

杭基礎周辺地盤の締固めによる液状化 対策に関する動的遠心模型実験

古関潤一¹・松尾修²・近藤浩市³・吉澤努⁴

¹正会員 東京大学生産技術研究所 第5部助教授 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 動土質研究室室長（〒305 茨城県つくば市大字旭1）

³ 正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 動力質研究室研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1)

⁴ 正会員 大日本コンサルタント(株)技術本部構造研究室(〒550 大阪府大阪市西区北堀江1-22-19)

深さ 9 m の平坦な液状化地盤中に直径 1 m の単杭がある場合を対象に、正弦波入力による縮尺 1/50 の動的遠心模型実験を計 4 ケース実施した。杭の周辺地盤を締固めることによってその部分の過剰間隙水圧が低減されれば、杭の曲げひずみと杭頭変位は無改良の場合とあまり変わらなかった。この理由として、締固め改良幅が大きくなるほど杭模型の固有振動数が富まり、その影響で杭頭の応答加速度が大きくなったことが考えられた。

Key Words: Dynamic centrifuge tests, pile, sand, liquefaction, compaction

1. はじめに

杭基礎周辺の砂地盤が液状化する恐れがある場合、従来は、液状化の程度に応じて砂地盤の地盤反力係数を低減した設計を行い、杭基礎の規模を大きくすることで対策がなされてきた。しかし、液状化層が極めて厚いときには、周辺の砂地盤の締固め改良を併用して地盤反力を確保したほうが、より効率的な対策が行える場合もあると考えられる。そこで、このような併用工法による液状化対策の効果について検討するために、周辺地盤を締固めた単杭模型の地震時挙動に関する動的遠心模型実験を、前報²⁾に引き続いて実施した。

2. 実験方法

深さ 9 m の液状化地盤中に直径 1 m の単杭がある場合を対象に、縮尺 1/50 の遠心模型実験を実施した。実験に用いた模型の例を図 1 に示す。表 1 に示すように締固め改良幅を 0~20 m (重力場換算) の範囲で 4 通りに変化させた模型を剛な箱形土槽の中に作成し、50 G の遠心加速度を作用させた状態で、60 Hz (重力場換算 1.2 Hz) の正弦波 20 波を用いて計 4 回の水平加振を行った。ただし、ケース 1 の 4 回目加振時には測定不良によりデータが得られなかった。

地盤は豊浦砂を用いて、相対密度約60%の未改良部を空中落下法により、また、相対密度約90%の締固め改良部

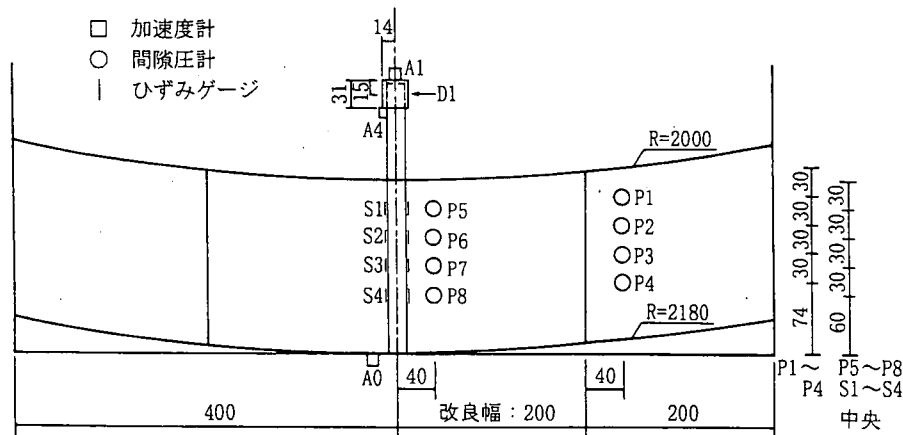


図1 ケース4の模型断面図と計測器配置(数値の単位:mm)

表-1 実験条件 (重力場換算値)

実験 ケース	締固め改良幅 (杭からの距離)	地盤の相対密度 (改良/未改良部)	加振加速度振幅* (1.2Hz 正弦波 20 波)
1	0m(無改良)	—/61%	105/216/326/#
2	20m(全面改良)	85%/—	93/209/316/334
3	5m	87%/59%	103/223/307/365
4	10m	87%/61%	112/221/326/359

*左から 1~4 回目加振時の順 (単位 cm/sec^2), #はデータ未計測。

表-2 杭の諸元 (重力場換算値)

杭径	1 m
杭長	9 m
曲げ剛性 (EI)	184,000 $\text{tonf}\cdot\text{m}^2$
杭自重	3.60 tonf
杭頭鉛直荷重	13.75 tonf

*杭底部を換算長さ 40m, 換算奥行き 10m の剛な土槽に固定した。

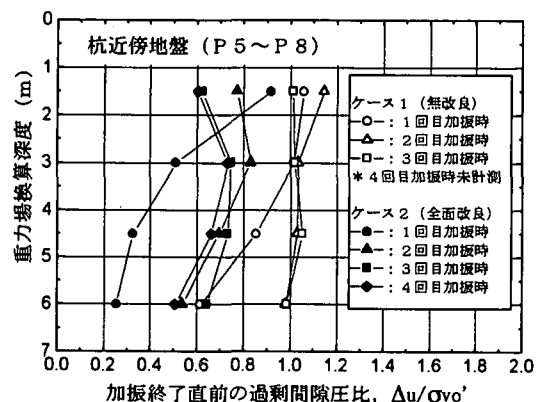


図2 杭近傍地盤の過剰間隙圧比 (ケース1,2)

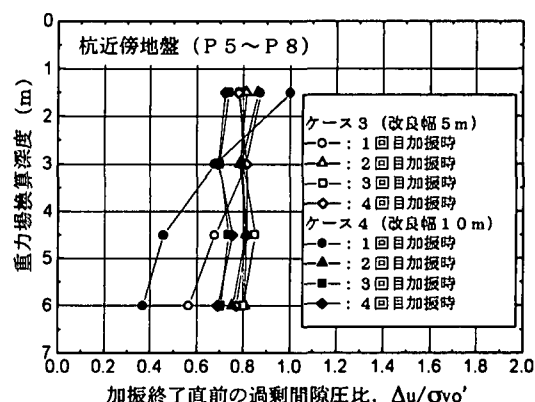


図4 杭近傍地盤の過剰間隙圧比 (ケース3,4)

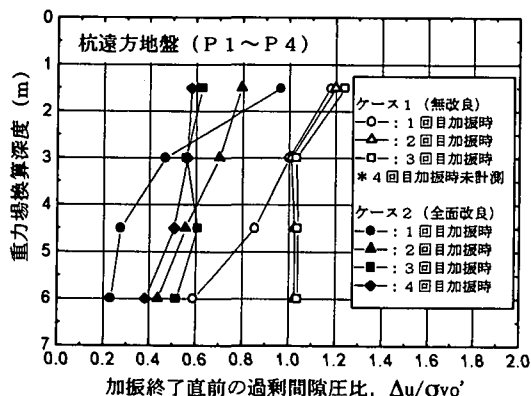


図3 杭遠方地盤の過剰間隙圧比 (ケース1,2)

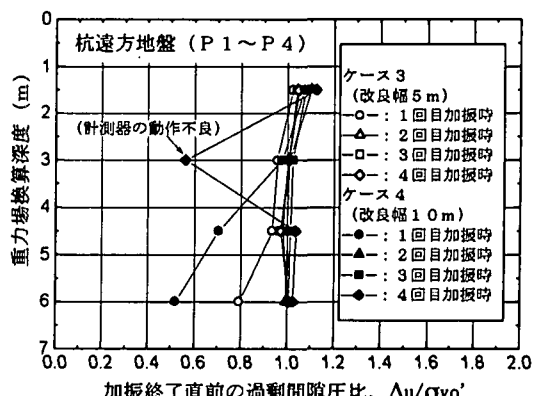


図5 杭遠方地盤の過剰間隙圧比 (ケース3,4)

を突き棒を用いて締固めることにより作成し、粘性 50cs (水の約 50 倍) のシリコンオイルで飽和させた。地盤中央部に肉厚 1.1mm, 外径 20mm の真鍮製パイプの頭部におもりを取り付けたものを杭模型として設置し、底部を土槽に固定した。杭模型の諸元を表-2 に示す。前報²⁾の実験では杭頭のおもりが大きすぎてロッキング応答が現れたため、今回は小さいおもりと肉厚の大きい杭模型に変更した。

3. 実験結果および考察

杭の近傍の地盤の過剰間隙圧比(図1のP5~P8におけ

る加振終了直前の平均値)の深度方向分布を図2に示す。無改良のケース1では、加振ステップ2以降で各深度における過剰間隙圧比が1.0を超えており、ほぼ全面的に完全な液状化が生じた。一方、全面改良のケース2では、過剰間隙圧比が最大0.8程度にとどまっており、各深度とも完全な液状化には至らなかった。これらのケースでは、杭の遠方の地盤(図1のP1~P4、ただしケース3では改良幅が小さい分だけ図の左側へ移動)についても、図3に示すようにそれぞれ同様な傾向が見られた。これらに対し、改良幅5m(重力場換算値、以下同様)のケース3と10mのケース4では、図5より杭の遠方の未改良地盤(ケース3

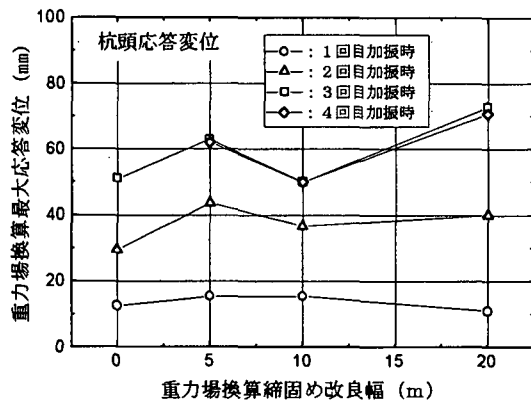


図6 締固め改良幅と杭頭最大応答変位の関係

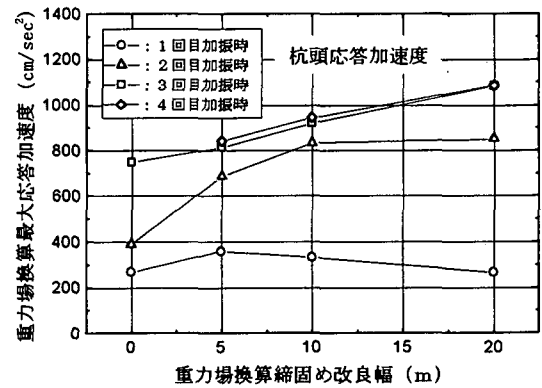


図9 締固め改良幅と杭頭最大応答加速度の関係

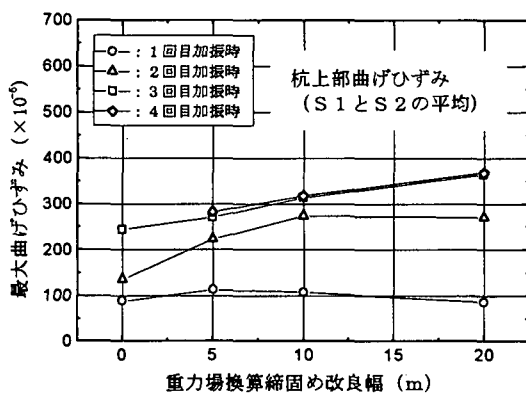


図7 締固め改良幅と杭上部の最大曲げひずみの関係

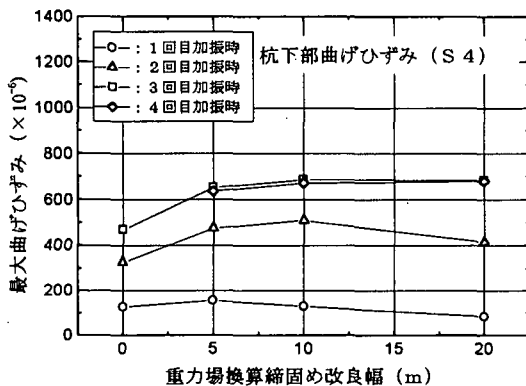


図8 締固め改良幅と杭下部の最大曲げひずみの関係

では改良幅が小さい分だけ P1~P4 を図-1 の左側へ移動) はケース1と同様な挙動を、図-4 より杭の近傍の改良地盤ではケース2と同様な挙動を示した。すなわち、過剰間隙圧に関しては、締固め改良の効果が比較的に明確に現れた。

しかしながら、図-6 より、杭頭の応答変位(最大値)には締固め改良の効果は必ずしも現れなかった。すなわち、加振ステップ1では、全面改良のケース2における応答変位が最も小さかったが、他のケースに関しては、無改良の

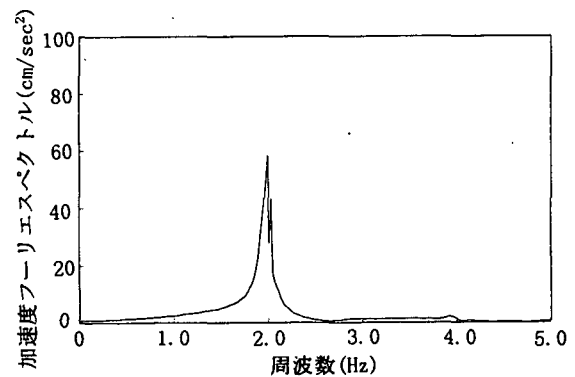


図10 地盤のない状態における杭の自由振動時の周波数特性

ケース1の応答変位が改良幅5m及び10mのケース3及び4よりも小さかった。加振ステップ2では、無改良のケース1の応答変位が最も小さくなり、加振ステップ3でも同様であった。逆に、全面改良のケース2は、加振加速度が大きくなると他のケースよりも応答変位が大きくなった。同様な傾向が、図-7,8 に示した杭の曲げひずみ(最大値、ただし杭上部はS1とS2のひずみゲージに配線ミスがあったためこれらの最大値の平均)についても見られた。

上記の理由として、図-9 に示したように、同じ加振ステップでは締固め改良幅が大きくなるほど杭頭の応答加速度が大きくなったことが考えられる。そこで、加振加速度と杭頭応答加速度のフーリエスペクトル比を比較したところ、1.2Hz(重力場換算値、以下同様)の成分の増幅度は各ケースともほぼ同じ1.8倍程度であったが、2.4Hzの高周波成分に違いが見られた。すなわち、加振加速度波形の1.2Hzの成分を基準とした場合、加振ステップ2以降の杭頭の応答加速度波形に含まれる2.4Hzの成分は、無改良のケース1では0.4倍程度、改良幅5mのケース3では0.5倍程度、改良幅10mのケース4では0.7倍程度、全面改良のケース2では1.0倍程度と順に大きくなった。なお、加振加速度波形に含まれる2.4Hzの成分は、1.2Hzの成分の0.1倍程度でしかない。地盤のない状態での杭模型の固有振動数は図-10 に示したように約2.0Hzであったが、改良幅が大

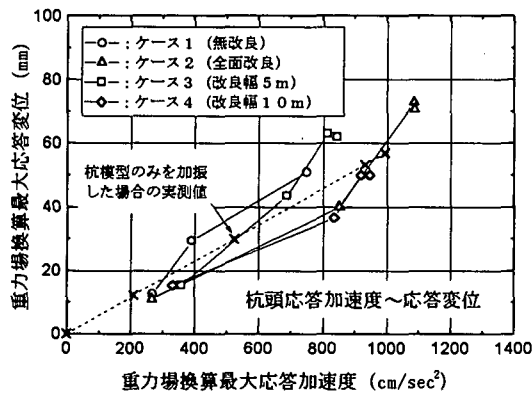


図11 杭頭最大応答加速度と杭頭最大応答変位の関係

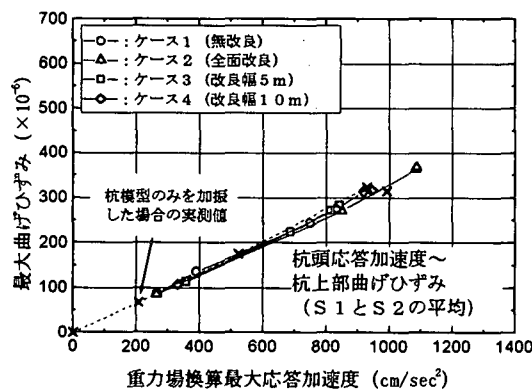


図12 杭頭最大応答加速度と杭上部の最大曲げひずみの関係

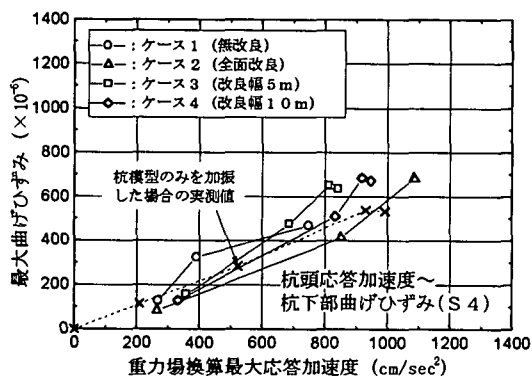


図13 杭頭最大応答加速度と杭下部の最大曲げひずみの関係

きくなって地盤の剛性が相対的に高まるほど、その影響を受けて杭模型の固有振動数が2.0Hzよりも高くなり、今回の加振波形に若干含まれる高周波成分が著しく増幅されたことが考えられる。実際の地震波のように不規則な波形を入力した場合の挙動について、今後検討する必要がある。

最後に、杭頭応答加速度が同程度である場合の締固め改良の効果について検討する。杭頭の最大応答変位は、図11より、400cm/sec²以上の杭頭応答加速度では無改良のケー

ス1のほうが全面改良のケース2よりも大きくなった。また、同図より、改良幅5mのケース3と改良幅10mのケース4は、それぞれ無改良および全面改良の場合と同じ傾向を示した。一方、杭の最大曲げひずみは、図12,13より、杭の上部(S1とS2の平均)では締固め改良の効果がほとんど見られなかったのに対し、杭の下部(S4)では、ケース1の加振ステップ3を除いて、改良幅が大きくなるほど曲げひずみが生じにくくなる傾向が得られた(S3も同様)。以上より、同程度の杭頭最大応答加速度を基準とした場合、周辺地盤の締固め改良による曲げひずみの低減効果は杭上部よりも下部で顕著に現れ、また、改良幅が10m以上の場合に杭頭応答変位が低減される効果が現れたことがわかる。なお、図11～13には地盤のない状態で杭模型を加振した結果も示したが、杭下部の曲げひずみは、地盤のある状態のほうがかえって大きくなる場合があり、その影響が杭頭応答変位にも現れた。この理由として、地盤の応答変位により杭下部が強制変形させられた可能性が考えられる。

5. まとめ

正弦波入力による今回の動的遠心模型実験結果では、杭の周辺地盤を締固めることによってその部分の過剰間隙圧が低減されたが、同程度の加振加速度に対する杭の曲げひずみと杭頭変位は、無改良の場合とあまり変わらなかった。この理由として、締固め改良幅が大きくなるほど杭模型の固有振動数が高まり、その影響で杭頭の応答加速度が大きくなったことが考えられた。一方、同程度の杭頭応答加速度に対しては、締固めの効果が杭の下部の曲げひずみに顕著に現れ、ある改良幅以上では杭頭応答変位も低減された。

なお、ここでは液状化した地盤で側方流動が発生しない場合を検討対象としたが、傾斜した地盤において側方流動が発生する場合の実験結果について文献3)で報告している。また、動的遠心模型実験における締固め地盤の作成方法に関する基礎的な検討結果について文献4)で報告している。

参考文献

- 1) 古関潤一、古賀泰之、林裕士、小沢凡夫、吉澤努：杭基礎構造物の液状化対策に関する検討、第28回土質工学研究発表会、1993。
- 2) 古関潤一、高橋晃浩、松尾修、小沢凡夫、吉澤努：杭基礎構造物の液状化対策に関する検討(その2)、第29回土質工学研究発表会、1994。
- 3) 吉澤努、古関潤一、松尾修、近藤浩市：側方流動が杭基礎に及ぼす影響に関する動的遠心模型実験、第32回地盤工学研究発表会投稿中、1997。
- 4) 高橋晃浩、古関潤一、松尾修：動的遠心模型実験における締固め地盤作成方法が液状化特性に及ぼす影響、第29回土質工学研究発表会、1994。