

三次元有限要素法を用いた液状化地盤における模型杭の水平載荷実験の逆解析

Inverse analysis of lateral loading tests on a model pile in liquefied soil using 3-D finite element method analysis

吉澤睦博*, 内田明彦**, 濱田純次***

YOSHIZAWA Mutsuhiro, UCHIDA Akihiko, HAMADA Junji

*工修, 研究主任, (株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

**博 (工), 主任研究員, (株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

***博 (工), 研究主任, (株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

Inverse analysis of characteristic of liquefied soil shear modulus was carried out using the data of lateral loading tests on a model pile in the large-scale laminar shear box. 3-D Finite Element Method was used for the inverse analysis to stabilize the identification results. The inverse analysis result shows the efficiency of characteristic of strain dependency of soil shear modulus.

Key Words: liquefaction, pile, large-scale laminar shear box, finite element method

キーワード: 液状化, 杭, 大型せん断土槽, 有限要素法

1. はじめに

1964 年新潟地震以来, 地震時の飽和地盤の液状化問題は構造物の耐震設計上の重要な課題として研究が進められている。液状化時の杭基礎の設計では, 杭の水平抵抗である地盤反力特性が重要であり, そのために模型杭の振動実験や杭頭載荷や杭頭加振等の多くの研究が精力的に行われている¹⁾²⁾³⁾。実験による地盤の液状化状態の再現は土槽を水平加振させ地盤のダイレイタンスにより過剰間隙水圧を発生させることが望ましいが, 近年, 有効応力の低減を浸透圧で模擬した土層を用いた模型杭の載荷実験も行われており, 成果⁴⁾⁵⁾を上げている。

これらの実験的研究では地盤反力特性の評価を①曲率の値を杭軸方向に微積分して地盤反力, 杭変位を求めて逆算する場合, ②地盤を離散化したばねでモデル化し, そのばね値を杭の曲率から逆解析する場合などの処理で行われている。これらの処理では杭-地盤を弾性床上の梁モデルとして扱うためシンプルで解りやすいが, シンプルであるため計測される曲率データの特性が反映されやすく, 適切な処理を施さないと工学的に不可解な結果を算出してしまう場合がある。

そこで本論文では実験に用いた土層および杭を三次元有限要素法 (以降では FEM と記す) でモデル化し, モデル化した杭要素における曲率分布を再現する地盤特性の逆解析を行った。FEM は地盤の変形解析で強力な評価ツールとして利用されることが多い。FEM 自身も土層を離散化してモデル化する近似解法であるため, モデル化の適切さは強く求められる。しかし地盤を離散化したばねで評価するモデルに比べて杭周辺の地盤の応力分布や

変位分布をそのまま表現できるため, より実用的な方法であると考えられる。

本論文では液状化地盤中の杭の地盤反力特性を評価するために行われた杭頭載荷および地盤載荷の実験結果を, 三次元 FEM 解析をベースにした逆解析により評価するとともに, 用いた FEM 解析手法の適用性を確認した。

2. 実験概要

本研究の逆解析で用いた実験データは, 図-1に示す大型せん断土槽実験装置を使った実験結果である。土槽の大きさは内径 2.5m×2.5m×深さ 8m, 水平載荷用のアクチュエーターはそれぞれ独立に制御可能で, 最上段のアクチュエーターは杭頭に水平変位, 土槽枠に連結したアクチュエーターは地盤変形を与えることが可能である。

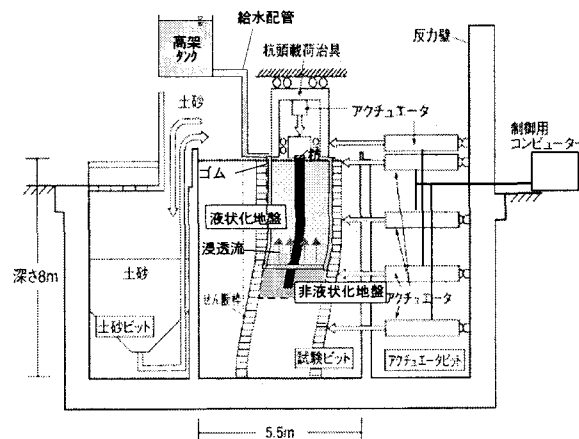


図-1 大型せん断土槽の概要

模型地盤は珪砂 6 号（飯豊砂）を用いて作成された。GL-4.0m 以深は支持地盤（相対密度 80%以上）としてランマー転圧により作成、それより浅は水中落下法により作成された。模型杭は外径 165.2mm、肉厚 3.7mm、長さ 4.9m の鋼管杭で支持地盤に 800mm 根入れされている。液状化を模擬するための上向き浸透流は土槽外に設けた高架タンクを上下させて、土層との水頭差をつけることで発生させた。水頭差による土層の水圧比は、鉛直方向はほぼ一定に制御できたが、水平面内での水圧比の分布の違いが生じた。これは載荷実験の繰り返しによる杭近傍の緩み領域が水みちとなる影響と考えられる。そこで今回は杭近傍で計測された水圧と杭から離れた位置で計測された水圧の平均より実験での水圧比を求めた。実験装置の詳細および結果の概要は参考文献 5) を参照されたい。

今回の逆解析に用いた実験ケースの一覧を表-1 に示す。Case2' は杭頭変位をゼロにして土槽枠にのみ変位を与えた載荷である。

表-1 逆会席で用いた試験ケース

試験名	相対密度	湿潤重量 (kN/m ³)	杭頭変位 (mm)	土槽変位(mm)※		
				0.0m	-2.0m	-4m
Case1	緩詰め	約30%	18.13	20~25	0	0
Case2	密詰め	約70%	19.01	20~25	0	0
Case2'	"	"	"	0	28	19

※アクチュエーター位置における変位

3. 逆解析の概要

三次元 FEM を用いた杭の載荷実験の逆解析が 30G の遠心場及び 1G 場で実施されている⁹⁾。本論文での逆解析も同様の手順を用いて行った。

- ①実験の模型装置を三次元 FEM でモデル化
- ②FEM モデルの地盤のせん断剛性の関数の設定
- ③実験での杭頭変位 u_0 を FEM モデルに強制変位入力（土槽変位の場合は土槽変位を境界に入力）
- ④杭の曲率の実験値と計算値の残差自乗和を計算
- ⑤④の残差自乗和が最小になるように②のせん断剛性の関数のパラメータを最適化する。

以降に各ステップを述べる。

3.1 FEM 解析モデルの作成

図-2 に逆解析に用いた三次元 FEM の解析モデルを示す。杭は土槽の中心に線形はり要素でモデル化した。杭の載荷試験を模擬するためには、杭が地盤を押す際の三次元効果を表現する必要があるため、杭による砂の排除体積をモデル化した。今回は鋼管を等価な断面積を持つ正方形とした六面体要素と考え、杭を中心に柱状に要素を抜き出した。抜き出した要素と対応するはり要素周りの節点を、同一深度のはり要素の節点に水平方向、上下方向とも等変位拘束した。側面及び底面の境界はすべて変位固定とした。杭先端部はピン支持、杭頭部には水平変位と回転変位を強制変位で入力した。

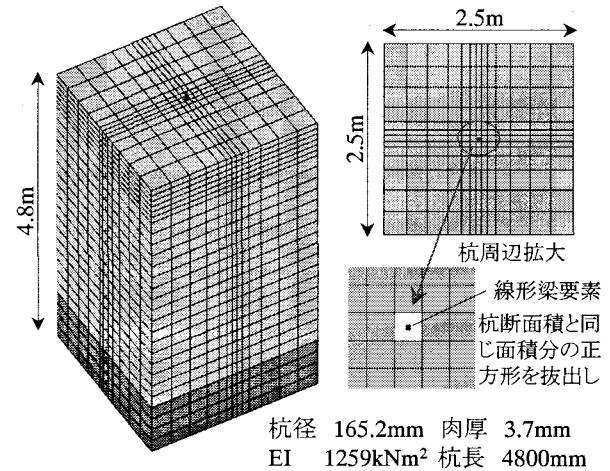


図-2 三次元 FEM 解析モデル図

3.1 せん断剛性の関数の設定

逆解析の対象となる実験では、液状化を浸透圧による有効応力の低下で模擬している。したがって逆解析で用いるせん断剛性の関数は有効拘束圧に依存する形で表記されていることが望ましい。そこでせん断剛性の関数は室内土質試験結果に基づき提案^{7,9)}されている式(1)を用いた。式(1)はせん断剛性とせん断歪みの関係に有効拘束圧の影響を評価したもので、規準歪み γ_{ref} にも拘束圧依存が考慮されている。

$$G = G_0 \cdot F_\gamma \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right) \cdot F_\sigma (\sigma'_m) \quad \text{式(1)}$$

$$\text{ただし, } \gamma_{ref} = \gamma_{ref,0} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m,0}} \right)^n, \quad F_\sigma (\sigma'_m) = \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m,0}} \right)^n$$

ここで σ'_m : 平均有効応力, $\sigma'_{m,0}$: 基準となる平均有効応力, G_0 : 平均有効拘束圧 $\sigma'_{m,0}$ での初期せん断剛性, F_γ : せん断歪みの関数, F_σ : σ'_m の関数, γ_{ref} : 規準歪み (通常 $G/G_0=0.5$ 時の値; γ_{50}), $\gamma_{ref,0}$: $\sigma'_{m,0}$ 時の規準歪み, n : 応力比のパラメータである。

実際の計算では土槽実験に合せて実施した繰返し三軸圧縮試験から得られたせん断剛性とせん断歪み特性（以降 $G-\gamma$ 特性と呼ぶ）の値を用いて行った。図-3 に今回の逆解析で用いた $G-\gamma$ 特性を示す。三次元 FEM 解析では杭周辺の三次元挙動をそのままモデル化できるので、 $G-\gamma$ 特性は最大せん断歪み γ_{max} と最大せん断応力 τ_{max} の関係に適用した。

$$\gamma_{max} = \left\{ (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right\}^{0.5}$$

$$\tau_{max} = \left\{ \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \right\}^{0.5}$$

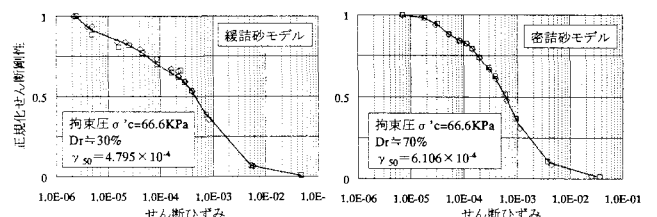


図-3 解析に用いたせん断剛性とせん断歪み特性

3.3 強制変位入力による静的解析

解析モデルの杭頭に実験での杭頭載荷変位を強制変位入力した解析を行った。解析モデルの初期応力は静止土圧係数 $K_0=0.5$ として設定し、作用させる浸透圧レベルに応じて初期応力を低下させた。また静的解析時の土骨格のポアソン比は 0.333 とした。杭頭変位は実験で発生した水平変位と回転変位とを同時に作用させた。Case2'の土槽変位入力の場合は、表-1に示す変位量を深さ方向に直線分布で側方境界の節点に一樣に作用させた。

3.4 残差自乗和の計算

残差自乗和は各浸透圧レベルでの残差自乗和を全て足し合わせた(式(2)参照)。これは各浸透圧レベルに共通なパラメータを求め、有効拘束圧に依存しないパラメータを求めるためである。

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\frac{\phi_j^{obs.} - \phi_j^{ana.}}{\max(\phi_j^{obs.})} \right)^2 \right\} \quad \text{式(2)}$$

ここで ϕ は曲率であり、*obs.* は実験値、*ana.* は計算値である。 n は浸透圧レベルの数であり、 m は杭に設置された歪み計の個数である。

3.5 残差自乗和の最小化による最適化

今回の逆解析のパラメータは G_0 、 $\gamma_{ref,0}$ 、及び n を考えた。 G_0 をパラメータに加えた理由は、動的変形試験の一斉試験結果⁹⁾においても G_0 の値は2割程度の幅をもっているからである。残差自乗和 Φ の最小化は最適化するパラメータ G_0 、 $\gamma_{ref,0}$ 、及び n を初期値で無次元化し、各パラメータの重みを等しく考えて最小化した。

4. 解析結果

4.1 杭の地盤反力特性

実験結果と逆解析結果の比較を図-4、図-5に示す。

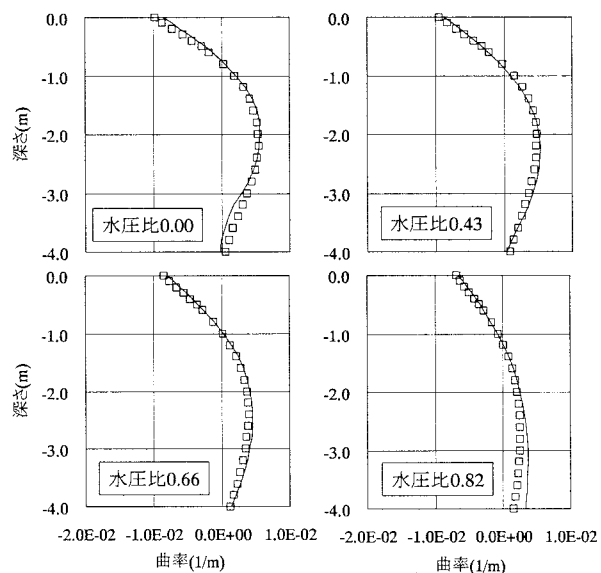


図-4 Case1の曲率分布の比較 (□：実験値)

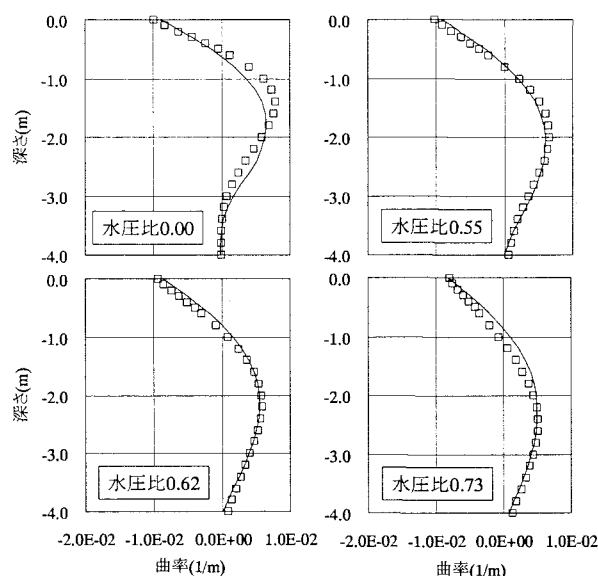


図-5 Case2の曲率分布の比較 (□：実験値)

杭頭変位 20~25mm の範囲で実施されたデータで、図中の□印が実験値、線が逆解析で求められた曲率である。支持地盤との境界の GL-4.0m 部分までを示した。

水圧比を変えた全ての実験結果を用いて逆解析を行っているため、個々の水圧比での曲率分布の適合度はやや落ちるものの、水圧比が大きくなるにつれて、地中部での曲率の最大発生深度が深くなっていく様子や、曲率の深さ方向への変化が緩やか(地盤反力が小さい為せん断力がほぼ一定に近づく)になる傾向が再現されている。

逆解析結果で求められたパラメータを図-6に示す。

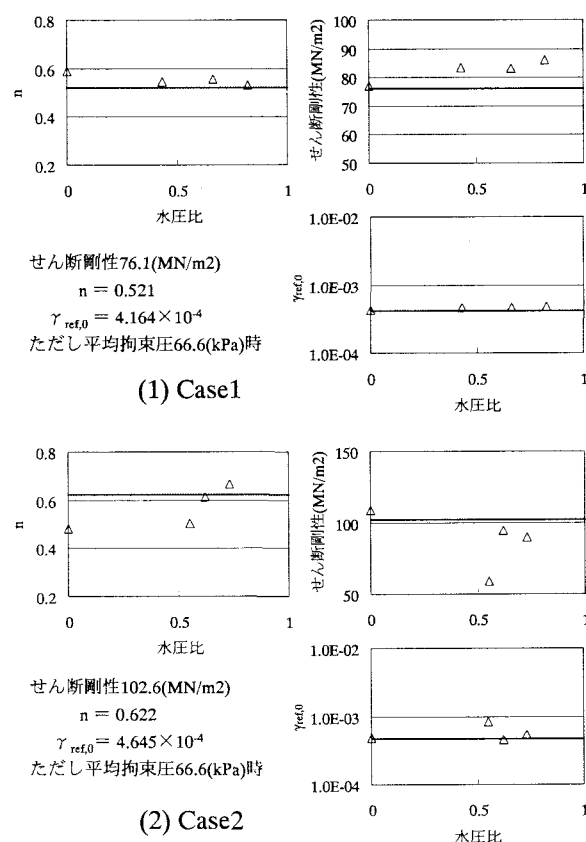


図-6 求められたパラメータ (Case1 および 2)

図-6中の太線が求められた値（左下に値を表記）であり、水圧比ごとに表示されている△印は、各水圧比での曲率分布だけを用いて逆解析した際に求められた値である。Case1 では両者の間の差があまり大きくないが、Case2 では水圧比ごとに求められた値のばらつきがやや大きい。しかしすべての水圧比のデータを用いて行った結果は平均的な値を示している。

図-7及び図-8は土槽に変位を与えた Case2'の逆解析結果である。杭頭部にのみ変位を与えた場合と比べて曲率分布の一致度が全体的に悪い。これは土槽枠に与えた変位の杭への伝播、及び支持地盤部と表層地盤部分の取り合い部のモデル化に改良の余地があると考えられる。

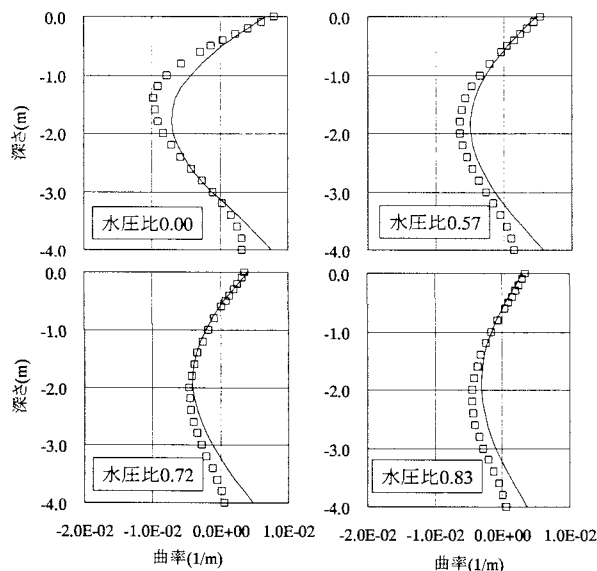


図-7 曲率分布の比較 (Case2')

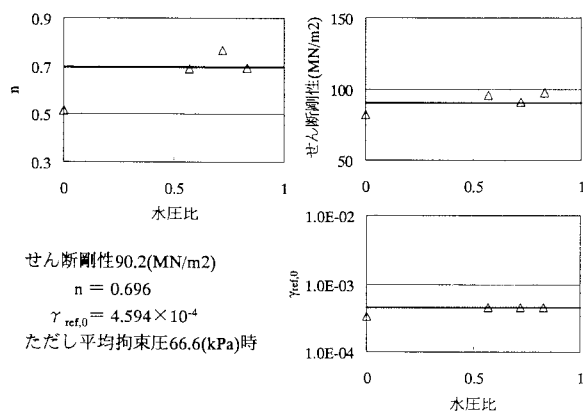


図-8 求められたパラメータ (Case2')

図-9はCase1及びCase2の逆解析結果から得られた杭変位と地盤反力係数（以降では k_H と記す）分布である。地盤反力は梁要素の部材端でのせん断力の差から杭の節点力を算出して評価した。実験結果の曲げ歪み分布の微積分により地盤反力係数を算出する場合には、杭変位が非常に小さい部分でゼロ割やマイナス側に算出されたりして k_H がばらついて求められしうが、三次元FEM解析を用いた今回の方法では比較的安定して反力係数分布が評価できている。

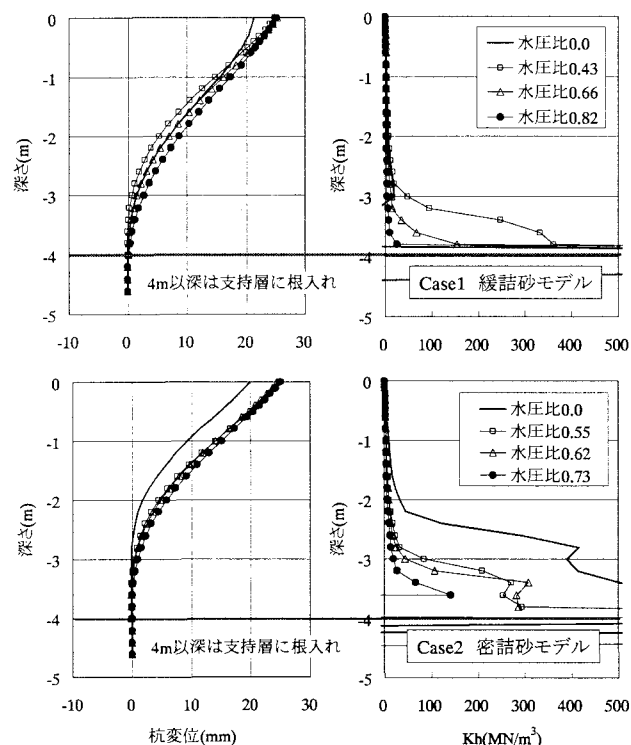


図-9 地盤反力係数分布の比較

次に k_H 特性を把握する為に、Case1の逆解析結果で最適化されたパラメータを用いて、Case1の順解析を行った。順解析では杭頭変位を1mm, 10mm, 20mm, 40mmと段階を追って実施した。図-10はその結果より算出した k_H を深さ毎に表示した結果である。杭と地盤との相対変位が大きくなると一般に地盤反力係数は低下する。液状化のように大きく有効応力が変動しない場合の杭頭載荷実験の結果では、 k_H の非線形性として杭変位が10mmのときの k_H と杭変位 δ （10mmで正規化）の間には k_H が δ の0.5乗に比例することが提案されている¹⁰。図-10の上段には水圧比0.0時の杭変位10mmの k_H の値を基に0.5乗に比例するとした近似線を併記した。水圧比0.0の地盤反力係数の値の分布からはその傾向が伺える。一方で水圧比が上昇した結果をみると、有効拘束圧の低下による k_H の低減が入っているため、変位レベルの小さい領域でも k_H の値が小さく、変位依存性の傾向は平坦で弱くなっている。

次にこれを水圧比側から考察を加えるために、図-10で求められた k_H の分布より、杭変位が同一のときの k_H の値を水圧比が0.0の k_H の値で正規化した。正規化した k_H の値を水圧比ごとに表示したものが図-11である。本来は三次元FEM解析を行っているため、解析で変位レベルごとに整理することが望ましいが、今回は図-10の離散的な値を関数近似して整理した。

図-11には参考線として地盤反力係数が有効拘束圧の0.5乗で低減する場合と0.521乗、1.0乗で低減する場合の値を記した。0.521乗は今回のCase1で逆解析された値である。砂質地盤のせん断剛性は有効拘束圧の0.5乗に比例するとして分析や解析が行われることが多い。しか

し k_H の低減係数として評価する場合には、 k_H の変位依存の低減効果もあるため、その低減は逆解析結果の 0.521 乗よりも大きいことが解る。

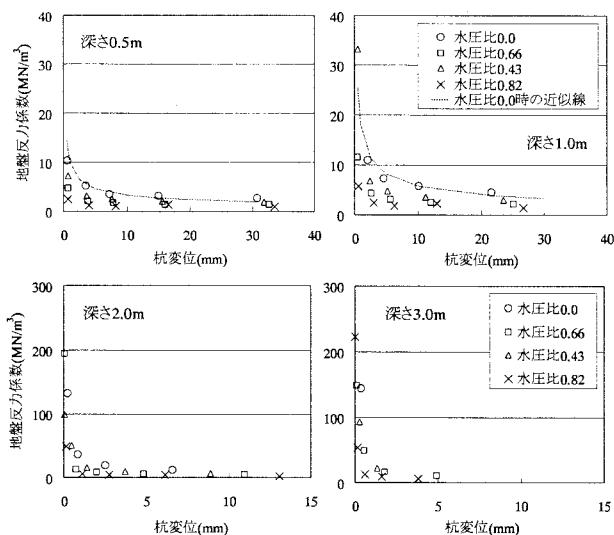


図-10 地盤反力係数と変位の関係 (Case1)

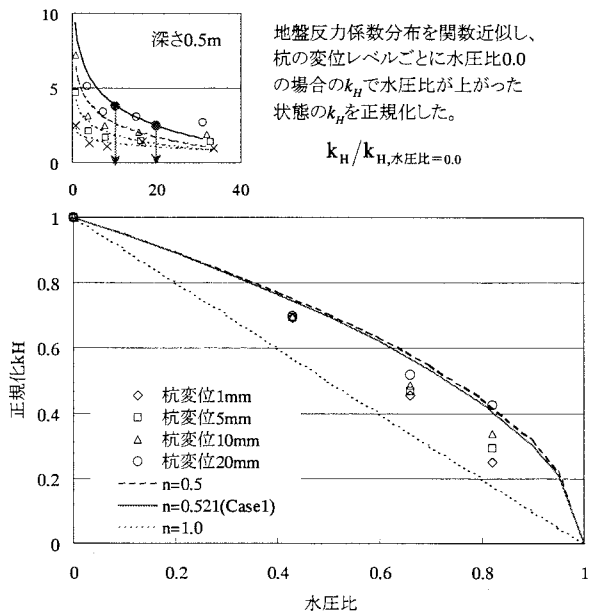


図-11 正規化 k_H と水圧比の関係 (Case1 ; 深さ 0.5m)

4.2 地盤のせん断剛性とせん断歪み特性

国生は飽和した沖積砂を用いた繰返し三軸試験を有効拘束圧を 2~100(kPa) に変化させて行い、得られた $G-\gamma$ 特性を、正規化したせん断剛性および正規化したせん断歪みで整理すれば一本の $G-\gamma$ 特性で評価できることを示している⁷⁾。同種の研究は清田らの動的せん断試験装置を用いた土の繰返し変形試験からも報告⁸⁾されている。清田らはさらに気乾状態の珪砂 6 号 (石見銀山産) を用いて有効上載圧を 19.6~490(kPa) の範囲で変化させて行い、 $G-\gamma$ 特性が同じように評価できることを示し、次式^{8), 11)}を示している。

$$\gamma_{50} = 0.0667 \sigma_v^{0.48} \quad (3)$$

$$G'_0 = 481 \sigma_v^{0.49} \quad (4)$$

$$\text{ただし } G'_0 = G_0 / ((2.17 - e)^2 / (1 + e))$$

ただし、ここで σ_v は上載圧で単位は kgf/cm^2 、 e は間隙比である。そこで標準的な珪砂 6 号の $G-\gamma$ 特性を式(3)の値と式(5)¹²⁾を用いて作成した。

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_{50}} \quad (5)$$

清田らの整理方法に従い、せん断歪みを正規化して剛性低下率との関係に表した図を図-12に示す。図中の□印付きのデータは今回の逆解析に用いた $G-\gamma$ 特性(図-3)を同様に整理した結果である。相対密度 70% 相当のモデルで用いた $G-\gamma$ 特性は清田らの式と良い対応が見られているが、緩詰め相対密度 30% 相当のモデルでは γ_{50} より大きい範囲の歪み領域での対応は良いが、 γ_{50} より小さい範囲では剛性低下が大きい結果となっている。

図-13に清田らの $G-\gamma$ 特性と今回の逆解析求められた $G-\gamma$ 特性を拘束圧ごとに比較した図を示す。図-13中の入力データとは、図-3の入力データを基に拘束圧のパラメータを $n=0.5$ として求めた $G-\gamma$ 特性である。

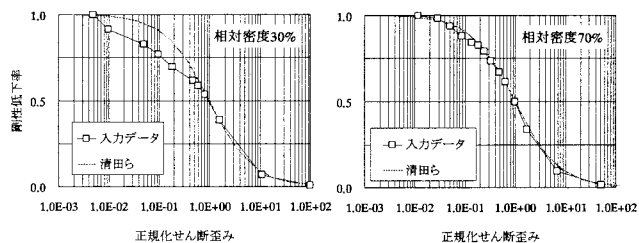


図-12 正規化せん断歪みと剛性低下率

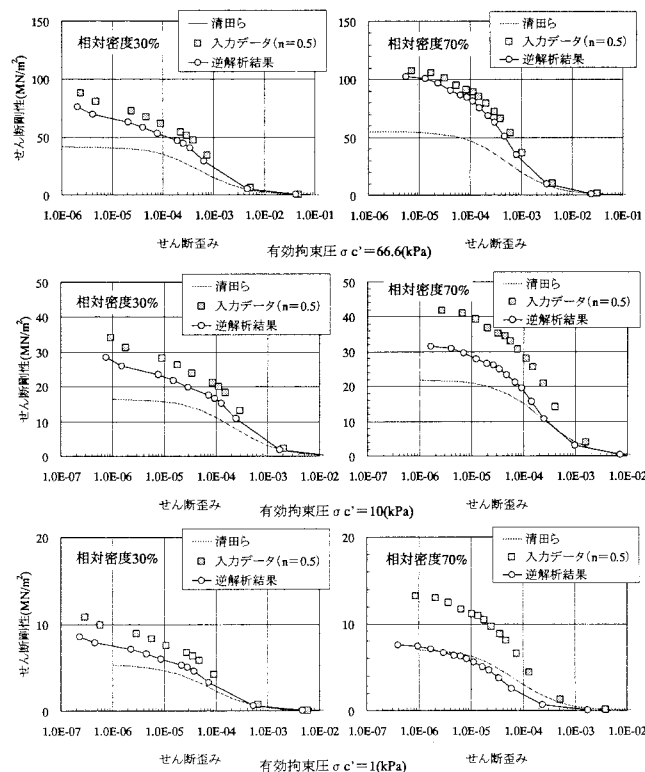


図-13 逆解析されたせん断剛性-せん断歪み特性

図-13の有効拘束圧 66.6(kPa)は、実際の三軸試験で用いられた値である。静止土圧係数を 0.5 と仮定すると今回の実験で用いられた珪砂相当の飽和地盤で約 11m 深さの平均有効応力になる。また有効拘束圧 10(kPa)は約 1.7m, 1(kPa)は約 0.17m となる。今回の逆解析で得られた $G-\gamma$ 特性は、拘束圧の小さい 1~10(kPa)場合には室内試験結果の整理より得られた清田らの $G-\gamma$ 特性と対応した特性となっているが、拘束圧の大きい場合には初期せん断剛性 G_0 の対応が悪い。これは今回の逆解析に用いた杭頭載荷実験の曲率分布が拘束圧の小さい表層付近での値が大きいこと、また実験はさらに有効応力を低下させた状態で実施しているため、拘束圧の小さい領域でのせん断剛性の対応は良くなったと考えられる。

図-14は清田らの $G-\gamma$ 特性と逆解析結果の $G-\gamma$ 特性を用いて水圧比の大きく違う 2 ケースを順解析した結果である。表層付近での一致度は逆解析モデルの方が高いが、土層下部の拘束圧の大きい領域は逆解析モデルも一致度は低い。拘束圧を考慮した $G-\gamma$ 特性の改良の余地があると考えられる。

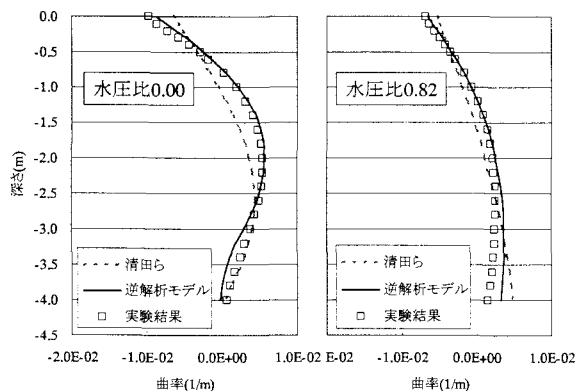


図-14 $G-\gamma$ 特性の違いによる比較

5. まとめ

液状化地盤中の杭の地盤反力特性を把握するために、大型土槽による杭頭載荷実験結果を用いた液状化地盤のせん断剛性の逆解析を行った。逆解析は土層と杭を三次元 FEM でモデル化した変形解析を用いて行った。その結果、杭頭載荷実験結果を再現できる地盤のせん断剛性—せん断歪み特性 ($G-\gamma$ 特性) が求まり、水平地盤反力特性の評価ができた。逆解析により求められた地盤の $G-\gamma$ 特性は、室内試験結果で得られている既往の特性よりも拘束圧依存性の強いものであったが、杭頭載荷実験での拘束圧レベルでは両者は比較的良好な対応を示した。しかし室内試験結果の $G-\gamma$ 特性を用いた順解析結果は杭頭載荷実験の特徴を良く再現しているとは言えず、両者に改良の余地があると考えられる。

室内土質試験で得られる地盤の $G-\gamma$ 特性の適用性に関しては、観測された地震波の逆解析などで検証が行われている。今回の逆解析により、室内土質試験で得られる地盤の $G-\gamma$ 特性は、杭と地盤との相互作用の実験結

果にも現れていることが確認された。しかし逆解析では与えられた条件を満たす解を求めているため、実際の設計などに適用していくためには、その与えられる条件を広げる研究が必要である。今回の逆解析で用いた大型せん断土槽の実験では、土槽に変位入力した場合や、杭頭変位レベルを上げた場合があるため、引き続き本手法の適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 水野二十一, 杉本三千雄, 飯場正紀, 森利弘, 平出努: 液状化過程における杭基礎の動的挙動, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, pp.1635-1640, 1998 年 11 月
- 2) 田村次次, 時松孝次, 鈴木比呂子, 八幡夏恵子, 鈴木康嗣, 土屋富男, 内田明彦, 吉澤睦博, 藤井俊二, 船原秀樹, 阿部秋男: 大型せん断土槽を用いた液状化地盤における鋼管杭基礎の振動実験, 防災科学技術研究所研究資料, 第 227 号, 2002 年 4 月
- 3) 澤田亮, 西村昭彦: 液状化地盤における基礎構造物の振動性状に関する研究, 土木学会論文集 No.736/III -63, pp.129-142, 2003 年 6 月
- 4) 難波伸介, 富永晃司, 山本春行, 徐挺: 有効応力制御地盤内の単杭に作用する水平地盤反力に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol.47B, pp.361-366, 2001 年 3 月
- 5) 土屋富男, 内田明彦, 濱田純次, 河合栄作, 高橋計人, 山下清, 加倉井正昭: 液状化地盤における模型杭の水平載荷実験 (その 1, その 2), 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.2229-2232, 2001
- 6) 並河努, 成川匡文, 土方勝一郎, 大島豊, 西村功, 内川祐一郎, 柳下文夫, 久保賀也, 塩見忠彦, 馬場崎亮一: SR モデルによる杭基礎建築物の地震応答解析における液状化の考慮方法 (その 6~その 8), 日本建築学会学術講演概要集, B-2, 371-376, 1999 年 9 月
- 7) 国生剛治: 土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答, 電力中央研究所報告 総合報告 NO.301, 1982
- 8) 清田芳治, 田村英雄: 繰返しせん断力を受ける砂の動的変形特性に関する研究, 鹿島技術研究所年報第 39 号, pp.207-214, 1991
- 9) 地盤工学会: 室内繰返し載荷試験による豊浦砂の変形特性に関する全国一斉試験の実施と試験結果の解析, 土と基礎 42-11, pp.85-88, 1994
- 10) 今井恒雄: 地盤の横方向 K 値に関する研究(3)—設計に用いる k 値—, 土と基礎, Vol.17, No.11, pp.13-18, 1969 年
- 11) 清田芳治, 萩原庸嘉, 田村英雄: 珪砂 6 号の動的変形特性に関する研究, 第 30 回土質工学研究発表会, 851-852, 1995
- 12) 古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治: 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.2077-2078, 2003 年 7 月 (2004 年 9 月 17 日受付)