軟弱地盤の非線形特性を利用した免震基礎，*MENSHIN* ,No.34 ,日本免震構造協会 ,pp. 26-40 ,2001 .
- [2] 堀田洋之，福武毅芳，社本康広：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，pp. 2027-2028，2005 .
- [3] 堀田洋之，福武毅芳，社本康広：地盤液状化後の沈下量評価法と遠心模型実験による検証，日本建築学会大会学術講演概要集，B-1，pp. 519-520，2005 .
- [4] 福武毅芳，堀田洋之，馬淵倉一：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，日本建築学会大会学術講演概要集，構造 II，pp. 483-484，2005 .
- [5] 堀田洋之，福武毅芳，社本康広：地盤液状化後の基礎の3次元沈下挙動に関する遠心模型実験とその簡易評価，第41回地盤工学研究発表会，2006 .
- [6] 福武毅芳，大槻 明，藤川 智：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 .
- [7] 福武毅芳，大槻 明，佐藤正義，社本康広，亀岡裕行：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 .
- [8] 藤川 智，福武毅芳，大槻 明：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 .
- [9] 大槻 明，福武毅芳，藤川 智，佐藤正義：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 .
- [10] 福武毅芳：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 .
- [11] 吉見吉昭，福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術(5章-6章)，技報堂出版，2005 .
- [12] Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Goto, S. :Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation, *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 2, pp. 71-80, 1997 .

液状化地盤上の偏心直接基礎建物の遠心実験および 有効応力解析による応答評価

福武毅芳* (清水建設), 堀田洋之 (清水建設), 社本康広 (清水建設),
馬淵倉一 (CRC ソリュ - ションズ)

Response of Eccentric Spread Foundation Structure on Liquefiable Ground in Centrifuge Tests and Analyses

Kiyoshi FUKUTAKE* (Shimizu corp.), Hiroyuki HOTTA (Shimizu corp.), Yasuhiro
SHAMOTO (Shimizu corp.), and Souichi MABUCHI (CRC Solutions corp.)

近年ではL2地震のような大きな入力とあいまって、液状化の発生をある程度許容した上で、地震後の変形量を許容値以内に制御する設計が行われる傾向にある。このような情勢を受けて、地盤・構造物系の実験と解析を実施した。

左右方向と奥行き方向の2方向に偏心を持つ直接基礎構造物の液状化時の挙動を、動的遠心模型実験により把握し、さらに三次元有効応力解析によって模擬した。加速度応答は実験結果と解析結果がほぼ一致した。構造物は接地圧の高い所ほどよく沈下し、三次元的に傾斜した。この傾向は有効応力解析において重力の影響を考慮することで表すことができた (Fig. 1 参照)。しかし沈下量は実験値に比べて小さ目の値であった。過剰間隙水圧は接地圧が大きく沈下量の大きい個所での水圧上昇抑制効果は定量的には表現できなかった。

以上のような現象を定量的に表現するためには、地盤と構造物の間の不連続的な挙動の表現、圧密沈下の影響、応力～ひずみ関係のラチェッティング現象、などを考慮することが必要である。また加振終了後にも少なからず沈下が生じており、今後検討する予定である。

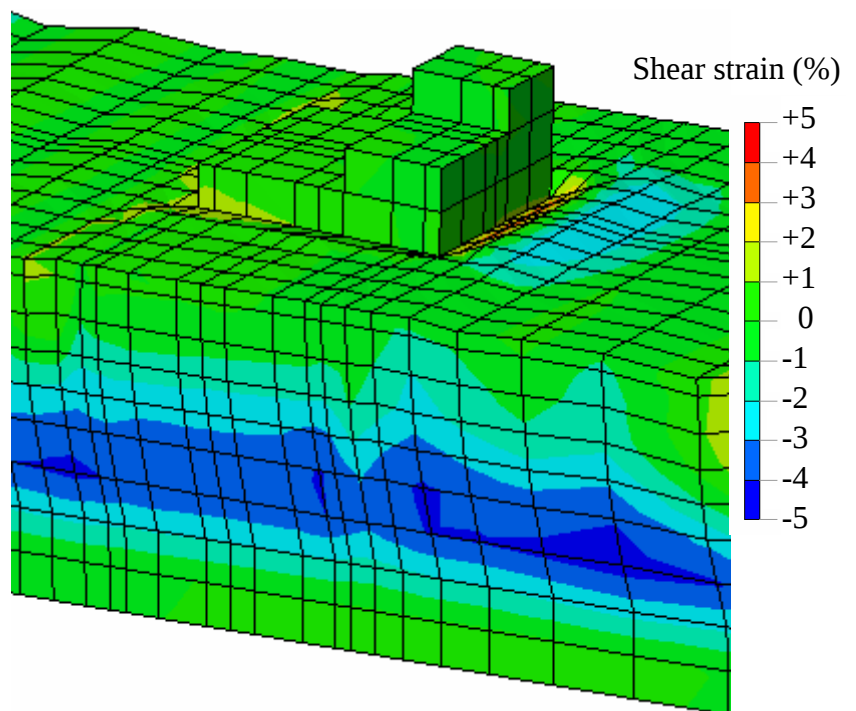


Fig. 1 Deformation and shear strain contour at 6.0 sec.
(Analysis, Deformation magnified 5 times)