

遠心模型実験における液状化地盤と円筒土留の相互作用に関する有効応力解析

佐藤清¹・松田隆²・後藤洋三²

¹正会員 工修 株式会社大林組技術研究所 土木第五研究室 (〒204 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²正会員 工博 同上

飽和砂地盤中の円筒土留壁の地震時挙動に関する遠心振動実験を対象とした動的有効応力解析を実施し、土留構造物および周辺地盤の液状化時の挙動を考察した。解析は二次元および三次元にて行い、それぞれ実験結果と比較した。円筒土留壁は二次元では梁要素とバネ要素の組み合わせにより、三次元ではSHELL要素によりモデル化した。その結果、解析の再現性を確認できた他、土留付近の地盤の過剰間隙水圧は土留の加速度応答と同様の振動成分を有すること、土留壁にはオーバリングによる曲げモーメントと引張と圧縮が混在する軸力分布が見られること、断面力は軸力は下層、モーメントは上方で厳しくなることなどがわかった。

Key Word: Daynamic Centrifuge Test, Liquefaction, Dynamic Effective Stress Analysis, Earth Retaining wall

1. はじめに

大型の土留構造物周辺で液状化が発生した場合、土留壁体との相互作用により壁体近傍の地盤の挙動は自由地盤の挙動とは異なった傾向を示すと考えられる。このような地盤液状化と土留の特性を明らかにすることは、土留構造物の耐震性の評価と液状化対策工の設計をする上で有効な資料となる。そこで、円筒土留構造物の大型遠心模型振動実験を実施し、さらにこの実験を対象とした動的有効応力解析を行った。本報告は実験結果と解析結果の両者から、土留構造物および周辺地盤の液状化時の挙動のうち二次元解析と三次元解析の再現性と、実験では直接得られなかった壁体の断面力分布に関する特徴の把握を試みた結果を述べる。

2. 模型実験概要

遠心模型振動実験は米国カリフォルニア大学デービス校にある大型遠心載荷装置に搭載した油圧式振動台により、遠心加速度場50Gで実施した¹⁾。図-1に模型地盤と円筒土留の構成および計測器の配置を示す。円筒土留模型は高さ65cm、外径40cm、壁厚1.2cm(実寸法32.5m、20m、0.6m)で、繊維補強の高強度モルタルで作製している。模型地盤は2層で構成され、上部が液状化対象層となる相対密度68%のNevada砂層で、厚さ44cm(実寸法22m)としている。下部はセメント混合土による厚さ19cm(実寸法9.5m)の非液状化層で、円筒土留模型の支持層となる。模型地盤は内側

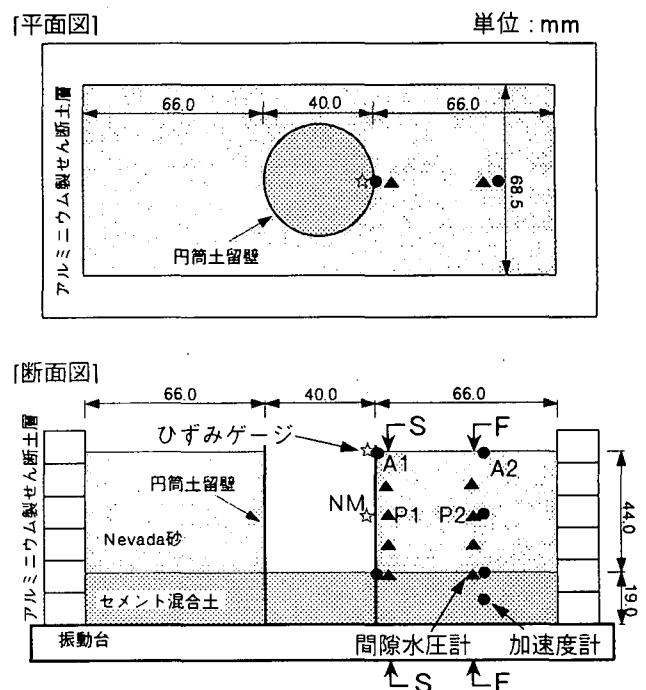


図-1 模型地盤と円筒土留モデル

面に板バネを設置したせん断土槽に保持され、乾燥状態で投入後、脱気水で飽和させた。せん断土槽は6段の中空アルミニウム製枠とゴム製枠間材で保持されている。

入力地震波には兵庫県南部地震においてポートアイランドのGL-83mで観測された波形を、最大加速度12.7Gに調整して用いた。

3. 解析方法

数値解析には修正松岡モデルを用いた動的有効応力解析コード EFECT²⁾ を使用した。解析は二次元および三次元で行ったが、二次元モデルでは加速度・水圧等の外力の再現が可能であることを確認し、三次元モデルでは円筒土留全体の断面力分布を把握することを目的としている。

(1) 二次元有限要素モデル

図-2に二次元モデルを示す。地盤は液状化層を二相系非線形、非液状化層を一相系線形材料とした。円筒土留は左右の梁要素およびバネ要素(図-2中のk3)でモデル化した。円筒土留全体の曲げとせん断および圧縮を考慮するために、円筒に作用する軸力およびモーメントと梁要素に作用する軸力およびモーメントが等しくなるように断面積、断面二次モーメントを設定した。またオーバリングモードに対する剛性を考慮するために、バネ要素k3のバネ定数を等分布荷重が作用したときの円筒モデルと平面ひずみモデルの変位量を同じくするように設定した(図-3参照)。せん断土層の影響として、地盤の左右端部にバネ要素(図-2中のk1、k2)を介して集中質量を設け質量と剛性を考慮した。バネ要素k1は水平および鉛直方向のバネ、k2は水平方向のみのバネである。

表1~3に材料定数を示す。Nevada砂のヤング率は式(1)³⁾により拘束圧を考慮した値を算定した。透水係数k、硬化パラメータksは要素試験結果を基本に、別途行った自由地盤の加振実験結果を再現し得るよう調整し設定した。このとき透水係数は過剰間隙水圧消散時の排水勾配を、硬化パラメータは第一主要動による過剰間隙水圧の振幅を考慮した。梁要素のヤング率は円筒模型の圧縮試験結果より算定した。

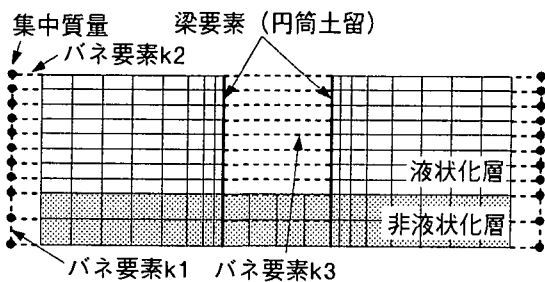


図-2 二次元有限要素モデル

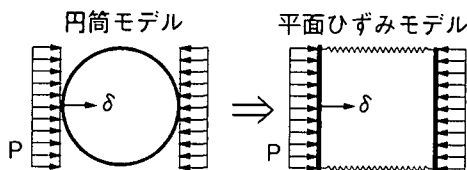


図-3 円筒土留のモデル化(二次元)

(2) 三次元有限要素モデル

図-4に三次元での有限要素モデルを示す。モデル化は模型地盤の加振直角方向に1/2対称とした。地盤要素は立体要素を用い、円筒土留にはSHELL要素を用いた。表-3にSHELL要素の材料定数を示す。なお二次元モデル、三次元モデルともに地盤~構造物間の滑り・はく離は考慮していない。

表-1 地盤要素パラメータ

| | Nevada砂 | 砂/土混合土 |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| 湿潤密度 ρ (kN/m ³) | 19.70 | 22.34 |
| 相対密度 D_r (%) | 68 | ----- |
| 土骨格ヤング率 E (kN/m ²) | 式(1) | 550000 |
| 土骨格ポアソン比 ν | 0.29 | 0.40 |
| 土骨格 ν -リ減衰 α_s | 52.1 | 52.1 |
| 土骨格 ν -リ減衰 β_s | 5.6×10^{-5} | 5.6×10^{-5} |
| 内部摩擦角 ϕ_f (DEG) | 25 | ----- |
| 初期間隙比 e_0 | 0.658 | ----- |
| 透水係数 k (m/s) | 1.8×10^{-5} | ----- |
| 硬化パラメータ ks | 0.0001~0.003 | ----- |

$$E = (\sigma_a \cdot \sigma_m)^{0.5} \cdot 6 \cdot (1 - 2\nu) \frac{(1 + e_0)}{C_s} \quad (1)$$

E : ヤング率 σ_a : 大気圧 σ_m : 平均応力
 ν : ポアソン比 C_s : 膨潤指数

表-2 バネ要素パラメータ

| | バネ要素k1 | バネ要素k2 | バネ要素k3 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 水平方向 k_x (kN/m) | 2.2×10^2 | 1.0×10^5 | 4.0×10^6 |
| 鉛直方向 k_z (kN/m) | 1.0×10^5 | ----- | ----- |

表-3 梁要素およびSHELL要素パラメータ

| | 梁要素 (二次元) | SHELL要素 (三次元) |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| ヤング率 E (kN/m ²) | 2.97×10^7 | 2.97×10^7 |
| ポアソン比 ν | 0.167 | 0.167 |
| 重量密度 γ (kN/m ³) | 23.52 | 23.52 |
| 断面積 A (m ²) | 0.0073 | ----- |
| 断面二次モーメント I (m ⁴) | 0.000138 | ----- |

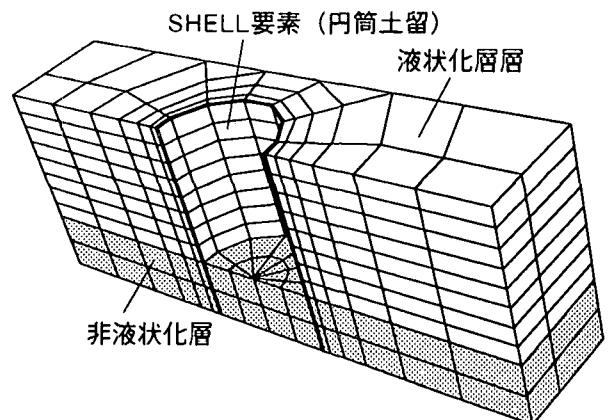


図-4 三次元有限要素モデル

4. 解析結果

図-5は土留壁(図-1の測線S-S)および地盤(図-1の測線F-F)の最大応答加速度の深度分布を示している。実験値は土留壁では上方に向かって増加し、地盤では減少しており、解析結果も実験と対応している。土留壁において三次元解析結果が一様に増加しているのに対して、二次元解析結果は基盤からGL-30cmまでわずかに減少したのち増加している。これは土留壁に用いた要素の違い、すなわち壁体の全体剛性や固有振動数の違いによる差と考えられる。地盤では実験値が一様に減少していると推定されるが、解析は全体に上方に向かって減少しているが一様ではない。これは解析結果に見られるスパイク状の局部的な値と考えられる。また、解析結果は液状化層では減少し、非液状化層(GL-44cm~63cm)では増加している。今回、非液状化層の非線形性を確認するデータが無いため線形としたが、実際は非線形性を有していたものと思われ、今後、非線形特性を推定し再検討する必要がある。図-6、7に土留壁および地盤における地表面の加速度時刻歴を示す(図-1中の測点A1およびA2)。図には二次元解析を実験と比較して示したが、三次元解析も同様の波形となっている。土留壁での応答波形は入力波の周波数特性と同じ成分で増幅している。地盤では第一主要動(0.1~0.15秒)以降はほとんど増幅がなく、長周期化している。

図-8は土留壁近傍(図-1の測線S-S)および地盤(図-1の測線F-F)における過剰間隙水圧比の深度方向の0.3秒における分布である。実験値において土留壁近傍と地盤の応答を比較すると、最上部を除いて地盤の方が高い値となっている。二次元解析においても同様の傾向がある。これらの結果から液状化が生じやすいのは土留壁近傍ではなく、ある程度離れた場所であることが指摘できる。その理由として土留壁により壁体近傍地盤に生じるひずみが抑制されることが考えられる。これに対して三次元解析では土留壁近傍、地盤ともにほぼ全域で0.9以上の値となっており、実験結果との相違がある。これは土留壁近傍で過剰間隙水圧比に大きな振動成分が生じていることが影響していると考えられる(後述の図-11参照)。図-9、10は図-1に示すP1測点、P2測点の過剰間隙水圧比の時刻歴で、二次元解析の結果と比較したものである。解析、実験ともに土留壁近傍のP1測点では0.1~0.3秒においてP2測点には見られない大きな振動成分が生じている。この振動成分は壁体の加速度波形と一致しており、壁体の影響であることは明らかである。図-11に示すように、このような振動は三次元解析にも現れている。図-10においてP2測点では解析と実験で初期の立上がりに若干の差があるが、全体にはよく対応している。これに対して三次

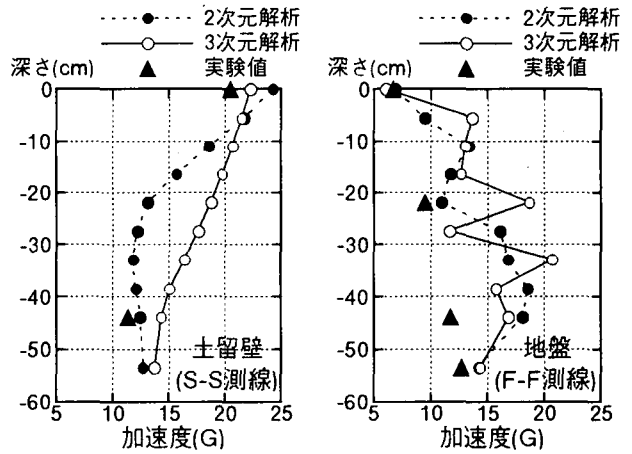


図-5 応答加速度最大値分布

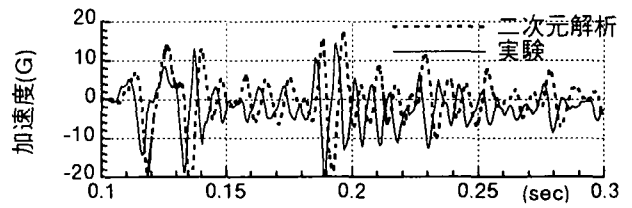


図-6 応答加速度時刻歴(土留壁A1測点)

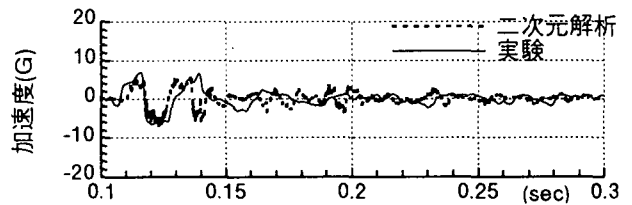


図-7 応答加速度時刻歴(地盤A2測点)

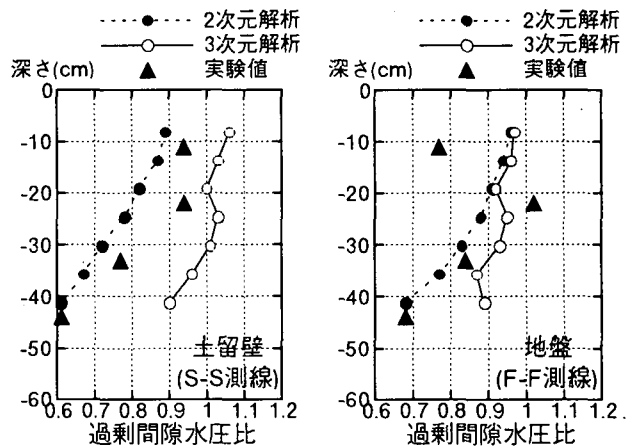


図-8 過剰間隙水圧比(0.3秒)分布

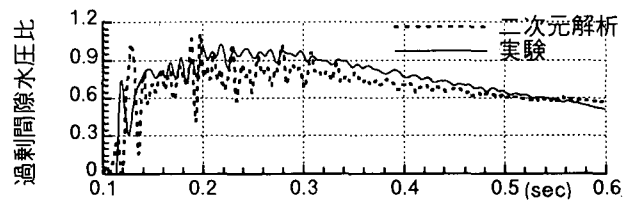


図-9 過剰間隙水圧比時刻歴(土留壁P1測点)

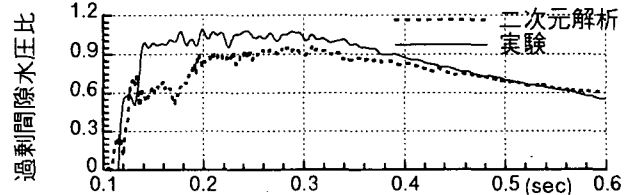


図-10 過剰間隙水圧比時刻歴(地盤P2測点)

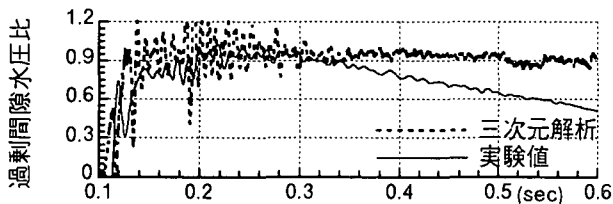


図-11 過剰間隙水圧比時刻歴 (土留壁 P1 測点)

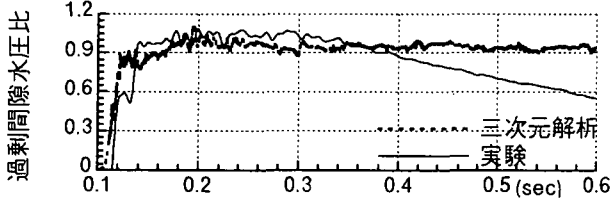


図-12 過剰間隙水圧比時刻歴 (地盤部 P2 測点)

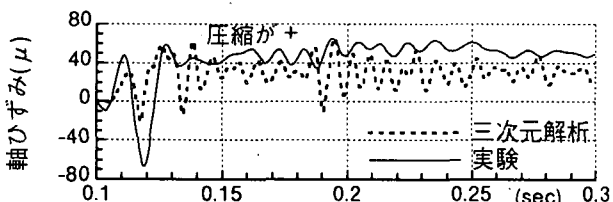


図-13 土留壁の軸ひずみ時刻歴 (土留壁 NM 測点)

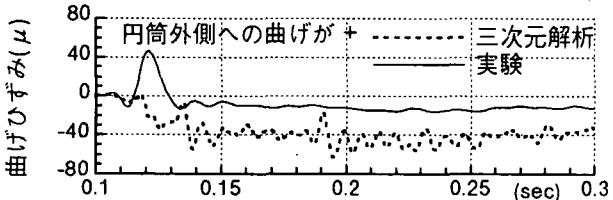


図-14 土留壁の曲げひずみ時刻歴 (土留壁 NM 測点)

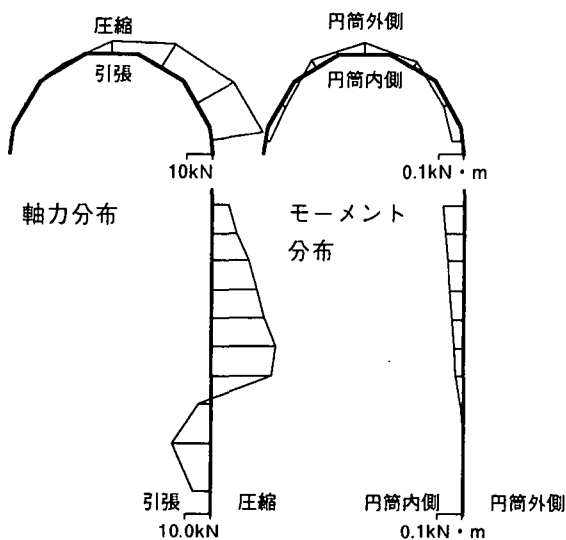


図-15 土留壁の断面力分布 (三次元解析結果)

元解析の場合、図-12に示すように初期の立ち上がりは実験とよく一致しているが、消散過程に差が見られる。この点についてはモデル化を再考する必要があると考えている。

図-13は土留壁のNM測点における円周方向の軸ひずみの時刻歴である。三次元解析、実験ともに壁体の内面と外面におけるひずみを平均した値で、圧縮を正としている。実験に見られる0.12秒での振幅が三次元解析では再現できていないが、全体によく対応しており、第一主要動以降、圧縮の状態が続くことが

わかる。図-14はNM測点における円周方向の曲げひずみの時刻歴で、円筒外側への曲げを正としている。実験における第一主要動での振幅を解析では再現できていない他、その後の値は解析の方が大きな値となっているが、第一主要動以降は円筒内側への曲げが継続する現象は再現できている。図-15はNM測点の位置における土留壁円周上および測線S-S上の円周方向の軸力とモーメントの分布(加振開始後0.19秒)を示している。円周上の軸力分布を見ると右側では圧縮力が大きく、地盤の変位に伴って生じていると考えられる。深度分布では液状化層では下方方向に向かって圧縮力が増加しており、非液状化層では引張りに変わる。円周上のモーメント分布からは加振方向から壁体を押された形状を反映した状態であることがわかる。これは側壁の影響により生じる、円筒土留に作用する土圧の乱れや、過剰間隙水圧の上昇が円周方向で一様でないことなどによる影響と考えられる。モーメントの深度分布では上部ほど大きなモーメントが作用しており、非液状化層ではかなり小さい。これは円筒の上方ほどオーバリング変形の影響が現れることを示している。

5. まとめ

今回の検討では、二次元解析・三次元解析とも応答加速度や液状化挙動において実験との良好な対応が得られた。二次元解析の場合、三次元解析より計算時間の上で有利なため、二次元動的解析により加速度・水圧等の外力を求め、その結果を用いた三次元静的解析により土留壁体の断面力を照査する方法を設計に用いることも可能と考えられる。ただし三次元解析では過剰間隙水圧の消散過程と壁体のひずみにおいて実験と相違点も見られた。水圧の消散に関しては排水条件や重ね合わせ手法について再考する必要がある。ひずみについては壁体境界での滑りや剥離の考慮が必要であると考えられる他、実験計測上の限界を明らかにしておく必要がある。境界条件等が増えれば解析が複雑になり、さらに多くの計算時間を必要とするが、実験では得ることが困難な土留全体の詳細な断面力やひずみ分布が直接得られることは耐震性の検討において重要である。

参考文献

- 1) 松田他：円筒土留の地震時挙動に関する遠心模型振動実験について、第31回地盤工学研究発表会講演概要集、pp1171-1172。
- 2) 伊藤：動的有効応力解析プログラム「EFFECT」(その1) -基礎理論と地盤構成モデル-、大林組技術研究所報、No.51,1995。
- 3) T.Kimura et al. : Numerical prediction for Model No.11, Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems Volume 1, pp947-957。