

レベル2地震時の液状化による 地盤・杭挙動と液状化対策技術

萩原敏行¹・新井寿昭²

¹西松建設(株) 技術研究所 土木技術研究課
(〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4054)

E-mail:toshiyuki_hagiwara@nishimatsu.co.jp

²西松建設(株) 技術研究所 建築技術研究課
(〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4054)

E-mail:toshiaki_arai@nishimatsu.co.jp

レベル2地震時の液状化地盤中の杭基礎の地震時応答特性、および締固め工法による液状化対策効果を定量的に把握することを目的として、本研究では、兵庫県南部地震で観測された波形を入力した大型模型振動台実験を実施した。また、軸対称FEMおよび二次元有効応力解析を実施し、実験結果との比較を行った。その結果、締固め改良を施した地盤上で行った実験では、レベル2地震動に対しても、液状化無対策ケースに比べて杭に生じる曲げモーメントを大幅に抑制できる液状化対策効果が確認された。また解析結果は、杭、地盤の応答特性、液状化対策効果について実験結果を概ね良好に再現できることが確認された。

Key Words : liquefaction, piles, model test, numerical analysis, measures against liquefaction

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震における、これまでの被害事例の調査、ならびに実験・解析的検討から、大規模地震時の挙動解明には、地盤の変形挙動の予測が重要であることが明らかになってきている¹⁾。しかし、被害事例で多く見られた非液状化層と液状化層との境界部の問題については、解析的検討は先行してなされているが、模型実験による検討事例は非常に少ない。

また、レベル2地震動に対する確実で経済的な液状化対策工法を検討することの重要性もクローズアップされている。兵庫県南部地震では、地震後の調査から、ポートアイランド、六甲アイランドの締固めによる改良地盤に液状化対策効果が認められたことが報告されている²⁾。しかしながら、対象構造物に応じた最適な対策工法の選定や合理的な改良範囲の設定方法を含めて、多くの課題が残されている。

そこで本研究では、杭基礎で支持された地上式タンクを対象としたレベル2地震動の挙動メカニズムの解明、ならびに締固め工法およびせん断変形抑制工法による液状化対策効果を定量的に把握することを目的として、一連の大型振動台模型実験を実施した^{3)~6)}。実験概要と結果については既報に譲るものとし、本報文では、軸対称FEMおよび二次元有効応

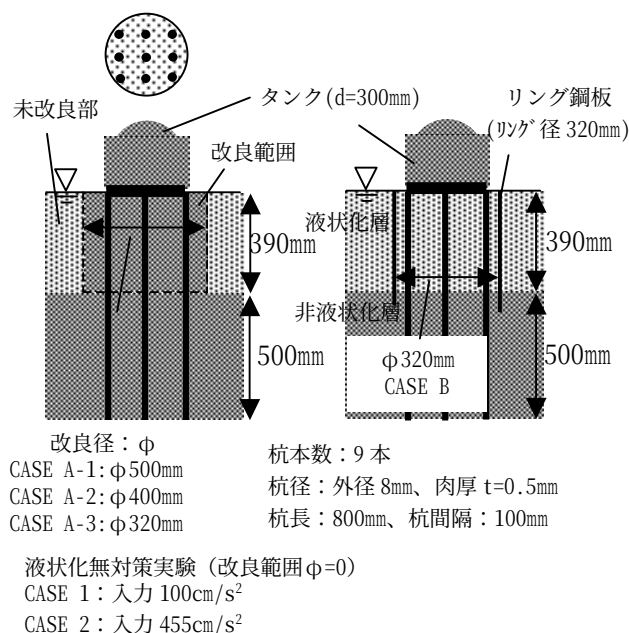


図-1 液状化対策実験模式図

力解析法を用いてシミュレーション解析を実施し、実験結果との比較・考察を行った結果について報告する。

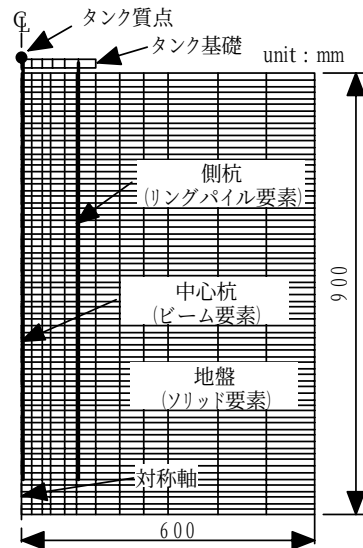


図-2 解析モデル（軸対称 FEM）

表-1 解析に用いた地盤物性

深度(m)	密度 γ (kN/m^3)	G_0 (kN/m^2)	間隙比 e	透水係数 $k(\text{cm/s})$
液状化層	-0.1	19.1	0.73	1.0×10^{-2}
	-0.2	19.1	0.73	1.0×10^{-2}
	-0.3	19.1	0.73	1.0×10^{-2}
	-0.4	19.1	0.73	1.0×10^{-2}
非液状化層	-0.5	19.5	0.67	1.0×10^{-2}
	-0.6	19.5	0.67	1.0×10^{-2}
	-0.7	19.5	0.67	1.0×10^{-2}
	-0.8	19.5	0.67	1.0×10^{-2}
	-0.9	19.5	0.67	1.0×10^{-2}

2. シミュレーション解析

(1) 軸対称 FEM 解析

本研究では、実機タンクへの将来的な適用性を考慮して、計算時間や計算機容量などの面で大幅に有利で、しかもタンク基礎のような形状効果の評価が可能な軸対称 FEM モデルに、過剰間隙水圧の上昇を模擬できる消散解析を併用する方法を採用する。

軸対称 FEM の解析モデルを図-2 に示す。実施した軸対称 FEM 解析は、図-3 に示すフローのように、等価線形地震応答解析と過剰間隙水圧の発生・消散解析を併用する手法である³⁾。モデル化にあたって地上式タンクは剛体質点とし、タンク重量は基礎中央位置に集中質量として与えた。また、杭については、中心杭をビーム要素で、周辺杭をリングパイル要素でモデル化した。リングパイル要素の半径は、8本の杭の矩形配置と回転剛性が等価となるように設定した。杭頭はタンク基礎に剛結されていると仮定して固定条件として、杭先端は模型と同様にピンとして取り扱った。せん断土槽のモデル化は底面を固定境界とし、対称軸位置は水平ローラー支持、土槽の円周は自由境界とし、ここでは土槽枠を無視した。解析に用いた地盤物性を表-1 に示す。地盤はソリッ

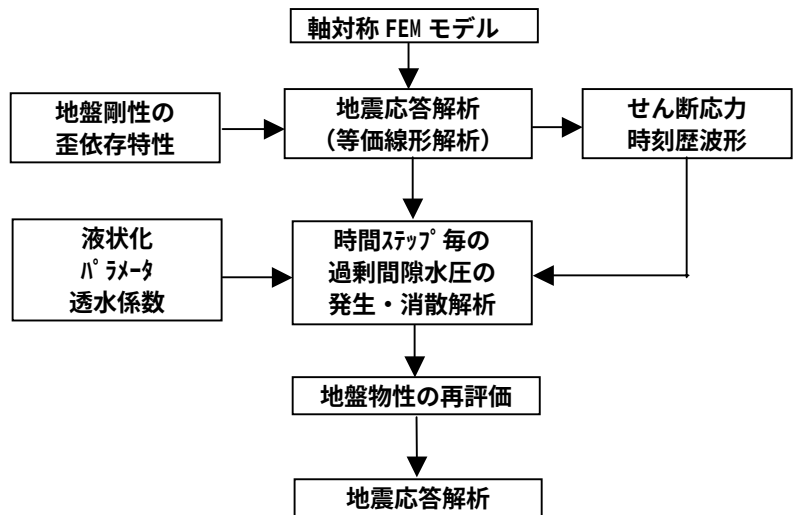


図-3 軸対称 FEM の解析フロー

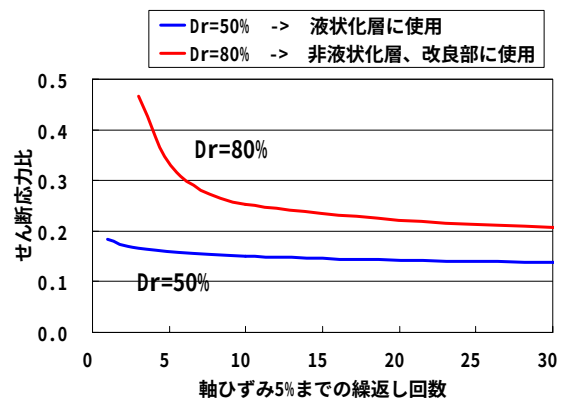


図-4 液状化強度（二次元有効応力解析）

ド要素でモデル化し、液状化層（ $Dr=50\%$ ）の地盤物性は文献 8)を参考に設定した。また、非液状化層（ $Dr=85\%$ ）の地盤物性は、間隙比を 0.75 と仮定し、せん断剛性 G_0 は、

$$G_0 = 700 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^{0.5}$$

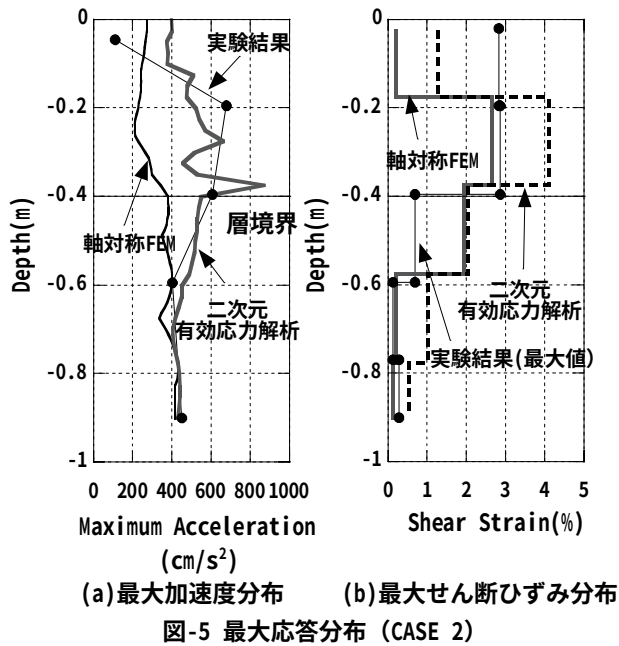
e : 間隙比

σ'_0 : 有効拘束圧

により決定した。ここで、改良体は非液状化層と同じ地盤物性として取り扱い、地盤の動的変形特性は H-D モデルで評価した。なお、過剰間隙水圧の計算に関する液状化検討用パラメータは文献 8)を参考に設定した。過剰間隙水圧の発生・消散解析後に、等価線形地震応答解析より得られた等価剛性と有効応力の減少に伴う剛性低下を考慮して地盤物性を再評価し、再度応答解析を行った。

(2) 二次元有効応力解析

軸対称 FEM 解析法の妥当性を確認するために、二次元有効応力解析⁶⁾も実施した。二次元有効応力解析では、地盤は二次元平面ひずみ要素でモデル化し、杭はビーム要素でモデル化した。杭頭および杭先端の境界条件は、軸対称 FEM と同様とした。タンク質



量、杭剛性はタンク直径($d=300\text{mm}$)で除し、単位幅あたりの値とした。

解析手法は、有効応力法に基づいた非線形地震応答解析法とした。地盤材料の構成則は西モデル⁸⁾を採用し、地盤剛性は軸対称FEMモデルと同様の方法により設定した。液状化層の液状化強度は、図-4に示す $Dr=50\%$ の値を採用し、非液状化層の液状化強度は同図の $Dr=80\%$ の値を採用した。西モデルのパラメータについては、要素シミュレーションにより液状化強度をフィティングすることにより設定した。

入力地震動には、兵庫県南部地震においてポートアイランドで観測された地中観測波 (G.L.-32m、NS成分、最大加速度 544cm/s^2) を用いた。

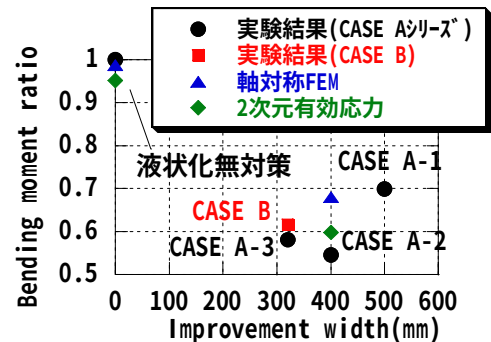
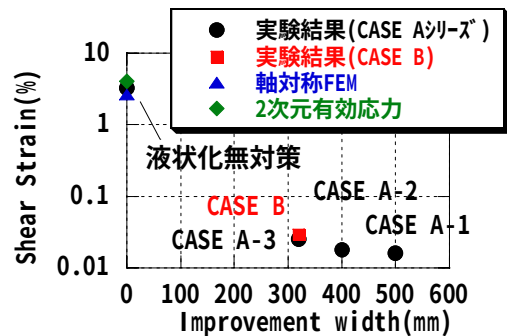
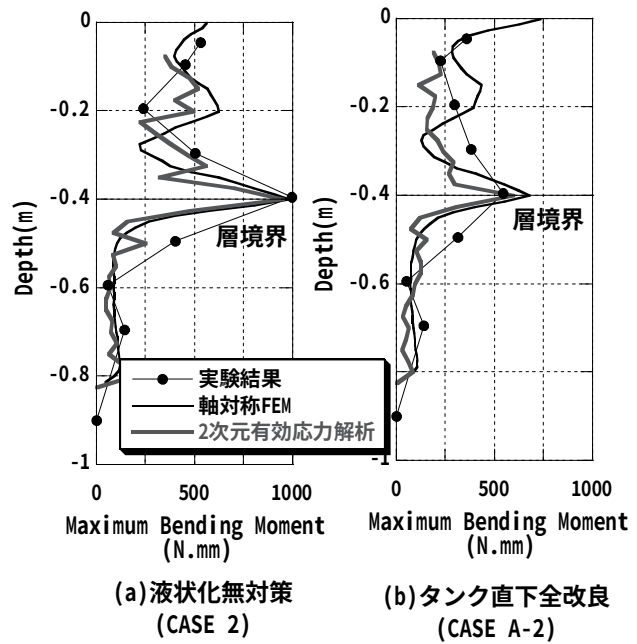
3. 解析結果と考察

(1) シミュレーション解析

液状化無対策のケース(CASE 2)を対象に、実験結果と二次元有効応力解析、および軸対称 FEM 解析による比較検討を行った。加速度とせん断ひずみの最大応答分布を図-5 に示す。なお、解析結果のせん断ひずみは、実験の計測位置間で評価した。

地盤の最大加速度分布に着目すると、二次元有効応力解析では、実験結果は地表面付近で解析結果に比べて小さくなっているものの、GL-0.1m以深では良く一致している。一方、軸対称FEM解析では、GL-0.6m以浅の最大加速度が小さくなる結果となっている。これは、振動数に依存しない等価減衰を用いていることにより高振動数成分の減衰を過大評価しているために応答を過小評価しているためであると考えられる。

地盤の最大せん断ひずみ分布に着目すると、軸対称FEM解析では、表層付近の傾向は実験結果と異なるが、最大値を示す層境界部の挙動は実験結果を概ねシミュレートできている。



(2) 杭応力の検討

液状化無対策 (CASE 2) およびタンク直下全改良 (CASE A-2) の杭の最大曲げモーメント分布を図-6 に示す。

軸対称FEM解析では、無対策および改良したケースともに、GL-0.2m付近の曲げモーメント分布は実験結果や二次元有効応力解析結果と異なる傾向を示しているが、GL-0.3m以深の曲げモーメント分布では良く一致している。最大曲げモーメントが生じている層境界に着目した場合、二次元有効応力解析では、無対策に対する改良したケースの層境界の曲げモーメント比は約70%となっており、実験結果同様

に改良による抑制効果が認められた。一方、軸対称FEM解析においても、層境界の曲げモーメント比は約60%となっている。したがって、提案する軸対称FEM解析手法は二次元有効応力解析法と同様、液状化対策効果の検討を行うことは十分に可能であると考えられる。

(3) 液状化対策効果

タンク直下地盤の層境界部に生じる地盤の最大せん断ひずみと改良径の関係を図-7に示す。実験では、土槽境界の影響を受けていると考えられるが、タンク直下全改良（CASE Aシリーズ）では、改良径が大きくなるほど層境界部に生じる最大せん断ひずみが小さくなっており、液状化無対策に比べて1/130～1/200程度まで抑制されている。また、リング鋼板による液状化対策（CASE B）では、リングによるせん断変形抑制効果により、CASE A-3と同程度のせん断ひずみ抑制効果が認められる。

液状化無対策（CASE 2）を基準とした層境界部に生じる最大曲げモーメント比を図-8に示す。タンク直下全改良（CASE Aシリーズ）では、液状化無対策（CASE 2）に対して、層境界部に生じる最大曲げモーメントを0.6程度まで抑制できることが確認された。また、解析結果でも実験結果と同程度の液状化対策効果が認められた。リング鋼板（CASE B）では、改良径が同等のCASE A-3（φ320mm）とほぼ同程度に抑制できる効果が認められた。

以上のことから、杭の応力低減を目的とした場合、タンク基礎の水平変形をある程度許容できる場合には、せん断変形抑制工法でも十分な液状化対策効果があると言える。

4. まとめ

今回実施した一連の大型振動台実験およびシミュレーション解析結果から、レベル2地震動に対してタンク径相当の直下改良でも杭に生じる曲げモーメントを約60%に抑制できる液状化対策効果が明らかとなった。また、せん断変形抑制工法でも、層境界部に生じる杭の曲げモーメントを直下改良と同程度

に抑制できることが明らかとなった。

等価線形地震応答解析と過剰間隙水圧の発生・消散解析を併用する手法を用いたシミュレーション解析の結果、軸対称FEMは液状化の著しいレベル2地震動を対象とした場合でも、実験結果を良好にシミュレーションできることが示された。

以上より、軸対称FEM解析は、実規模構造物を対象としたレベル2地震に対する事前予測解析に対しても、十分適用が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) BTL委員会: 建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会, 兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する検討報告書, 平成10年3月.
- 2) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N.: Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, pp.97-107, 1996.
- 3) 萩原敏行、新井寿昭、阿世賀宏: 杭基礎で支持された地上式タンク基礎の大型振動台実験, 第46回地盤工学シンポジウム, pp. 7-12, 平成13年11月.
- 4) 萩原敏行、新井寿昭、阿世賀宏: 軟弱地盤における杭支持構造物の模型振動台実験（その1：液状化実験）, 第37回地盤工学研究発表会, pp.1827-1828, 2002.
- 5) 新井寿昭、萩原敏行、阿世賀宏: 軟弱地盤における杭支持構造物の模型振動台実験（その2：液状化対策実験）, 第37回地盤工学研究発表会, pp.1829-1830, 2002.
- 6) 内山不二男、庄司正弘、萩原敏行、新井寿昭: 軟弱地盤における杭支持構造物の模型振動台実験シミュレーション解析, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1955-1956, 2003.
- 7) 西好一、金谷守、松井家孝、当麻純一: 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, 電力中央研究所報告, 研究報告U86002, 1996.
- 8) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 昭和57年5月.

(2003. 10. 29 受付)

SOIL-PILE DYNAMIC BEHAVIOUR DUE TO SOIL LIQUEFACTION AND REMEDIAL MEASURES AGAINST LIQUEFACTION FOR LEVEL 2 EARTHQUAKE

Toshiyuki HAGIWARA and Toshiaki ARAI

In order to clarify the seismic behaviour of the pile foundations caused by soil liquefaction and to propose the effective and economical countermeasures against liquefaction, a series of shaking table tests was carried out on the pile foundations using a large shaking table under one gravitational field. It was found that the solidification method was able to effectively decrease the bending moments acting on the piles and mitigate ground deformations just under and nearby the oil tank. In addition, the effectiveness of the soil improvement area on seismic behaviour of the piles was quantitatively investigated. The FE analysis under an axisymmetric condition could also predict reasonably well the model test results.