

E-Defense の地盤-杭-構造物の大型振動台実験を再現する三次元有効応力解析の液状化パラメタ

大塚 悠一¹・溜 幸生²・堀 宗朗³・安田 進⁴

¹ 正会員 東電設計株式会社

(〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 グランスクエア 9F)

E-mail: yuichi-otsuka@tepsco.co.jp

² 正会員 東電設計株式会社 (同上)

E-mail: etamari@tepsco.co.jp

³ 正会員 国立研究開発法人海洋研究開発機構

(〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173 番 25)

E-mail: horimune@jamstec.go.jp

⁴ 名誉会員 東京電機大学

(〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

本研究は、三次元有限要素解析の実用上の有効性を議論するため、確実に設定できる液状化パラメタを使った有効応力解析を実施し、大型振動台実験の再現を試みた。対象は、E-Defense を使った地盤-杭-構造物系の大型振動台実験である。液状化パラメタは、実験で用いた土の室内試験より得られた複数のせん断ひずみ両振幅の繰返し回数を再現しうるパラメタである。この液状化パラメタを使うことで、従来の代表的なせん断ひずみ両振幅 ($\gamma_{DA} = 7.5\%$) の特定の繰返し回数のみでフィットさせた液状化パラメタによる有効応力解析と比較して、より正確に複数の観測点での過剰間隙水圧と加速度を再現できることが示された。

Key Words: *soil-pile-structure interaction, finite element method, soil liquefaction, nonlinear dynamic analysis*

1. はじめに

日本では、多くの都市が海や河川付近の軟弱地盤に位置しているため、建物の基礎として杭基礎構造物がよく用いられている。しかしながら、杭基礎は水平方向に剛性の高い構造物ではないため、地震による構造物の慣性力 (kinematic force) や液状化による地盤変形による地盤反力 (inertial force) による損傷を受けることが大きい。これら2種類の力を評価できる有限要素法 (Fine Element Method, FEM) による地震応答解析は耐震設計において、重要な

要素である。

近年では高性能計算機を活用した有限要素法 (HPC-FEM) が開発され、三次元解析による研究が行われつつある^{1,2)}。しかしながら、実務的には耐震設計では二次元解析が主流である。例えば日本では、液状化を伴う耐震設計業務では二次元液状化解析プログラムである FLIP ROSE 2D³⁾ がよく用いられているが、三次元解析プログラムである FLIP ROSE 3D⁴⁾ の実績は乏しい。三次元液状化解析を実務に適用するには、FLIP ROSE 3D による三次元有限要素法モデルの妥当性の検証が必要である。

筆者らは三次元有限要素法モデルの妥当性の検証を目的として、E-Defense による地盤-杭-構造物系の大型振動台実験^{5,6)}の再現解析を行った⁷⁾。再現解析の結果、加速度波形、変位波形、間隙水圧については実験との良好な一致を示し、プログラムの妥当性を示した。一方で杭頭や地層境界における曲げひずみについては過大評価をしているなど一部課題が残った。

本研究では更なる妥当性の検証を行うために、地盤の液状化のパラメタの見直しを行なった。既往研究⁷⁾では代表的なせん断ひずみ両振幅 ($\gamma_{DA} = 7.5\%$) の特定の繰返し回数のみでフィットさせた液状化パラメタを用いたが、本研究では複数のせん断ひずみ両振幅の繰返し回数を再現しうる液状化パラメタを用いた。新たに設定した液状化パラメタによる解析結果と既往研究の解析結果との比較を通して、地盤の液状化が全体の応答に与える影響について評価した。

2. 実験概要

図-1 に実験に用いた地盤・杭・構造物で構成される試験体の模式図を示す。試験体はせん断土槽であり、高さ 6.3m、直径 8m である。

この土槽は、40 本の鋼製リングを積みかさねたものであり、土槽内部の地盤に水平 2 方向のせん断変形を許容する。

地盤は、砂地盤と杭下端周辺のセメント混合土層で構成される。砂地盤は、オーストラリア産のアルバーニ-珪砂であり、二種類の相対密度 D_r を有する層で構成される。

杭は鋼管杭 9 本で構成される。鋼管杭は、長さ 5.7m、直径 152.4mm、肉厚 2mm の中空である。これらの杭配置は、縦・横・それぞれ 3 列、杭間隔は直径の 4 倍である。杭は A1 から C3 でラベリングされている(図-1 参照)。

基礎は重さが 10ton の鋼製版である。基礎と杭頭の間隙には無収縮セメントが注入され、杭頭が剛結合状態である。上部構造物は重さが 12ton の鋼製板である。

この試験体を用いて、複数の入力波を用いて一連の振動実験を行なっている。本論文では、杭が非線形特性を示し、地盤が十分に液状化したケース(鷹取波 3.0 m/s^2) の再現解析を行った。振動台底面に入力される入力波を図-2 に示す。

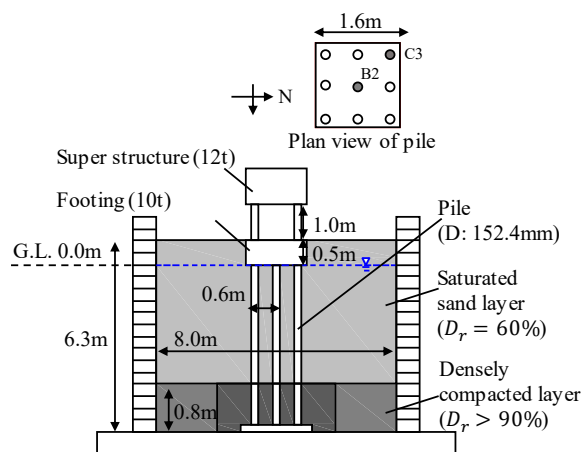
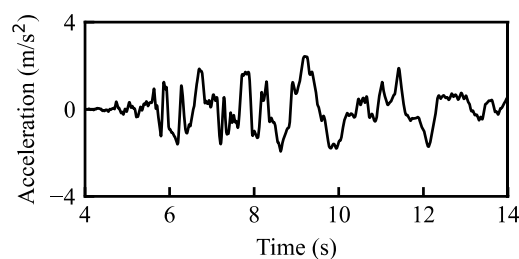
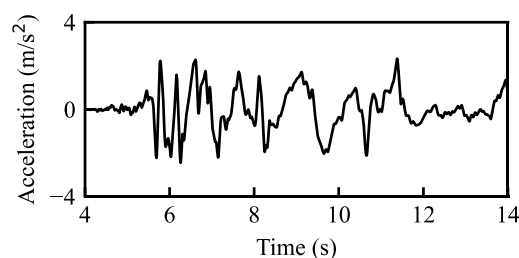


図-1 振動台実験図



(a) X 方向



(a) Y 方向

図-2 入力波形

3. 数値解析

(1) 解析モデルの概要

本研究では解析プログラムとして、三次元有限要素法による液状化解析プログラムである FLIP ROSE 3D (ver. 1.6)を用いた。このプログラムでは、土のモデル化としてマルチスプリングモデルを、液状化のモデル化として過剰間隙水圧モデルを実装している⁴⁾。また破壊基準として Mohr-Coulomb を用いている。なお、本研究では、計算の高速化のためにオリジナルプログラムに並列化直接法ソルバ⁸⁾を適用した。

解析モデルを図-3 に示す。節点数 140055 であり、地盤の最大要素高さは 0.25m、最大アスペクト比は 9.2 である。

地盤は三層に分かれ、構成則にマルチスプリングモデルを用いたソリッド要素でモデル化されている。1 層目

は相対密度 $D_r=60\%$ の乾燥砂の非液化化層、2層目は相対密度 $D_r=60\%$ の湿潤砂の液化化層、そして3層目は相対密度 $D_r=90\%$ の湿潤砂の非液化化層である。既往実験の結果に基づいて設定した地盤のパラメタを表-1に示す。

杭はバイリニアの非線形梁要素でモデル化されている。図-4で示すように、杭の体積は考慮されており、杭と地盤は剛梁で結合されている。杭の非線形特性は、降伏強度としてSKK440の 235N/mm^2 を用いて設定した。軸力の影響は考慮せず、常時軸力として 50kN を与えたときの非線形特性を図-5に示す。降伏後の勾配率として0.05倍に設定した。その他の物性と断面性能は表-2に示す鋼材の物性に基づいて設定した。

上部構造物と基礎は線形ソリッド要素でモデル化されている。せん断土槽と柱は線形梁要素でモデル化されている。杭と同様に物性や断面性能は表-2に示す鋼材の物性に基づいて設定した。

図-2に示した入力波をモデルの底面に水平2方向に強制加速度として与えた。解析の積分時間間隔 Δt は $0.01(\text{s})$ で与え、時間積分はWilson θ 法($\theta = 1.4$)を用いた。非線形方程式の収束方法はNewton Raphson法である。減衰は、剛性比例減衰で与え、実験で杭基礎において計測した固有振動数(7.8Hz)で減衰定数が 2% になるように与えた。

(2) 液化化パラメタの設定

地盤の液化化パラメタとして本研究で新たに設定したパラメタを表-3に示し、2020年度の既往研究⁷⁾で設定したパラメタを表-4に示す。それぞれの液化化パラメタによる液化化強度曲線(繰返しせん断応力比 τ/σ_c とせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} が 1.5% 、 3% 、 7.5% となる回数の関係)を図-6に示す。室内試験で得られた各せん断ひずみ両振幅 γ_{DA} に関する液化化強度曲線は概ね重なっていることから、実験で用いたアルバニー珪砂は繰返し载荷によるせん断ひずみの増大が急激に進行する性質を持っていることが分かる。精度の高い数値解析を行うためには、この性質を再現することが必要である。

2020年度の既往研究で液化化パラメタを設定した際は、代表値として良く用いられる繰返し回数が20回となるせん断応力比について、室内試験と解析が整合するように液化化パラメタを設定した。図-6(b)に示すように2020年度に設定した液化化パラメタによる液化化強度曲線では繰返し回数20回のところでは実験と解析は整合しているが、繰返し回数が20回より少ない回数の場合は解析の方が各せん断ひずみ両振幅の繰返し回数に違いがみられる。この繰返し回数の違いは、繰返し载荷の下で供試体のせん断ひずみ振幅が徐々に進展することを意味しており、密な砂の膨張的挙動(正のダイラテンシー)に近い挙動を示している。つまり2020年度の液化化パラメタは室内試験結果よりもサイクリックモビリ

ティが起きやすい粘り強い砂の特性を持っていることを意味する。

2021年度に行われた本研究で液化化パラメタを設定した際は、全てのせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} に関する液化化曲線について、実験と解析で整合するように液化化パラメタを設定した。具体的には、液化化パラメタを変えながら2000ケースほどの要素シミュレーションの多数解析を行い、液化化強度曲線から室内試験と解析が一番整合している液化化パラメタの組み合わせを抽出した。変相角についても室内試験で得られたせん断応力経路に基づいて30度に設定した。

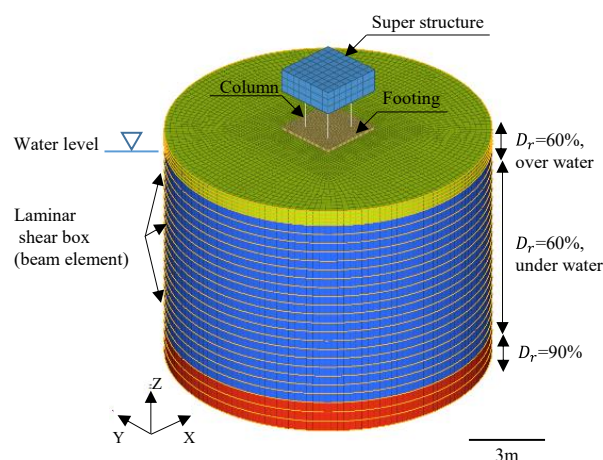


図-3 解析モデル

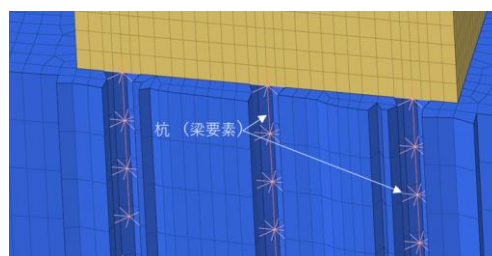


図-4 杭のモデル化

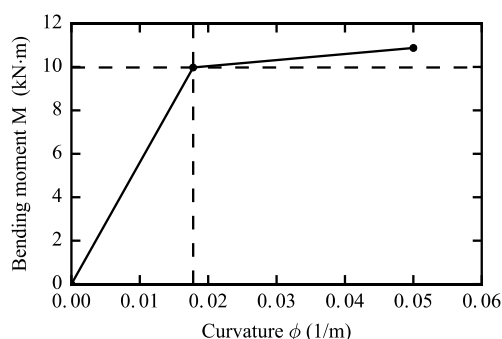


図-5 杭の曲げモーメントと曲率の関係

表-1 地盤の動的特性

Layer	G.L. (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	G_{ma} (kPa)	σ'_{ma} (kPa)	ν (-)	ϕ_f (deg.)	h_{max} (-)
$D_r=60\%$ (dry)	0.0 to -0.5	1.700	160	43520	2.22	0.33	38.7	0.24
$D_r=60\%$	-0.5 to -5.3	2.006	160	51342	21.21	0.33	38.7	0.24
$D_r=90\%$	-5.3 to -6.3	2.058	200	82338	43.36	0.33	38.7	0.24

ρ : 密度; V_s : せん断波速度; G_{ma} : 拘束圧 $\sigma'_m = \sigma'_{ma}$ におけるせん断剛性; σ'_{ma} : 基準拘束圧; K_o : 土骨格の体積弾性係数;
 ν : ポアソン比, ϕ_f : 内部摩擦角度, h_{max} : 最大減衰比.

表-2 鋼材のパラメタ

ρ (t/m ³)	G (kPa)	ν (-)
7.45	8.4×10^7	0.25

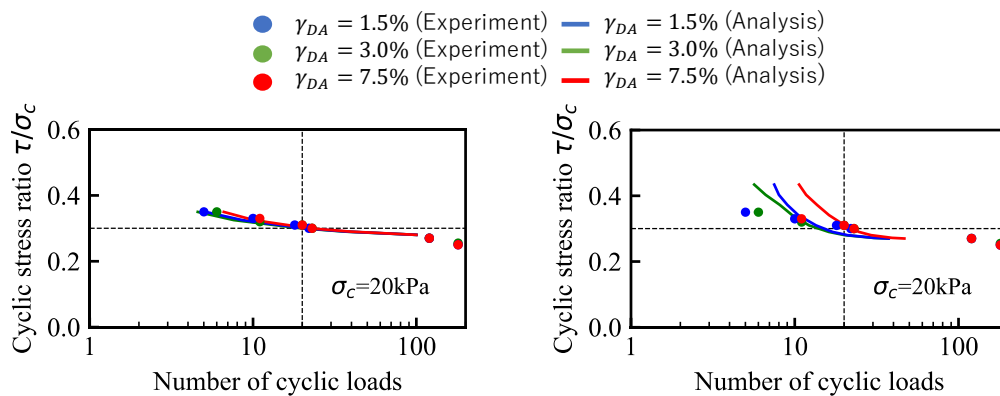
表-3 地盤の液状化特性(2021 年度設定)

Layer	G.L. (m)	n (-)	K_w (kPa)	ϕ_p (deg.)	S1	w1	p1	p2	c1
$D_r=60\%$ (dry)	0.0 to -0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
$D_r=60\%$	-0.5 to -5.3	0.383	2200000	30	0.005	3.800	1.450	1.025	2.900
$D_r=90\%$	-5.3 to -6.3	0.383	2200000	-	-	-	-	-	-

n : 間隙率; ϕ_p : 変相角度; K_w : 水の体積弾性係数; p1, p2, w1, s1: 液状化パラメタ

表-4 地盤の液状化特性(2020 年度設定)⁷⁾

Layer	G.L. (m)	n (-)	K_w (kPa)	ϕ_p (deg.)	S1	w1	p1	p2	c1
$D_r=60\%$ (dry)	0.0 to -0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
$D_r=60\%$	-0.5 to -5.3	0.383	2200000	28	0.005	7.850	0.500	1.000	3.090
$D_r=90\%$	-5.3 to -6.3	0.383	2200000	-	-	-	-	-	-



(a) 2021 年度

(b) 2020 年度⁷⁾

図-6 液状化強度曲線

4. 解析結果

本節では2021年度と2020年度⁷⁾に設定した液状化パラメタを用いた解析結果と実験結果の比較を示す。比較する成分は地盤の間隙水圧、基礎と地表面の加速度波形と変位、杭の曲げひずみの最大値である。図-7に観測点の位置を示す。なお本研究では異なる液状化パラメタを用いた二つの解析の比較を主に行っており、実験と解析結果の整合性の考察については既往研究⁷⁾に記している。

図-8と図-9に杭周辺の間隙水圧の時刻歴に関する二つの解析と実験との比較を示す。両者の解析とも6(s)後と7(s)前後の間隙水圧の低下と間隙水圧の最大値については再現できているが、2020年度の解析結果の方が実験に比べて水圧の低下が大きい。とくに6(s)前では解析の方が間隙水圧は低下しており、G.L. -2.0mの間隙水圧については、2020年度の解析では6(s)あたりでゼロに近づいている。この間隙水圧の低下が瞬間的なせん断剛性の急増を引き起こし、下部からの振動が上部に伝わりやすくなり、地表面加速度波形のパルスの原因となったと思われる。

図-10と図-11に基礎の加速度波形の時刻歴に関する比較を示す。6(s)前後の加速度波形の振幅については、2020年度の解析による加速度振幅は実験よりも明らかに大きい。この解析における振幅の増大は間隙水圧の低下に伴うサイクリックモビリティによる剛性の回復によるものと考えられる。3章で述べたように2020年度の解析では実際よりも密な砂の特性を持つ液状化パラメタの設定となっているため6(s)前後で実験よりも間隙水圧が大きく低下したことにより剛性が実際よりも大きく回復し、加速度の振幅が増大した。逆に間隙水圧を適切に評価している2021年度の解析では加速度が最大となる7.2(s)付近の加速度は実験より小さめとなっているが、6(s)前後の加速度波形を十分に再現できるよう改善されている。また液状化が進行した10(s)以降についても2021年度の解析の方が実験と整合した波形である。

図-12と図-13に地表面の加速度波形の時刻歴に関する比較を示す。基礎の加速度波形と同様に2021年度の解析の方が実験により整合した結果になった。

図-14と図-15に基礎の変位波形の比較を、図-16と図-17に地表面の変位波形の比較を示す。2020年度と2021年度の解析結果で大きな差がないことが分かる。

図-18と図-19に基礎の中心にある杭(B2)の最大曲げひずみの分布と曲げひずみを示す。解析では、実験と同様に杭頭とDr=60%とDr=90%の地層境界で曲げひずみが大きい。値は実験よりも2倍以上大きく、塑性化が進行している。2020年度と2021年度の解析結果を比較すると、G.L. -2.0mからG.L. -4.0mの曲げひずみについては2021年度の解析の方が実験結果に近いが、Dr=

60%とDr=90%の地層境界の曲げひずみについては2020年度の解析結果の方が実験結果に近い。液状化パラメタを見直して間隙水圧や加速度波形に関する再現性を高めても、解析による杭の曲げひずみの過大評価を改善することはできなかった。

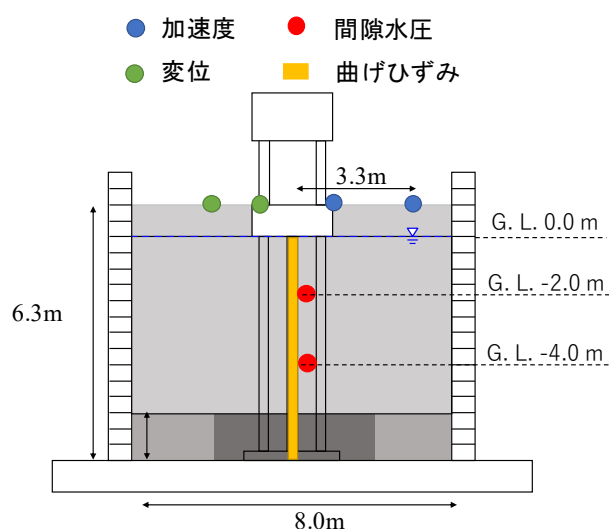


図-7 観測点

5. まとめ

本研究では液状化解析のための三次元有限要素法モデルの妥当性の検証を目的として、既往研究⁷⁾で行った E-Defense の振動台実験の再現解析について液状化パラメタを見直した上で解析を行った。既往研究ではせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA} = 7.5\%$ に関する液状化強度曲線が示す繰り返し回数 20 回のせん断応力比が実験と解析で一致するように液状化パラメタを設定したが、本研究では要素シミュレーションを多数解析を行って複数のせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} に関する液状化強度曲線が実験と解析で一致するように液状化パラメタを設定した。

本研究で設定した液状化パラメタによる解析は、既往研究で設定した液状化パラメタによる解析に比べて、間隙水圧と加速度の時刻歴に関して実験により整合するようになった。再現性の高い数値解析を行うためには、室内試験で求めた複数のせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} に関する液状化強度曲線を十分に再現できるような液状化パラメタを設定する必要があることが分かる。

一方で既往研究において課題であった杭頭と地層境界の曲げひずみの過大評価については液状化パラメタを見直しても改善することはできなかった。この過大評価を解消するためには、杭に働く慣性力や地盤反力についての考察や杭頭や杭底の拘束条件について考察を深める必要がある。

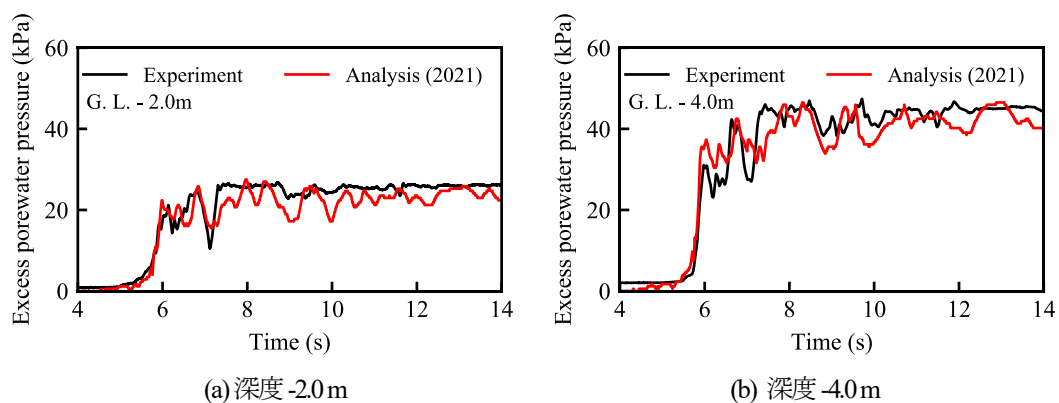


図-8 杭周辺の過剰間隙水圧の時刻歴(2021年度)

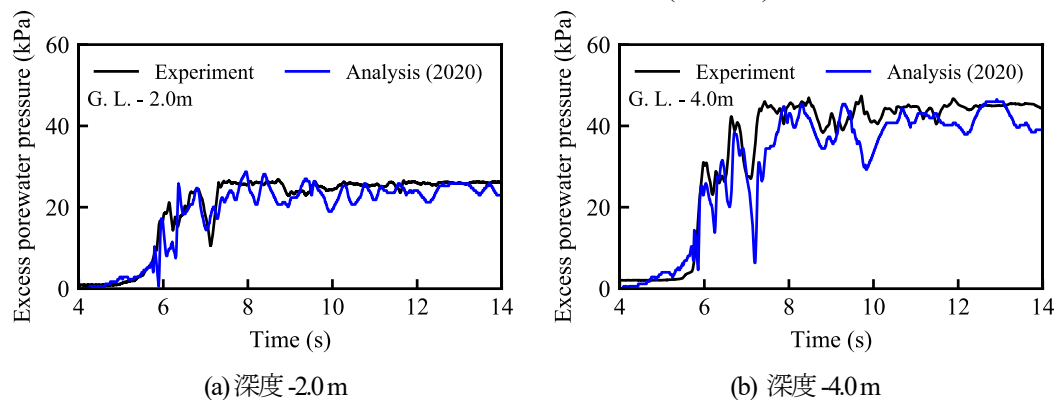


図-9 杭周辺の過剰間隙水圧の時刻歴(2020年度)

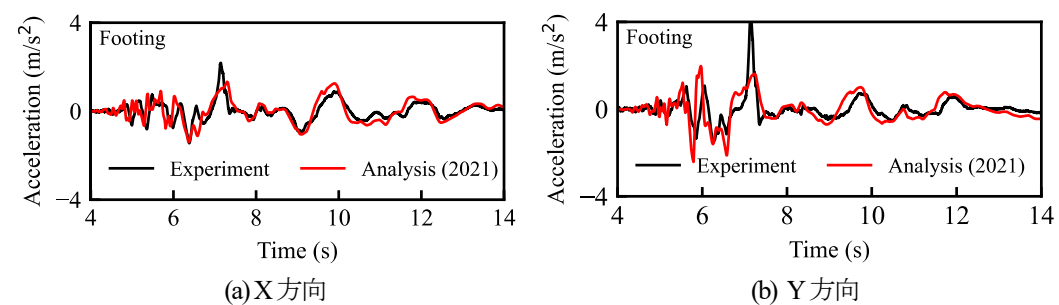


図-10 基礎の加速度の時刻歴(2021年度)

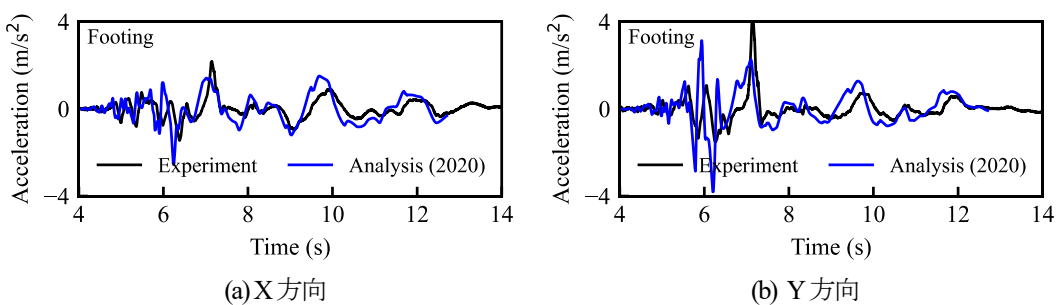


図-11 基礎の加速度の時刻歴(2020年度)

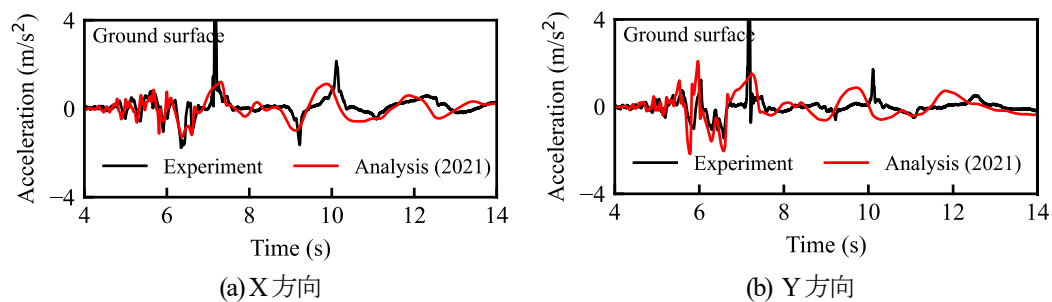


図-12 地表面の加速度の時刻歴(2021年度)

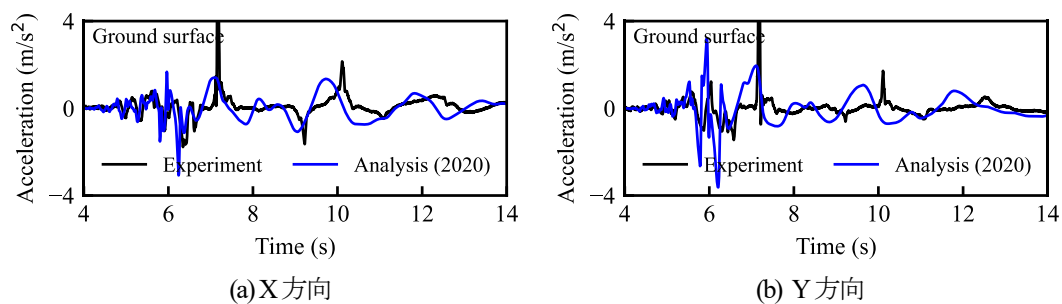


図-13 地表面の加速度の時刻歴(2020年度)

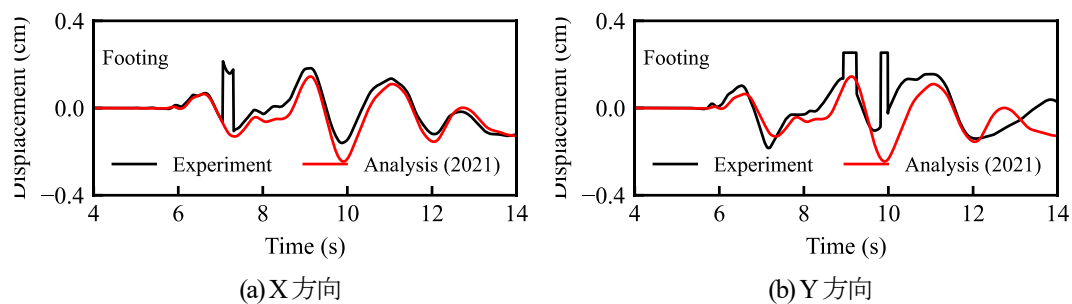


図-14 基礎の変位波形の時刻歴(2021年度)

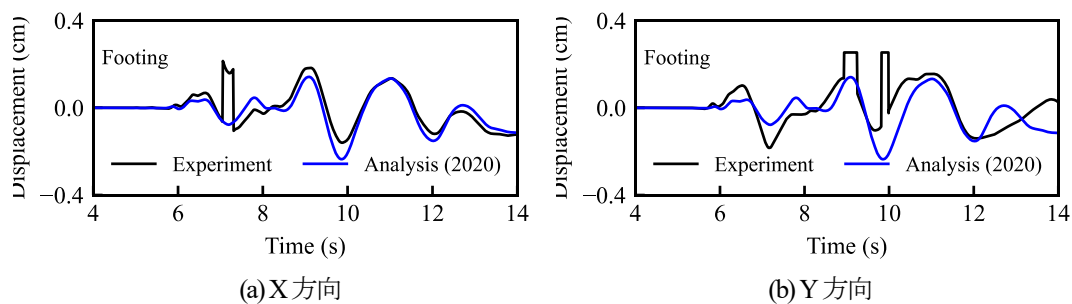


図-15 基礎の変位の時刻歴(2020年度)

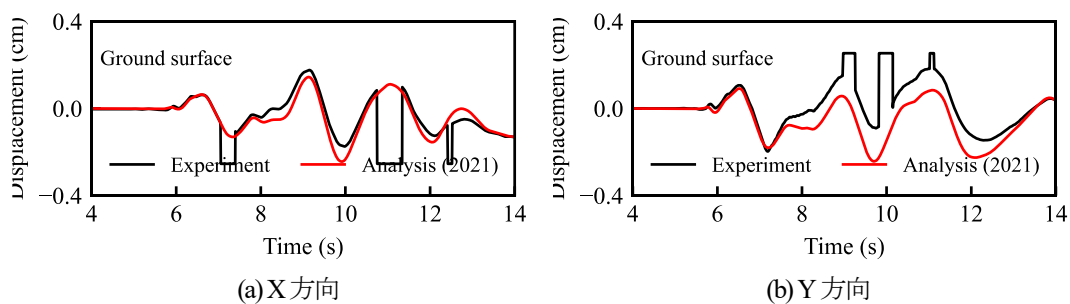


図-16 地表面の変位の時刻歴(2021 年度)

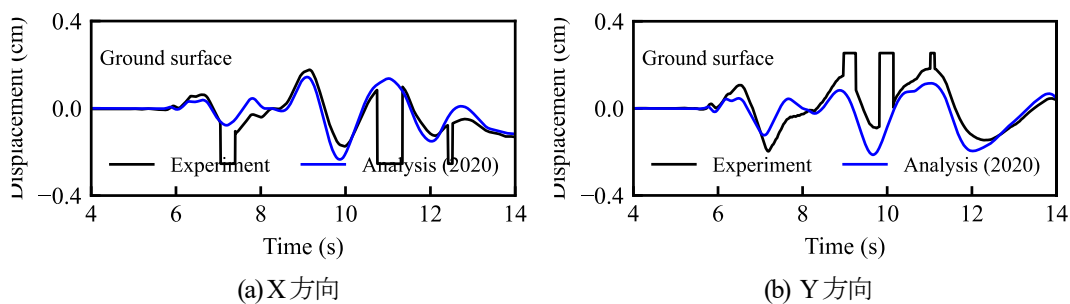


図-17 地表面の変位の時刻歴(2020 年度)

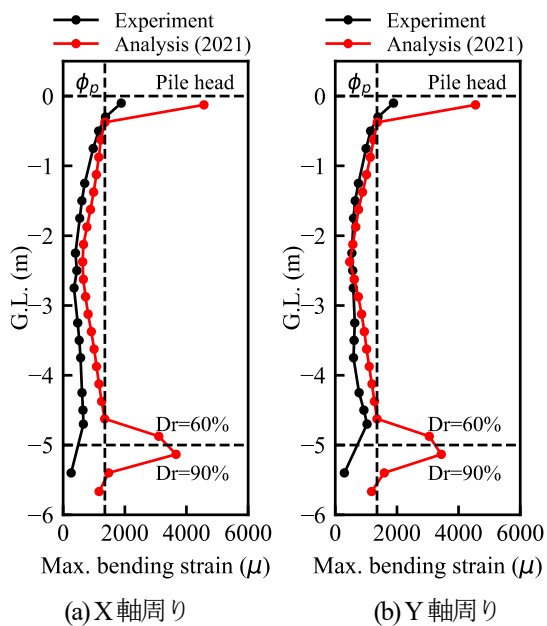


図-18 杭の最大曲げひずみ分布(2021 年度)

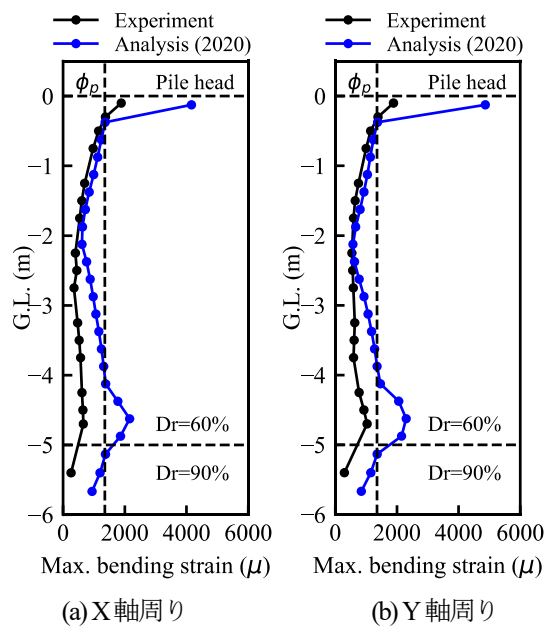


図-19 杭の最大曲げひずみ分布(2020 年度)

謝辞：本研究で検討対象とした実験は大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環で実施されたものである。ここに記して謝意を表します。

- 7) P.R. Amestoy, I.S. Duff, J.-Y. L'Excellent (2000): Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol.184, 501-520.

参考文献

- 1) Kusakabe, R., Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., & Wijerathne, L. (2019). A finite element analysis method for simulating seismic soil liquefaction based on a large-scale 3D soil structure model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 123, 64-74.
- 2) Kusakabe, R., Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., & Wijerathne, L. (2019). A finite element analysis method for simulating seismic soil liquefaction based on a large-scale 3D soil structure model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 123, 64-74.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, 1-15
- 4) Iai, S., Ozutsumi, O (2005): Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 29, 417-442.
- 5) Suzuki, H., Tokimatsu, K., Tabata, K. (2014). Factors affecting stress distribution of a 3×3 pile group in dry sand on three-dimensional large shaking table tests. *Soils and Foundations*, 54(4), 699-712.
- 6) Otsuka Y, Tamari Y, Ichimura T, Hori M, Yasuda S. Validation of a 3D FEM model for the liquefaction analysis of soil-pile-structure systems. *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering*, 2020.

LIQUEFACTION PARAMETERS FOR 3D LIQUEFACTION ANALYSIS OF SOIL-PILE-STRUCTURE SYSTEMS USING E-DEFENSE

Yuichi OTSUKA, Yukio TAMARI, Muneo HORI and Susumu YASUDA

This paper did the liquefaction analysis for the validation of a three-dimensional finite element method model (3D FEM model). The liquefaction analysis were carried out for the soil-pile-structure system used in E-Defense with the liquefaction analysis program, called as FLIP ROSE 3D. It was shown that the analysis with the liquefaction parameter which reproduces the several liquefaction resistance curves (the number of cycles required to attain double amplitude shear strain) accurately satisfactorily reproduced the experimental data of acceleration and porewater pressure.