

高レベル地震動における杭基礎の群杭効果の一考察

Pile-groupe effects of steel pier system with pile foundation on seismic response

北海道大学大学院工学研究科 ○正 員 橋本 至 (Itaru HASHIMOTO)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎 (Toshiro HAYASHIKAWA)
 (株)ドーコン 正 員 寿楽 和也 (Kazuya JURAKU)

1. はじめに

高架橋など地上構造物は地震動が地盤および基礎を介して構造物に伝達し、その応答により慣性力が生じる。同時に、構造物周辺の地盤振動は構造物の応答により基礎を介してその影響を受ける。このような力のやりとりは構造物と地盤・基礎との相互作用と呼ばれる。高レベル地震動に対して高架橋など地上構造物の耐震性を適切に照査するには、構造物の損傷過程に立ち入った照査を行うだけでなく、構造物応答の照査に地盤のひずみレベルの増大に伴う地盤・基礎の非線形挙動を反映させる必要があると考えられる¹⁾。

高レベル地震動下において、杭基礎は上部工および下部工などの躯体の応答による慣性力を受けるだけでなく、地盤の振動変位による影響を受けること（キネマティック相互作用）が知られている。1995年兵庫県南部地震による杭基礎の被災を経験し、大型せん断土槽を用いた加振実験や動的解析による動的相互作用のメカニズムの研究が行われている。

高レベル地震動の影響を受ける組杭（群杭）における群杭効果の評価は基礎部材の断面力の評価だけでなく、杭基礎を有する構造物全体の地震時挙動の評価にも重要である。現行の道路橋示方書（以後、道示と呼ぶ）にお

いても、レベル2地震時に対する杭基礎の照査法²⁾の中で群杭効果を考慮するために水平地盤反力係数や水平地盤反力度の上限値に係る種々補正係数（低減係数）を導入している。しかし、これら補正係数は国内で実施された組杭の現位置水平載荷実験結果などに基づいた“地盤抵抗エリアの相互干渉による影響範囲の考え方”³⁾により設定されたものであり、キネマティック相互作用による影響が反映されていないものと考えられる。

一方、設計実務においては、コスト縮減などの面から高性能杭を採用するケースが多くなり、また、限定的ではあるが、杭基礎の許容水平変位量を緩和する方向⁴⁾にある。これらは、従来と比較して地震時における基礎変位が大きくなることであり、橋全体系の耐震性照査において地盤・基礎の評価がより重要となると考えられる。

以上のような背景の元に、本研究は杭基礎で支持された鋼製橋脚を有する橋梁構造を対象として、地盤を含めて橋梁構造を一体モデルとし、地盤と杭との動的相互バネ^{5),6)}を導入した2次元FEMによるプッシュオーバー解析および動的解析を行い、キネマティック相互作用による杭基礎の群杭効果に与える影響を検討することを目的とする。なお、解析コードは“FLIP”研究会版⁷⁾を用いた。

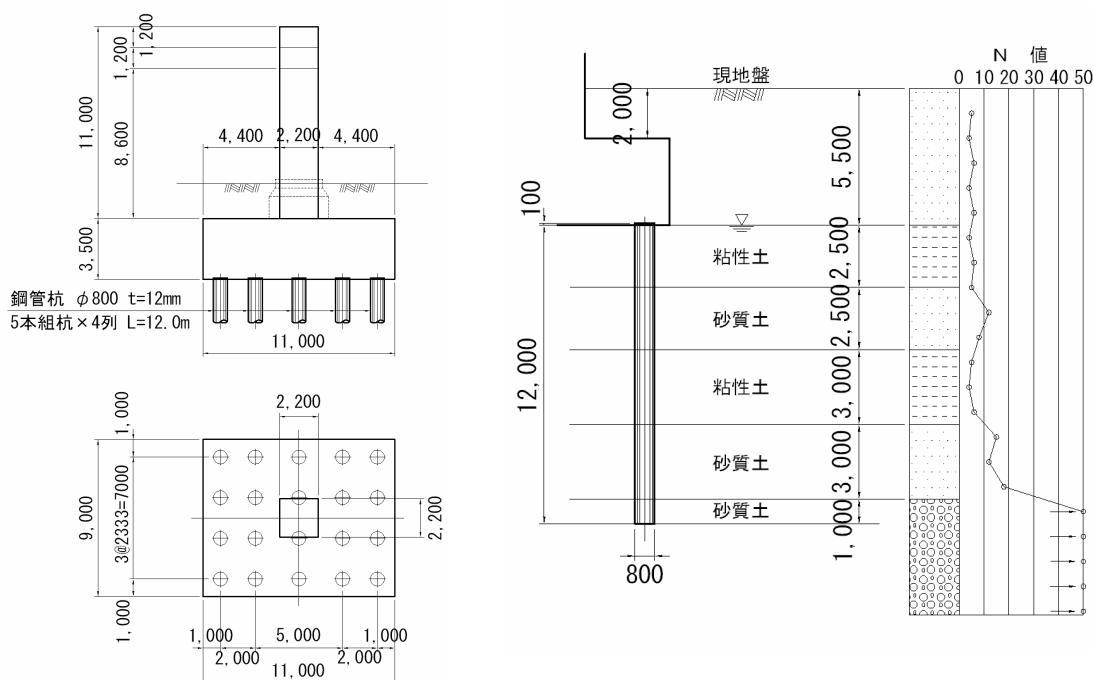


図-1 検討対象とする橋脚と地盤

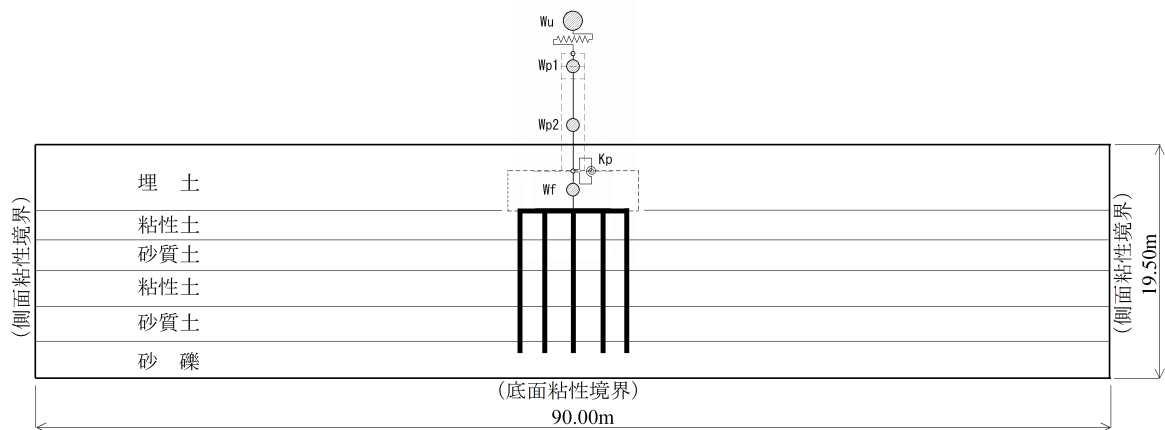


図-2 一体モデルの概略図

表-1 地盤の種々パラメータ値

	埋土 砂質土	第1層 粘性土	第2層 砂質土	第3層 粘性土	第4層 砂質土	第5層 砂質土
平均有効拘束圧 σ_{ma}'	98.000	77.600	98.000	109.100	98.000	98.000
σ_{ma}' に対応する 初期せん断剛性 Gma	60633.0	50722.8	69133.0	50722.8	79414.0	176258.0
パラメータ mG	0.5	←	←	←	←	←
σ_{ma}' に対応する 体積弾性係数 Kma	158121.0	132277.0	180288.0	132277.0	207098.0	459654.0
パラメータ mK	0.5	←	←	←	←	←
ポアソン比 ν	0.33	←	←	←	←	←
N値	N=5	N=5	N=10	N=5	N=15	N=50
質量密度 ρ	1.734	1.734	1.734	1.734	1.937	1.937
間隙率 n	0.45	←	←	←	←	←
間隙水の 体積弾性係数 Ki	2.20E+06	←	←	←	←	←
減衰定数 Hmax	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3
粘着力 C	0	0 (c=30)	0	0 (c=30)	0	0
内部摩擦角 $\phi f'$	38.70	30.00	39.05	30.00	39.47	42.88

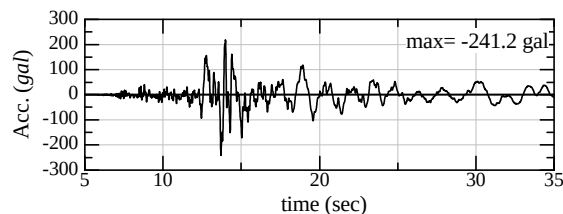


図-3 入力地震動

2. 解析条件

2.1 対象とする橋脚と地盤

図-1 に検討対象とした杭基礎で支持された鋼製橋脚を有する橋梁構造の概要を示す。橋脚および弾性支承の断面諸元、上部工反力条件は参考文献⁸⁾による。また、杭基礎の諸元は現行道示に準拠した試設計により設定した。

2.2 解析モデル

上部工、支承、橋脚躯体、杭基礎および地盤で構成される一体モデルの概略を図-2 に示す。解析モデルは杭一組当りに対して作成し、橋脚などの断面諸元は 1/4 とした。また、地盤の奥行き幅は組杭間隔である 2.333m (=2.92D, D:杭径) とした。

橋脚などの諸定数は参考文献⁸⁾によるものとし、地盤の種々パラメータ値は参考文献⁹⁾により設定し、それを表-1 に一覧する。

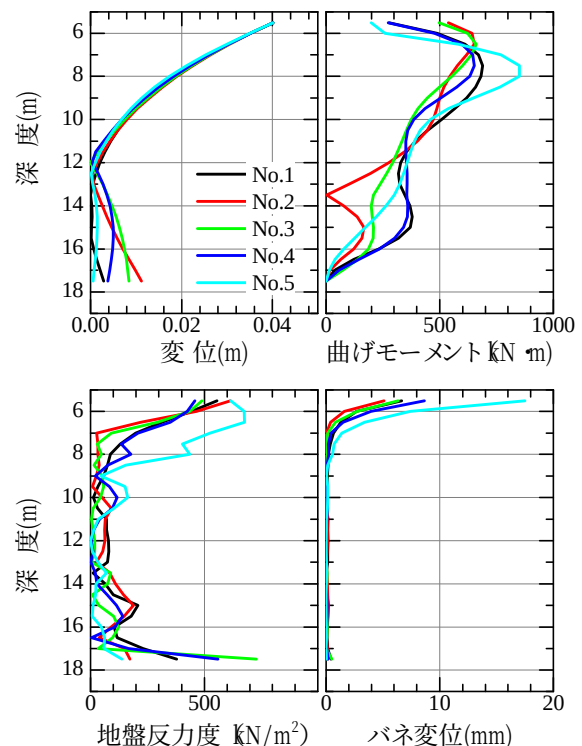


図-4 杭の変位、曲げモーメント、地盤反力等

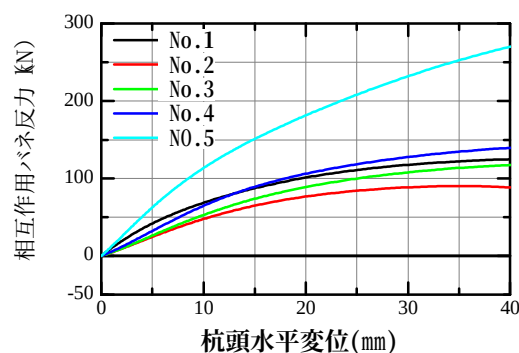


図-5 水平変位と地盤反力

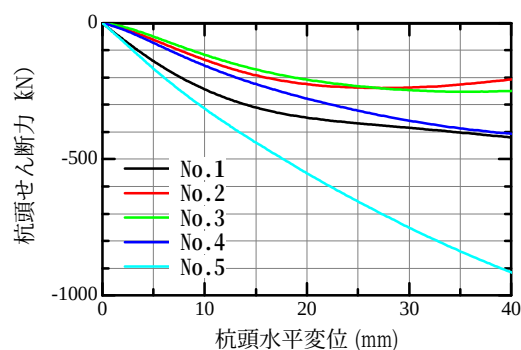


図-6 杭頭せん断力と杭頭水平変位

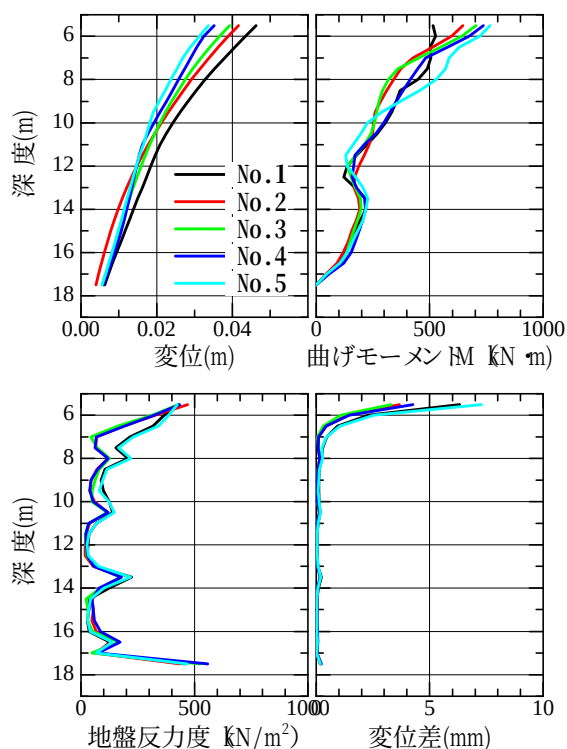


図-7 杭の変位、曲げモーメント、地盤反力等

2.3 入力基盤波

入力する地震動は 1995 年兵庫県南部地震において関西電力技術研究所 GL-24.9m において観測された地中記録¹⁰⁾の東西成分(図-3)を用いた。なお、記録波は地中記録であり、入射波と反射波の複合波であると考えられる。反射波は記録地点の表層地盤の反射波の影響を受けていると考えられ、観測地点の土質柱状図に基づいて入射波の抽出を行い、入力基盤波とした。

3. 解析結果と考察

3.1 静的水平载荷解析

組杭に作用する慣性力による群杭効果を検討するため、橋脚天橋位置に強制変位を与えるプッシュオーバー解析解析を行った。杭頭位置における水平変位に着目し、杭径の 5% (=40mm) まで強制変位载荷を行った。

図-4 に杭径の 5%変位時の杭の変位、曲げモーメント、地盤反力度および水平変位(バネ変位)の深度方向分布を示す。図-5 に杭頭部の粘性土層中央の水平地盤反力(相互作用バネ反力)と杭頭水平変位の関係を、図-6 に杭頭せん断力と杭頭水平変位の関係の関係を示す。

杭の特性値 β は 0.297m (道示により算定)である。杭頭から $1/\beta$ の範囲 (=3.4m) に分布する粘性土層により杭の水平方向挙動が主に支配されていることが図-4 から分かる。

各杭の水平力分担率は、前杭 (No.5)が他杭に比較して分担比率が大きい。杭頭変位量 15mm および 40mm における各杭の前杭に作用する杭頭せん断力 1.00 とした他杭の分担比率は、

- 15mm $\rightarrow$ 0.70 : 0.43 : 0.39 : 0.51 : 1.00
- 40mm $\rightarrow$ 0.46 : 0.23 : 0.27 : 0.45 : 1.00

であり、杭頭変位量の増大により前杭の分担率が增大することが分かる。また、各杭の粘性土層の地盤反力も同様な関係にあり、杭頭変位量 15mm および 40mm における各杭の分担比率は、

- 15mm $\rightarrow$ 0.58 : 0.43 : 0.51 : 0.59 : 1.00
- 40mm $\rightarrow$ 0.46 : 0.33 : 0.43 : 0.52 : 1.00

である。

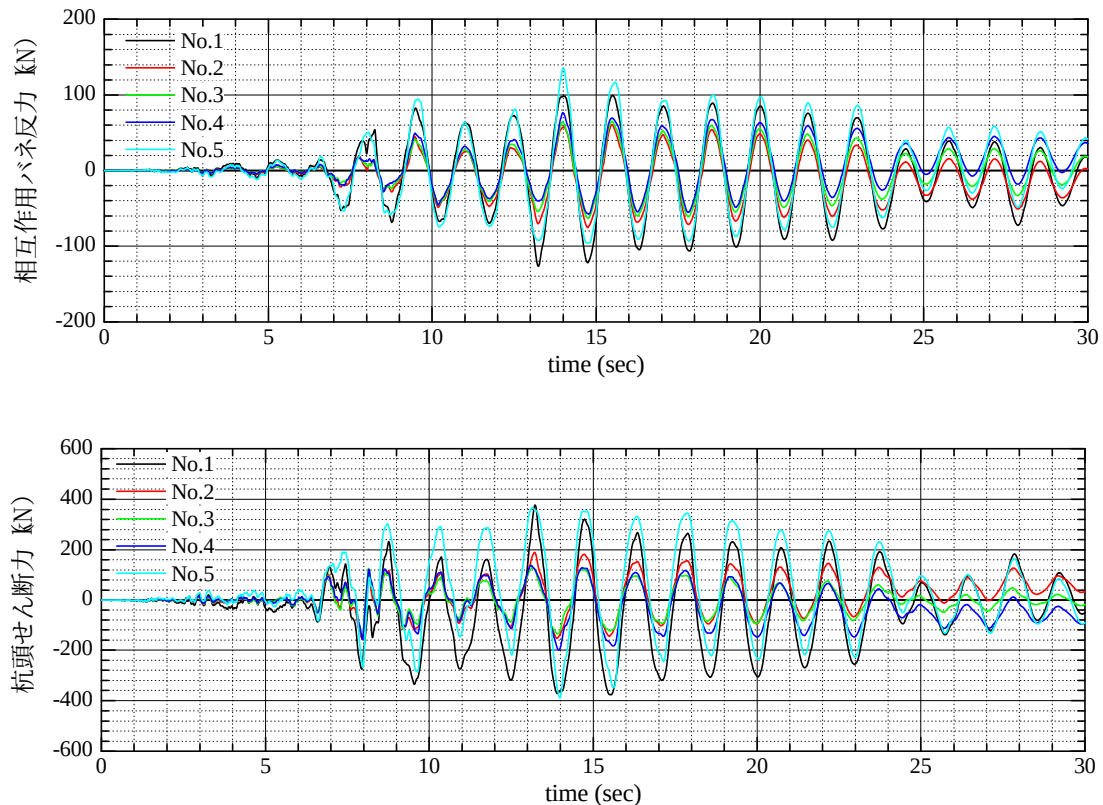
3.2 動的相互作用解析

図-7 に杭の変位、曲げモーメント、水平地盤反力度および相互作用バネ変位について最大値の深度方向分布を示す。図-8 に杭頭部の粘性土層中央の水平地盤反力の時刻歴応答を、図-9 に杭頭せん断力の時刻歴応答を示す。

図-7 から、杭頭の水平変位は約 40mm であるが、これは基盤に対する相対変位であり、杭と地盤との相対変位は最大となる杭頭位置でも約 8mm であることが分かる。また、杭頭から $1/\beta$ 範囲以深において、地盤と杭との相対変位はわずかであり、杭と地盤は概ね同じ変位振動を生じていることが分かる。杭の水平方向地盤反力の最大値は前杭と後杭、中間杭 3 本に分類され、その比率は杭頭から $1/\beta$ 範囲の深度で最大 1.00 : 0.35 であり、深度方向にその差異は小さくなる。

図-9 から、地盤が最大応答を示す 7~9 秒間において各杭の水平力分担比率は複雑な変動を示すが、上部構造などが応答し慣性力応答が主となる 12 秒以降は概ね一定の分担比率を示すことが分かる。

各杭の水平力分担率は、杭頭作用水平力が最大となる $t=13.24$ 秒および $t=13.92$ 秒における各杭の前杭の作用水平力を 1.00 とする分担比率は、



• $t=13.24$ 秒 $\rightarrow 1.00 : 0.50 : 0.31 : 0.31 : 0.95$

• $t=13.92$ 秒 $\rightarrow 0.99 : 0.39 : 0.35 : 0.50 : 1.00$

であり、前杭と後杭が概ね同じ水平力を分担する。一方、各杭の粘性土の水平地盤反力は、それが最大となる $t=13.24$ 秒および $t=14.0$ 秒における各杭の前杭を 1.00 とする分担比率は、

• $t=13.24$ 秒 $\rightarrow 1.00 : 0.55 : 0.43 : 0.32 : 0.73$

• $t=14.00$ 秒 $\rightarrow 0.72 : 0.42 : 0.47 : 0.56 : 1.00$

であり、後杭が前杭に対して 70% となっている。

4. 結論

対象とした橋梁構造において、地盤を含めた一体モデルによる地盤と杭との動的相互バネを導入した 2 次元 FEM によるプッシュオーバー解析および動的解析から得た知見は以下のとおりである。

- 1) プッシュオーバー解析において、杭頭変位量が小さい状態から群杭効果が現れ、各杭の水平力分担の不均衡が生じる。各杭に生じる水平方向地盤反力の比率は、杭頭変位=15mm において、前杭：中杭：後杭=1.0：0.4～0.6：0.6 であり、杭頭変位の増大とともに中杭および後杭の分担比率が低下する。
- 2) 動的解析において、杭頭位置における地盤と杭との相対変位は最大 8mm 程度であるが、群杭効果による各杭の水平力分担の不均衡が生じる。各杭における水平方向地盤反力の比率は、前杭：中杭：後杭=1.0：0.3～0.55：0.7 である。一方、各杭の頭部に作用する水平力の比率は、前杭：中杭：後杭=1.0：0.3～0.5：1.0 であり、後杭の比率が水平方向地盤反力の分担比率と異なる。この差異の原因については今後の課題とする。

参考文献

- 1) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第 3 次提言と解説，2000.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，平成 14 年 3 月
- 3) 幸左賢二，鈴木直人，木村亮ら：終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験，土木学会論文集，No.596/III-43，pp.249-260,1998.6.
- 4) 西谷雅弘，龍田昌毅：水平変位の制限を緩和した杭基礎の設計例，基礎工，Vol.30, No.5, pp.55-57, 2002.5
- 5) 三輪滋，小堤治，溜幸生ほか：2 次元水平断面モデルを用いた液化地盤における杭－地盤系の相互作用の検討，第 38 回地盤工学研究発表会，2003.7
- 6) 寿楽和也，一井康二，篠崎晴彦ほか：2 次元解析における杭－地盤相互作用ばねを用いた群杭効果の評価手法の検討，第 58 回土木学会年次学術講演会，2003
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15
- 8) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 4. 鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例，平成 9 年 3 月
- 9) 森田年一，井合進，一井康二ほか：液化化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.7
- 10) 財) 震災予防協会 強震動アレー観測記録データベース推進委員会：強震動アレー観測 No.3，1998.