

遠心振動実験による杭頭絶縁基礎の 地震時挙動に関する研究

田地 陽一¹・張 至鎬²・福武 毅芳³・中井 正一⁴・関口 徹⁵・
木全 宏之⁶・西村 晋一⁷

¹清水建設(株) 技術研究所主任研究員
(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail:y.taji@shimz.co.jp

²元 清水建設(株) 技術研究所副主任研究員 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

³清水建設(株) 技術研究所グループ長 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail:kiyoshi.fukutake@shimz.co.jp

⁴千葉大学大学院工学研究科教授 (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33)

E-mail:nakai@faculty.chiba-u.jp

⁵千葉大学大学院工学研究科助教 (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33)

E-mail:tsekiguc@faculty.chiba-u.jp

⁶清水建設(株)土木技術本部グループ長 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館)

E-mail:kimata@shimz.co.jp

⁷清水建設(株)土木技術本部主査 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館)

E-mail:s.nishimura@shimz.co.jp

筆者らは、地震時における杭応力や上部構造物の慣性力を低減することを目的とし、杭頭と基礎スラブを剛結しないで完全に切り離す基礎構造を想定した「杭頭絶縁基礎」を提案している。本研究では、「杭頭絶縁基礎」の地震時挙動を検討するために、9 本杭を有した基礎～構造物～地盤系の遠心振動実験を実施した。杭頭と基礎スラブの離隔距離は杭径 D の 0.5 倍、杭間隔は $2.5D$ とした。

30g 場の遠心振動実験により、1) 杭頭絶縁基礎は杭頭を剛結した基礎よりも構造物の加速度応答が低減されること、2) 構造物と杭頭の間地盤にジオテキスタイルを介在させることにより構造物の沈下や構造物と地盤の相対沈下が抑制されること、が明らかとなった。

Key Words : *Pile foundation, Pile head joint, Dynamic centrifuge test, Settlement, Seismic isolation*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、構造物に大きな加速度が作用することにより既製コンクリート杭の杭頭部がせん断破壊する被害が多く発生した¹⁾。これは杭頭部に応力が集中する剛結型の杭頭接合法に起因するものであり、以降、杭頭ピン接合や半剛接構造など杭頭固定度を低減する新しい接合方法やデバイスの研究開発^{例えば 2) ~8)}が行われてきた。

このような中、筆者らは、杭頭と基礎スラブを剛結しないで完全に切り離す基礎構造を想定した「杭頭絶縁基礎」の提案を行っている^{9), 10)}。前報¹¹⁾では、遠心振動実験により、杭頭とスラブが杭径分の間隔 ($1D$) で離れている4本杭の杭基礎構造物を対

象として耐震性に関する検討を行った。本報では、杭頭とスラブ間の地盤の層厚が薄くなるほど杭への荷重伝達率が大きくなるという実験結果⁹⁾から、杭頭とスラブ間を杭径 D の0.5倍 ($0.5D$) 離れた杭基礎構造物を対象として遠心振動実験により耐震性の検討を行った。実験は、実構造物に近づけるために9本杭の群杭基礎構造物を対象とした。さらに、地盤内の杭頭レベルにジオテキスタイルを敷設することにより、構造物の残留沈下を抑制する効果についても検討した。

2. 遠心実験の概要

(1) 遠心模型の概要

遠心振動実験は、長さ770mm、幅470mm、高さ370mmのせん断土槽を用い、遠心加速度30gで実施した。模型砂地盤は、地盤材料として7号珪砂 ($G_s=2.635$, $e_{max}=1.185$, $e_{min}=0.712$, $D_{50}=0.147\text{mm}$) を用い空中落下法により相対密度 $Dr=60\%$ となるように作製した。遠心振動実験は乾燥砂地盤で行った。

杭基礎模型は、外径17mm、肉厚1mm、長さ268mmの真鍮製パイプを用い9本杭構造とした。杭芯距離は42.5mm (2.5D) とし、杭先端はセメント系改良体 (せん断波速度 $V_s=300\text{m/s}$) に37mm根入れし固定した。杭頭部に真鍮製のキャップをすることにより、杭内部に砂が入らないようにした。上部構造物模型は、長さ136mm、幅136mm、高さ88mmのアルミ製ブロックとした。上部構造物模型の重量は4.4kg (実物換算1,190kN) で、接地圧は実物換算で 69.9kN/m^2 である。構造物模型の底面には珪砂7号を両面テープにより貼り付けた。

図-1に杭頭絶縁基礎の遠心振動実験における計測器配置図 (後述するCase1の場合) を示す。構造物から157mm離れた位置に加速度計を3深度設置した。地盤の沈下と水平変位を計測するために、レーザー変位計を2箇所設置した。上部構造物については、水平加速度、鉛直加速度、ならびにレーザー変位計により水平変位と3箇所において鉛直変位を測定した。模型杭のひずみ計測は、P1杭には7深度に、P2

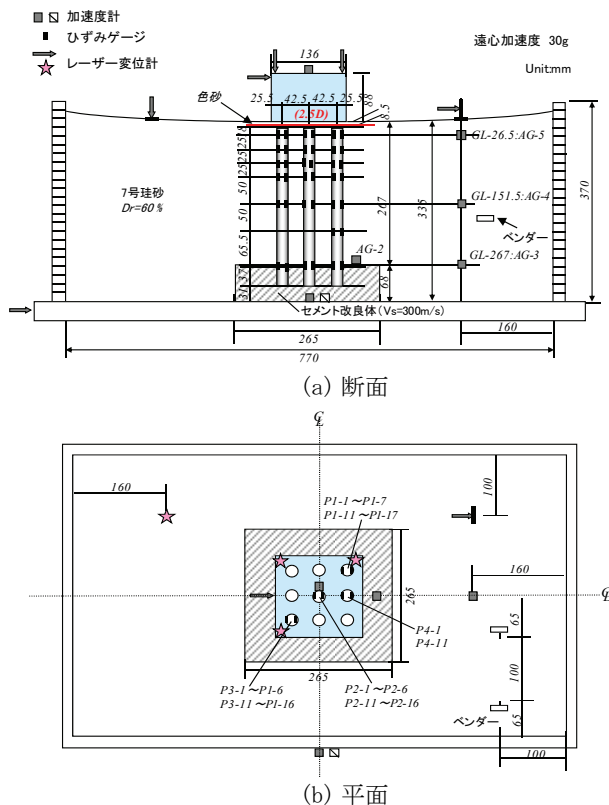


図-1 杭頭絶縁基礎に対する遠心振動実験の計器配置 (Case1)

杭, P3杭には6深度, P4杭には1深度にひずみゲージを設置した。ひずみゲージは中空杭内部の所定の位置に貼りつけ、リード線は杭下端部から杭外に出した。地盤のせん断剛性の把握ため、模型地盤中にベンダーエレメントを設置し、せん断波速度を計測した。さらに、上部構造物と杭頭の間に色砂を敷くことで実験後の残留沈下状況の把握を試みた。

(2) 実験ケース

表-1に実験ケース一覧を示す。実験は4ケースである。Case1, Case2は上部構造物と杭頭を0.5D (8.5mm) 切り離した実験 (杭頭絶縁基礎) である。Case2は地震後の残留沈下の抑制を期待して、杭頭レベルの地盤内に204mm×204mm寸法のジオテキスタイルを敷設した実験である。Case3は杭頭部を構造物に剛結合した実験, Case4は直接基礎とした。上部構造物の下端の位置は地表面としており、地盤の埋め込みは考慮していない。ベンダーエレメントにより計測された模型地盤のせん断波速度 V_s は、133~148m/sでややばらつきはあるものの概ね同一の地盤条件であると評価できる。入力波は60Hz10波 (実物換算2Hz) の正弦波であり、最大加速度は9g (実物換算で300Gal) を目標とした。以下、計測値は実換算値を示す。

3. 実験結果

(1) 加速度応答特性

図-2に各実験ケースにおける入力加速度、地表面および構造物上部の加速度応答時刻歴を示す。それ

表-1 実験ケース一覧

Case	実験条件	実験模型 (単位:mm)
1	- 杭頭絶縁 (0.5D) - 地盤V_s:140m/s - セメント改良体V_s:280m/s - 入力加速度:309Gal	
2	- 杭頭絶縁+ - ジオテキスタイル - 地盤V_s:133m/s - セメント改良体V_s:280m/s - 入力加速度:298Gal	
3	- 杭頭剛結 - 地盤V_s:148m/s - セメント改良体V_s:302m/s - 入力加速度:336Gal	
4	- 直接基礎 - 地盤V_s:138m/s - 入力加速度:243Gal	

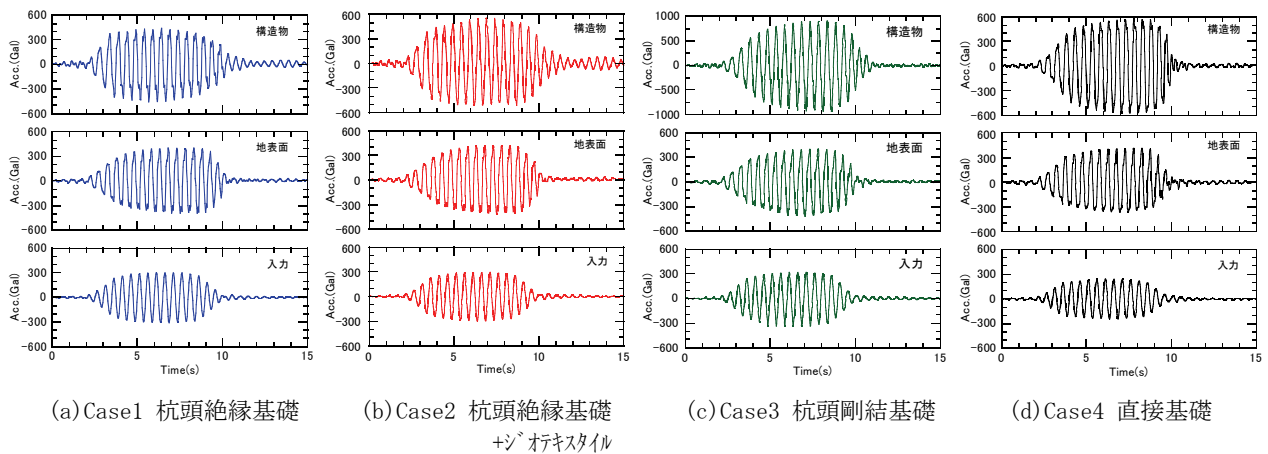


図-2 各実験ケースにおける入力加速度、地表面および構造物上部の加速度応答時刻歴

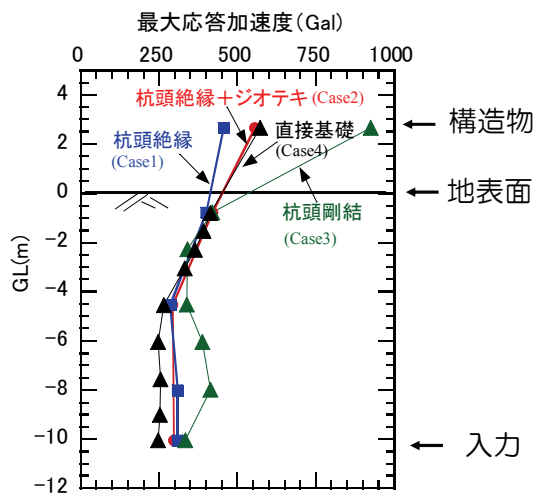


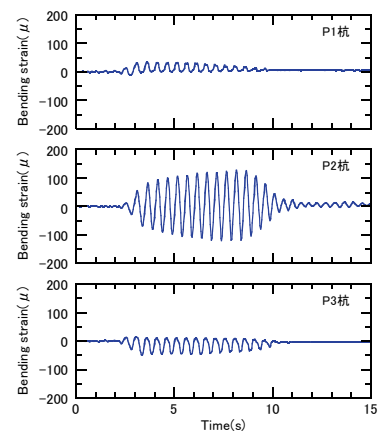
図-3 各実験ケースにおける最大加速度の深度方向分布

ぞれの実験ケースの入力最大加速度は、Case4の直接基礎の実験では243Gal、Case1～Case3では309Gal、298Gal、336Galである。図-3に最大加速度の深度分布を示す。地盤中ではGL-10m～-4mではほぼ一定の加速度応答を示し、GL-4m以浅では深度が浅くなるにつれ加速度応答が増加する傾向を示す。この傾向はどの実験ケースにおいてもほぼ同様である。

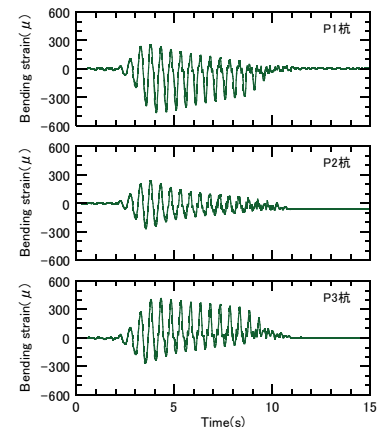
上部構造物の加速度応答値は、Case3の杭頭剛結基礎では900Galを超えている。一方、Case1、Case2の杭頭絶縁基礎では、600Galを下回る値となっており、杭頭剛結基礎と比較して最大加速度が30%低減している。Case1の杭頭絶縁基礎の実験、Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎の実験とCase4の直接基礎の実験を比較すると、特にCase1の杭頭絶縁基礎において構造物の加速度応答が小さくなっている。

(2) 杭基礎の挙動

図-4にCase3の杭頭剛結基礎の実験とCase1の杭頭絶縁基礎におけるP1杭～P3杭の杭頭部の曲げひずみの時刻歴を示す。Case3の杭頭剛結基礎では、端部



(a) Case1 杭頭絶縁基礎



(b) Case3 杭頭剛結基礎

図-4 杭頭部の曲げひずみの時刻歴

のP1杭、P3杭が中心杭P2杭よりも曲げひずみが大きい。一方、Case1の杭頭絶縁基礎では中心杭P2杭が端部のP1杭、P3杭よりも曲げひずみが大きい。端部の杭であるP1杭、P3杭の曲げひずみは、基線を片側にシフトしながら振動成分が加わった時刻歴を示している。P1杭とP3杭では曲げひずみの符号が逆であることから構造物の沈下とともに、杭頭絶縁基礎における端部の杭頭部が外側に開こうとする挙動をしていると推定できる。

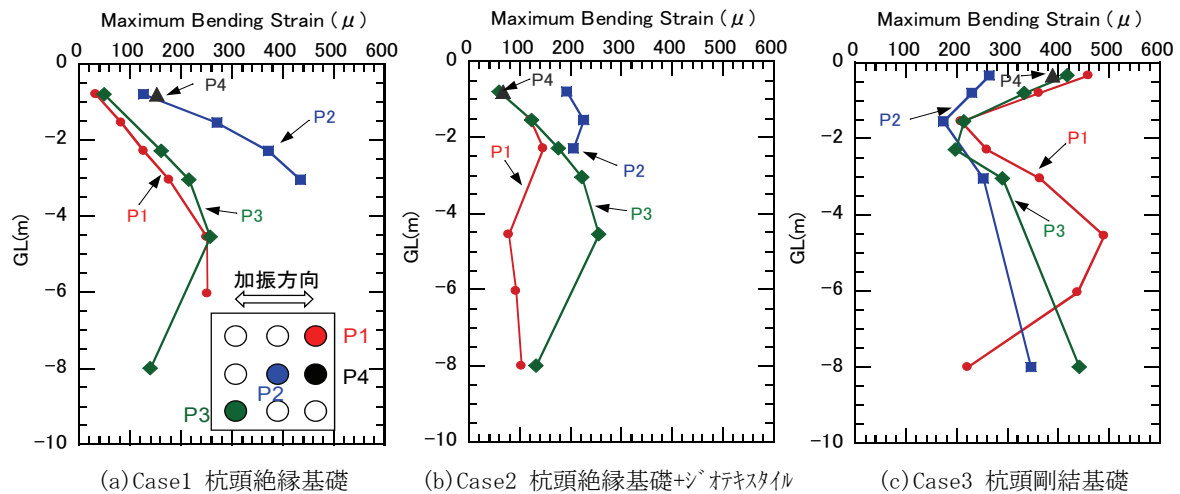


図-5 各実験ケースにおける杭基礎の最大曲げひずみの深度方向分布

図-5に各実験ケースにおける杭基礎の最大曲げひずみの深度方向分布を示す。Case1の杭頭絶縁基礎とCase2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎における杭の曲げひずみは、Case3の杭頭剛結基礎と比較し、端部のP1杭、P3杭においてほぼ全深度で低減している。ただし、中央杭P2杭の曲げひずみは、Case1の杭頭絶縁基礎が他のケースより大きくなっている。こうした杭頭絶縁基礎の中央杭P2杭に大きな曲げひずみが生じる現象は、同図から、杭頭にジオテキスタイルを敷設することにより抑えられることがわかる。

図-6に各実験ケースにおける杭頭の軸力の時刻歴を示す。Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎では端部のP1杭の杭頭に貼り付けたゲージが断線したため計測できていない。軸力は遠心载荷直前の1g時点を初期値とした。Case3の杭頭剛結基礎では中央杭より端部の杭において軸力の変動が大きくなっている。一方、Case1の杭頭絶縁基礎では端部のP1杭、P3杭では軸力の変動は見られない。中央杭P2杭では、構造物の沈下の影響を受け圧縮側にシフトしながら振動成分が加わる時刻歴を示している。加振終了後には520kNの軸力が残留しており、中央杭に軸力分担が集中していることがわかる。Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎では、構造物の沈下が抑制されるため、圧縮側に軸力がシフトしておらず、残留軸力は260kNと50%に抑えられている。

(3) 変位応答特性

図-7に実験ケースごとの構造物と地盤の沈下量を示す。地盤の沈下量は構造物から157mm(実換算値4.7m)離れた一般地盤の沈下量である。構造物部の沈下量は、構造物頂部の3箇所で計測した鉛直変位(絶対沈下量)の平均値として算定した。地盤の沈下量は、Case1とCase2ではほぼ同じであるが、Case4の直接基礎の実験では、入力加速度が他のケースより小さいため、他のケースより約15mm小さくなっている。構造物の沈下量は、Case4の直接基礎

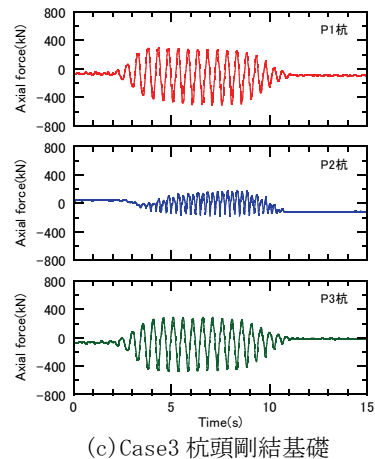
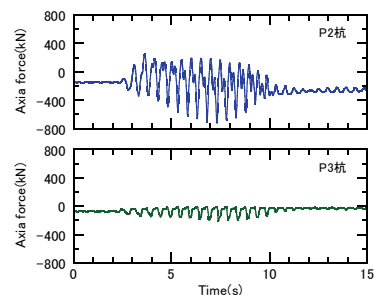
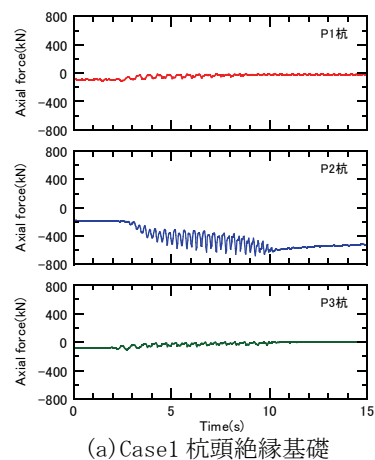


図-6 各実験ケースにおける杭基礎の軸力の時刻歴

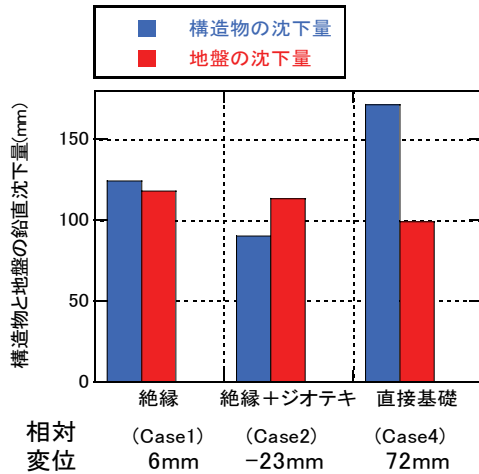


図-7 各実験ケースにおける構造物と地盤の沈下量

では160mm, Case1の杭頭絶縁基礎では120mm, Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎の実験では90mmとなっている。直接基礎の沈下量と比較して, Case1の杭頭絶縁基礎では25%, Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎では40%, 構造物の沈下が抑制されることがわかる。地盤と構造物の相対沈下量を比較すると, Case4の直接基礎の実験より, Case1, Case2の杭頭絶縁基礎の実験が小さくなっている。特に, Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎の実験では, 一般地盤の沈下量より構造物の沈下量が小さくなっている。

写真-1は, Case1の杭頭絶縁基礎の振動実験において, 実験終了後にシリコンオイルを地盤に浸潤させながら模型地盤を掘り出し, 杭基礎周辺地盤の変形の様子を撮影したものである。模型地盤中の赤線は色砂で, 加振前は杭頭レベルに配置していた。杭縁から0.5D離れた地盤までは, 杭から離れるにつれ徐々に沈下量が大きくなり, 0.5Dの地点では不連続な部分が生じ, 0.5D以上離れるとほぼ一定の沈下量になっている。

写真-2は, Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎の実験後の模型断面を撮影したものである。ジオテキスタイルの影響により, 杭頭部と杭間地盤の沈下量の差は小さく, ジオテキスタイルを敷設した領域では構造物と地盤との相対沈下はほとんどない。

杭頭と構造物の間に介在する地盤は, 常時(本実験では遠心加速度が30gに達した時)に応力集中が発生し, 破壊に対して限界付近まで達していると思われる。地震時には絶縁部分に存在する土が繰返し変形を受け, 杭頭上部の土が杭の周囲に移動し, 構造物が大きく沈下したと解釈できる。しかしながら, Case2では, ジオテキスタイルを杭頭絶縁部に介在させているため, 地盤が繰返し変形に抵抗できず移動する欠点を補うことができ, 地盤の変位が拘束される。すなわち, 地震時における地盤の移動を, ジオテキスタイルのテンション抵抗によって防いだため, 構造物の沈下を抑制し, ジオテキスタイルを敷設した領域では構造物と地盤の相対沈下を抑えることができたと推定できる。

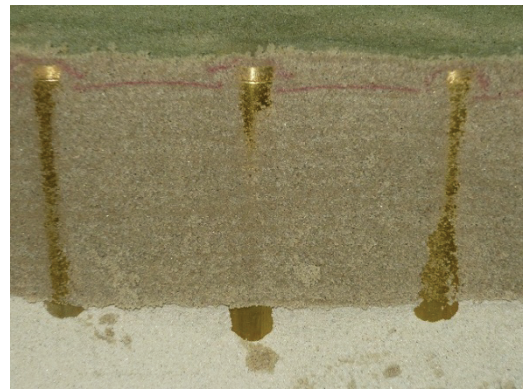


写真-1 模型地盤における実験後の断面 (Case1)

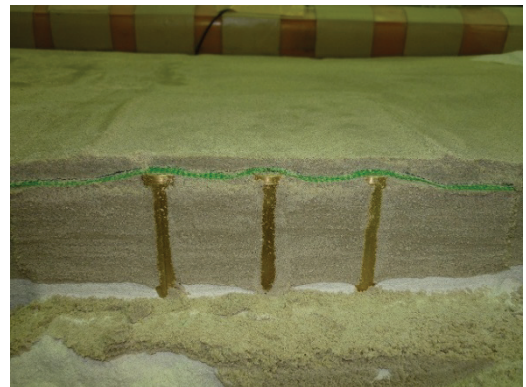


写真-2 模型地盤における実験後の断面 (Case2)

構造物の残留水平変位については, Case1の杭頭絶縁基礎では8mm, Case2のジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎では8mm, Case3の杭頭剛結基礎では0mm, Case4も直接基礎では9mmであり, 本実験の加振レベルでは構造物の残留水平変位は小さく実験ケースごとの差はない。

4. まとめ

本研究では, 地震時における杭応力や上部構造物の慣性力を低減することを目的とした杭頭と基礎スラブを剛結しないで完全に切り離す基礎構造である「杭頭絶縁基礎」について, 9本杭を有した基礎～構造物～地盤系の遠心振動実験を実施し, 地震時挙動の検討を行った。杭頭と基礎スラブ(構造物の底面)の離隔距離は杭径 D の0.5倍, 杭間隔は $2.5D$ とした。入力 $9g$ (実換算 $300Gal$)の正弦波10波とした。

遠心振動実験は, ①杭頭絶縁基礎, ②杭頭と構造物底面の間の地盤にジオテキスタイルを介在させた杭頭絶縁基礎, ③杭頭剛結合基礎, ④直接基礎, の4ケース行った。以下に結論を示す。

- 1) 杭頭と構造物を0.5D離れた杭頭絶縁基礎では, 300Gal入力をした場合, 杭頭を剛結した基礎より構造物の加速度応答が30%低減される。
- 2) 杭頭絶縁基礎では, 杭頭剛結基礎と比較して, 端

部の杭において加振中に生じる曲げひずみが低減され、中央の杭では曲げひずみが増大する。構造物の沈下の影響により、杭頭絶縁基礎では中央の杭において軸力分担が大きくなる。杭頭と構造物の間の地盤にジオテキスタイルを介在させることにより、中央の杭で発生する杭応力を低減することができる。

- 3) 300Gal入力をした場合、杭頭絶縁基礎を有した構造物の沈下量は、直接基礎の沈下量と比較して、25%低減する。さらに、杭頭と構造物の間の地盤にジオテキスタイルを介在させることにより、構造物の沈下量は40%低減し、構造物と地盤の相対沈下量も抑えることができる。

参考文献

- 1) 阪神淡路大震災調査報告編集委員会：阪神淡路大震災調査報告，建築編-4，木造建築物，建築基礎構造，1998.
- 2) 杉村義広，平出努：高強度プレストレストコンクリート杭とパイルキャップ接合部の回転拘束度および破壊耐力に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集報告集，第373号，pp. 111-120，1987.
- 3) 辻 英一，松尾雅夫，他：杭頭新接合法（P/R-PILE）の開発，日本建築学会大会学術講演集（九州），B-1，pp. 725-726，1998.
- 4) 斎藤 一，吉松敏行，他：半固定杭頭接合法の開発，日本建築学会大会学術講演集（関東），B-1，pp. 497-502，1999.
- 5) 小林勝己，益永英治，森山英治，他：場所打ち杭ー基礎梁部分架構における杭頭半剛接合の力学的特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 533号，pp. 107-114，2000.
- 6) 大槻 明，田蔵隆，眞野英之，他：球面接触部を有する杭頭接合法の開発（その1-2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 451-454，2001.
- 7) 和智勝則，佐野真一郎，前田 昇，他：既製コンクリート杭の杭頭簡易接合法に関する研究（その1, 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），B-1，pp. 521-524，2002.
- 8) 小林恒一，小椋仁志，和田 章：杭頭と基礎フーチング間のすべりを考慮した「杭頭縁切り工法」について（その1 設計法とモデル解析），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 457-458，2004.
- 9) 眞野英之，中井正一，他：杭頭とラフトの間に地盤の薄層を設けた支持杭基礎の沈下挙動（その1~2），第42回地盤工学研究発表会，pp. 1319-1322，2007.
- 10) 関口 徹，中井正一，眞野英之，他：杭頭とラフトの間に地盤の薄層を設けた支持杭基礎の沈下挙動（その3~4），第43回地盤工学研究発表会，pp. 1207-1210，2008.
- 11) 張 至縞，田地陽一，福武毅芳，中井正一，関口徹，他：遠心模型実験による杭頭絶縁基礎の地震時挙動の検討，第13回日本地震工学シンポジウム（筑波），CD-Rom，2010.

A STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF FOUNDATION WITH GAP BETWEEN PILE AND SLAB USING CENTRIFUGE MODEL TEST

Yoichi TAJI, Jiho JANG, Kiyoshi FUKUTAKE, Shoichi NAKAI, Toru SEKIGUCHI, Hiroyuki KIMATA and Shinichi NISHIMURA

For reducing the stress in piles and the inertia force of the superstructure during an earthquake, a foundation was assumed in which pile heads were completely separated from the slab without rigidly connecting them. In order to verify the effectiveness of the method, centrifuge model tests were conducted using a nine-pile structure/ground system. In case of piles heads were separated from the slab combined with geotextile, stress in piles was reduced and residual settlement was also controlled. This is attributable to the tensile force of geotextile.