

裏込め盛土土圧と杭間隔が砂地盤上の 杭基礎構造物の地震時挙動に与える影響

高橋章浩¹・桑野二郎²・竹村次朗²

¹正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

本論文では地震時の裏込め盛土荷重を受ける杭基礎構造物の変位および杭近傍地盤の変状過程を、構造物に作用する裏込め盛土荷重および基礎の杭間隔に着目して遠心力載荷装置を用いて実験的に調べた。その結果、常時から偏載荷重を受けている地盤中に位置する杭基礎構造物は、振動初期に前面側の地盤剛性の低下と共に変位が蓄積し、さらに背面側地盤の液状化によってより大きな変位が発生すること、裏込め盛土の液状化は構造物に作用する土圧の増加を引き起こし、杭に生じる曲げモーメントの増加に大きな影響を与えること、杭に作用する地盤変位による荷重は杭中心間隔が杭径の 2.5 倍以上の時、杭間隔の影響を受けず、ほぼ同じとなることを明らかにした。

Key Words : pile foundation, backfill, earth pressure, pile spacing, liquefaction, centrifuge, model test

1. はじめに

偏載荷重が作用している地盤において、地震時に液状化によって構造物が大きな被害を受けることがある。先の兵庫県南部地震でも、常時から偏載荷重を受けている杭式横棧橋や橋梁基礎に大きな変位が生じた^{例え}¹⁾。本研究では裏込め盛土による偏載荷重を受ける杭基礎構造物に液状化によって生じる地盤の残留変形が与える影響を調べることを目的としており^{2) 3)}、本論文では特に裏込め盛土土圧と杭間隔に着目して行った遠心力載荷装置を用いた模型実験の結果について報告する。

2. 実験概要

実験は杭基礎構造物変位のメカニズムを主に裏込め土圧作用の観点から調べるシリーズ1と、杭間隔の影響を調べるシリーズ2の2つのシリーズに分けて行った。どちらのシリーズも底部地盤の試料は豊浦砂とし、裏込め材についてはシリーズ1では硅砂8号を、シリーズ2では豊浦砂を用いた。それぞれの試料の物理特性を表1に示す。硅砂8号は豊浦砂に比べ粒径が小さく、透水係数も小さい。地盤の作成は空中落下法により行い、相対密度は約50%とした。振動実験は50Gの遠心加速度場にて行い、間隙流体には振動、透水両現象に関する時間の相似率を一致させるため水の50倍の粘性係数

表1 試料の物理特性

| 試料 | 豊浦砂 | 硅砂8号 |
|-----------------|-------|-------|
| 土粒子密度 G_s | 2.64 | 2.65 |
| D_{50} (mm) | 0.19 | 0.10 |
| D_{30} (mm) | 0.16 | 0.07 |
| D_{10} (mm) | 0.14 | 0.04 |
| 均等係数 U_c | 1.56 | 2.93 |
| 曲率係数 U_c' | 0.95 | 0.97 |
| 最大間隙比 e_{max} | 0.973 | 1.333 |
| 最小間隙比 e_{min} | 0.609 | 0.703 |

を持つメチルセルロース水溶液を用い、水面は盛土上面に設定した。実験システムを図1に示す。シリーズ1では地表面を容器底面と平行としたが、遠心模型に作用する遠心加速度方向が容器底面に垂直ではないことから、シリーズ2では地表面を遠心加速度方向に直交するように曲率をつけて作成した。用いた模型杭は外径10mm、肉厚0.2mmのステンレス製で、EIはシリーズ1で13.3N.m²、シリーズ2で14.3N.m²である。上部構造物模型はシリーズ1では高さ60mm、幅30mmの矩形とし、シリーズ2では高さ60mm、幅は上部で24mm下部で40mmの逆T字型のアルミ製とし、奥行きはともに148mmとした。杭は奥行き方向に一列に構造物へ剛結し、杭先端は容器底面に固定した。シリーズ1では、杭間隔sと杭径dの比s/dを3.5、シリーズ2では2.5、5.0とした。なおそれぞれのs/dの杭の本数はそれぞれ4、6、3である。実験ケースは表2の通りである。図1に示した

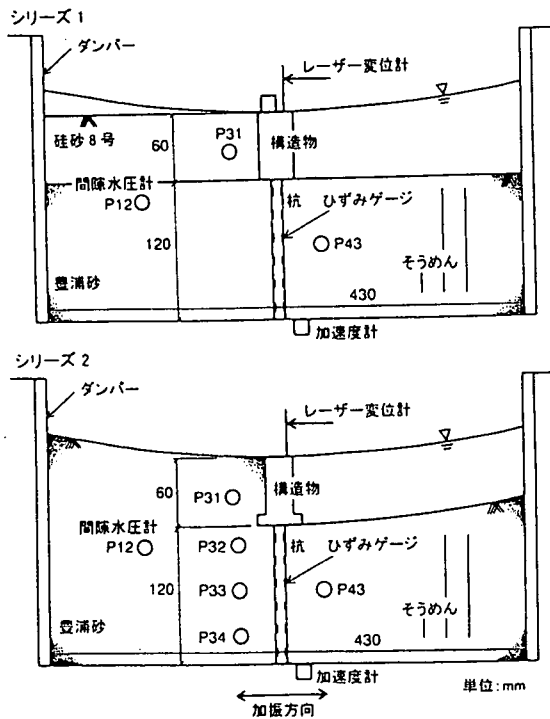


図1 実験システム

表2 実験ケース

| ケース番号 | 構造物への裏込め土圧の作用 | 杭間隔比 s/d | |
|-------|---------------|----------|-----|
| シリーズ1 | 1 | あり | 3.5 |
| | 2 | なし | 3.5 |
| シリーズ2 | 3 | あり | 2.5 |
| | 4 | あり | 5.0 |

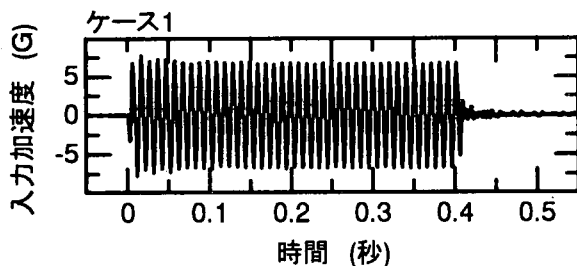


図2 入力波加速度の時刻歴

実験システムを構築し 50G の遠心加速度場にて、図 2 に示すような最大加速度約 6~7G(実物スケールで約 120~140gal)の 100Hz の正弦波を図 1 に示す方向に 40 波入力して振動実験を実施した。なおケース2では構造物に作用する裏込め土圧の影響を排除するため、裏込め盛土と構造物の間に剛な仕切板を設置した。

3. 実験結果と考察

(1) 偏載荷重が作用する地盤の変位によって生じる構造物変位について

はじめに地盤変位が杭基礎にのみ影響を与えるシリーズ1のケース2に着目し、地盤の変位とそれに伴う構造物の変位蓄積過程について説明する。図3にケース

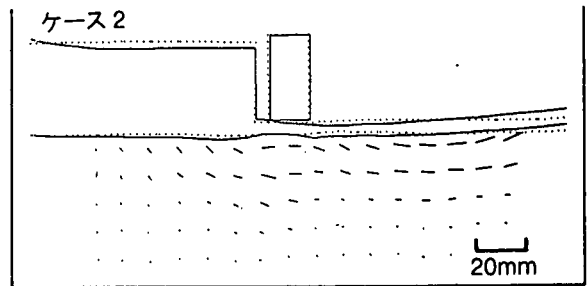


図3 残留変位ベクトル(シリーズ1)

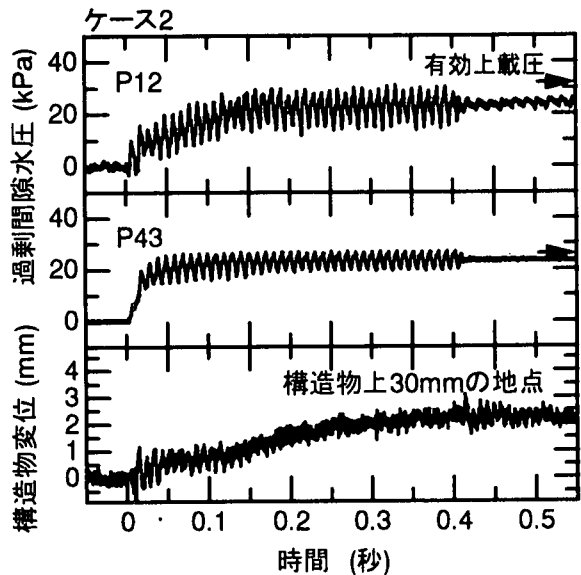


図4 過剰間隙水圧と構造物変位の時刻歴(シリーズ1)

2の地盤の残留変位ベクトル図を示す。これらは容器全面のガラスと地盤との間に設置した標点付きのそうめんを振動前後に写真撮影することによって得たもので、ベクトル長は実測の2倍としてある。地盤の変位は構造物下部を中心に発生しており、地表面に近づくにつれてその値が大きくなっている。図4は構造物上端より30mm上の地点のターゲットの変位と、P12、P43の各点での過剰間隙水圧の時刻歴を示したものである。なお有効上載圧は矢印で示してある。構造物の変位を見ると、振動開始直後から増加している。この時、前面側地盤(P43)の過剰間隙水圧から判断して、ほぼ液状化しており、前面側地盤の剛性が著しく低下した時に構造物の変位が大きく発生していることがわかる。振動開始0.15秒後付近で再び構造物変位の増加割合が若干増加しているが、このとき盛土直下地盤(P12)の過剰間隙水圧はほぼ有効上載圧に達しており、これに伴い発生した地盤の側方変位により構造物変位が増加したと考えられる。このように直接盛土土圧が構造物に作用してなくても地盤変位により構造物変位が増加していく過程が確認された。

(2) 構造物に作用する裏込め盛土土圧の影響について

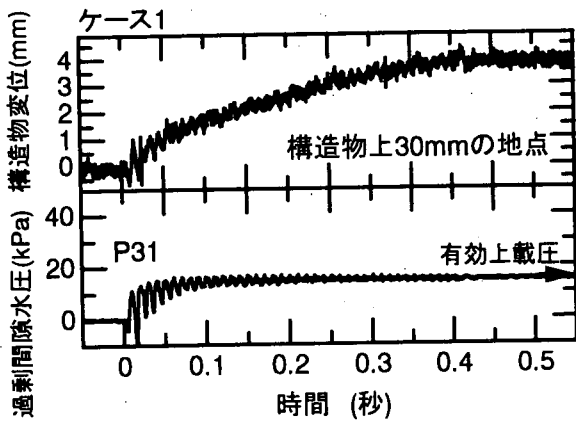


図5 構造物変位と地盤内間隙水圧の時刻歴(シリーズ1)

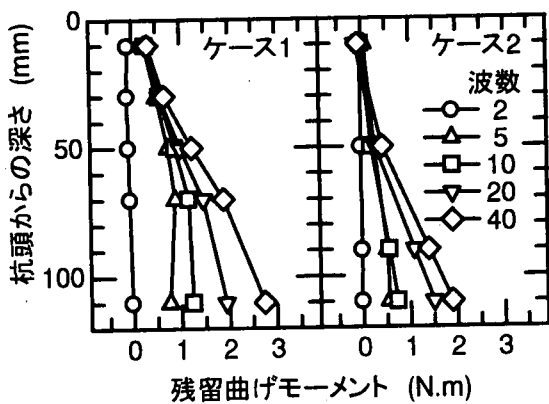


図6 杭に生じる残留曲げモーメントの変化(シリーズ1)

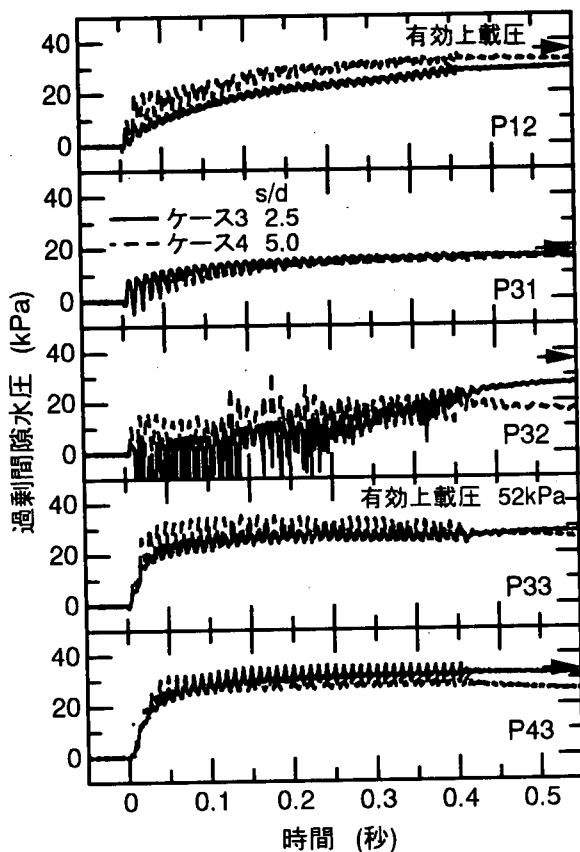


図7 地盤内の過剰間隙水圧の時刻歴(シリーズ2)

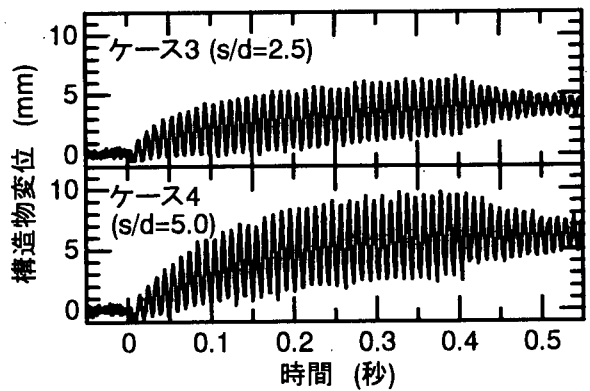


図8 構造物変位の時刻歴(シリーズ2)

シリーズ1のケース1の構造物に取り付けたターゲットの変位とP31地点(構造物背面)での過剰間隙水圧の時刻歴を図5に示す。裏込め盛土の過剰間隙水圧は振動開始後すぐに急増し、ほぼ有効上載圧に等しくなって液状化している。これにより構造物に作用する土圧は増加し、その分ケース1の構造物の残留変位はケース2(図4)と比較すると大きくなったものと考えられる。

図6にケース1,2の2,5,10,20,40波目の残留曲げモーメントの深さ方向分布を示す。残留曲げモーメントは、曲げモーメントを1波平均した値と定義した。ケース2の杭頭付近ではその値はほとんど増加していないが、ケース1では増加している。両者の残留曲げモーメントの差が、裏込め盛土土圧の増加の影響を表していると考えられ、その差は決して小さくない。また、どちらのケースも地盤変位の大きい底部砂層上部では波数とともにある一定値に収束しており、地盤変位により杭に作用する荷重が極限值となっていることもわかる。

(3)杭間隔の影響について

シリーズ2(ケース3,4)での杭近傍P12, P31, P32, P33, P43の各点での過剰間隙水圧の時刻歴を図7に示す。P12, P31, P43では最終的には過剰間隙水圧比にしてほぼ1となっている。一方、裏込め側杭近傍をみると、杭頭付近のP32では過剰間隙水圧は大きく振動しながら蓄積し、振動終了時にほぼ有効上載圧の半分まで上昇している。しかし、比較的深い背面側P33に着目すると、振動開始後すぐに同じ深さの前面側P43とほぼ同じ過剰間隙水圧まで上昇し、有効上載圧の半分程度でほぼ定常状態となり、あまり振動していない。このように杭の変位が大きな地盤上部では構造物振動が過剰間隙水圧の蓄積に与える影響が大きいといえる。

図8にレーザー変位計で測定した構造物上部のターゲットの変位の時刻歴を示す。どちらも振動開始時の変位の増加割合は大きく、振動とともに徐々にその割合は小さくなっている。また、杭間隔が大きく、杭1本あたりに作用する裏込め土圧による荷重が大きなケース4でより

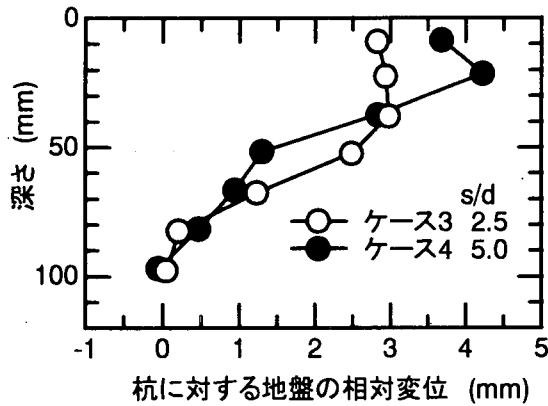


図9 杭近傍地盤の杭に対する相対変位(シリーズ2)

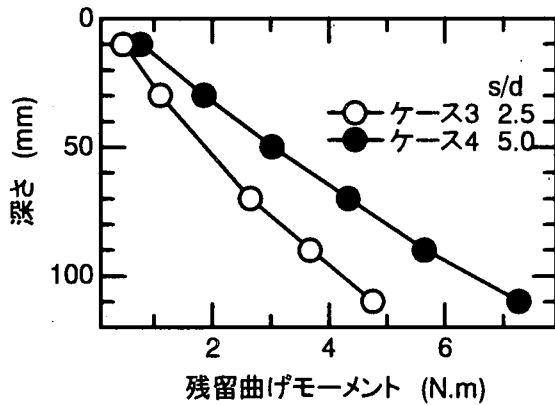


図10 振動終了直後に杭に生じている曲げモーメント(シリーズ2)

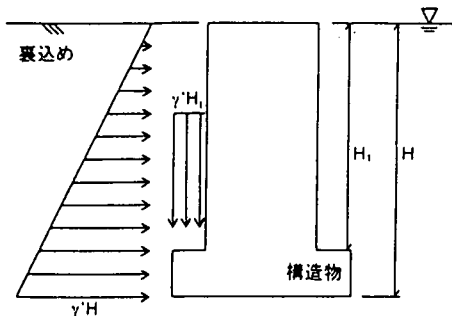


図11 仮定した構造物に作用する土圧

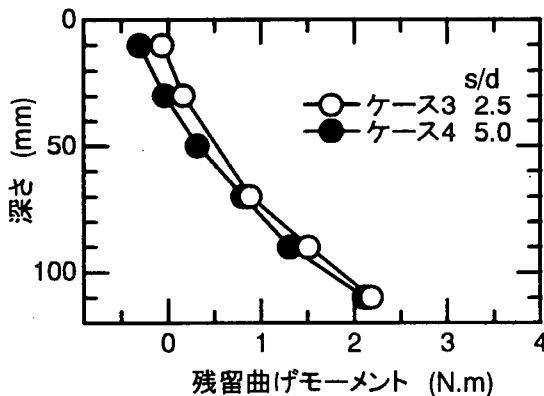


図12 裏込め土圧による成分を差し引いた振動終了時の残留曲げモーメント(シリーズ2)

大きな構造物の残留変位が生じている。振動後の杭に対する杭近傍地盤の相対残留水平変位を図9に示す。若干のばらつきはあるものの、その差異は小さく、分布形状はほぼ同じとなっている。

一方、図10は振動終了時に杭に生じていた曲げモーメントの深さ方向分布を示したものであるが、どちらのケースでも杭先端付近でもっとも大きくなっており、その値は $s/d=5.0$ の方が大きく、裏込め土圧の影響を強く受けたものとなっていると考えられる。そこでその影響を取り除くため、裏込めが全域液状化したと仮定して、図11に示すような土圧分布から求めた裏込め土圧による曲げモーメント成分を図10の値から差し引いたものを図12に示す。このように曲げモーメントの深さ方向分布は両者でほぼ一致し、また図9に示すように、そのときに生じている地盤の相対変位もほぼ等しいことから、今回実験を行った $s/d=2.5$ 以上では、地盤の変位によって杭に作用する荷重に対する杭間隔の影響はほとんどないと考えられる。

4. まとめ

今回報告した実験から以下のような結論が得られた。すなわち、

- 1) 常時から偏載荷重を受けている地盤中に位置する杭基礎構造物は、振動初期に前面側の地盤剛性の低下と共に変位が蓄積し、さらに背面側地盤の液状化によって大きな変位が発生する。
- 2) 裏込め盛土の液状化は、構造物に作用する土圧の増加を引き起こし、杭に生じる曲げモーメントを大きく増加させる。
- 3) 杭近傍において発生する過剰間隙水圧は、杭頭付近では杭および構造物の振動の影響を大きく受ける。
- 4) 今回実験を行った範囲($s/d=2.5$ 以上)では、杭に作用する地盤変位による荷重は杭間隔の影響を受けず、ほぼ同じ大きさとなる。

参考文献

- 1) Hamada, M. et al.: Liquefaction-Induced Ground Displacement and Its Related Damage to Lifeline Facilities, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the Jan. 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp81-97, 1996
- 2) 高橋ら: 地震時の砂地盤の側方流動と構造物の応答が杭基礎に与える影響, 土木学会第51回年次学術講演会, III-A, pp286-287
- 3) 高橋ら: 裏込め盛土を有する砂地盤上の杭基礎構造物の地震時挙動における杭間隔の影響, 土木学会第52回年次学術講演会, III