

液状化時の杭基礎構造物の挙動及び補強方法に関する一検討

ハザマ 正会員 足立 有史  
 ハザマ 正会員 浦野 和彦  
 ハザマ 正会員 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<sup>1)</sup>。その被害形態も杭の性状、地盤構成等の違いにより異なる。本研究では、液状化時の杭基礎の挙動を把握するため、せん断土層を用いた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。また兵庫県南部地震以降、設計震度の見直しで補強対策等が要求されるケースが生じていることから、液状化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、著者が考える2タイプの対策方法を模型実験に取り入れ、その対策効果についての検討を行った。

2. 振動台実験の概要

図-1に振動台模型の概要図を示す。せん断土層は幅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 $Dr=50\%$ 、下部層相対密度 $Dr=90\%$ ）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。なお、間隙流体は水を用いている。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。各材料の基本物性を表-1に示す。また実験ケースとしては表-2に示す4ケースを実施した。各ケースとも入力波形は同一とした。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。なお、ケース3,4で実施した対策方法はそれぞれ図-2に示すような構造形式である。

3. 実験結果および考察

a) 乾燥砂地盤と飽和砂地盤の比較

図-3に乾燥砂地盤（ケース1）と飽和砂地盤（ケース2）の側方地盤部の加速度応答の比較を示す。また、図-4,5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については側方地盤部の過剰間隙水圧時刻歴を併記している。図-4よりケース2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 $vo'$ に達し、完全液状化に至ったことがわかる。また、下部層（ $Dr=90\%$ ）でも、過剰間隙水圧比（ $Pw/vo'$ ）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の加速度波形からもケース1では加振中ほぼ一定の振幅を示しているのに対し、ケース2では上部層において液状化に達した時刻から加速度応答がほとんどなくなり、その後

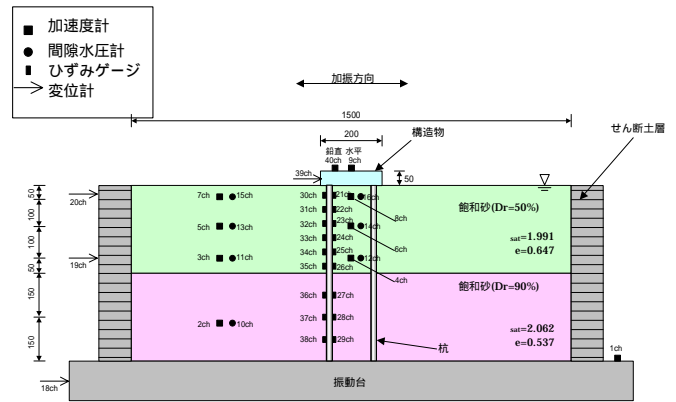


図-1 振動台模型の概要図(ケース2)

表-1 各材料の基本物性

項目		単位	物性値
地盤	土粒子の密度 s	t/m <sup>3</sup>	2.633
	最大密度 dmax	t/m <sup>3</sup>	1.75
	最小密度 dmin	t/m <sup>3</sup>	1.48
	最大粒径	mm	0.85
	均等係数Uc		2.11
	乾燥単位体積重量(Dr=50%)	kN/m <sup>3</sup>	1.60
	乾燥単位体積重量(Dr=90%)	kN/m <sup>3</sup>	1.71
	飽和単位体積重量(Dr=50%)	kN/m <sup>3</sup>	1.99
	飽和単位体積重量(Dr=90%)	kN/m <sup>3</sup>	2.06
杭	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	76.5
	断面積	m <sup>2</sup>	6.75 × 10 <sup>-5</sup>
	断面2次モーメント	m <sup>4</sup>	2.71 × 10 <sup>-9</sup>
	弾性係数	kN/m <sup>2</sup>	2.06 × 10 <sup>8</sup>
フーチング	重量	N	98.0
格子状枠	アクリル製(内寸法210mm × 210mm × 150mm, t=5mm)		
板状固化体	石こう(230mm × 230mm × 60mm)		
	弾性係数	kN/m <sup>2</sup>	7.73 × 10 <sup>5</sup>

表-2 実験ケース

ケース名	地盤	対策仕様	入力波形
ケース1	乾燥砂	無し	・正弦波 ・一定振幅: 0.8m/sec <sup>2</sup> ・周波数: 4Hz ・継続時間: 10sec+前後1secのテーパ部
ケース2	飽和砂	無し	
ケース3	飽和砂	格子状枠	
ケース4	飽和砂	板状改良	

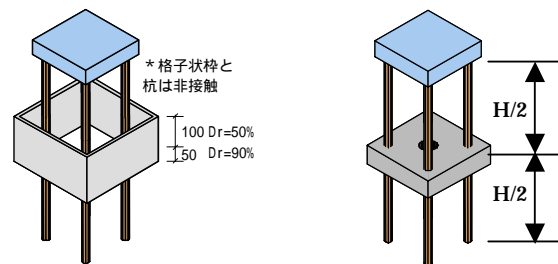


図-2 対策方法イメージ図

キーワード：振動台実験 杭 液状化 対策工法

連絡先：〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 TEL：0298-58-8813 FAX：0298-58-8819

過剰間隙水圧の低下とともに、応答が回復する傾向にある。

図-4,5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徐々に上昇している。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急激に低下している。これは、地盤が完全液状化に至ったことにより流体状になり、杭に作用する抵抗が減少したためであると考えられる。その後も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、再堆積に伴い密な状況になったことによるものと推察される。なお、曲げひずみは固定されている杭の上下端に向かうほど大きくなる傾向を示した。

**b) 杭の発生応力低減対策の効果**

図-6に杭に作用する最大曲げひずみを低減させる試みとして、図-2に示したような対策工を施したケース3,4の杭頭曲げひずみ時刻歴を示す。また、図-7に最大曲げひずみ分布をケース1,2の結果と合わせて示す。対策工を施した両ケースの曲げひずみの発生状況は無対策時(ケース2)と同様に、液状化の進行に伴い増加し、完全液状化後急激に低下しており、無対策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。杭の最大曲げひずみについては、ケース3の方がケース4に比べ若干大きい結果となった。この理由として、ケース4では固化体の設置により杭中間部を拘束することで、2層ラーメン的な構造となり、杭構造がより剛になったことによる効果が考えられる。一方ケース3では格子状枠による拘束効果はあるものの、ケース4に比べ拘束の度合いが低減された構造となっているものと考えられる。

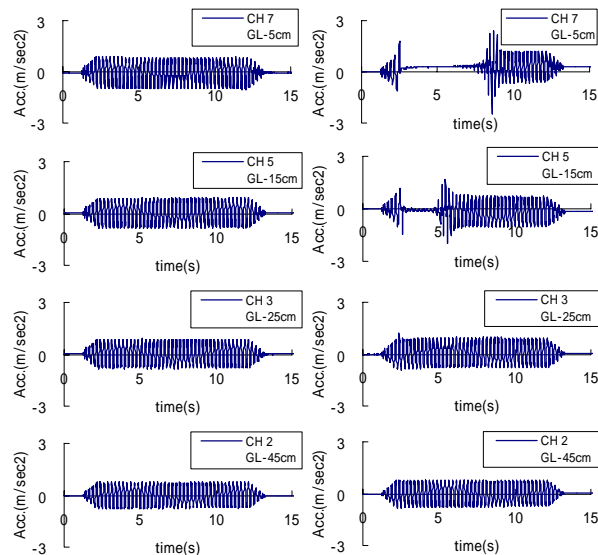
**5. まとめ**

本研究では、液状化時の杭の挙動を把握するため、水平地盤を対象に乾燥砂モデルとの比較を模型振動台実験を実施することにより検討を行った。その結果、液状化によって杭に作用する曲げひずみは、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ることを確認した。

また、今回用いた格子状枠、板状固化の2タイプの対策方法により、杭の最大曲げひずみを低減できることを定性的に確認できた。今後は、対策効果について、地盤条件、対策工設置位置の異なる条件についても検討し、対策効果の定量的な評価を行うことを予定している。

**【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) Iai. SIMILITUDE FOR SHAKING TABLE TESTS ON SOIL-STRUCTURE-FLUID MODEL IN 1-g GRAVITATIONAL FIELD, SOIL AND FOUNDATIONS Vol.29, No.1, 105-118, JSSMFE, 1989.



ケース1(乾燥砂)                      ケース2(飽和砂)  
図-3 地盤加速度応答

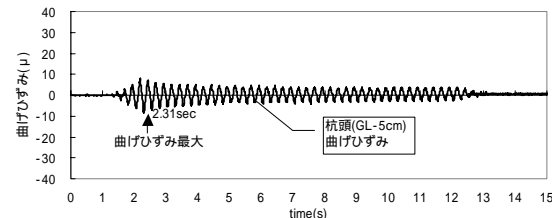


図-4 杭頭曲げひずみ(ケース1)

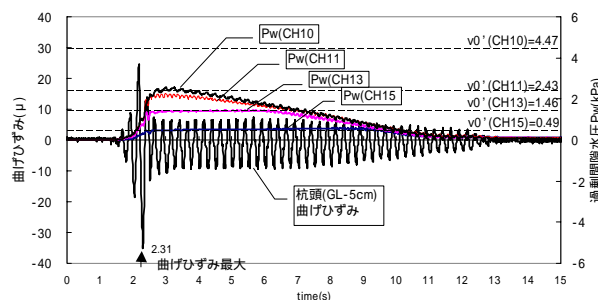
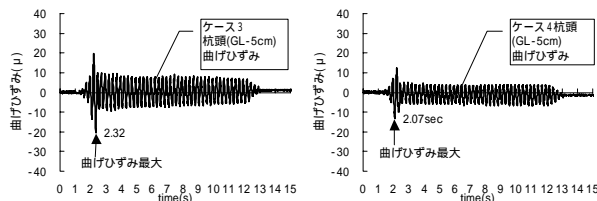


図-5 杭頭曲げひずみ及び過剰間隙水圧(ケース2)

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	Pw(kPa)	vo'(kPa)	Pw/ 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



ケース3(格子状枠)                      ケース4(板状固化)  
図-6 対策時杭頭曲げひずみ

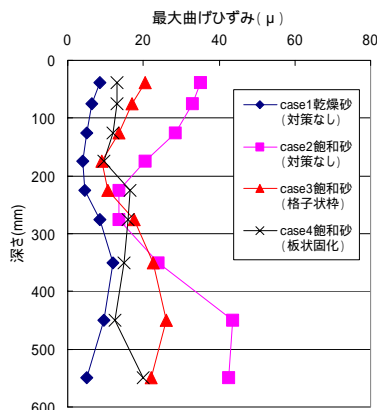


図-7 最大曲げひずみ分布図