

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

杭基礎構造物の補強方法に関する振動台実験

足立有史* 浦野和彦** 三原正哉***

1. はじめに

大規模地震時において、地盤の液状化に起因するとされる杭基礎の被害事例が多く報告されている¹⁾。本研究では、液状化時の杭基礎の挙動を把握するため、せん断土槽を用いた1G場振動台実験を実施した。実験では地盤の液状化の影響を評価するため、乾燥砂地盤との比較を中心に検討した。また、液状化時を含めた地震時の杭に発生する応力を効率的に低減できる対策工の検討として、2タイプの杭補強方法を模型実験に取り入れ、その補強効果についての検討を行った。さらに、有効応力法にもとづく数値シミュレーションを実施し、補強効果の確認を行った。

2. 振動台実験の概要

2.1 実験方法

図-1に振動台模型の概要図を示す(本誌グラフィ写真-3参照)。せん断土槽は幅1.5m×奥行0.4m×高さ0.6mである。地盤は珪砂5号を用いた2層(上部層相対密度 $D_r=50\%$ 、下部層相対密度 $D_r=90\%$)からなる水平地盤を対象とした。地盤作製は砂を均等に撒き出すことのできる砂まき装置を用い水中落下法により5cmごとに

土層を作成し、所定の相対密度を確認した。飽和砂モデルにおける地下水位は地表面に設定した。なお、間隙流体は水を用いている。実験は地盤作成後一晩置いた後に開始している。杭模型は外径19.1mm、肉厚1.2mm、長さ0.6mの鋼管を4本(2×2)使用し、フーチングを支持している。杭間隔は0.15m(約7.8D)とし、杭上端はフーチングに剛結、杭下端は底版に固定とした。計測は図-1に示すように、加速度計、間隙水圧計、非接触変位計、ひずみゲージを用いて行った。各材料の基本物性を表-1に示す。なお、別途実施した予備試験より杭-フーチング系(地盤なし)の固有振動数は約11Hz、飽和砂地盤の微小変位時の固有振動数は約30Hzを確認している。

2.2 実験ケース

実験は表-2に示す4ケースを実施した。各ケースとも入力加速度波形は同一とした。なお、ケース3、4で実施した補強方法は、それぞれ図-2に示すような構造形態で、既設構造物への適用時の施工性等も考慮し、杭深度中間部の拘束度を高めることにより杭基礎+フーチング系全体の構造をより剛にすることを目的として採用したものである。ケース4の固有振動数(地盤なし)は約18Hzであった。また、補強体材料としてケース3の壁

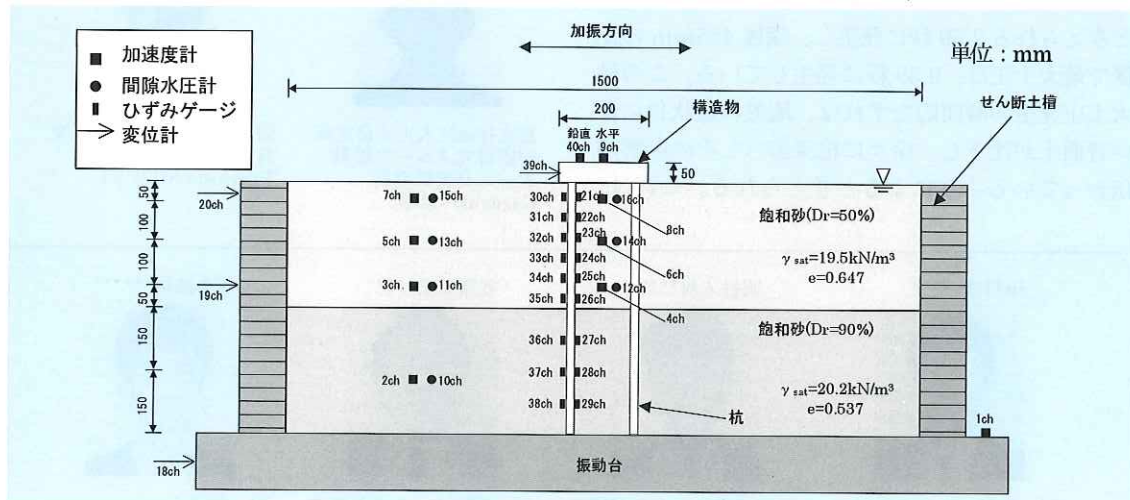


図-1 振動台実験模型図(ケース2の場合)

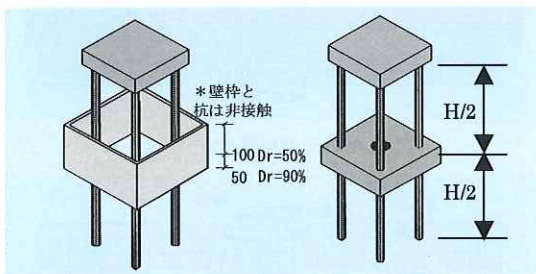
Model Shaking Table Test for Reinforcement Method of Pile Foundation Structure

表-1 使用材料の基本物性

項目		単位	物性値
地盤	土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.63
	最大密度 $\rho_{d \max}$	g/cm^3	1.75
	最小密度 $\rho_{d \min}$	g/cm^3	1.48
	最大粒径	mm	0.85
	均等係数		2.11
	乾燥単位体積重量 ($D_r=50\%$)	kN/m^3	15.7
	乾燥単位体積重量 ($D_r=90\%$)	kN/m^3	16.8
	飽和単位体積重量 ($D_r=50\%$)	kN/m^3	19.5
杭	飽和単位体積重量 ($D_r=90\%$)	kN/m^3	20.2
	単位体積重量	kN/m^3	76.5
	断面積	m^2	6.75×10^{-5}
	断面 2 次モーメント	m^4	2.71×10^{-5}
フーチング	弾性係数	kN/m^2	2.06×10^8
	重量	N	98.0
壁枠	アクリル製 (内寸法 $210 \times 210 \times 150 \text{mm}$, $t=5 \text{mm}$)		
	弾性係数	kN/m^2	3.55×10^6
板状固化体	石こう ($230 \times 230 \times 60 \text{mm}$)		
	弾性係数	kN/m^2	7.73×10^5

表-2 実験ケース

ケース名	地盤	補強仕様	入力波形
ケース 1	乾燥砂	無し	・正弦波 ・一定振幅: 0.8m/sec^2 ・周波数: 4Hz ・継続時間: 10sec + 前後の 1sec のデーパー部
ケース 2	飽和砂	無し	
ケース 3	飽和砂	壁枠	
ケース 4	飽和砂	板状固化	



(a) ケース 3(壁枠) (b) ケース 4(板状固化)

図-2 補強方法概要図

枠にはアクリル板を、また、ケース 4 の板状固化体には石こうを用いて模型を作成した。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥砂地盤と飽和砂地盤の比較

図-3, 4 に杭頭部 (GL-5cm) の曲げひずみ時刻歴を示す。ここで、ケース 2 については地盤側方部の過剰間隙水圧時刻歴を併記している。図-4 より飽和砂地盤では GL-15cm 程度の深さまでの範囲で加振開始後約 1 秒後に過剰間隙水圧が初期鉛直有効応力 σ'_{vo} に達し、完全液状化に至ったことがわかる。また、下部層 ($D_r = 90\%$) でも、過剰

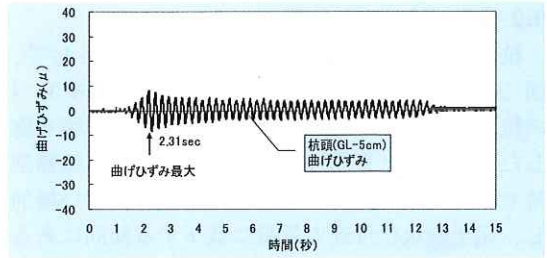


図-3 杭頭曲げひずみ (ケース 1)

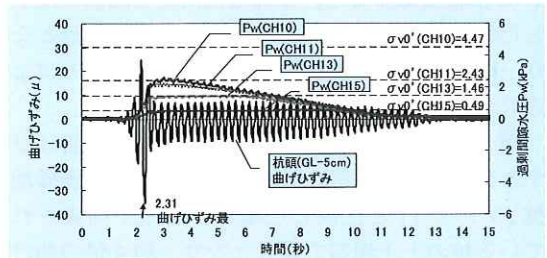


図-4 杭頭曲げひずみ (ケース 2)

表-3 最大曲げひずみ時刻の過剰間隙水圧比 (ケース 2)

深度	曲げピーク時刻	P_w (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	P_w/σ'_{vo}
GL-5cm(ch15)	2.31sec	0.33	0.49	0.68
GL-15cm(ch13)	2.31sec	0.74	1.46	0.50
GL-25cm(ch11)	2.31sec	1.00	2.43	0.41
GL-45cm(ch10)	2.31sec	1.01	4.47	0.23

間隙水圧比 (P_w/σ'_{vo}) がピーク時に 0.56 となっている。実験時の地盤状況は、液状化に伴い地表面に水が湧き上がり、加振終了時点で地表面沈下量が 1cm 程度生じた。図-3, 4 より杭頭部の曲げひずみ応答を比較してみると、ケース 1 はケース 2 に比べ最大値で 1/4 程度と小さく、振幅も比較的一定である。一方ケース 2 では加振開始後、過剰間隙水圧が増加するとともに曲げひずみも急激に上昇している。

表-3 にケース 2 の曲げひずみの最大値発生時刻での過剰間隙水圧比 (P_w/σ'_{vo}) を示しているが、上部層で 0.5~0.7 程度まで過剰間隙水圧比が上昇した時点で最大曲げひずみを示し、その後完全液状化に達すると曲げひずみは急激に低下している。これは、間隙水圧比が 0.5~0.7 の間で地盤から杭に作用する水平荷重が最大となり、その後地盤が完全液状化に至ったことにより流体状となることで、地盤が杭間をすり抜け、杭に作用する水平荷重が減少したためであると考えられる。その後 9 秒付近から徐々に曲げひずみが減少する傾向にあるが、これは地盤が一旦液状化した後の再堆積に伴い、剛性が回復することによるものと推察される。

3.2 補強対策による効果

杭に作用する応力を低減させる試みとして、図-2に示したような補強を施した。ケース3、4の杭頭曲げひずみ時刻歴を図-5に示す。補強を施した両ケースとも曲げひずみの発生状況は無補強時(ケース2)と同様に、液状化の進行に伴い増加し、完全液状化付近で急激に低下する傾向にあるが、無補強時に比べ最大曲げひずみは杭上下端で4~5割程度減少した。これは杭深度中間部に配置した補強材により、2層ラーメン的な構造となり、杭基礎構造がより剛なものになったことによるものと考えられる。

図-6に実験を実施した全ケースの最大曲げひずみ分布を示す。飽和砂地盤(ケース2)は乾燥砂地盤(ケース1)と比較した場合、回転が拘束されている杭の上下端部で最大となり、約4倍の曲げひずみが生じている。また、2種類の補強形式を

比較した場合、ケース3の方がケース4に比べ幾分大きい結果となった。ケース3では壁枠に囲まれた地盤は剛性低下が抑制され拘束効果はあるものの、ケース4に比べ拘束の度合いが小さい構造であるためと考えられる。

3.3 数値シミュレーション

今回採用した杭補強方法の補強効果を評価する目的により、飽和砂地盤モデル(ケース2、3、4)に関する数値解析を実施した。

解析はOkaらの砂の弾塑性モデル²⁾を用いた2次元有効応力解析プログラムLIQCA2D^{3,4)}を用いて実施した。

解析モデル図を図-7, 8, 9に示すが、地盤およびフーチングは平面ひずみ要素を用い、また、杭は梁要素でモデル化した。また、杭の補強に用いた壁枠(ケース3)は、本来3次元的な構造であるが、2次元で表現するために面外方向(加振方向に直角)の壁は梁要素で、また面内方向(加振方向)の壁は平面ひずみ要素でモデル化し、左右の辺のみを地盤要素と結合した2重要素とした。モデル境界

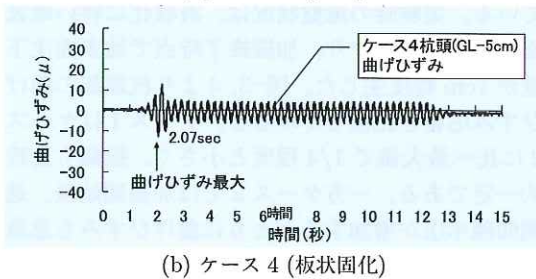
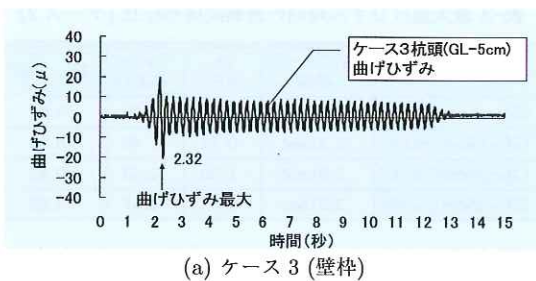


図-5 補強時杭頭曲げひずみ合

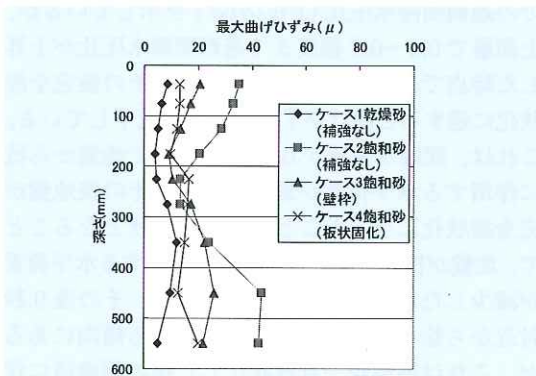


図-6 最大曲げひずみ分布

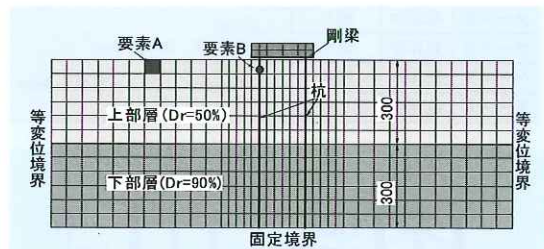


図-7 解析モデル図(ケース2)

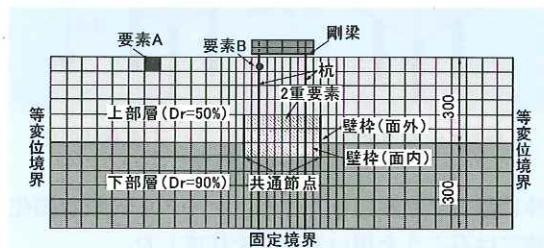


図-8 解析モデル図(ケース3)

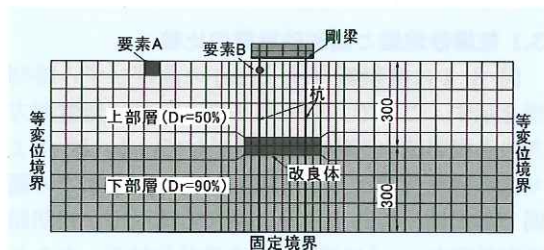


図-9 解析モデル図(ケース4)

表-4 地盤モデルパラメータ一覧

項目	下部層 $D_r=90\%$	上部層 $D_r=50\%$
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	20.20	19.50
初期間隙比 e_0	0.537	0.647
透水係数 k (m/s)	3.1E-04	3.1E-04
圧縮指数 λ	0.0250	0.0250
膨潤指数 κ	0.0025	0.0025
初期せん断剛性比 G_0/σ'_{mo}	1482.3	1046.6
破壊応力比 M_f	1.336	1.336
変相応力比 M_m	0.909	0.909
硬化パラメータ B_0	6500	2650
ダイレイタンスパラメータ D_0	1.0	3.0
ダイレイタンスパラメータ n	6.0	4.0
塑性規準ひずみ γ^P_r	0.004	0.006
弾性規準ひずみ γ^E_r	0.100	0.020
液状化強度比 $RL20$	0.32	0.17

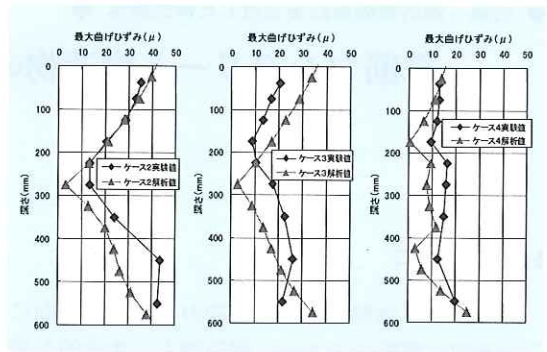
条件として、底面は固定とし、側面はせん断土槽をモデル化するために等変位境界とした。入力波形は、実験時と同様、表-2に示すものを用いた。

地盤モデルパラメータを表-4に示す。砂の弾塑性パラメータに関しては、繰返し三軸試験を想定した要素シミュレーションにより、室内試験より求めた液状化強度曲線および変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$) を再現できるよう設定した。その他詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

解析結果として、杭の最大曲げひずみ分布を実験結果と合わせ図-10に示す。杭の最大曲げひずみ分布は実験結果を概ね再現している。解析結果における最大曲げひずみはケース2に対してケース3では10%程度、ケース4では30%程度小さくなっており、この解析からも補強効果の有効性を確認することができた。

4. まとめ

本研究では、液状化時の杭の挙動を把握および杭の補強方法の効果を確認するため、1G場の模型振動実験および解析的な検討を行った。その結果、以下のことが得られた。



ケース2 (無補強) ケース3 (壁樁) ケース4 (板状固化)

図-10 最大曲げひずみ分布比較

- (1) 本研究で用いたモデルの場合、液状化によって杭に発生する最大曲げひずみは、乾燥砂地盤と比べ4倍程度大きくなった。また、飽和砂地盤での曲げひずみは過剰間隙水圧が上昇し完全液状化に達する直前で最大となり、その後は地盤の流体化に伴い急激に低下した。
- (2) 本研究で採用した壁樁、板状固化の2タイプの杭の補強方法において、杭の最大曲げひずみ低減効果を確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会杭基礎耐震設計研究小委員会：杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書, 2001.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 3) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., & Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 4) 渦岡良介：地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究, 岐阜大学学位論文, 2000.
- 5) 足立、浦野、三原：液状化時の杭基礎構造物の挙動および補強方法に関する一検討, 第47回地盤工学シンポジウム, 2002.

足立有史*



ハザマ技術研究所技術研究部土木研究室
Yuji ADACHI

浦野和彦**



同 技術研究部土木研究室
Kazuhiko URANO

三原正哉***



同 技術研究部土木研究室
Masaya MIHARA