

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㈱ 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㈱ 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



CASE 1:入力 100cm/s² CASE 2:入力 455cm/s²

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。





表-1 解析に用いた地盤物性

深度(m)		密度	G ₀	間隙比	透水係数
		(kN/m³)	(kN/m^2)	е	k(cm/s)
液	-0.1	19.1	1960	0.73	1.0 × 10 ⁻²
状	-0.2	19.1	3680	0.73	1.0 × 10 ⁻²
化	-0.3	19.1	4660	0.73	1.0 × 10 ⁻²
層	-0.4	19.1	5640	0.73	1.0 × 10 ⁻²
쀼	-0.5	19.5	12010	0.67	1.0 × 10 ⁻²
液	-0.6	19.5	13480	0.67	1.0 × 10 ⁻²
状	-0.7	19.5	14470	0.67	1.0 × 10 ⁻²
化	-0.8	19.5	15940	0.67	1.0 × 10 ⁻²
層	-0.9	19.5	16920	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



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 G₀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=300mm)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、要素シュミレーションにより 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/s²)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(320mm)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 があると言えよう。

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

- 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.
- 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 axisymmeteic condition could also predict reasonably well the model test results.