

# 地震時の地盤の非線形性を考慮した杭の水平抵抗に関する研究†

町田幸紀\*, 関崇夫\*\*

## A Study on Lateral Resistance of Pile Taking Into Account Soil Nonlinearity during Earthquake†

Yukinori Machida\* and Takao Seki\*\*

A behavior of a pile supported structure is affected by nonlinear dynamic soil-structure interaction during earthquake. There are two major factors which affect the nonlinear soil-structure interaction, the one is the local nonlinearity and the other is the site nonlinearity. In this paper, the p-y model has been developed by taking into account both of these two effects. The applicability of this p-y model to the site nonlinearity has already been confirmed through the simulation analyses of lateral load tests of full-scale single piles. The simulation analyses are conducted to confirm that the proposed model is useful in the dynamic soil-pile-structure interaction problem. The estimated results by pseudo-static analyses using the proposed p-y model are compared to the results of the bending moment, displacement and shear force in the centrifuge table test and in the shaking table tests. The estimated bending moment, displacement and shear force are good agreement with observed results.

**Key Words:** Single pile, Lateral resistance of pile, Centrifuge model test, Large shaking table test, Simulation analysis, Pseudo-static analysis

### 1 はじめに

杭支持建物の耐震検討に用いられる解析モデルとして、上部構造と杭基礎を連成させ動的に杭応答を算定する上部建物一杭基礎一体型モデルや、上部構造と杭の応答解析を別々に行う分離型モデルがある。特に、地震等による地盤変位を地盤ばねを介して杭に作用させる応答変位法は、分離型モデルに分類され、モデル化の簡便さから一般建物の杭の耐震設計に用いられる場合が多い。

しかし、応答変位法に用いる地盤ばねは、杭頭慣性力に対する場合、杭の水平載荷試験結果に基づいて  $N$  値等の地盤定数と関連付けられた水平地盤反力係数を用いて評価される。一方、地震時の地盤変位に対する場合、地盤の応答解析で用いられる地盤の弾性係数を用いた Mindlin の第 II 解や Francis の式など弾性論に基づき評価されるなど、作用する外力により水平地盤反力係数や地盤反力～変位関係の評価法が異なっている。例えば、応答変位法により杭頭慣性力と地盤変位を同時に作用さ

せる場合、どちらの地盤ばねを使用すべきか設定方法が確立されておらず、設計者の判断にゆだねられている現状がある<sup>1)</sup>。

このような問題を解決するため、杭頭慣性力や地盤変位に対して同一の水平地盤反力係数と地盤反力～変位関係で評価を行った研究として、時松ら<sup>2)</sup>は、実大杭の杭頭および地中水平載荷試験を実施し、その試験結果から新たに地盤反力～変位関係を提案し、提案モデルの妥当性を検証している。さらに、基礎を根入れした杭一構造物系の大型振動台実験結果から得られた杭応力を、応答変位法を用いて評価する際に、先に提案した地盤反力～変位関係を適用してその妥当性を確認している<sup>3)</sup>。また室野ら<sup>4)</sup>は、地盤反力～変位関係として双曲線モデルを適用し、杭周辺地盤の局所的な非線形性 (Local no-linearity) と自然地盤が地震動により非線形化するサイト非線形性 (Site no-linearity) が、杭の水平抵抗特性に与える影響を検討している。しかし、これらの解析

† 原稿受理 平成 26 年 2 月 28 日 Received February 28, 2014

\* 建築学専攻大学院生 (Graduate Student, Department of Architecture)

\*\* 建築学科 (Department of Architecture)

で使用している水平地盤反力係数は、 $N$ 値や一軸圧縮強度などから評価した変形係数に基づき算定された値を用いている。以上のことから、杭の静的水平載荷試験結果に対するシミュレーション解析や、地震時の動的効果を考慮した応答変位法により杭の応答解析を行うに当たり、弾性論に基づく水平地盤反力係数と地盤反力～変位関係の適用性を検討した研究は少ない<sup>5)・6)</sup>。

著者の一人は<sup>7)</sup>、地盤変位による杭応力を評価する際の地盤ばねが、自由地盤の非線形性を評価した弾性論の水平地盤反力係数として設定されることが多いことから、弾性論に基づく水平地盤反力係数と大変位域までの杭の水平抵抗挙動を把握するため、新たに地盤反力・変位関係を提案した。その手法を、地盤の PS 検層結果に基づく動的な物性値が得られている単杭の実大の静的水平載荷試験のシミュレーション解析に適用しその有効性について示した。

本報では、静的水平載荷試験に採用した水平地盤反力係数と地盤反力～変位関係を、構造物一杭一地盤連成モデルの群杭支持構造物の遠心模型振動実験や大型振動台実験結果に対するシミュレーション解析に適用し、動的な問題への有効性を検討するとともに、ひずみレベルにおける杭応力の影響について示す。

## 2 杭の水平抵抗

### 2・1 水平地盤反力係数

解析には、地震時の地盤変位を考慮した杭の水平抵抗および水平変位を求めるために応答変位法を採用した。この手法は、杭体を梁要素、地盤を連続するばねに置換した弾性支承梁と仮定した杭に、杭頭水平力と地盤ばねを介して地盤変位を与える解法で、基本方程式は次式となる。

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + k_{hf} B (y - y_g) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $E_p$ ：杭のヤング係数、 $I_p$ ：杭の断面 2 次モーメント、 $x$ ：深度、 $y$ ：杭の水平変位、 $k_{hf}$ ：水平地盤反力係数、 $B$ ：杭径、 $y_g$ ：地盤変位を表す。

本報では、水平地盤反力係数に半無限一様地盤上にある無限長の梁に荷重を作用させたときの関係式として、Francis の提案式を用いる。

$$k_{hf} = 1.3 \cdot \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)B} \cdot \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_p I_p}} \quad (2)$$

ここに、 $E_s$ ：地盤の変形係数、 $\nu_s$ ：地盤のポアソン比を表す。

また地盤の変形係数 $E_s$ は、せん断波速度から求まる変形係数を用いる。

### 2・2 水平地盤反力～変位関係

本報では、単杭の実大水平載荷試験結果のシミュレーション解析で採用した  $p$ - $y$  曲線を用いる<sup>7)</sup>。

$$p = p_u \left[ 1 - \left\{ \exp\left(-\frac{k_f y}{p_u}\right) \right\}^\xi \right] \quad (3)$$

ここに、 $p_u$ ：地盤の極限水平地盤反力、 $k_f$ ：Francis の式から評価される地盤ばね ( $k_f = k_{hf} \cdot B$ )、 $y$ ：杭と地盤

の相対変位、 $\xi$ ：原点における地盤ばね値を調整するパラメーターを表す。

単杭の実大水平載荷試験のシミュレーション解析では $\xi = 0.15$  (Vesic の提案式を地盤反力係数として用いる場合は $\xi = 0.37$ ) としたが、動的解析時の水平地盤反力係数は、地震時の地盤のせん断ひずみによる変形係数  $E_s$  の剛性低下を考慮して算定するため $\xi = 1.0$ とする。

地盤の極限水平地盤反力は、ランキンの受働土圧の 3 倍 ((4)式) として設定した。

$$p_u = 3(K_p \cdot \sigma_z + 2 \cdot c \sqrt{K_p}) \quad (4)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

ここに、 $K_p$ ：受働土圧係数、 $\sigma_z$ ：有効上載圧、 $c$ ：粘着力、 $\phi$ ：内部摩擦角を表す。

次節で行う遠心模型実験、大型振動台実験結果のシミュレーション解析では、杭に作用させる外力は、杭頭に上部構造物からの慣性力を、杭先端からの相対変位を地盤ばねを介して杭体に与える。杭の応答は、杭と地盤を深さ方向に多層分割した第  $i$  層について (1)式の微分方程式を解き、変位 ( $y_i$ )、傾斜角 ( $\theta_i$ )、曲げモーメント ( $M_i$ )、せん断力 ( $Q_i$ ) の一般解を求める。次に、各層の境界における  $y_i$ 、 $\theta_i$ 、 $M_i$ 、 $Q_i$  の連続条件、杭頭、杭先端の境界条件から連立 1 次方程式を構築し、(3)式の  $p_i \sim y_i$  曲線の割線勾配を水平地盤反力係数  $k_{hfi}$  として与え、 $p_i \sim y_i$  関係を満足するような解を繰返し収れん計算によって求める直接反復法により行う。

## 3 遠心模型実験に対するシミュレーション解析

### 3・1 遠心模型実験の概要

木村ら<sup>8)・10)</sup>の行った杭基礎構造物の遠心模型実験結果に対し、前報<sup>7)</sup>で提案した地盤反力-変位関係を用いて、応答変位法によりシミュレーション解析を行う。解析を行ったモデルの実験模型および、杭基礎構造物模型諸元と実構造物に換算したものを示す。(Fig. 1, Table 1) また、実スケールに換算した自由地盤の解析諸元を Table 2 に示す。実験モデルは基礎が剛体とみなせる剛基礎モデルとし、地盤は相対密度 93% の気乾状態の豊浦砂である。剛基礎モデルの基礎は厚さ 37mm のアルミ板で、地表面より 5mm 離して設置している。また、上部構造物は断面 3mm×10mm、長さ 85mm の板ばね 9 枚に支持されている。杭基礎は杭径 12mm (実換算 360mm)、肉厚 0.5mm (実換算 15mm)、杭長 270mm (実換算 8.1m)、杭間隔は 90mm (実換算 2.7m、杭径の 7.5 倍)、正方配列の 9 本群杭である。この 9 本のうち 3 本の杭 (隅杭、辺杭、中杭) を解析した。

実験は遠心加速度 30G 場 (縮尺 1/30) において底部より実換算で最大加速度が約 1.40m/s<sup>2</sup> の臨海波を与えている。また、自由地盤系の 1 次固有振動数は 4.3Hz、杭一構造系モデルの 1 次固有振動数は 1.6Hz である<sup>8)</sup>。

地盤の極限水平地盤反力 $p_u$ は、(4)式で与えられるランキンの受働土圧の 3 倍とし、内部摩擦角  $\phi = 45^\circ$ 、粘着力  $c = 0$  として算定した<sup>10)</sup>。杭体は弾性、境界条件として杭



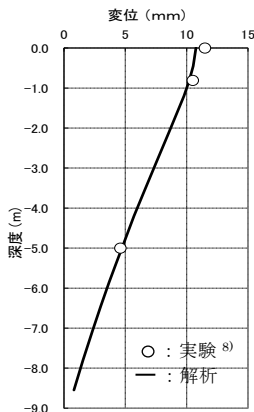


Fig.2 自由地盤の変位分布

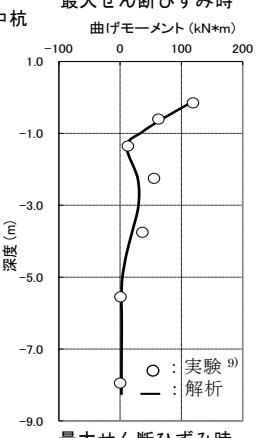
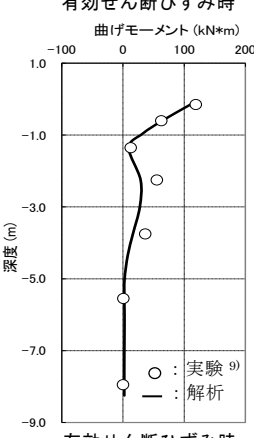
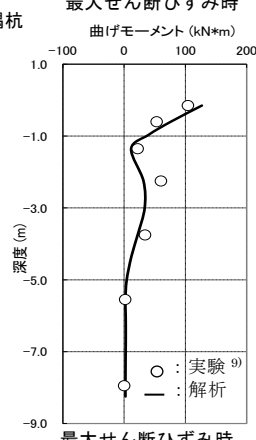
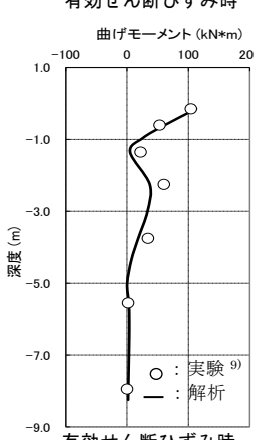
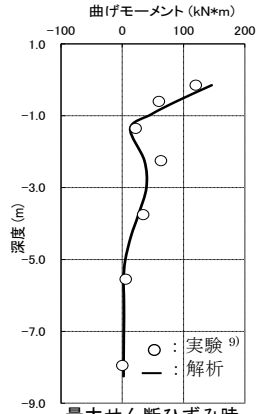
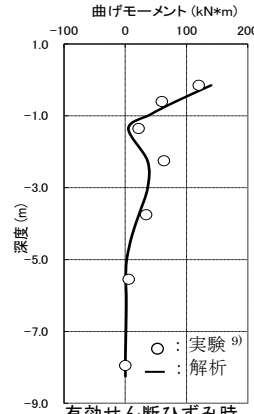


Fig.3 杭体の曲げモーメント分布

ないため、一般的に土槽実験などで地盤材料として用いられる豊浦標準砂の試験データを使用し、岩崎・龍岡ら<sup>15)</sup>の提案式に基づき拘束圧依存性を考慮して設定した。地震時のせん断弾性係数は、SHAKEにより RINKAI92を与えた地盤応答解析を行い、得られた各層の最大せん断ひずみ時のせん断弾性係数から算定した。また、水平地盤反力係数の算定時に用いる地盤の変形係数 $E_s$ は、最大せん断ひずみ時のせん断弾性係数と、最大せん断ひずみに0.65を乗じた有効せん断ひずみ時のせん断弾性係数およびポアソン比(=0.333)から算定した。

極限水平地盤反力 $p_u$ は、(4)式で与えられるランキン受働土圧の3倍とし、地盤の粘着力については、乾燥砂であることから $c=0$ と仮定した。また、地盤の $N$ 値は、Meyerhof式<sup>16)</sup>((6)式)より算定した。内部摩擦角 $\phi$ は、得られた $N$ 値から建築基礎構造設計指針<sup>1)</sup>に基づき算定した。

$$D_r = 21 \left( \frac{N}{\sigma'_v / 98 + 0.7} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$\phi = \sqrt{20N_1} + 20 \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20) \quad (7)$$

$$\phi = 40^\circ \quad (N_1 > 20) \quad (8)$$

$$N_1 = N \cdot \sqrt{\frac{98}{\sigma'_v}} \quad (9)$$

ここで、 $D_r$ : 相対密度(%),  $\sigma'_v$ : 有効上載圧( $kN/m^2$ ),  $N_1$ : 換算 $N$ 値を表す。杭体は弾性、境界条件として杭頭固定、杭先端ピンとした。

Table3 杭の諸元

杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (m)	曲げ剛性 ( $kN \cdot m^2$ )	降伏強度 ( $N/mm^2$ )
165.2	3.7	4	1255	440

	根入れ無	根入れ有
実験モデル		
構造物固有周期	DAS( $T_b=0.06s$ )	DBS( $T_b=0.06s$ )
	DAL( $T_b=0.7s$ )	DBL( $T_b=0.7s$ )

Fig.4 実験モデル (文献3) 図1に加筆)

#### 4・2 自由地盤の応答変位と杭頭水平力

表層地盤の応答変位は、実験結果の地盤の最大変位分布図<sup>3)</sup>から、同一の地盤モデルや加振条件であっても自由地盤の変位分布に差異が見られることから (Fig. 5のc), d)を参照) モデルごとに地盤の初期せん断剛性を調整せず、SHAKEを用いて DAS, DAL, DBS, DBLモデルの地表面の変位がそれぞれ7.2mm, 7mm, 10mm, 9mmとなるように RINKAI92の最大加速度を調整して求めた。各モデルの自由地盤の応答変位分布を Fig. 5に示す。解析結果の地盤変位分布は実験結果のそれにほぼ対応している。応答変位法による杭応答解析時には、杭

先端位置に対する相対変位を地盤ばねを介して杭体に与えた。

構造物慣性力は、DAS モデル、DAL モデルでは構造物慣性力と杭頭曲げモーメントの関係図<sup>3)</sup>から、それぞれ 125kN, 54kN を与えた。また、DBS モデルと DBL モデルでは根入れがあることから、上部構造物からの慣性力と基礎に作用する土圧を考慮した値 66kN, 36kN を与えた<sup>13)</sup>。

### 4・3 解析結果

Fig. 6 に、各モデルの杭頭水平力と地盤変位を同時に作用させた場合と、杭頭水平力による杭応力と地盤変位による杭応力を二乗和平方根により重ね合わせた杭体の曲げモーメント分布を示す。上部構造が短周期の DAS モデルと DBS モデルでは同時に作用させ、長周期の DAL モデルと DBL モデルでは二乗和平方根で評価した。

根入れの無い DAS モデルと DAL モデルでは、解析による杭頭曲げモーメントが実験結果よりも大きい値となった。これは、地盤を上載圧を考慮して算定したが、地表面付近ではせん断弾性係数を過小に評価したことが考えられる。また、地中部の最大曲げモーメントとその発生深度は DAS モデル、DAL モデルともに実験結果と対応している。一方、根入れのある DBS モデルでは、杭頭曲げモーメント、地中部の最大モーメントとその発生深度ともに実験結果とほぼ対応している。また、DBL モデルでは杭頭曲げモーメントは実験結果と対応が良い。

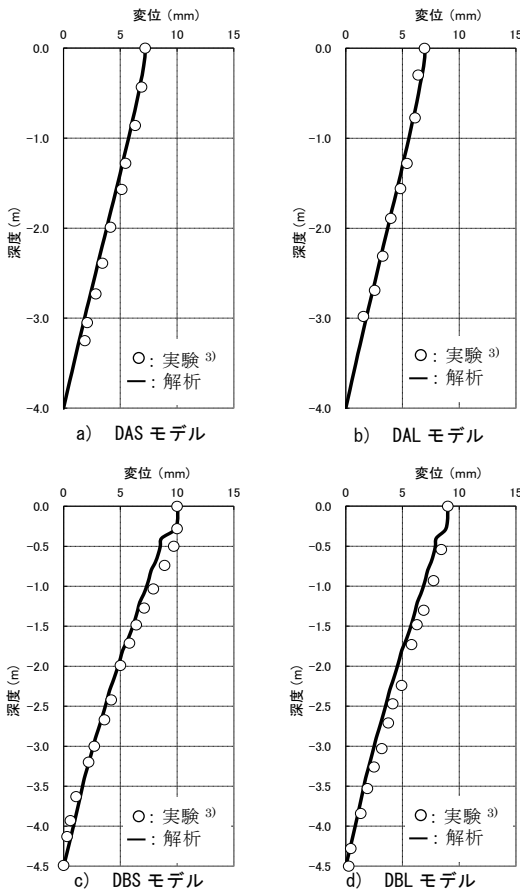


Fig.5 自由地盤の変位分

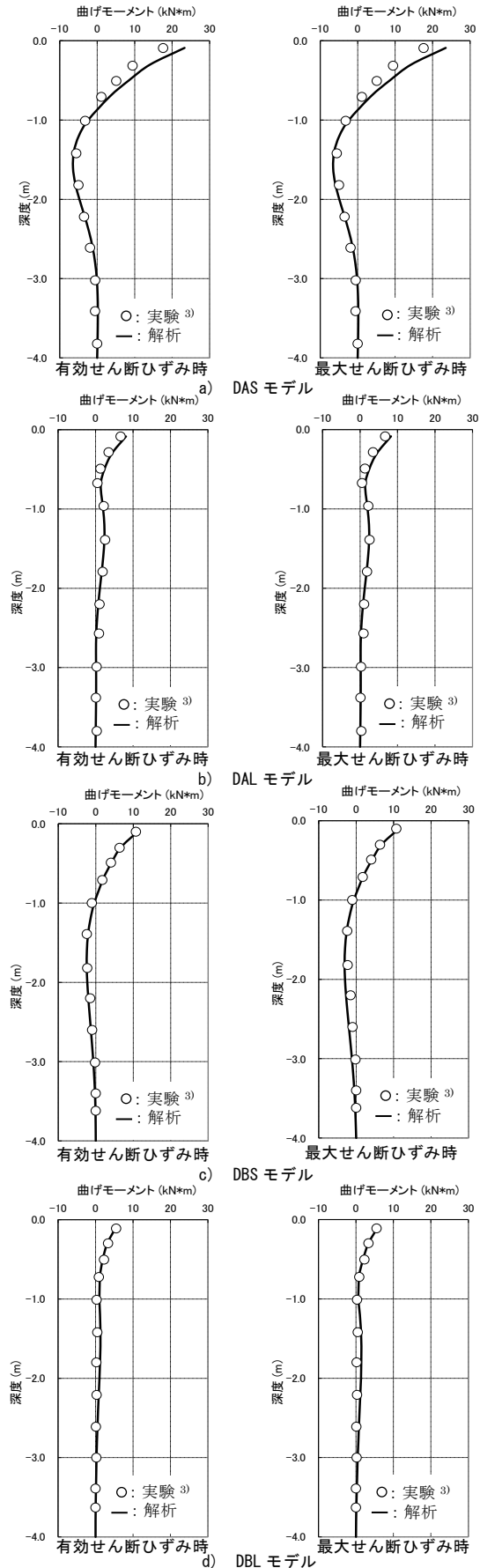


Fig.6 杭体の曲げモーメント分布

有効せん断ひずみ時の杭応力と最大せん断ひずみ時の杭応力を比較すると、最大せん断ひずみ時の杭応力は4 ケースとも過大に評価する傾向がみられる。これは、最大せん断ひずみ時では剛性低下の進んだ変形係数として評価するために地盤反力が低下したことが考えられる。一方、有効せん断ひずみ時の杭応力は最大せん断ひずみ時に比べ実験結果との対応が良い結果が得られた。

## 5 まとめ

本報では、前報<sup>7)</sup>で提案した水平地盤反力係数と地盤反力-変位関係の動的問題への適用性を検討するために、応答変位法により群杭支持構造物の遠心模型実験、大型振動台実験結果に対するシミュレーション解析を行った。2 事例の遠心模型実験、大型振動台実験結果に対するシミュレーション解析から、解析結果は実験結果と概ね対応した結果が得られていることから、前報<sup>7)</sup>で提案した水平地盤反力係数と地盤反力～変位関係が動的問題にも有効である可能性を確認した。

また、地盤の変形係数については、地盤の剛性を過小評価しないためにも、有効せん断ひずみ時の変形係数を用いることで実験結果との対応が良いことが得られた。

なお、本報は限られた実験結果に対して解析を実施したもので、さらにデータの蓄積と検証を図る必要がある。

最後に、本報の作成にあたり、貴重な実験データを引用させて頂いた文献の著者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針,2001
- 2) 時松孝次，鈴木比呂子，佐伯英一郎：実大杭の杭頭および地中水平載荷試験に基づく地盤反力変位関係，日本建築学会構造系論文集，第 562 号，pp.53-58，2002.12
- 3) 時松孝次，鈴木比呂子，佐藤正義：地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第 587 号，pp.125-132，2005.1
- 4) 室野剛隆，西岡英俊，野上雄太：地盤の非線形性を考慮した杭の地震時の水平抵抗特性，鉄道総研報告，Vol.24，No.7，pp.35-40，2010.6
- 5) 町田幸紀，関崇夫：杭の水平抵抗解析に用いる地盤反力変位関係（その 3：動的問題への適用性に関する検討），日本地震工学会大会梗概集，pp.104-105，2012 年
- 6) 町田幸紀，関崇夫：地震時の地盤の非線形性を考慮した杭の水平抵抗解析に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.104-105，2013.8
- 7) 関崇夫，元井康雄，鈴木直子：単杭の水平抵抗解析に用いる地盤反力変位関係のモデル化，構造工学論文集，Vol.58B，pp.133-138，2012 年
- 8) 真野英之，木村匠，田中鉄也，松井和幸ほか：杭基礎構造物の耐震性及び基礎梁の剛性の影響(その 1～その 4)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.713-720，2004 年
- 9) 木村匠，社本康広，松井和幸，真野英之，護雅史，中井正一：杭基礎構造物の耐震性及び基礎梁の剛性の影

響，日本建築学会構造系論文集，No.618，pp.41-48，2007 年

- 10) 木村匠：杭基礎構造物の動的相互作用を考慮した立体振動性状に関する研究，千葉大学学位論文，2009.1
- 11) 時松孝次，鈴木比呂子，鈴木康嗣，藤井俊二：大型振動台実験に基づく液状化過程における杭の水平地盤反力の評価，日本建築学会構造系論文集，第 553 号，pp.57-64，2002 年
- 12) Tokimatsu, K., Suzuki, H. and Sato, M. : Influence of inertial and kinematic components on pile response during earthquakes, 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering and 3<sup>rd</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp.768-775, 2004
- 13) Tokimatsu, K., Suzuki, H. and Sato, M. : Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation , Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, pp.753-762, 2005
- 14) 鈴木比呂子，時松孝次：応答変位法に基づく大型振動台実験における杭の軸力および曲げ応力の評価，第 39 回地盤工学研究発表会，pp.1523-1524，2003.7
- 15) 岩崎，龍岡他：地盤の動的変形特性に関する実験的研究（Ⅱ），土木研究報告，第 153 号，1980