

杭に発揮される周面摩擦への水平載荷の影響

高橋 章浩¹⁾, 山崎 敬穂²⁾, 井澤 淳³⁾

1) 東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻, takihiro@cv.titech.ac.jp

2) 東京工業大学 工学部 土木工学科, yamazaki.t.ac@m.titech.ac.jp

3) 東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻, jizawa@cv.titech.ac.jp

1. はじめに

実務における杭基礎の設計計算では、杭を梁で、地盤をバネでモデル化することがよく行われる(例えば¹⁾。後者の地盤と杭の相互作用バネは、杭先端の鉛直支持バネ ($Q-z$ 関係), 杭側面の水平・鉛直方向バネ (それぞれ $p-y$, $t-z$ 関係) で構成されることが多い。この内、杭側面の鉛直方向バネの物性は、杭の周面摩擦特性を表すもので、その上限値は、杭に作用する側圧と土と杭の摩擦係数によって決定される。杭に作用する側圧は、杭に与えられる水平方向荷重によって変化するが、通常、そのような効果は無視し、水平載荷前の地盤の初期応力を用いて設定する(杭の鉛直載荷試験結果を参考に決定する等)(例えば²⁾。

各地盤バネ間の連成についての検討が行われはじめているものの³⁾、杭基礎の設計計算で用いられる各地盤バネの特性は、互いに独立に与えられ、杭の側圧の増減に伴う杭の最大周面摩擦力度の変化は考慮しないのが普通である。しかしながら、杭の側圧の増加は、杭周面で発揮される最大摩擦力度を増大させ、杭に発生する曲げモーメントや軸力を小さくする可能性があるため、この効果は無視した杭基礎の応答計算結果は、過度に安全側の評価となっている可能性もある。特に既設基礎の耐震性能照査(基礎を耐震補強すべきか否かの判断)においては、このような状況は好ましくない。

本研究では、杭の側圧の増減に伴う杭の最大周面摩擦力度の変化が、杭頭に鉛直・水平荷重を受ける杭基礎の応答に与える影響を調べることを目的として、3次元有限要素解析を実施した。解析は、杭の側圧変化によって発揮できる最大周面摩擦力度も変化する場合と、設計計算に用いられる梁-バネモデルのように、側圧の大きさによらず発揮できる最大周面摩擦力度が決まっている場合を対象とし、杭の周面摩擦特性の与え方が、杭の応答に与える影響を調べた。

2. 解析条件

解析の対象としたのは、鋼管杭(杭径 1m, 肉厚

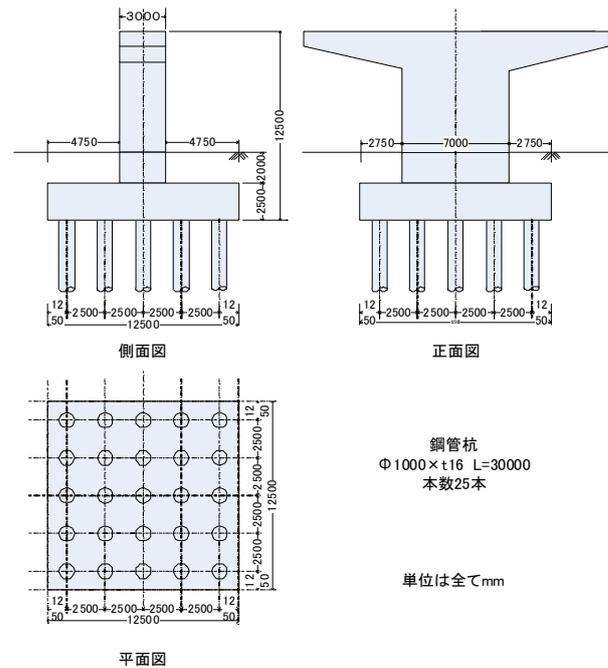


図1: 解析対象とした道路橋橋脚

16mm, 杭長 30m) に支持された道路橋橋脚である。図1に示すような、砂地盤上に建設された4車線の鋼橋が鋼管杭支持の鉄筋コンクリート製の橋脚によって支えられている場合を想定した。想定した地盤は砂の単一地盤である ($p' = 98\text{kPa}$ における $E = 100\text{MPa}$, $e = 0.8$, $\nu = 0.333$, $\phi' = 35^\circ$)。解析では、この橋脚基礎全体を対象とするのではなく、地震動等により上部工の慣性力に起因するモーメントが基礎に作用した時に、軸力変動の影響が最も大きくなる最外縁の杭のみを対象とした。即ち、群杭基礎で想定される荷重を受ける単杭を解析対象とした。

本研究で用いた有限要素解析モデルの鳥瞰図を図2に示す(水平力は x 方向に付与)。上記のようなモデル化をした場合、杭頭に与える水平・鉛直荷重、曲げモーメントを事前に設定しておく必要があるが、杭頭をフーチングに剛結した場合に必要な杭頭での曲げモーメントは、基礎と地盤の相互作用の結果得られるものであり、今回のような解析モデルではこれを与条件とすることはできないことから、杭頭はフーチングにヒンジ結合されている(杭頭で

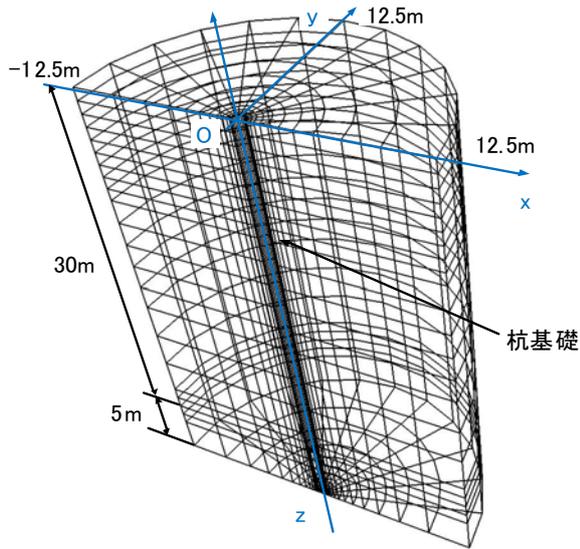


図 2：有限要素解析モデルの鳥瞰図

表 1：杭頭に与えた荷重（1本あたり）

	水平荷重 (kN)	鉛直荷重 (kN)
死荷重	0	1320
地震時荷重 (押し込み側)	+354	+1102
地震時荷重 (引き抜き側)	+354	-1102

の曲げモーメント=0) と仮定した。

本解析における載荷手順は以下の通りである。

(1) 地盤と杭の自重に起因する地盤内の応力状態を計算する（このとき、杭は埋込み杭として施工されたと想定し、杭貫入の影響や杭と地盤の摩擦は無視する）。(2) 構造物（上部構造と杭を除く下部構造）の死荷重を杭頭に作用させる。(3) レベル 1 地震動相当（最大水平震度=0.3）の構造物慣性力に起因する荷重を杭頭に作用させる（表 1）。

本解析では、杭は弾性体、地盤は、Drucker-Pragar の降伏規準に従う弾塑性体（せん断膨張角 $\psi=0$ ）としてモデル化した。本研究は、杭の側圧変化によって発揮できる最大周面摩擦力度も変化する場合（以降、Case-R と呼ぶ）と、設計計算に用いられる梁-バネモデルのように、側圧の大きさによらず発揮できる最大周面摩擦力度が決まっている場合（以降、Case-D と呼ぶ）の、杭応答の差異を調べることを目的としていることから、杭と地盤の間に有限厚の要素（接触面要素）を設け、この要素の材料特性の与え方によってこれらの違いを表現することとした。杭と地盤の接触面要素は、Case-R、Case-D とともに、Drucker-Pragar の降伏規準に従う弾塑性体とするが、Case-R では、側圧変化によって発揮できる最大周面摩擦力度も変化する様、地盤と同じ物性を与えた。即ち、杭表面は十分粗であり、

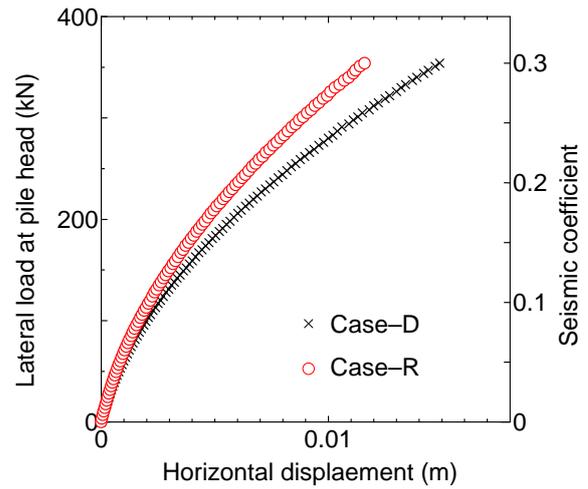


図 3：杭頭水平荷重－水平変位関係（地震時荷重付与時）

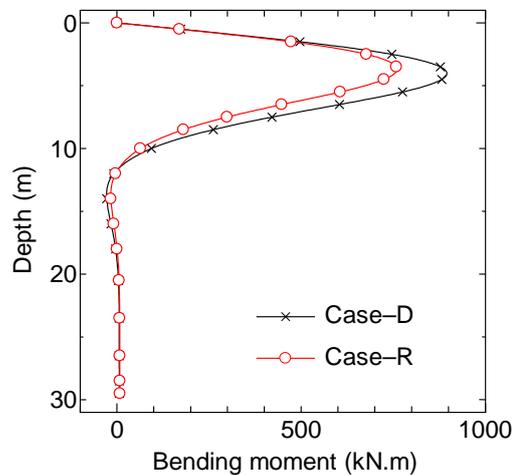


図 4：曲げモーメント分布（地震時荷重付与後）

土の強度と同じだけの最大摩擦力度が発揮されるとした。一方、Case-D では、側圧の変化によらず一定のせん断強度を持たせるため、せん断抵抗角 $\phi=0$ とし、粘着力 c を載荷前のせん断強度が Case-R と Case-D で同じになるように設定した（深さ方向に c は変化）。即ち、 $\phi=0$ であることから、載荷中に拘束圧（側圧）が変化しても、最大周面摩擦力度は変化しない。

3. 解析結果と考察

押し込み側と引き抜き側を対象として解析を行ったが、いずれもほぼ同様の傾向を示していたことから、本報では、押し込み側の結果のみを示す。

図 3 に地震時荷重付与時の杭頭水平荷重－水平変位関係を、図 4 に地震時荷重付与後の杭の曲げモーメントの深さ方向分布を示す。杭頭の水平変位、最大曲げモーメントともに、Case-D の方が、Case-R よりも大きな値を示しており、Case-R と比して、

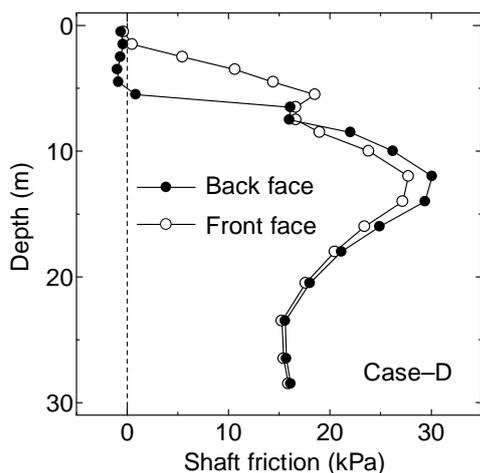


図 5：周面摩擦力度分布
(Case-D, 地震時荷重付与後)

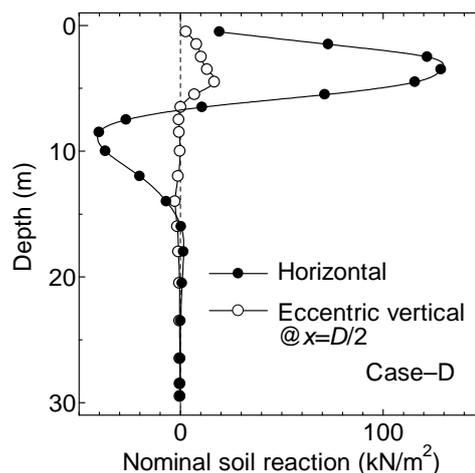


図 7：梁-バネモデル相当の地盤反力度分布
(Case-D, 地震時荷重付与後)

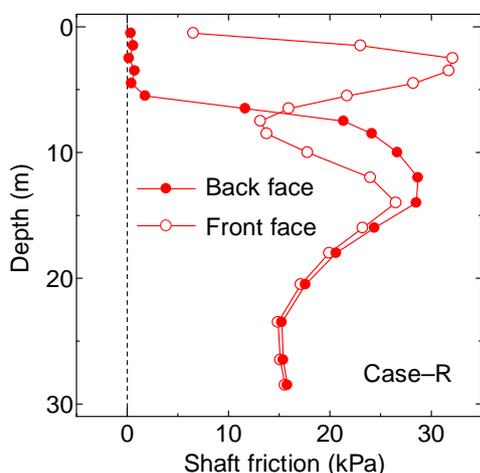


図 6：周面摩擦力度分布
(Case-R, 地震時荷重付与後)

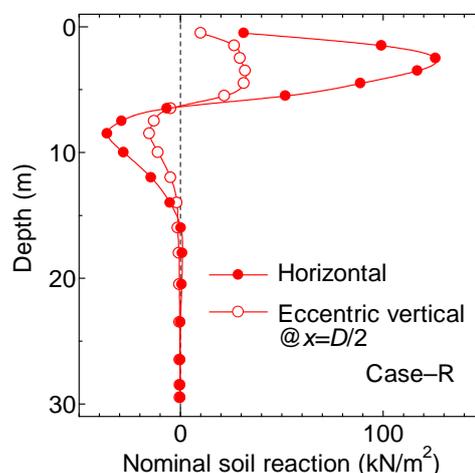


図 8：梁-バネモデル相当の地盤反力度分布
(Case-R, 地震時荷重付与後)

それぞれ 28%, 18%程大きな値となっている。即ち、設計計算のように、杭の側圧の大きさによらず発揮できる最大周面摩擦力度が決まると仮定した場合、かなり安全側の結果を与えることがわかる。このような杭の周面摩擦のモデル化による違いは、杭前背面の周面摩擦の差によって生じる抵抗モーメントや、杭前背面の抵抗領域の大きさの違いとなって表れると考えられる。以下では、得られた地盤の応力度や抵抗モーメントによる比較を試みる。

Case-D と Case-R の地震時荷重付与後の杭前背面の周面摩擦力度の分布を図 5 と 6 にそれぞれ示す。ここでは、水平荷重を x が正の方向に与えているため、杭前面側とは $x > 0$ ($y \approx 0$) の杭側面、杭背面側とは $x < 0$ ($y \approx 0$) の杭側面を表す。両図を比較すると、杭の曲げモーメントが小さい 15m 以深では、杭の周面摩擦のモデル化による違いは見られず、また、杭の前背面で大きさもほとんど変わらない。一方で、

杭の曲げモーメントの深さ方向変化の大きな 15m 以浅では杭前面側で大きな差がみられる。周面摩擦力度の上限値が側圧に依存しない Case-D では、前面側での周面摩擦力度は小さく、また、背面側との差も小さい。これは、杭頭作用力に対する周面摩擦に起因する抵抗モーメントが小さいことを意味している。一方で、周面摩擦力度の上限値が側圧に依存する Case-R では、杭前面側において、側圧の上昇に伴い周面摩擦力度の上限値が大きくなった結果、特に深さ方向に曲げモーメントが増大する 5m 以浅では、杭前背面の周面摩擦力度の差が極めて大きく、水平荷重の増大とともに周面摩擦に起因する抵抗モーメントが大きくなっているといえる。

このように杭周に沿って変化する地盤反力度が杭の応答に与える影響を明確にするため、梁-バネモデル相当の地盤反力度（一次元梁を支える地盤バネの反力度）を求め、これを深さ方向にプロットし

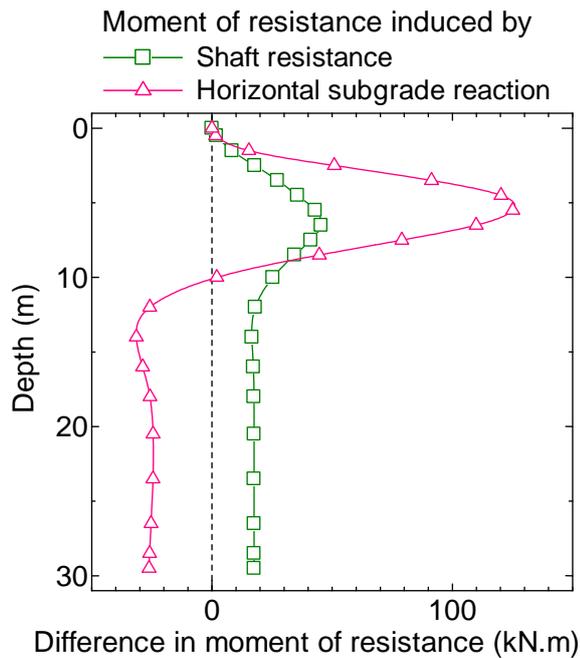


図9：2ケース間の周面摩擦に起因する抵抗モーメントの差と水平地盤反力度分布の違いによる抵抗モーメントの差

たものを図7と8に示す。ここで $x=D/2$ での偏心鉛直地盤反力度とは、 $x=\pm D/2$ の位置に鉛直地盤バネを配したときの2つの鉛直地盤バネの反力度の差（杭中心に作用する鉛直荷重に対する反力度は含まない）を表したもので、杭前背面の周面摩擦力度差が大きいほど、この絶対値は大きくなる。これらの図を比較すると、Case-Rの15m以浅において偏心鉛直地盤反力度は相対的に大きな値を示している。この効果により、周面摩擦に起因する抵抗モーメントが大きくなり、加えて（若干ではあるものの）、最大水平地盤反力度が小さく、かつ、水平地盤反力度が最大となる点がCase-Dに比して浅くなったことにより、相対的にCase-Rの水平変位が小さく、また、杭の最大曲げモーメントが小さくなったと考えられる。

このように、大きな杭の周面摩擦が期待できる場合には、前者のような周面摩擦に起因する抵抗モーメントの増大といった杭の応答値を小さくする直接的な効果と、後者のような周面摩擦に起因する水平地盤反力度分布の変化といった間接的な効果がある。これらの割合を明確にするため、Case-DとCase-Rの周面摩擦に起因する抵抗モーメントの差と、水平地盤反力度分布の違いによる抵抗モーメントの差を求め、プロットしたのが図9である。この

図より、曲げモーメントの差が最大になる深さで、周面摩擦に起因する抵抗モーメントの差は水平地盤反力度分布の違いによる抵抗モーメントの差の35%程度であった。このように、(1)杭の側圧変化によって発揮できる最大周面摩擦力度も変化する場合、周面摩擦に起因する抵抗モーメントの増大という直接的な効果は、水平地盤反力度分布の変化といった間接的な効果に比して小さいものの、これが杭の応答に与える影響は、無視できない大きさであること、(2)周面摩擦に起因する水平地盤反力度分布の変化は小さいものの、これが杭の応答に与える影響は大きく、杭の周面摩擦特性を適切にモデル化することの重要性を確認できた。

4. まとめ

3次元有限要素解析により、側圧変化が周面摩擦特性に影響するモデルと影響しないモデルを対象に杭の鉛直・水平同時載荷を行った結果得られた結論は下記の通りである：

- (1) 杭の側圧変化によって発揮できる最大周面摩擦力度も変化する場合、周面摩擦に起因する抵抗モーメントの増大という直接的な効果は、水平地盤反力度分布の変化といった間接的な効果に比して小さいものの、これが杭の応答に与える影響は、無視できない大きさであることがわかった。
- (2) 周面摩擦に起因する水平地盤反力度分布の変化は小さいものの、これが杭の応答に与える影響は大きく、杭の周面摩擦特性を適切にモデル化することの重要性を確認できた。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 杭基礎の調査・設計・施工から検査まで, 2004.
- 2) Gazetas, G. & Mylonakis, G., Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues, *Proc 3rd Conf Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE, Seattle, 1119-1174, 1998.
- 3) Allotey, N. & Foschi, R., Coupled P-Y T-Z analysis of single piles in cohesionless soil under vertical and/or horizontal ground motion, *J Earthquake Engineering*, Vol.9, Nn.6, 755-775, 2005.