

液状化地盤中の杭基礎構造物の地盤—構造物一体型モデル による動的解析手法に関する検討

山本 昌徳¹・山内 泰知¹・神澤 拓¹・井澤 淳²

¹正会員 修士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

²正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

1. はじめに

地震時に地盤の液状化が発生した場合、地盤は急激に剛性や強度を失うため、基礎構造物に大きな被害が発生する。鉄道構造物等設計標準 耐震設計¹⁾（以降、耐震標準）では、この被害程度を精緻に評価するために、有効応力解析による地盤—構造物一体型の動的非線形解析を実施することを推奨している。既往の研究により液状化を考慮した様々な有効応力解析モデルが提案されている（例えば²⁾）。いずれの手法を用いた場合も非排水繰返し三軸試験の結果をフィッティングすることでパラメータ設定を行う場合が多いが、設計者の判断に委ねられる部分が多い。したがって、設計において有効応力解析を適用する際の適正化を考えた場合、パラメータの設定方法を規定化しておくことも必要と考えられる。

本稿では、地盤—構造物一体型モデルに適用する有効応力解析モデルとして、修正 GHE モデル³⁾におわんモデル⁴⁾を組み合わせたモデルを例として、鉄道総研で提案している変形特性試験法の結果⁵⁾を用いたパラメータ設定手法を検討した。また、有効応力解析結果をハイブリッド地盤応答試験（以降、ハイブリッド試験）結果⁵⁾と比較することで、パラメータ設定手法の妥当性を検証した。さらに、杭基礎構造物を対象とした地盤—構造物一体型モデルによる動的解析を実施し、振動台実験結果⁶⁾と比較することで、適用性を検証した。

2. 地盤—構造物一体型モデルによる動的解析 手法の概要

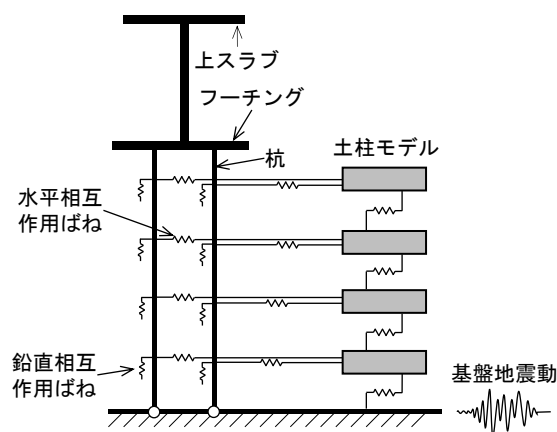


図-1 梁ばねモデルを用いた
地盤—構造物一体型モデルの概要

耐震標準では、設計地震動に対する構造物の応答値算定法として図-1に示すような梁ばねモデルを用いた地盤—構造物一体型モデルによる動的解析を推奨している。本稿では、土柱モデル部分を有効応力解析モデルとして、同様の解析を実施することを想定する。耐震標準では全応力解析に適用する非線形モデルとして、GHE-Sモデル⁷⁾を推奨しており、有効応力解析モデルにおいても、関連したモデルとすることが望ましい。そこで、修正 GHE モデルとおわんモデルを組み合わせたモデルを採用することとした。なお、GHE-S モデルは大ひずみ領域でスリップ形状を示す履歴法則としているため、おわんモデルと組み合わせる場合、間隙水圧の影響を二重に評価することになる。そのため、骨格モデルとしては修正 GHE を採用した。

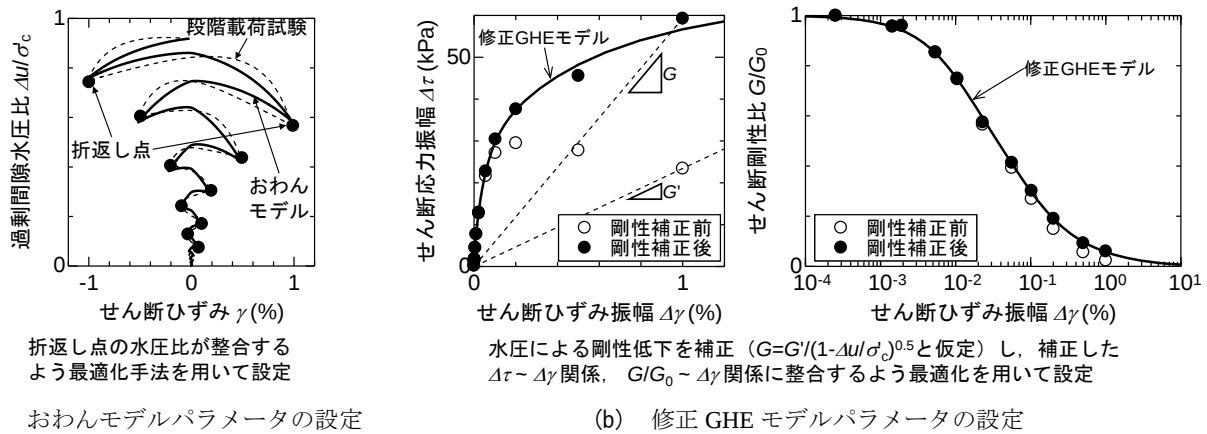


図-2 修正 GHE およびおわんモデルパラメータの設定方法の手順

3. 有効応力解析モデルのパラメータ設定

本稿では、修正 GHE モデルおよびおわんモデルのパラメータ設定において、筆者らが提案している土の変形特性試験⁵⁾のうち、ひずみ制御型 1 回繰返し段階載荷試験（以降、段階載荷試験）の結果を用いる。以下に、パラメータの設定手順を示す。また、図-2 に豊浦砂 $D_r = 60\%$ に対して設定した例を示す。

- (a) 段階載荷試験の $\Delta u/\sigma'_c \sim \gamma$ 関係における各ステージで荷重から除荷、除荷から荷重の折返し点で（図-2 中の●）が整合するよう最適化手法を用いて設定する。
- (b) 段階載荷試験の $\Delta u/\sigma'_c \sim \gamma$ 関係から過剰間隙水圧の上昇による剛性低下の影響を補正した $G/G_0 \sim \Delta\gamma$ 関係を算出し、最適化手法を用いて修正 GHE モデルパラメータを設定する。このとき、 G/G_0 と $\Delta u/\sigma'_c$ は剛性の拘束圧依存性から式 (1) の関係が成り立つと仮定する。

$$G/G_0 = (1 - \Delta u/\sigma'_c)^{0.5} \quad (1)$$

なお、最適化手法には反復 Shor's アルゴリズム⁸⁾を用いた。表-1、表-2 に同手順で得られた修正 GHE モデルおよびおわんモデルパラメータを示す。

図-3 に表-1、表-2 のパラメータを用いた場合の、FEM による一要素の有効応力解析（以降、要素シミュレーション）の結果を示すが、要素シミュレーションの結果は段階載荷試験結果を概ね再現できていることが分かる。

4. 有効応力解析による検証

(1) 検討地盤の概要

有効応力解析の妥当性を検証するため、ハイブリッド試験⁵⁾結果と比較する。図-4 に検証に用いる地盤の地層構造を示す。深度 4～6 m が対象層であり、その他の層は GHE-S モデルによる全応力解析とした。

表-1 修正 GHE モデルパラメータ

$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	α	β	$h_{\max}$	κ
1.00	0.26	0.42	1.00	1.34	0.97	0.36	1.1

表-2 おわんモデルパラメータ

A	B	C	D	$Cc/(1+e_0)$	$Cs/(1+e_0)$
-2.05	1.40	5.91	24.64	0.0092	0.0090

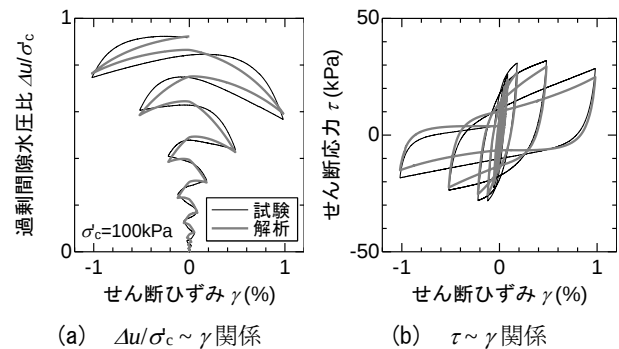


図-3 豊浦砂 $D_r = 60\%$ の段階載荷試験結果と要素シミュレーション結果

対象層は豊浦砂 $D_r = 60\%$ とし、その他の層は GHE-S モデルの標準パラメータ⁷⁾を適用してモデル化した。入力地震動は耐震標準に示されているスペクトル II 地震動（G1 地盤）とした。減衰は福島ら⁹⁾を参考にレーリー減衰（ $\alpha = 1.02$ ， $\beta = 0.00200$ ，一次モードに対して 5%）を設定し、基盤は $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ， $V_s = 400 \text{ m/s}$ 相当の粘性境界とした。

(2) 応答値の比較

図-5 にハイブリッド試験および有効応力解析から得られた最大応答値の深度分布を示す。変位およびせん断ひずみについては全層でほぼ一致している。一方で、有効応力解析結果は試験対象層の加速度およびせん断応力を過大評価している。図-6、図-7 に

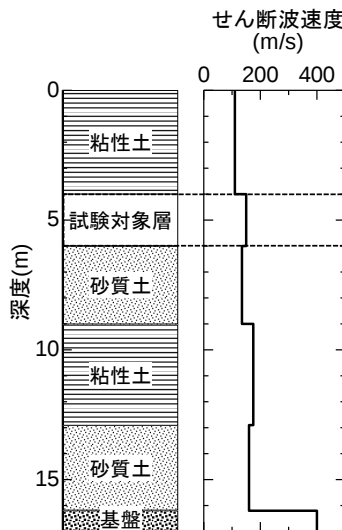


図-4 検討地盤

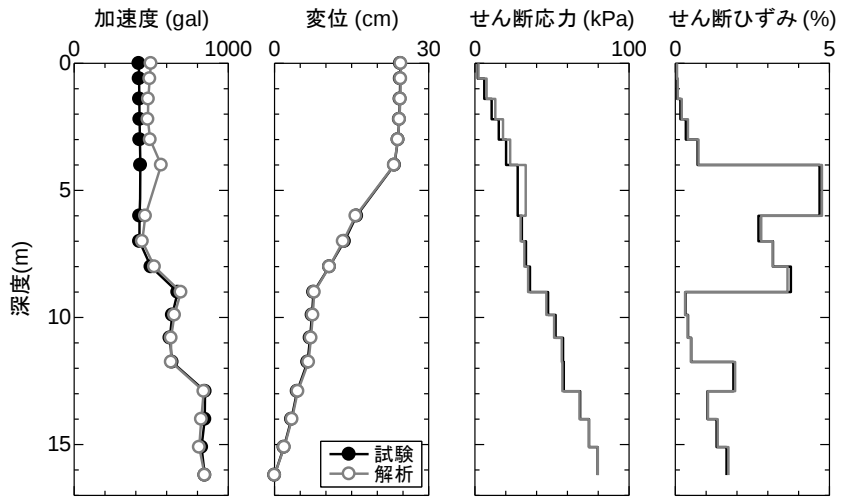


図-5 ハイブリッド試験と一次元地盤応答解析の最大応答値の深度分布

試験対象層の各種応答を示すが、解析においてサイクリックモビリティをハイブリッド試験よりも過大評価しているためであると考えられる。この点については今後の課題であり、さらに検討していきたい。

5. 地盤—構造物一体型モデルの動的解析

(1) 杭基礎構造物の解析モデル

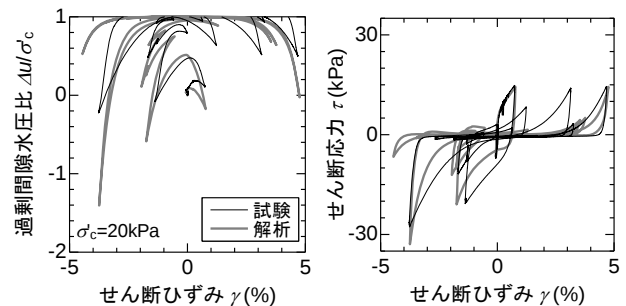
一体型モデルによる動的解析の対象として、鉄道総研で実施した杭基礎構造物の振動台実験⁹⁾を採用する。図-8 に模型断面図を示す。模型地盤は下部から、4号砕石（湿潤密度 1.62 g/cm³）、東北珪砂 6号（D_r = 80, 60%）で構成されている。入力地震動は耐震標準に示されているスペクトル I 地震動（G1 地盤）を相似則に従い時間軸を 1/3.83 に圧縮したものととしている。

解析で用いたモデル図を図-9 に示す。地盤と構造物間の水平および鉛直相互作用ばね、構造物モデルは、佐名川ら⁹⁾のモデル化手法を用いて設定した。水平および鉛直相互作用ばねの地盤反力係数 k はひずみレベル依存性を考慮するとともに、式(2)に示すように有効応力の減少の 0.5 乗に比例して低減している。

$$k \propto (1 - \Delta u / \sigma'_c)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 Δu は過剰間隙水圧 (kPa)、 σ'_c は初期有効拘束圧 (kPa) である。

なお、本稿で用いる振動台実験は、シートパイル補強杭基礎構造物の地震時挙動を検討する目的で実施したものである。本稿では一体型モデルを単純化するため、検証にシートパイルをフーチングに結合していないケースを用いるが、その加振の前にシートパイルをフーチングと結合したケースでスペクトル I 地震動を 2 度入力しており、加振履歴の影響を受けていると考えられる。なお、佐名川らにより、振動台実験のシートパイル無しのケースにおいて、シートパイルを残置したことによる構造物の地震時挙



(a) $\Delta u / \sigma'_c \sim \gamma$ 関係 (b) $\tau \sim \gamma$ 関係

図-6 ハイブリッド試験と有効応力解析の試験対象層の各種応答

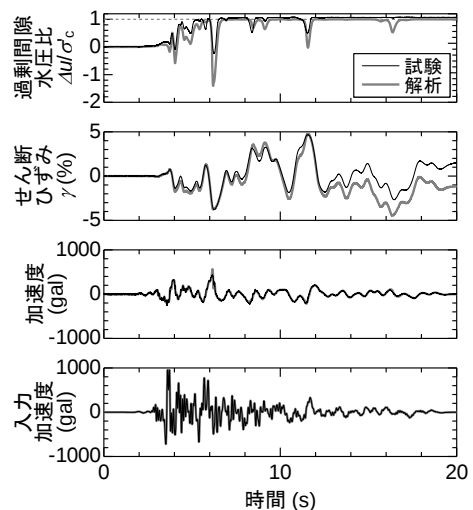


図-7 ハイブリッド試験と有効応力解析の試験対象層の時刻歴応答

ル I 地震動を 2 度入力しており、加振履歴の影響を受けていると考えられる。なお、佐名川らにより、振動台実験のシートパイル無しのケースにおいて、シートパイルを残置したことによる構造物の地震時挙

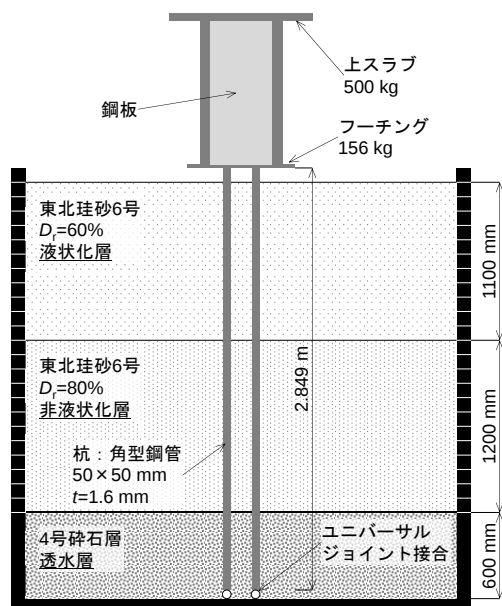


図-8 振動台実験の模型断面図

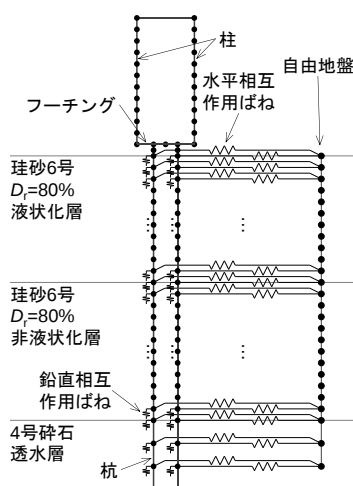


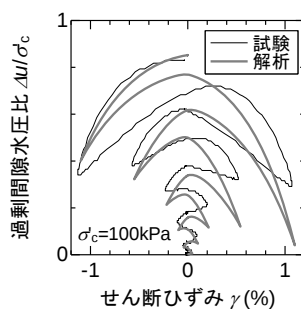
図-9 解析モデル図

表-3 修正 GHE モデルパラメータ

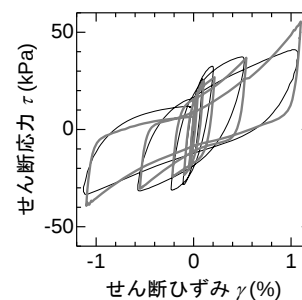
D_r (%)	$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	α	β	$h_{\max}$	κ
60	1.00	0.12	0.99	1.00	0.42	0.07	0.32	1.0
80	1.000	0.18	0.99	1.00	0.39	0.07	0.32	1.1

表-4 おわんモデルパラメータ

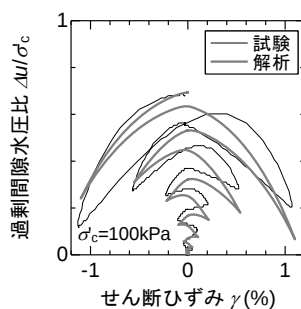
D_r (%)	A	B	C	D	$Cc/(1+e_0)$	$Cs/(1+e_0)$
60	-4.00	1.40	5.50	20.0	0.0142	0.0140
80	-7.00	1.40	2.00	30.0	0.0352	0.0350



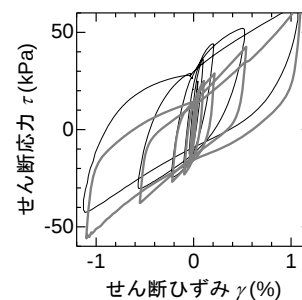
(a) $D_r = 60\%$ の $\Delta u/\sigma'_c \sim \gamma$ 関係



(b) $D_r = 60\%$ の $\tau \sim \gamma$ 関係



(c) $D_r = 80\%$ の $\Delta u/\sigma'_c \sim \gamma$ 関係



(d) $D_r = 80\%$ の $\tau \sim \gamma$ 関係

図-10 珪砂 6 号の段階載荷試験結果と

要素シミュレーション結果

動への影響は小さいことを確認している⁶⁾。

(2) 有効応力解析モデル

3 章に示した手法を用いて珪砂 6 号 $D_r = 60, 80\%$ の段階載荷試験に対して設定した有効応力解析モデルのパラメータを表-3, 表-4 に, 図-10 に珪砂 6 号 $D_r = 60, 80\%$ の段階載荷試験結果とその要素シミュレーション結果を示すが, 段階載荷試験結果を概ね再現できていることが分かる。

(3) 応答値の比較

図-11 に自由地盤の深度 0.2 m の応答時刻歴を示す。振動台実験結果では 8 秒付近で過剰間隙水圧比が一時的に 1.0 となるが, その後は 0.6 程度を中心に増減を繰り返しており, 完全な液状化には至っていないと考えられる。また, 4~10 秒で顕著なサイクリ

ックモビリティが生じている。一方で, 解析では 4 秒付近から過剰間隙水圧を過大評価し始め, 8 秒付近で過剰間隙比が 1.0 に達して液状化に至っている。そのため, 4 秒以降で有効応力解析は加速度振幅を振動台実験結果より過小評価している。それに伴い, 6 秒以降で変位振幅を過大評価する結果となっている。なお, 前述したように本ケースの前に複数回加振しているが, 本ケースの加振前の地表面沈下量に基づいて相対密度を推定すると, 検証に用いているケースの液状化層は $D_r = 66 \sim 72\%$ 程度まで上昇していると考えられ, 段階載荷試験に用いた試料より液状化に至りにくくなっていたと考えられる。

図-12 に構造物応答の時刻歴を示すが, 解析結果の上スラブ水平変位は 6 秒付近まで振動台実験と概ね整合するが, その後は, 振幅が大きくなっている。これは, 解析では 6 秒以降, 自由地盤の水平変位振幅

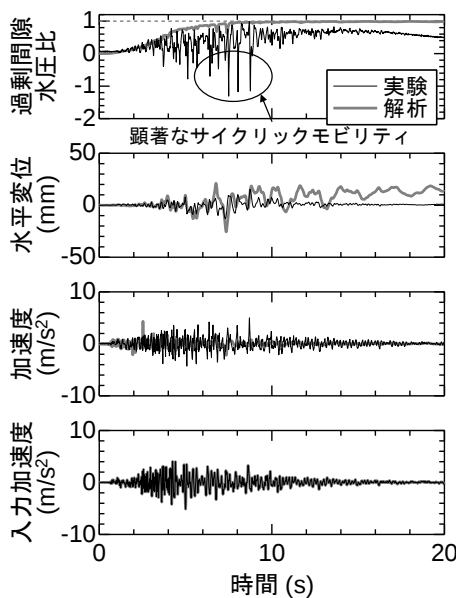


図-11 自由地盤の応答時刻歴
(G.L.-0.2 m おわんパラメータ調整)

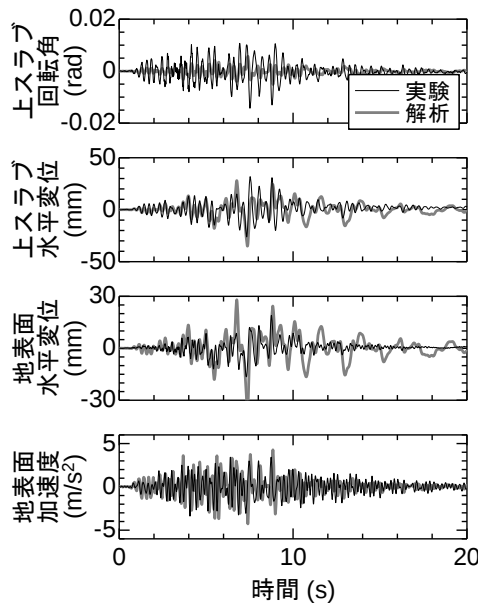


図-12 構造物の応答時刻歴

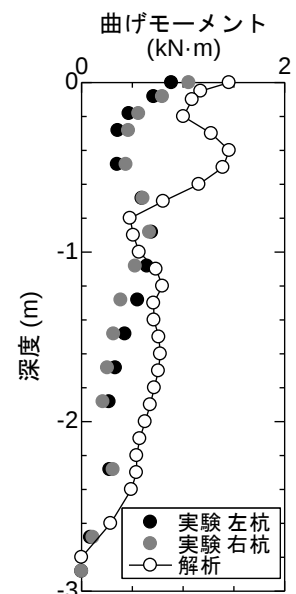


図-13 杭の曲げ
モーメント最大値深度分布

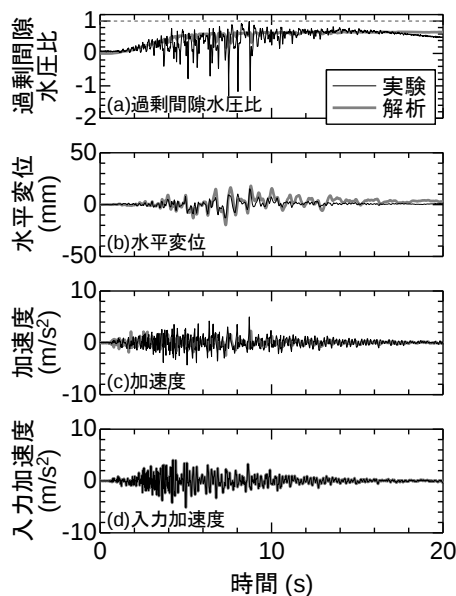


図-14 自由地盤の応答時刻歴
(G.L.-0.2 m おわんパラメータ調整)

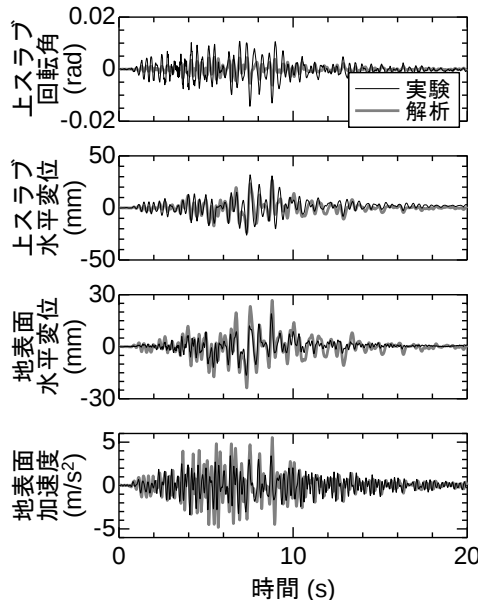


図-15 構造物の応答時刻歴

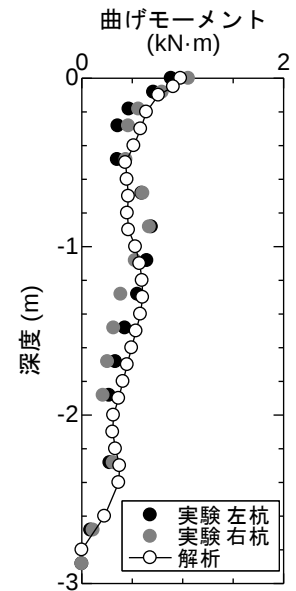


図-16 杭の曲げ
モーメント最大値深度分布

を振動台実験より過大評価しているためと考えられる。それに伴い、図-13に示す杭の曲げモーメントの最大値深度分布も過大評価している。

振動台実験の結果と過剰間隙水圧の挙動が整合しなかったのは、検証に用いている振動台実験ケースの前に複数回加振をしていたため、パラメータ設定に用いていた段階載荷試験と比べて地盤の密度が高くなり、振動台実験の地盤が液状化に至りにくくなったためと考えられる。

(4) パラメータを調整した応答値の比較

振動台実験の地盤は段階載荷試験で設定した密度

と異なると考えられるため、図-14(a)に示すように振動台実験の深度 0.2 m の過剰間隙水圧の挙動と整合するようおわんモデルパラメータを調整し、有効応力解析を実施した。有効応力解析の過剰間隙水圧の上昇を抑えたことで、6秒以降に現れていた変位の増大も抑えられ、振動台実験と概ね整合した。ただし、4～10秒の顕著なサイクリックモビリティを適切に再現することはできていないため、4秒以降の加速度振幅は過小評価している。

図-15、図-16に構造物応答の時刻歴および杭の曲げモーメント最大値深度分布を示す。解析の上スラブ水平変位は振動台実験とよく整合しており、地盤

と構造物の水平変位を適切に評価できているため、杭の曲げモーメントも概ね再現できていた。

表-5 に有効応力解析に用いたおわんモデルパラメータを、図-17 に珪砂 6 号 $D_r = 60\%$ の段階載荷試験結果および要素シミュレーション結果を示す。要素シミュレーション結果から、検証に用いている振動台実験ケースの液状化層は、段階載荷試験を実施しても液状化に至らない地盤と考えられる。

6. まとめ

本稿では、地盤—構造物一体型モデルに適用する有効応力解析モデルとして、修正 GHE モデルにおわんモデルを組み合わせたモデルを例とし、鉄道総研で提案している変形特性試験法の結果を用いたパラメータ設定手法を検討した。また、有効応力解析結果をハイブリッド試験結果と比較することで、パラメータ設定手法の妥当性を検証した。さらに、杭基礎構造物を対象とした地盤—構造物一体型モデルによる動的解析結果を振動台実験結果と比較し、適用性を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 段階載荷試験結果の過剰間隙水圧比-ひずみ関係と整合するようにおわんモデルパラメータを、水圧上昇による剛性低下を補正した応力-ひずみ関係およびせん断剛性比-ひずみ関係と整合するよう修正 GHE モデルパラメータを設定する手順を提案した。
- 2) 1)の手順でパラメータを設定し、有効応力解析を実施することにより、ハイブリッド試験の変位およびせん断ひずみの最大応答値の深度分布は全層でほぼ一致する結果を得た。ただし、サイクリックモビリティをハイブリッド試験より過大評価した。
- 3) パラメータを振動台実験の液状化層における過剰間隙水圧の挙動と整合するよう調整することで、地盤の挙動を適切に評価することができた。これにより、一体型モデルの動的解析においても構造物の挙動を適切に評価することができた。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012。
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka T.: Strain space

表-5 おわんモデルパラメータ

$D_r(\%)$	A	B	C	D	$Cc/(1+e_0)$	$Cs/(1+e_0)$
60	-7.00	1.40	2.00	30.0	0.0352	0.0350

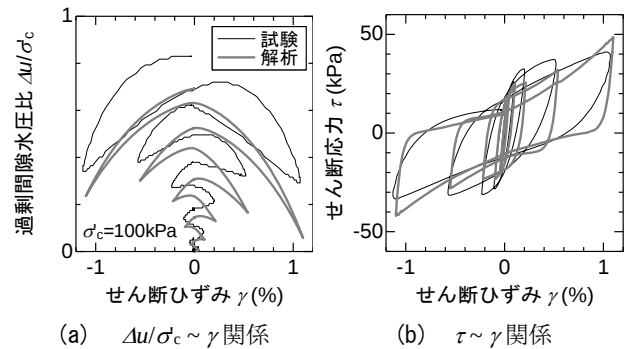


図-17 珪砂 6 号 $D_r = 60\%$ の段階載荷試験結果と

要素シミュレーション結果（おわんパラメータ調整）

plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp.1-15, 1992.

- 3) 西村昭彦，室野剛隆：GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 309-312, 1999.
- 4) 福武毅芳，松岡元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解釈，土木学会論文集，No. 412/III, pp. 143-151, 1989.
- 5) 佐名川太亮，西岡英俊，松浦光佑，樋口俊一，戸田和秀，妙中真治：液状化地盤におけるシートパイル補強杭基礎の地震時挙動に関する実験および数値解析的検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 12, No. 2, pp. 197-210, 2017.
- 6) 鈴木聡，井澤淳，豊岡亮洋，小島謙一：耐震設計における適切な表層地盤応答評価法の構築，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 9, 2018.
- 7) 野上雄太，室野剛隆：S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009.
- 8) Kappel, F. and Kuntsevich, A.V.: An implementation of Shor's r-algorithm, *Computational Optimization and Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 193-206, 2000.
- 9) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤の増幅率の評価，日本建築学会構造物系論文集，第 460 号，pp. 37-46, 1994.