

動的解析に用いるための群杭効率 η の評価について

○野々村佳哲¹・白戸真大²・福井次郎³

¹正会員 (独)土木研究所 基礎チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

²正会員 (独)土木研究所 基礎チーム 研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³正会員 (独)土木研究所 基礎チーム 上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

1. はじめに

強震動を受ける深い基礎の地震時挙動を評価するため、著者らは実験的な研究を進めてきている^{1),2),3)}。そして、単杭および柱状体基礎の動的解析において地盤抵抗を Winkler バネを用いてモデル化する場合の地盤反力度 p 、基礎・地盤間相対変位 y の履歴則を提案している^{1),4)}。そして、提案した p - y の履歴則を群杭の動的解析へも適用できるように研究を進めているところである。

水平荷重を受ける群杭における群杭効果の評価は、群杭としての地震時挙動の評価において重要なばかりではなく、各杭の断面力の評価にも大きく影響を与える。したがって、これまで多数の研究がなされ、評価式が提案されている⁵⁾。中でも Brown ら⁶⁾による p -multiplier の考え方は、後述のように、動的解析における p - y 履歴則の設定に適用しやすく、実務上利用しやすいものと考えられる。また、 p -multiplier の定量的評価については、幸左ら⁷⁾は日本で行われた群杭の現位置載荷実験結果を用いて地盤抵抗エリアの相互干渉による影響範囲の考えにより検討しており、比較的良好に群杭中のある杭の地盤反力度の上限値 p_u を推定できることを示している。

しかし、問題も残っている。幸左らの検討は杭頭での荷重変位関係に基づき行われている。これは、杭が受ける水平地盤抵抗について、深さ方向に一定の群杭効果が考慮されていることに等しい。慣性力の影響が大きな深度領域に対する検討としては、杭頭での荷重変位関係に基づく検討は有効であろう。しかし、杭は地震時には地盤の振動変位による荷重も受け(キネマティック相互作用)、特に、地中深部ではその影響が大きい。近年、キネマティック相互作用による杭の損傷に関しても何らかの設計上の対処が必要であると考えられているが⁸⁾、キネマティック相互作用下において群杭の各杭に生じる断面力・変形を評価するためには、杭が受ける水平地盤抵抗の群杭効果について深さ方向の

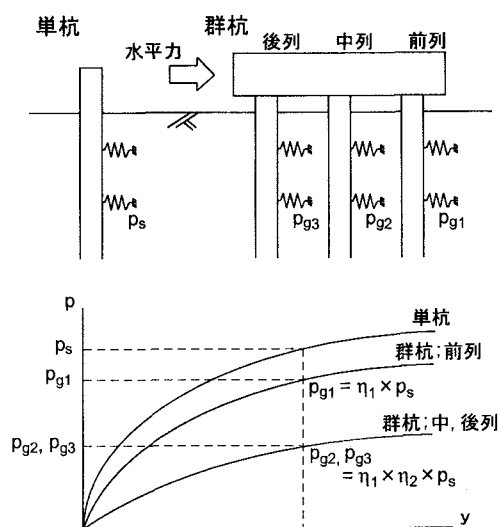


図-1 群杭効果を受ける杭の p - y 関係

性質も検討しておくことが望ましいと考えられる。

そこで、本研究では、まず、幸左らが検討した載荷試験結果に加えて、いくつかの既往の現位置、もしくは比較的大型の模型載荷実験結果を用いて地盤抵抗エリアによる手法の適用性を再評価する。次に、上記の問題点について、土木研究所基礎チームが過去に行ってきた室内での静的実験結果、振動台実験結果を用いて検討する。

2. 水平方向の群杭効果

(1) p - y 履歴則に群杭効果を考慮する方法

図-1 に示すように群杭中のある杭の地盤反力度 p_g は単杭の地盤反力度 p_s よりも小さくなる。一般に、同一変位レベルにおいて、単杭 > 前列杭 > 中列杭 > 後列杭の順で地盤反力度 p は小さくなっていく。Brown ら⁶⁾は、群杭中のある杭の p - y 関係 $p_g(y)$ は単杭の p - y 関係 $p_s(y)$ を元に、

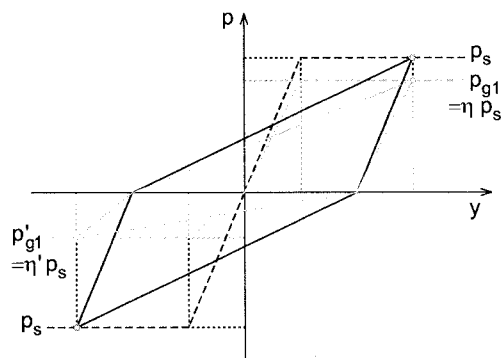


図-2 η の p - y 履歴則への適用

$$p_g(y) = \eta \times p_s(y) \quad (1)$$

と評価できるとしている。ここで、 y ：変位、 η ：群杭中のある一本の杭の群杭効率で、群杭効果による地盤反力度の低減率である。

現在、道路橋示方書では、レベル2地震動に対する照査を行う際に、水平地盤反力度係数 k_h および水平地盤反力度の上限値 p_u に対し、群杭効果による低減率 η_k, η_p をそれぞれ乗ずることで、群杭効果の影響を考慮している⁹⁾。しかし2パラメータとすると、動的解析を行う場合などでは杭位置ごとにその降伏点が変わるため、履歴則の設定が複雑になる。式(1)のように1つのパラメータにより評価する場合には、2パラメータの場合よりも精度は下がるかもしれないが、群杭効果による影響を簡単に設定できるという利点がある。

動的解析では正負交番の载荷になるため、杭に生じる変位によって群杭中の端部の杭は前列杭にも後列杭にもなりうる。例えば、図-1中の相互作用バネ p_{g1} に着目すると、変位が正側の载荷では前列杭となり、負側の载荷では後列杭となる。そこで、履歴則においては図-2のように単杭の骨格曲線を正側、負側それぞれで η を設定し低減させることで、簡易に群杭効果を考慮できる。このとき、例えば p_{g1} の正側と p_{g3} の負側では同じ η になると考えられる。

(2) 群杭効率 η の推定

群杭内の各杭間においてその p - y 関係が異なってくる要因として、図-3に示すような地盤抵抗領域の重なりが挙げられる。これは地盤の抵抗力の有効領域として図-3のようなくさび型の抵抗領域を考えたとき、この抵抗領域が重なり合うことによって杭が地盤から受ける抵抗力が減少し、各杭で受ける地盤反力度に差異が生じるものと考えられる^{6),10)}。以上の考えにより、幸左ら⁷⁾は基準となるある杭に対する着目杭の群杭効率 η を次式により表現している。

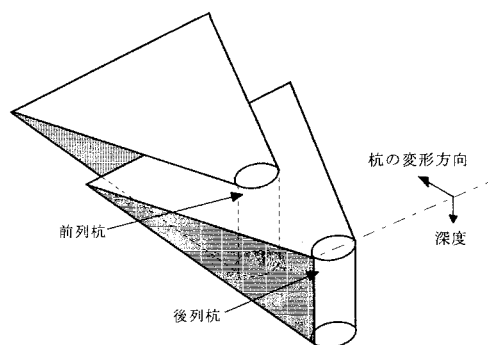


図-3 地盤抵抗領域の重なり

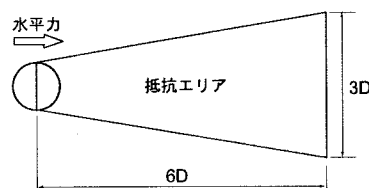


図-4 単杭の抵抗エリア

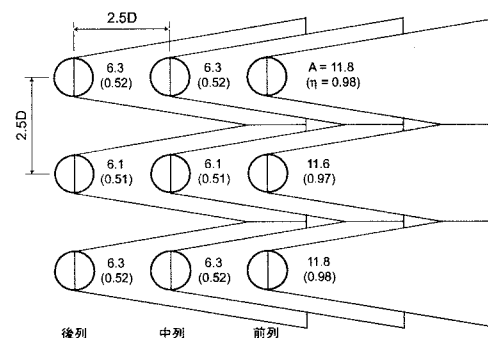


図-5 9本群杭 (杭間隔 $2.5D$) の抵抗エリア

$$\eta = \frac{\text{着目杭の抵抗エリア}}{\text{基準杭の抵抗エリア}} \quad (2)$$

ここで、抵抗エリアとは杭配置によって決まる地盤抵抗の有効面積である。そして幸左らは DIN4014¹¹⁾における荷重作用方向の杭間隔が $6D$ 、直角方向の杭間隔が $3D$ の場合には群杭効果は生じないという規定に基づき、単杭の抵抗エリアを図-4のように $6D \times 3D$ の範囲と仮定し、既往の载荷実験結果を用いて式(2)の適用性を調べた結果、実験値と比較的一致を示した。例えば杭間隔 $2.5D$ の9本群杭を考えたとき、単杭を基準とした抵抗エリアの比率は図-5のようになる。

本研究では群杭効率 η を群杭基礎全体の低減率に及ぼす要因と群杭中の荷重分担率に及ぼす要因とに分け、次式のように表すものとする。

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 \quad (3)$$

ここで、 η_1 ：群杭基礎全体の低減率に及ぼす要因、 η_2 ：群杭中における各杭の荷重分担率に及ぼす要因である。例えば、図-5 で示したような抵抗エリアが形成されるとき、 η_1 は荷重直角方向の抵抗エリアの重なり合いが、また η_2 は荷重方向の抵抗エリアの重なり合いがその影響因子として考えられる。

3. 群杭効率 η_1, η_2 に関する既往実験の調査

(1) 調査方法

既往の実験あるいは模型杭の水平載荷試験の中から、杭―地盤系の水平抵抗がほぼ上限とみなせる領域に達するまでの荷重を行った事例をとりあげ、群杭効率 η_1, η_2 の検討を行った。このうち、文献^{12),13),14),15)}はすでに幸左らが検討を行ったもの、文献^{6),16),17),18),19),20)}は今回新たに追加したデータである。調査対象とした実験とその諸条件について表-1に示す。

今回の検討において、群杭効率 η_1, η_2 は次式により算定した。

$$\eta_1 = \frac{\text{前列杭の杭頭せん断力}}{\text{単杭の杭頭せん断力}} \quad (4)$$

$$\eta_2 = \frac{\text{他列杭の杭頭せん断力}}{\text{前列杭の杭頭せん断力}} \quad (5)$$

η_1 は、群杭中でもっとも杭頭せん断力が大きくなる前列杭を基準杭として、単杭に対する群杭中の基準杭の群杭効率として算定した。また η_2 は、基準杭とした前列杭に対する他列杭の群杭効率として算定した。

群杭効率 η_1, η_2 は、実験により得られた杭頭せん断力 H の比率として算定する。杭頭でのせん断力 H ―水平変位 δ 関係は、計測データのバラつきに対する一種のフィルタ処理として杭基礎設計便覧²¹⁾にも示されている Weibull 分布曲線による近似をほどこした。Weibull 分布曲線の理論式は次式の通りである。

$$H(\delta) = H_{\max} \{1 - \exp(-\delta/\delta_y)\} \quad (6)$$

ここで、 $H_{\max}$ ：地盤反力度の最大値、 δ_y ：降伏点である。式 (6) による近似の一例を図-6 に示す。以降の検

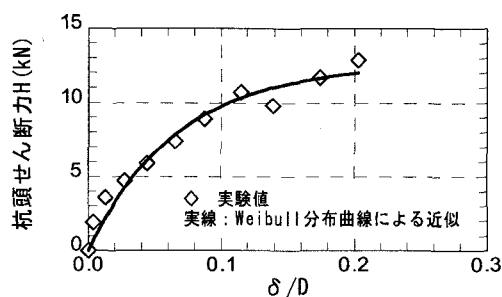


図-6 Weibull による近似の一例 (土研 H12・単杭)

討において群杭効率 η_1, η_2 の値は、降伏点を越え塑性領域に十分達していると考えられる杭径の 0.1 倍の変位を Weibull 近似式に代入して求めている。

(2) 抵抗領域の考えによる推測値との比較

まず、式 (3) の精度を確認する。図-7 は縦軸に群杭効率 η_1, η_2 、横軸に杭間隔をとったもので、図中の曲線は地盤抵抗エリアを図-4 のように $6D \times 3D$ の範囲と仮定した場合の各杭間隔における群杭効率 η の推定値である。

図-7 のうち η_2 のグラフを見ると、図中において $2.5D$ の粘性土で $\eta_2 = 1$ に近くなっているデータを除くと、推測値と実験値はよい相関をみせている。この $\eta_2 = 1$ となった荷重試験は、比較的硬質の粘性土で行われたものである¹⁸⁾。以上より、砂地盤および弱い粘土層における群杭効率 η_2 、つまり群杭中における各杭の荷重分担率に及ぼす要因は、 $6D \times 3D$ の地盤抵抗エリアを考えることによって表すことができそうである。

一方、 η_1 のグラフを見ると、推測値は杭間隔が狭くなるほど η_1 が小さくなるという傾向は一致しているものの、実験値に比べると差が大きく、特に粘性土の実験値ではより大きな低減率となっている。今後サンプル数を増やし、土質の違いを考慮したさらなる検討を行う必要があると考えられる。

表-1 群杭効率 η_1, η_2 の調査対象

実験名	構造系	杭種	杭径	地盤	その他
土研 H4 ¹²⁾	単杭～9 本杭	鋼管杭	101.6 mm	砂質土	
阪高・梅田 ¹³⁾	単杭/直列 2 本杭	場所打ち杭	1000 mm	砂/シルト	
阪高・岸和田 ¹⁴⁾	単杭/9 本杭	場所打ち杭	1200 mm	埋立 (砂礫)/洪積	
首都高 ¹⁵⁾	単杭/9 本杭	鋼管杭	318.5 mm	埋土/砂/粘土	
土研 H12 ^{16),17)}	単杭/4 本杭	鋼管杭	114.3 mm	砂質土	
小野ら ¹⁸⁾	単杭/4 本杭/9 本杭	鋼管杭	18.01(914.4) mm	粘性土	遠心 50g
Brown ⁶⁾	単杭/9 本杭	鋼管杭 (グラウト)	273 mm	砂/(根入れ部は粘土)	
McVay ¹⁹⁾	単杭/9 本杭	パイプ	9.6(430) mm	砂質土	遠心 45g
Rollins ²⁰⁾	単杭/9 本杭	鋼管 (C 充填)	324 mm	粘性土地盤	

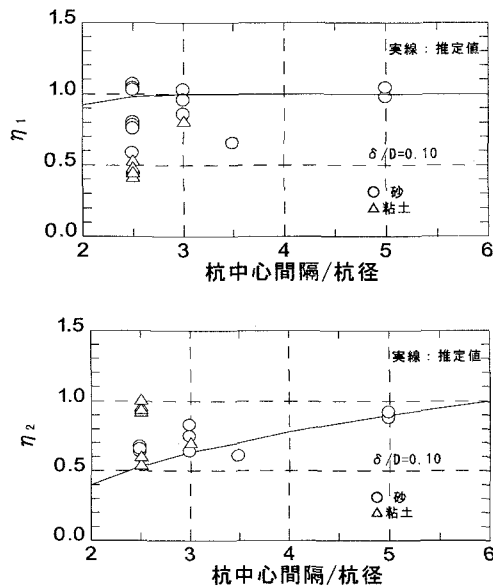


図-7 杭間隔の検討

(3) 地盤反力度による群杭効率を用いた深度方向の検討

群杭効率として各杭間の作用力の比を求めるとき、一般的には杭頭せん断力の比として求められることが多い。しかし、実際の動的解析の履歴則などにおいて群杭効率 η により低減させるのは、杭頭せん断力ではなく各相互作用バネの地盤反力度である。そこで、表-1の実験のうち土研 H4 実験を対象として、各深度で発揮される地盤反力度の群杭効率を評価した。

比較結果を図-8に示す。横軸の η_1, η_2 は、各深度の $p-y$ 関係を算出した後、杭頭せん断力の場合と同じく Weibull 近似式に杭径の 10% の変位を与えて求めた地盤反力度 p を用いて算出している。縦軸は $z\beta$ で、深さ z を杭の特性値 $1/\beta$ で無次元化したものである。 β の値は文献中¹²⁾に示されている値を用いた。

図-8のうち η_2 のグラフを見ると、 $z\beta = 1.5$ 以深では群杭効果が急激に変化しているが、これは $1/\beta$ を超え、分母となる前列杭の地盤反力度の絶対値が小さくなったためと考えられる。 $z\beta = 1.5$ 以浅では、 $\eta_2 = 0.5$ 程度のところに集まっている。調査対象の土研 H4 実験では杭間隔が $2.5D$ で、地盤抵抗エリアによる推測値は 0.52 となる。両者が一致することから、 η_2 においては杭頭反力度から算定した値を履歴則の低減率として使用できると考えられる。

一方、 η_1 のグラフを見ると、深度方向にほぼ一定値となる傾向が見られる。しかし、実験値と推測値を比較すると、前節の杭頭せん断力による比較の場合と同様に、両者は一致しない。特に 3×3 本の方形配列の杭基礎では極端に小さな値となっており、前述の土質の違いによる調査に加え、杭配置形状についても検討を

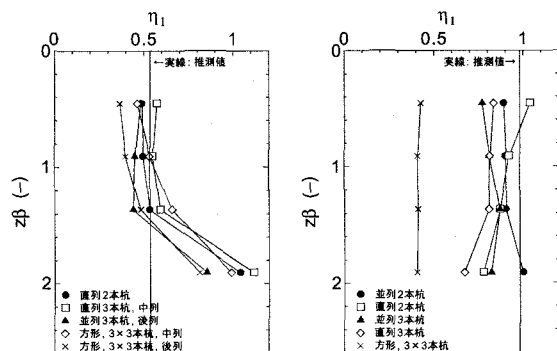


図-8 深度方向の検討

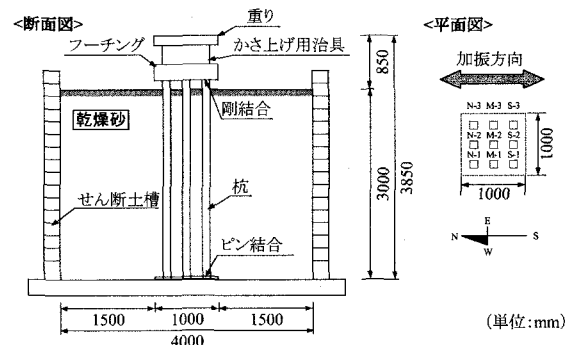


図-9 振動台実験の概要図

行う必要があると考えられる。

(4) 振動台実験における群杭効率 η_2 について

群杭基礎模型 (3×3 本、杭径 $D = 125$ mm、杭間隔 $2.5D$) を乾燥砂地盤中に設置して行った振動台実験³⁾の結果より得られた η_2 の値について報告する。実験概要を図-9に示す。本実験結果では単杭の実験を行っておらず、 η_1 に関する検討は行わない。

図-10に正弦波、入力加速度 500 gal の加振実験により得られた各杭位置における地盤反力度分布を示す。図-10は図-11の時刻 A における地盤反力度分布図である。ここに時刻 A は、図-11の time window 内で杭 S-1 が前列杭となり、作用する地盤反力度が最大となった時刻である。同時刻において杭 M-1 は中列杭、杭 N-1 は後列杭となっている。また、図-10には、正弦波 500 gal の加振実験で荷重計により直接計測した地盤反力度を併せて $\circ, \diamond, \triangle$ の記号で示す。縦軸は深さ z を杭の特性値 $1/\beta$ で無次元化したもので、 β は実験前に行ったコーン貫入試験結果で得られた換算 N 値より地震時の変形係数 E_0 を推定して算出した。正弦波 500 gal の加振において、杭と地盤の相対変位は最大で杭径の 0.1 倍程度であった。

図-10の地盤反力度分布を用いて、 $z\beta = 0.15 \sim 1.5$ の

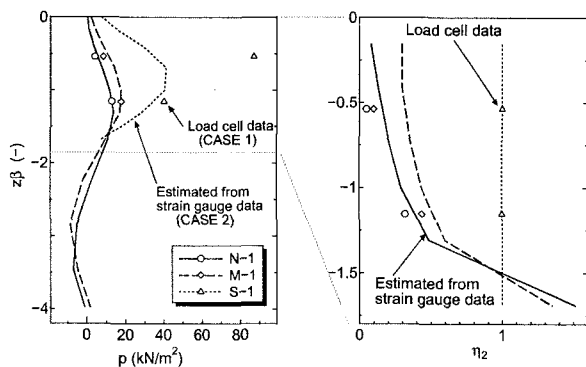


図-10 地盤反力度分布と群杭効率

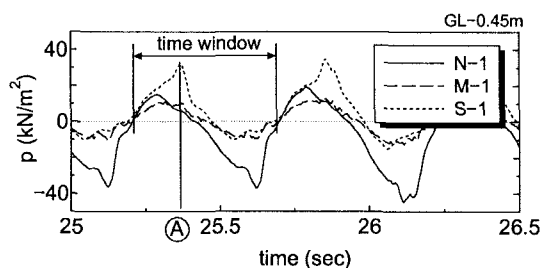


図-11 地盤反力度の時刻歴波形図

範囲における前列杭に対する中列杭・後列杭の群杭効果 η_2 について調べてみる。地表面から $z\beta = 1.3$ 程度の深度まではその他の区間では群杭効果が深さ方向にほぼ一定に表れている。しかし、それ以深のキネマティック相互作用が顕著となる深い位置については、浅い位置とは異なり群杭効果は小さく、群杭効率は 1 に近づいていく可能性がある。

また、地盤抵抗エリアの考えにより η_2 を推測すると、基礎モデルの杭間隔が $2.5D$ なので $\eta_2 = 0.52$ となる。実験値は中列 (M-1) で $0.3 \sim 0.5$ 程度、後列 (S-1) で $0.1 \sim 0.4$ 程度であり、若干小さめの値にはなっているが、地盤抵抗エリアの考えにより十分推測できていると考えられる。 η_2 の実験値が小さくなった原因としては、同一時刻において杭体に生じる変位が必ずしも一致しないことが挙げられる。今回の検討では、杭の変位レベルの影響は特に考慮していないが、例えば、ある time-window 内での最大値を用いて群杭効率を計算したり、または、 $p-y$ 履歴ループを求めたのち骨格曲線を評価した結果に基づき検討すれば、より適切な群杭効率の値が得られると考えられる。

4. まとめ

p -multiplier の考えにより規定した群杭効率 η を群杭基礎全体の低減率に及ぼす要因 η_1 と群杭中における各杭の荷重分担率に及ぼす要因 η_2 に分け、その低減率に

ついて地盤抵抗エリアの相互干渉の考えによって評価した。

その結果、群杭中における各杭の荷重分担率に及ぼす要因 η_2 に関しては地盤抵抗エリアの相互干渉の考えによって履歴則の低減率を十分評価できることが確認できた。しかし、群杭基礎全体の低減率に及ぼす要因 η_1 に関しては地盤抵抗エリアの相互干渉の考えでは評価しきれず、今後その定量的評価についてはさらに検討が必要である。

また、杭が受ける水平地盤抵抗の群杭効果について深さ方向の検討も行った。その結果、杭の水平支持力に大きく寄与すると考えられる地表面から $1/\beta$ を超えるあたりまでは群杭効率 η_1, η_2 はほぼ一定値を示すことが確認できた。

参考文献

- 1) 白戸真大, 福井次郎, 古関潤一: Winkler 型の基礎・地盤間水平相互作用パネの履歴モデル, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.148, 2003.
- 2) 白戸真大, 秋田直樹, 福井次郎: 基礎の地盤反力度特性に関する振動台実験, 土木学会地震工学論文集, Vol.26, pp.869-872, 2001.
- 3) 野々村佳哲, 白戸真大, 福井次郎, 喜多直之: 群杭基礎の大型振動台実験, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.153, 2003.
- 4) 白戸真大, 福井次郎, 古関潤一: 基礎・地盤間相互作用パネの新しい履歴モデルについて, 地震時保有水平体力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, Vol.7, 2004.
- 5) (社) 土質工学会 杭基礎の設計法とその解説編集委員会: 杭基礎の設計法とその解説, pp.840-850, 1985.
- 6) Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C.: Lateral load behavior of pile group in sand, *J. of Geotech. Eng.*, Vol.114, No.11, pp.1261-1271, 1988.
- 7) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀雄: 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.
- 8) 独立行政法人土木研究所: 地震時の地盤の振動変位が道路橋基礎に与える影響度と地盤条件の関係, 土木研究所資料第 3919 号, 2004.
- 9) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.408-410, 2002.
- 10) 富永晃司, 山肩邦男: 地盤およびくいの弾塑性特性を考慮した単ぐいの水平抵抗機構に関する理論的考察, 日本建築学会論文集, Vol.290, pp.13-22, 1980.
- 11) Deutsches Institut für Normung: DIN4014, 1987.
- 12) 建設省土木研究所: 群杭モデルの水平方向載荷試験, 土木研究所資料第 3079 号, 1992.
- 13) 阪神高速道路公団: 旧梅田入路構造物に関する調査研究報告書, (財) 阪神高速道路管理技術センター, 1992.
- 14) 阪神高速道路公団 (編): 岸和田旧港実杭水平載荷試験実験報告書, (財) 阪神高速道路管理技術センター, 1994.
- 15) 斉藤亮, 飯子道則, 五瀬伸吾, 易鋒: 杭基礎の水平方向大変形時の挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1395-1408, 1993.
- 16) 独立行政法人土木研究所: 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書 (その 2), 共同研究報告書第 278 号, 2001.
- 17) 独立行政法人土木研究所: 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書 (その 3), 共同研究報告書第 282 号, 2002.

- 18) 小野勇, 山田清臣, 菊田征勇, 松浦聖, 岡田勝也: 粘性土地盤における群杭の水平大変形挙動の実験的検討, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.223-233, 2000.
- 19) McVay, M., Casper, R. and Shang, T.: Lateral response of three-row groups in loose sands at 3D and 5D pile spacing, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.121, No.5, pp.436-441, 1995.
- 20) Rollins, K.M., Peterson, K.T. and Weaver, T.J.: Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, *J. of Geotech. and Geoenv. Eng.*, Vol.124, No.6, pp.468-478, 1998.
- 21) (社) 日本道路協会: 杭基礎設計便覧, pp.173-177, 1992.