

◆ 報 文 ◆

杭頭にヒンジを有する橋脚基礎の液状化地盤への適用性に関する実験的検討

谷本俊輔* 杉田秀樹** 高橋章浩*** 滝内友則****

1. はじめに

1.1 背景

土木構造物を支える基礎は、大規模地震に対しても所定の耐震性能を満足するように設計しなければならない。しかしながら、杭基礎の場合、液状化が生じる地盤においては、地盤反力の低下によって杭頭部や液状化層境界付近で断面力が大きくなるため、杭本数、杭径、鉄筋量を増やすなどの対処が必要となり、極めて不経済な設計となる場合がある。

一方、杭頭部での応力緩和を考慮した新しい基礎構造は、耐震性能を確保した上で従来の基礎に比べて建設コストを縮減できる可能性があり、具体的には、杭頭をヒンジ結合・ローラー結合する方法、半剛結合する工法など、杭頭の固定度を積極的に下げる方法が考えられる。新しい杭頭結合方法に関する研究は特に建築分野で活発であり¹⁾、すでに実用化された例もあるが、土木分野では未だに発展途上の段階にあることから、現在、その適用性について検討を行っているところである²⁾。

本報では、杭頭をヒンジ結合した基礎の効果とその動的応答特性を把握するため、上部構造—基礎—地盤系を対象とした動的遠心模型実験を行い、液状化地盤に対する適用性について検討した結果を示す。

1.2 弾性床上的の梁を用いた理論解析

ここで、弾性床上的の梁の解析解を通じて、杭頭結合条件が杭の曲げモーメントおよび変位に与える影響を把握しておく。式の展開は割愛して結果のみを示すが、水平方向地盤反力係数 k_H の地盤に支持される曲げ剛性 EI 、直径 D の半無限長の杭に対し、杭頭に水平力 P が作用した場合、杭の変位 $u(z)$ 、曲げモーメント $M(z)$ は図-1のようになる。ここに、 β は杭の特性値であり、式(1)

で表される。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad (1)$$

同図より、杭頭にヒンジを有する基礎は、杭頭をフーチングに剛結合した基礎に比べ、以下の特徴があることが分かる。

- (1) 深さの無次元量 $\beta z = \pi/4$ の位置で曲げモーメントの無次元量が極大値0.64を示す。すなわち、最大曲げモーメントの発生位置は深くなるものの、その値は2/3倍程度となる。
- (2) 杭頭部で変位の大きさが2倍となる。

実際には、杭が有限長であること、フーチングの前面抵抗の存在、地盤抵抗の非線形性、群杭効果などにより、このとおりととは限らないが、定性的な傾向は十分にとらえているはずである。橋梁のように、隣り合う下部構造間の相対変位を抑える必要のある構造物では、杭頭の固定度を下げる工法を適用するにあたっては、杭頭部の水平変位の大きさが懸念されるところである。

2. 実験対象橋梁と実験条件

2.1 対象橋梁の設定と相似則

実験対象は、12.2mの橋脚高さを有する連続鋼桁橋のうちの一基の下部構造および地盤³⁾であ

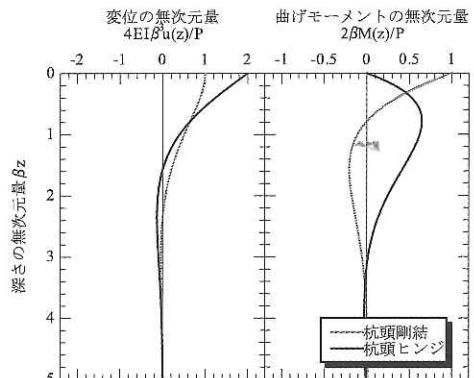


図-1 杭の変位および曲げモーメントの解析解

Experimental Study on Seismic Performance of Bridge Foundation with Hinge at Pile Head

り、その基礎は平面寸法が8.5m×8.5mのフーチング、3×3配列で杭径1.2mのRC場所打ち杭からなる。この橋脚基礎の橋軸方向を検討対象とした。ただし、この橋梁は地震時水平力分散構造を有する連続桁橋であるが、これを実験で再現することは困難であるため、1基の下部構造のみを切り離したものを検討対象とした。

動的遠心模型実験では、1/Nの縮尺模型に、相似則を考慮して、N倍の加速度を作用させることにより、実物大規模のものと同価なデータを得ることができる。実験条件の設定にあたっては、以下の事項に関する相似則を考慮した。

- ・ 上部構造の質量および重心位置。質量はレベル2地震時の上部構造の等価重量相当とし、重心位置は慣性力作用位置とした。
- ・ 橋脚の質量および剛性。剛性は降伏時の割線剛性とした。
- ・ フーチング幅、厚さおよび質量。
- ・ 杭の直径、打設間隔、長さおよび曲げ剛性。曲げ剛性はひび割れ前の値に設定した。
- ・ 地盤の層厚、液状化強度および液状化層 (G.L.-5~13m) の透水係数。砂層の相対密度は、実験試料が20回の繰返しで両振幅ひずみDA = 5%に達するせん断応力比 R_{L20} と、検討対象橋梁の地盤のN値から推定される繰返し三軸強度比 R_L が等しくなるように設定した。

これにより、地盤および橋の固有振動特性、砂層の液状化強度特性や基礎に生じる断面力などは、想定する実橋梁とほぼ等価なものとなる。

2.2 実験条件

実験模型の縮尺は1/70、その概要は図-2に示すとおりであり、前述のように、杭頭を剛結合したケースおよび杭頭にヒンジを設けたケースの2ケースについて報告する。実験は、独立行政法人土木研究所の大型動的遠心力載荷試験装置により、70Gの遠心力場で行ったものである。

模型地盤は、上から順に相対密度 $Dr = 60\%$ の乾燥砂層、 $Dr = 60\%$ の飽和砂層、正規圧密粘土層、 $Dr = 85\%$ の飽和砂層、 $Dr = 90\%$ の飽和砂層の5層構成であり、せん断土槽内に作製した。砂層には豊浦珪砂を用い、 $Dr = 90\%$ の層のみ締固めにより作製し、その他の砂層は空中落下法により作製した。粘土層にはカオリン粘土を用い、重力場および遠心力場で段階的に上載荷重を加えて

圧密させた。液状化が生じると想定される $Dr = 60\%$ の飽和砂層は、水の70倍の粘性を有するメトロゾ水溶液で飽和させた。

模型杭には外径16mm、肉厚1.5mmのアルミパイプを用いた。模型杭の先端は支持層に根入れさ

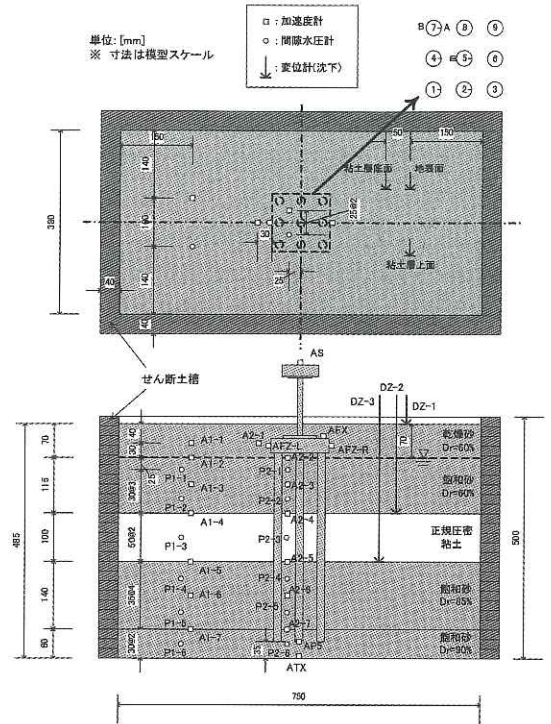


図-2 実験模型の概要

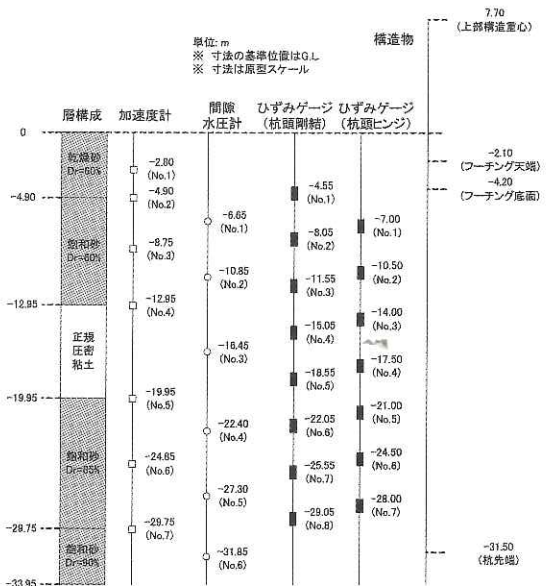


図-3 センサー配置等の詳細

せた。杭頭はフーチングに剛結ないしはヒンジ結合した。ヒンジ結合とする模型杭の杭頭部は、杭頭部に設置した直径11mmの球とフーチング底面に設置した球座を組み合わせることにより、フーチング底面を回転中心とするユニバーサルジョイントとしている。球と球座の曲率半径はほぼ同一であり、ヒンジ部に摩擦やガタつきが生じない程度に適度な力で固定した。フーチング上には上部構造を模擬した錘を取り付けた橋脚模型を設置した。

センサー配置は図-2、3のとおりである。1、2、4および5の杭（配置は図-2の右上参照）については曲げひずみのみを計測し、杭7については曲げひずみおよび軸ひずみを計測した。

振動台への入力波形には、既往の検討事例との整合を考慮し、神戸海洋気象台基盤波⁴⁾の振幅を0.7倍した図-4の波形を用いた。以降に示す値は全て原型スケールに換算したものである。

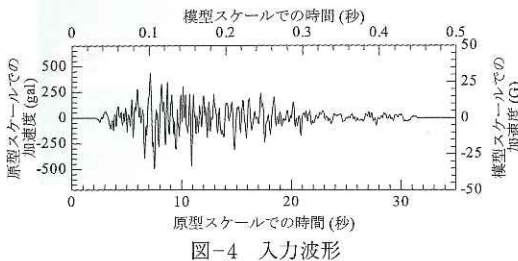


図-4 入力波形

3. 地盤、上部構造物および基礎の応答

3.1 地盤の応答

地震時に杭基礎に対して外力となる上部構造物および地盤の応答に着目し、両ケースの差の有無、およびいずれが杭基礎に対して支配的な影響を及ぼしていたかについて検討した。まず、地盤の応答について、構造物から離れた位置で計測された地盤の加速度、過剰間隙水圧および変位の時刻歴を図-5に示す。ここに示す変位波形は、計測された加速度波形をフーリエ変換し、0.1Hz前後のハイパスフィルターとともに周波数領域で数値積分したものであり、本報で示す変位波形は、全て同じ方法により算出したものである。Dr = 85%の飽和砂層に設置した間隙水圧計P1-4以深における過剰間隙水圧の応答に差が見られるが、それを除けば両ケースの地盤の応答はよく一致している。

液状化層の過剰間隙水圧 (P1-1およびP1-2)は加振開始後8.5秒程度でほぼ初期上載圧 σ'_{v0} に達しており、それ以降の時刻では液状化層以浅の加速度が急激に減少していることから、8.5秒付近で液状化が生じたことが分かる。

地盤の加速度は、Dr = 85%の砂層 (A1-5)よりも粘土層 (A1-4)、粘土層よりも液状化層 (A1-3)の方が小さくなっており、せん断波の上界に伴って加速度が減少していることが分かる。

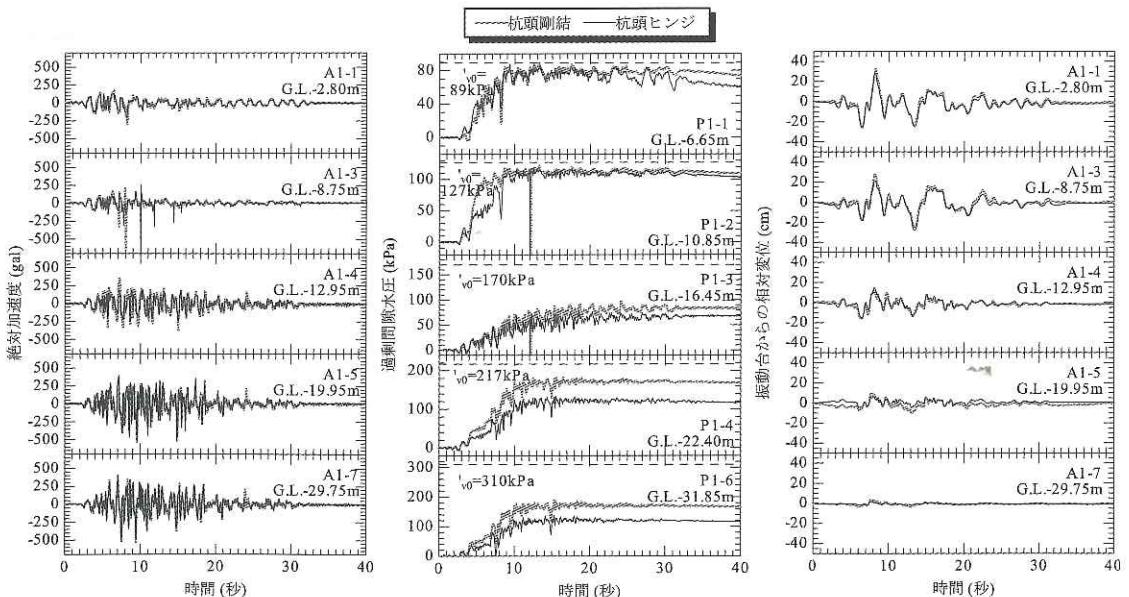


図-5 地盤の加速度、過剰間隙水圧および変位

これは、隣り合う2層間のせん断剛性に差があり、インピーダンス比が大きいいため、その層間で地震動の上昇成分が伝達しにくくなったためである。地盤の変位波形にも見られるように、このような層境界以浅には大きな変位が生じやすい。

3.2 上部構造の応答

上部構造の応答加速度を比較した結果を図-6に示す。杭頭ヒンジ結合により、地震力が杭頭からフーチングに伝達しにくくなり、上部構造の応答加速度が小さくなる効果も考えられたが、実験結果にはほとんど差が生じていない。したがって、杭頭結合条件の違いは、構造物全体の応答特性にあまり影響を及ぼしていないと考えられる。

このことは、杭頭にヒンジを設けたケースでヒンジが機能していないことによるものではない。図-7に示す杭の曲げモーメントの最大値分布を見ると、杭頭を剛結合したケースでは、杭頭付近に大きな曲げモーメントが作用しているのに対し、杭頭をヒンジ結合したケースでは、地中から杭頭に向かって滑らかにゼロに近づいており、ヒンジが機能していることが分かる。

3.3 基礎に対する上部構造の慣性力、地盤の振動変位の影響

基礎に対して地震時に主な外力となるのは、上

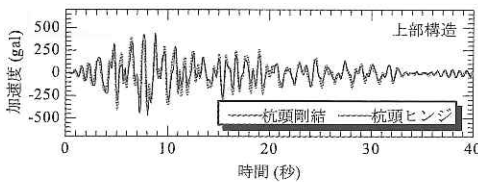


図-6 上部構造の応答加速度

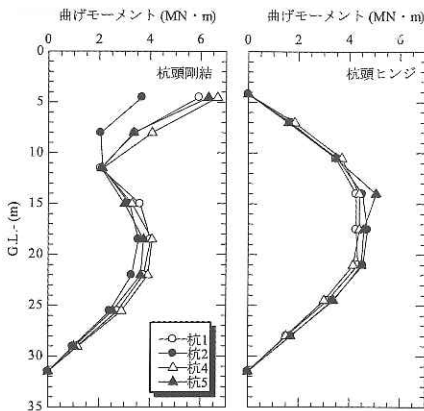


図-7 各杭の曲げモーメントの最大値

部構造からの慣性力と地盤の振動変位である。ここでは、本実験において、どちらの影響が基礎の応答に対して支配的であったかについて検討する。地表面の変位量および上部構造からの慣性力の大きさは、図-5および図-6に示したように、両ケースで同程度である。

各ケースで最大曲げモーメントが発生した深さにおける曲げモーメントと上部構造の加速度または地表面の変位の位相関係を図-8に示す。いずれのケースについても、地表面の変位-杭の曲げモーメント関係の方が、上部構造の加速度-杭の曲げモーメント関係よりも直線性が認められる。このことから、杭の曲げモーメントの発生は、上部構造の慣性力よりも地盤の振動変位に依存していると考えられる。

また、図-9に示すフーチングと振動台の相対変位は、図-5に示した地表面と振動台の相対変位と波形の形状、大きさともによく一致しており、フーチングの水平変位が地盤の振動変位に追従して発生していることが分かる。このことも、基礎の応答に対して地盤の振動変位の影響が支配的であることを裏付けている。

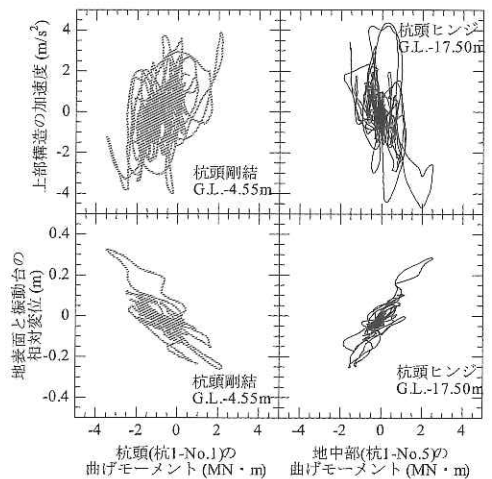


図-8 上部構造の加速度、地表面の変位と杭の曲げモーメントの位相関係

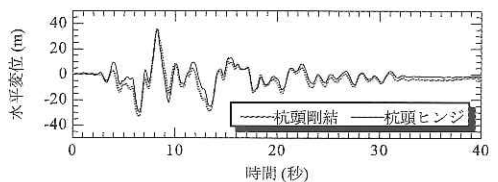


図-9 フーチング-振動台の相対変位

4. 杭頭結合条件による応答の違い

4.1 杭の曲げモーメント

図-7によれば、杭の曲げモーメントの最大値は、杭頭剛結合の場合は杭頭で $6.3\text{MN}\cdot\text{m}$ 、杭頭ヒンジ結合の場合は粘土層内 (G.L.-17.5m) で $4.5\text{MN}\cdot\text{m}$ となっており、杭頭をヒンジ結合することにより、3割程度低減することができている。このように、杭頭ヒンジ結合の場合は最大曲げモーメントの発生位置が深くなり、最大値が小さくなる傾向は、1.2節の説明と整合している。

4.2 基礎・上部構造の水平変位

図-10に示す基礎と地表面の相対変位には、最大値が5cm (2倍)程度異なるなど、明瞭な差が見られる。このことも、1.2節に示した説明と整合している。

一方、橋の耐震性を議論する上では、基礎単体の水平変位よりも、橋脚と基礎の変形の総和として生じる上部構造の水平変位の方が重要である。図-11に上部構造と地表面の相対変位を示すが、両ケースの最大値の差は8.4秒付近で3cm (1.3倍)程度となっている。このように、基礎の水平変位が2倍となっても、上部構造の水平変位が直ちに2倍となるわけではない。このことに対しては、後述のように杭頭ヒンジ基礎はフーチングのロッキングが生じにくいという構造的な特徴も影響していると考えられる。

4.3 フーチングのロッキングと杭の軸力変動

図-12にフーチングの回転角の時刻歴を示す。これは、フーチング両端に設置した鉛直方向加速度計の計測値より算出したものである。同図より、杭頭にヒンジを設けた基礎のフーチングの回転角は、ほぼ全時刻にわたって小さくなっており、最大値は杭頭を剛結した基礎の半分程度となることが分かる。

杭頭位置における軸力-軸方向変位関係 (引張側が正) を図-13に示す。杭頭にヒンジを設けたケースは、軸力変動・軸方向変位ともに小さくなっていることが分かる。上部構造等の自重から計算される加振前の軸力が -1.9MN 程度であることを考えると、この軸力変動量の差は大きいといえる。軸力の最大値は、引抜き側で3割程度、押し込み側で7割程度小さくなっている。杭の軸力変動のうち、押し込み力が小さいことは杭の押し込みによる基

礎全体系の降伏の抑制に寄与し、引抜き力が小さいことは、杭体の $M-\phi$ 関係 (耐力、じん性) の安定化に寄与する。

このような軸力変動とロッキングに関する挙動の違いは、次のように説明することができる。図-14のように、地震時におけるフーチング周りの回転力のつり合いを考える。上部構造からの慣性力がフーチングに時計回りのモーメントを与えるとき、杭の変形モードからも分かるように、杭頭のモーメント反力も時計回りとなり、フーチングの回転を助長する。したがって、回転力がつり合うためには、杭頭の軸力でこれら両者を抑制する必要があることになる。しかし、杭頭にヒンジを設けた基礎では、杭頭のモーメント反力がない分、軸力変動が小さくなる。

軸力変動が小さければ、杭の軸方向変位も小さ

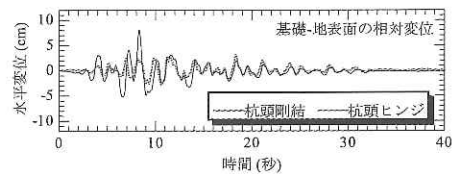


図-10 基礎-地表面の相対変位

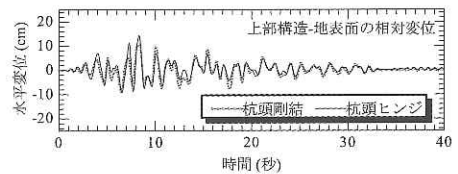


図-11 上部構造-地表面の相対変位

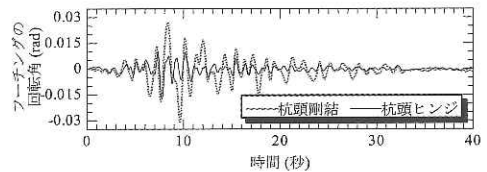


図-12 フーチングの回転角

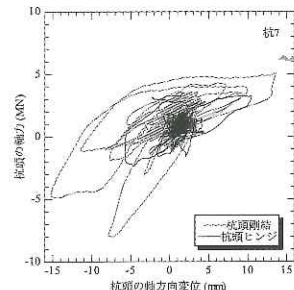


図-13 杭頭の軸力-軸方向変位関係

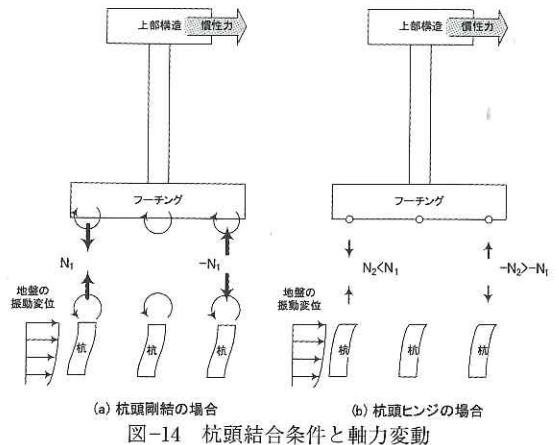
くなり、フーチングの回転角が小さくなると考える。したがって、杭頭にヒンジを設けた基礎はフーチングのロッキングが生じにくい構造であるということが分かる。また、地盤の振動変位の作用に対しては、杭頭にヒンジを設けた基礎においては杭の軸力が発生しないため、地盤の振動変位が基礎に対して大きな影響を及ぼす場合ほど、杭頭ヒンジ基礎が杭の軸力変動とフーチングの回転角を抑制する効果が高くなる。

5. まとめ

本検討により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 今回実施した2ケースの動的遠心模型実験では、基礎の応答に対し、上部構造の慣性力よりも地盤の振動変位が支配的な影響を及ぼした。
- (2) 杭頭にヒンジを設けた基礎では、杭頭を剛結した基礎に比べ、杭の曲げモーメントが最大で3割程度、フーチングの回転角が5割程度、軸力が押し込み側で7割程度、引抜き側で3割程度軽減された。
- (3) 杭頭をヒンジ結合とすることにより、杭頭を剛結する場合に比べ、上部構造の水平変位は最大で3割程度大きくなった。
- (4) 上部構造の水平変位がある程度許容される場合、杭頭をヒンジ結合した基礎を採用することにより、耐震性を確保しつつ、基礎の建設コストを削減できる可能性がある。

なお、杭頭をヒンジ結合することによる杭の軸力変動とフーチングの回転角を抑制する効果は、基礎の応答に対して地盤の振動変位の影響が卓越



する場合、すなわち液状化地盤や軟弱粘性土地盤において、より顕著に表れると考えられる。

上部構造の変位に注意しつつ、杭頭の固定度を下げる基礎工法の適用性を評価するためには、地盤の振動変位の影響を適切に考慮した基礎の耐震性能照査法を確立することが重要である。

参考文献

- 1) 特集 杭頭接合の新技术、基礎工、第29巻、2001.12
- 2) 高橋章浩：液状化に対する新しい基礎構造に関する研究、土木技術資料、47巻3号、pp.8-9、2005.3
- 3) 日本道路協会：6. 地震時に不安定となる地盤がある場合の設計計算例、道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- 4) 国土交通省土木研究所耐震技術研究センター振動研究室：大規模地震を考慮した地中構造物の耐震設計法に関する試験調査、振動研究室調査試験研究成果概要報告書、第22号、pp.19-20、2001.3

谷本俊輔*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研究
グループ振動チーム研究員
Shunsuke TANIMOTO

杉田秀樹**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研究
グループ振動チーム
研究員、工博
Dr. Hideki SUGITA

高橋章浩***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研究
グループ振動チーム主任研究
員、工博
Dr. Akihiro TAKAHASHI

滝内友則****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所耐震研究
グループ振動チーム交流研究
員
Tomonori TAKIUCHI