変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討

EARTHQUAKE RESPONSE OF PILE FOUNDATION CONSIDERING CONTRIBUTION
OF AXIAL-FORCE FLUCTUATION IN PILES

酒向 裕司*, 宮本 裕司**

Yuji SAKO and Yuji MIYAMOTO

Many pile foundations were severely damaged in the reclaimed land during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, January 17, 1995. The objective of this study is to investigate the contribution of axial-force fluctuation in piles to the responses of a pile foundation in the liquefied soil during earthquake. Earthquake response analyses of a structure on a pile foundation are conducted using the numerical model that takes into account the relationship between bending moment and curvature dependent on axial force. These analytical results indicate that axial-force fluctuation in piles affects the elastic-plastic behavior of a pile foundation.

Keywords: pile non-linearity, earthquake response, interaction, axial-force fluctuation

杭体非線形, 地震応答, 相互作用, 軸力変動

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、多くの杭基礎に被害が発生した。杭被害の調査・分析結果から、主な被害原因として、杭頭部では上部構造物からのせん断力、転倒モーメントが、地中部では地盤からの強制変形が杭体に過度の応力を生じさせたことが報告されている^{1), 2)}。筆者らも、ポートアイランド地点での観測記録を入力動とした杭支持構造物の地震応答解析を行い、液化化による地盤剛性の低下と地盤震動の増大が杭基礎の被害に大きく影響を与えたことを指摘している^{3), 4)}。このような被害を受け、杭基礎の設計用地震荷重として従来の杭頭に作用させる上部構造物からの慣性力に加えて、地盤震動による強制外力を考慮する設計法の確立が緊急の課題となっている⁵⁾。

一方、杭基礎の強度、変形性能は杭体に生じる軸力に依存するため⁶⁾、杭基礎の被害メカニズムを解明するためには地震時に生じる変動軸力の影響を検討する必要がある。変動軸力を考慮した検討としては、茶谷らによりRC杭の被害解析⁷⁾が行われているが、軸力の変化を取り入れながら建物の最大慣性力を静的に杭頭に作用させる検討に止まっている。さらに、地盤震動による強制外力については考慮されていない。また、現在実施に向けて検討がなされている性能規定型設計では、地震荷重の大きさに応じた杭基礎の変形(被害)状態を的確に把握することが必要となる。したがって、杭基礎の性能評価においては、軸力に依存した杭体の強度・変形性能を考慮して変形(被害)状態を評価することが重要となる。

このようなことから、本論文では杭体の復元力特性に軸力依存性

を取り入れた上部構造物-杭基礎一体とした地震応答解析法を示す。応答解析では、兵庫県南部地震時のポートアイランドでの観測記録を入力動とした仮定の杭支持構造物の地震応答解析を実施し、変動軸力による杭体の強度、変形性能の変化が杭基礎の地震応答に及ぼす影響を明らかにする⁸⁾。また、上下動入力による構造物の上下応答が杭体の軸力変動に及ぼす影響を把握するとともに、杭基礎の非線形応答に与える影響についても検討する。

2. 軸力依存を考慮した杭体のM- ϕ 関係

2.1 骨格曲線と履歴則

軸力変動を考慮した杭体の曲げモーメント M-曲率 ϕ の復元力特性は、次のように設定した。対象とする杭は、後の地震応答解析で用いる場所打ちコンクリート杭とする。Table 1に、杭断面の諸元を示す。

場所打ちコンクリート杭の曲げモーメント M-曲率 ϕ の関係は3折れ線の骨格曲線とし、第1折れ点、第2折れ点、終局点は以下のように設定する。

Table 1 Pile constants

Diameter		1400mm
Concrete	Compressive Strength	240kgf/cm ²
Steel Bar	Yield Strength	3500kgf/cm ² (SD345)
	Steel Ratio	1.2% (28-D29)

本論文の一部は、文献8)で既に発表している。

* 鹿島小堀研究室 主任研究員

** 鹿島小堀研究室 主管研究員・博士(工学)

Senior Research Eng., Kobori Research Complex, Kajima Corp.

Principal Research Eng., Kobori Research Complex, Kajima Corp., Dr. Eng.

i) 第1折れ点 ($\phi_c(N)$, $M_c(N)$)

縁部においてひび割れが発生する点とする。コンクリートの引張り強度は $1.8\sqrt{\sigma_y}$ (σ_y : 圧縮強度 (kgf/cm²)) とし、軸力 N が加わる時にひび割れが発生する曲げモーメント $M_c(N)$ は (1) 式で与える⁹⁾。曲率 $\phi_c(N)$ は (2) 式で求める。

$$M_c(N) = 1.8\sqrt{\sigma_y} \cdot Ze + N \cdot D / 8 \quad (1)$$

$$\phi_c(N) = M_c(N) / (Ec \cdot Ie) \quad (2)$$

ここに、 Ze : 杭体の弾性時断面係数、 D : 杭直径、

$Ec \cdot Ie$: 杭体の弾性時曲げ剛性

ii) 第2折れ点 ($\phi_y(N)$, $M_y(N)$)

圧縮側あるいは引張り側の縁鉄筋が降伏する点とする。曲げモーメント $M_y(N)$ は、文献 9) の柱の短期許容応力度の算定と同様とする。すなわち、軸力 N が加わる時の圧縮側あるいは引張り側の縁鉄筋が降伏する(短期許容応力度に達する)モーメント $M_y(N)$ と中立軸位置 $x_y(N)$ を収束計算により求める。その際、歪み分布は平面保持を仮定し、コンクリートの引張り強度は無視する。曲率 $\phi_y(N)$ は (3) 式で求める¹⁰⁾。

$$\phi_y(N) = \varepsilon_y / x_y(N) \quad (3)$$

ここに、 ε_y : 鉄筋の降伏歪み、

$x_y(N)$: 杭断面における降伏鉄筋から中立軸までの距離

iii) 終局点 ($\phi_u(N)$, $M_u(N)$)

圧縮側の縁コンクリートが圧壊する(限界圧縮歪み 0.3%に達する)点とする。曲げモーメント $M_u(N)$ は、文献 11) の曲げ終局強度の算定と同様とする。すなわち、圧縮縁コンクリートの歪みを限界圧縮歪みとし、歪み分布に平面保持を仮定して応力分布を設定し、収束計算により軸力 N と曲げモーメント $M_u(N)$ の釣り合いが取れるように中立軸位置 $x_u(N)$ と $M_u(N)$ を求める。その際、コンクリートの引張り強度は無視し、圧縮側のコンクリートは平均強度 $0.85 \cdot \sigma_y$ のストレス・ブロックを仮定する。鉄筋の応力-歪み関係は完全弾塑性とする。曲率 $\phi_u(N)$ は (4) 式で求める¹⁰⁾。

$$\phi_u(N) = \varepsilon_u / x_u(N) \quad (4)$$

ここに、 ε_u : コンクリートの限界圧縮歪み 0.3%、

$x_u(N)$: 杭断面における圧縮側縁部から中立軸までの距離

Fig. 1 に、軸力を変化させて算定した場所打ちコンクリート杭の骨格曲線を示す。軸力 N は、後出の地震応答解析結果を参考に構造物の長期軸力 200ton を基準に ± 400 ton の変動を考え、 $N = -200 \sim 600$ ton まで変化させた。以下、圧縮は正、引張りは負の軸力とする。杭体の強度は軸力の増加とともに上昇するが、第2折れ点から終局点に至る変形量は減少し、杭体の変形性能が軸力に大きく依存することがわかる。

軸力変動を考慮した骨格曲線に対する履歴則は、Fig. 2 に示すように設定した。すなわち、一定軸力下では従来の剛性劣化型の履歴則¹²⁾とする。変動軸力下では、現時刻以前に経験した最大塑性率を α ($= \phi_{\max}(N) / \phi_y(N)$ ここに、 $\phi_y(N)$: 第2折れ点の曲率、 $\phi_{\max}(N)$: 最大曲率、 N : 最大曲率を示した時の軸力) とすると、現時刻の軸力 N' において除荷状態から再び載荷状態に戻る際の骨格曲線上の最大曲率は、 α を用いて修正した最大曲率 $\phi'_{\max}(N')$ ($= \alpha \cdot \phi_y(N')$) とする。応答解析では、杭位置の違いにより時々刻々変化する軸力に応じた非線形特性を用いて時刻歴解析を行う。

2.2 ファイバーモデルとの比較

上記の変動軸力を考慮した非線形特性モデルの有効性を確かめるため、杭断面のファイバーモデル⁶⁾ による静的漸増解析結果と比較する。ファイバーモデルの加力パターンは、一定軸力下の静的単調加力と変動軸力下の繰り返し漸増加力の2種類を行う。ファイバーモデルに用いるコンクリートの応力-歪み関係は、引張り強度は無視し、圧壊後の耐力低下を考慮した Fig. 3 (a) に示すモデル¹³⁾ とした。鉄筋の応力-歪み関係は、Fig. 3 (b) に示す2折れ線とした。

Fig. 4 に、軸力 N を -200、0、200、600ton とした場合のファイバーモデルと3折れ線モデルの骨格曲線を比較して示す。図中のファイバーモデルによる $M-\phi$ 曲線上には、縁コンクリートのひび割れが生じる点 ($\phi_c M_c$)、縁鉄筋の降伏する点 ($\phi_y M_y$)、縁コンクリートが圧壊する点 ($\phi_u M_u$) を示している。ファイバーモデルと比較し、3折れ線モデルは低軸力下になるほど第1折れ点のモーメントが大きくなり、第2折れ点から圧壊点にかけてのモーメントを小さく評価するが、杭体の変形性能を規定する第2折れ点と圧壊点はほぼ一致している。

Fig. 5 (a) に、繰り返し加力によるファイバーモデルと3折れ線

Fig.1 Skeleton curves dependent on axial force

Fig.2 Hysteresis rule

Fig.3 Relationships between stress and strain

モデルの履歴曲線を比較して示す。モーメントの加力振幅は、Fig. 5 (b)に示すように、第1サイクルで M_c 、第2サイクルで M_y 、第3サイクルで M_u に至るものとした。その際、モーメントの増減とともに軸力も増減させた。曲げモーメント (M) と軸力 (N) の比 M/N は、圧縮側で 1.6 (単位: $\text{ton}\cdot\text{m}/\text{m}$) とし、引張り側で 0.63 とした。この比

率は、後述する地震応答解析による杭頭部での応答結果をもとに設定した。Fig. 5 (a)をみると、3 折れ線モデルの非線形特性は曲率の小さい領域で履歴ループはやや大きくなるが、第2折れ点から破壊点に至る剛性、変形特性は良く対応しており、提案モデルの有効性が確認できる。

Fig.4 Comparisons of skelton curves between tri-linear model and fiber model

Fig.5 Comparisons of hysteresis curves between tri-linear model and fiber model

果との比較により有効性を確認している¹⁷⁾。

杭体の曲げモーメント M -曲率 ϕ の関係は、先に示した軸力依存を考慮した非線形特性とする。なお、解析では縁コンクリートが圧壊する終局点以降については第 3 剛性を維持するものとし、せん断剛性は線形とした。杭体の変動軸力は、時々刻々得られる上部構造物からの転倒モーメント(基礎底面の回転ばねの反力)を三角形分布と仮定し杭位置により配分し、杭頭から杭先端まで同じとした。すなわち、杭の軸剛性は線形として扱い、杭周面の摩擦ばねは小さいと仮定している。

上部構造物の復元力特性は、柱梁部材に非線形特性を与えたフレームモデルの静的漸増解析により層せん断力 Q -層間変形 δ の関係を求め、層毎に 3 折れ線モデルに近似した。履歴則は杭体の曲げ非線形特性と同じ剛性劣化型モデル¹²⁾とした。

4. 杭基礎の地震応答

Fig. 10 に各杭の応答最大曲げモーメント、せん断力分布を示す。外側杭である Pile-1、Pile-3 には変動軸力が加わっているが、中央杭である Pile-2 には変動軸力が発生していない。各杭の応力は杭頭および液状化層と非液状化層の境界である GL-19m 位置で大きな値となり、変動軸力の違いにより Pile-3 が杭全長にわたり大きな応答を示している。杭頭でのせん断力の違いは、変動軸力により杭体の曲げ剛性と耐力に差が生じ、上部構造物からのせん断力の配分が杭位置により異なるためである。また、杭頭の曲げモーメントには、上部構造物のせん断力により生じた応力に比べ液状化地盤の地盤震動により生じた応力の寄与が大きくなっている^{3), 4)}。

Fig. 11 に各杭頭における曲げモーメント、せん断力、軸力の時刻歴波形を示す。各波形とも衝撃型の波であったポートアイランド波の入力によって、入力動の初期の段階に振幅の大きい波が数波続いている。周期成分は約 1~2 秒の波が卓越し、同(逆)位相に近い波形となっている。1~2 秒の周期成分は、この周期帯でパワーをもつ入力地震動により液状化地盤の応答が卓越した周期帯域であり、その入力により上部構造物が非線形化し長周期化したものである^{3), 4)}。Pile-3 の曲げモーメント、せん断力波形は 6.5 秒付近において最大値を示し、軸力は最大圧縮力が加わっている。同時刻に Pile-1 は最大引張り軸力となり、Pile-3 や変動軸力のない Pile-2 に比べ小さい杭応力となる。次に 7.4 秒付近では、Pile-1 と Pile-3 に生じる軸力の正負が入れ替わり、圧縮軸力となる Pile-1 の杭応力が最大値となる。

Fig. 12 に、6.5 秒における各杭の曲げモーメント、せん断力分布を示す。最大圧縮軸力が加わっている Pile-3 は杭全長にわたり大きな応力を示し、杭頭と GL-19m 位置では変動軸力のない Pile-2 に比較して約 1.4 倍となる。一方、最大引張り軸力となる Pile-1 では約 0.5 倍と小さい応力となっている。この応力の差は、杭位置により変動軸力が異なることにより杭体の曲げ剛性と耐力に差が生じているためである。

Fig. 13 に、各杭の杭頭と GL-19m 位置における M-N 曲線を示す。

Fig.10 Distributions of maximum responses of piles

Fig.11 Time histories of pile responses at the pile head

Fig.12 Distributions of pile responses at 6.5sec

図中には、縁コンクリートのひび割れモーメント M_c 、縁鉄筋の降伏モーメント M_y および縁コンクリートの圧壊モーメント M_u についての M - N 関係も示している。Pile-1 と Pile-3 の曲げモーメントと軸力の関係は、Fig. 11 に示したように両波形はほぼ同(逆)位相となるため、履歴面積の小さい形状となる。杭頭での塑性化状況は各杭とも M_y を越え、Pile-3 は最大圧縮軸力となる 6.5 秒で M_u を大きく越えている。軸力変動のない Pile-2 も同時刻で M_u に達している。Pile-1

は引張り軸力となりモーメントは増大しているが、 M_u を越えていない。しかし、次に最大圧縮軸力となる 7.4 秒で M_u に達している。一方、液状化層の下端部に相当する GL-19m 位置では杭頭とは逆位相の曲げモーメントが発生するため³⁾、 M - N 曲線の傾きは逆となる。6.5 秒では全ての杭が M_y を越えているが、 M_u には達していない。

Fig. 14 に、各杭の杭頭と GL-19m 位置における M - ϕ 履歴曲線を示す。図中には、軸力を変化させた時の降伏点 $M_y(\phi_y)$ と圧壊点

Fig.13 Relationships between bending moment and axial force at the pile head and G.L.-19m of Pile-1,2 and 3

Fig.14 Relationships between bending moment and curvature at the pile head and G.L.-19m of Pile-1,2 and 3

$M_0(\phi_0)$ の軌跡を示している。変動軸力がない Pile-2 は、通常の剛性劣化型の3折れ線の履歴曲線となる。Pile-1 の杭頭では、第1象限の引張り軸力下では曲げ剛性、耐力は低下し、逆に第3象限では圧縮軸力により上昇している。引張り軸力下で応答最大曲率となる6.5秒付近では、曲げモーメントは頭打ちとなり塑性化が大きく進展しているが、 M_0 には達していない。GL-19m位置では、杭頭と曲げモーメントが逆位相となるため、第3象限において引張り軸力により曲げ剛性、耐力が低下している。一方、Pile-3の杭頭では、Pile-1と逆位相の軸力となり180度回転した履歴曲線となる。第1象限では、圧縮軸力下となるため M_0 から M_U までの変形性能は小さくなり、6.5秒では曲率の増大とともに大きく M_0 を越える結果となる。

Table 2 に杭頭と GL-19m 位置の最大塑性率を示す。最大塑性率は、6.5秒における各杭の最大曲率 ϕ_{max} を、それぞれの軸力における縁鉄筋の降伏点 ϕ_y で除することにより求めている。また、その軸力における縁コンクリートの圧壊点 ϕ_U の ϕ_y に対する比(以下、終局塑性率という。)も併せて示す。最大塑性率がこの終局塑性率以下であれば圧壊点に達していないことを示している。杭頭での最大塑性率をみると、最大圧縮軸力となる Pile-3 の塑性率は4.6とあまり進んでいないが、終局塑性率2.5を大きく越えている。一方、最大引張り軸力となる Pile-1 では、塑性率は8.2と大きく進展しているが、変形性能も増大するため終局塑性率8.3には達していない。このように、杭基礎の

Table 2 Ductility of pile responses

		Pile-1	Pile-2	Pile-3
ϕ_{max} / ϕ_y	Pile Head	8.2	5.9	4.6
	G.L.-19m	3.9	2.4	1.8
ϕ_U / ϕ_y		8.3	4.0	2.5

変形(被害)状況を評価する工学量として最大塑性率を用いる場合、軸力変動により杭位置によって異なる杭体の変形性能を考慮して性能評価をする必要がある。

5. 上下動入力の影響

地震時に杭に生じる軸力は、先で検討した水平動入力による構造物の転倒モーメントにより発生する軸力の他に、上下動入力による構造物の上下応答にともない発生する軸力がある。ポートアイランド地点の鉛直アレー観測では、埋立層の液状化層では水平動の最大加速度値は低減したが、上下動は増幅する記録が得られており¹⁴⁾、

Fig.15 Time histories of pile responses at the pile head

Fig.16 Relationships between moment and axial force at the pile head of Pile-1,2 and 3

Fig.17 Relationships between bending moment and curvature at the pile head of Pile-1,2 and 3

構造物の上下応答も大きかったことが考えられる。ここでは、構造物の上下応答による軸力変動が杭基礎の応答に与える影響を検討する。

解析は、まず上部構造物の上下動地震応答解析を別途簡易モデルで行い、上下応答による各杭の軸力を一様分布として算定する。次に、先に示した水平動入力時の地震応答解析において、上下動入力時の軸力変動を同時に考慮しながら応答解析を行った。上部構造物は柱断面の軸剛性から算定した一本棒の軸ばねモデルとし、線形とした。基礎底面には群杭の上下方向の相互作用ばねを取り付けた。上下方向の相互作用ばねは、回転ばねと同様に等価地盤定数を用いて三次元薄層要素法による成層地盤内のリング加振解により評価した。入力地震動には、ポートアイランド GL0m で観測された上下動成分 (555.9Gal) を用いた。なお、上下方向の構造物-群杭-地盤連成系の 1 次周期は 0.11sec (基礎固定時 0.069sec) である。

解析結果として、Fig. 15 に各杭頭における曲げモーメント、せん断力、軸力の時刻歴波形を示す。Fig. 16 に各杭の杭頭における M-N 関係を、Fig. 17 に M-φ 履歴曲線を示す。上下動入力における軸力変動は Pile-2 の軸力波形にみることができる。その振動数成分は、水平動入力時の転倒モーメントによる軸力波形に比べ高振動数成分は卓越するが、最大値は約 1/3 程度であり、両者の最大値生起時刻に差がある。M-N 関係は、Fig. 13 に示した水平動入力時のみに比べ変動は大きくなり複雑なものとなるが、杭体の最大応力と塑性率はほぼ同程度であり、上下動入力の与える影響は小さいことがわかる。

6. まとめ

兵庫県南部地震時のポートアイランド波を入力動として、場所打ちコンクリート杭の M-φ 関係に軸力依存性を考慮した地震応答解析を実施し、軸力変動が杭応答に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた成果を、以下にまとめて示す。

- (1) 杭体の M-φ 関係に軸力変動を考慮した非線形特性モデルを示し、ファイバーモデルによる結果と比較した。提案モデルは、曲率の小さい領域で履歴ループはやや大きくなるが、縁鉄筋の降伏から縁コンクリートが圧壊に至る剛性、変形特性は良く対応し、提案モデルの有効性を確認した。
- (2) 変動軸力による杭体の M-φ 関係の違いにより、杭体に発生する応力は杭位置により異なる。本解析では、最大曲げモーメントが発生した 6.5 秒において、軸力変動がない中央の杭に対して、圧縮側の杭では最大曲げモーメントは 1.4 倍、引張り側の杭では 0.5 倍となる。また、杭位置の変動軸力の違いにより杭体の曲げ剛性と耐力が異なるため、杭頭部では塑性化状況に大きな差が生じ、上部構造物からのせん断力の配分が異なる。
- (3) 杭基礎の時系列での応答は、6.5 秒において各杭の杭頭部で M_y を越え、最大圧縮軸力となる杭と中立軸の杭で M_0 に達する。一方、引張り側の杭では M_0 を越えないが、次に最大圧縮軸力となる 7.4 秒で M_0 に達する。液状化層の下端部にあたる GL-19m 位置では、6.5 秒において圧縮側と引張り側の杭とも M_y を越えている。
- (4) 杭体の応答は、圧縮側と引張り側で終局点に至る変形量が異なるため、圧縮側の杭では塑性率はあまり大きくならないが終局点に達する。一方、引張り側の杭では塑性率は大きなものとなるが

終局点に達しない。このことから杭基礎の耐震性能を応答最大塑性率で評価する場合、圧縮側と引張り側それぞれの軸力下での変形性能を考慮して行う必要がある。

- (5) 構造物の上下応答による軸力は、構造物の転倒モーメントにより発生する軸力に比べ高振動数成分は卓越するがその値は小さく、上下応答が杭の最大応力と変形性能に与える影響は小さい。

なお、軸力変動の影響は、上部構造物の振動特性や入力地震動の特性により大きく変化することが考えられる。また、水平 2 方向入力時に隅杭に発生する変動軸力は、水平 1 方向入力時に比べさらに大きくなる場合があることが予想され、このような条件下での杭基礎の応答については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、1996.7
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-4、木造建築物・建築基礎構造、日本建築学会、1998.3
- 3) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治：1995 年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、No.493、pp.23-30、1997.3
- 4) 宮本裕司：兵庫県南部地震における杭基礎の被害、第 5 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、日本建築学会 基礎構造系振動小委員会、pp.33-44、1998.5
- 5) 日本建築学会構造委員会 基礎構造運営委員会：建築基礎の設計施工に関する研究資料 4、液状化地盤における基礎設計の考え方、1998.9
- 6) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)
- 7) 茶谷文雄、秋野矩之、野村敦子他：兵庫県南部地震で被災した RC 杭の被害分析、第 5 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、日本建築学会 基礎構造系振動小委員会、pp.193-198、1998.5
- 8) 酒向裕司、宮本裕司、池田 孝：杭の軸力変動が杭基礎の地震応答に及ぼす影響、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998.11
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説、1991
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針、1976
- 11) American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI-318-89) and Commentary
- 12) T. Takeda, M. A. Sozen, N. N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structure Division, ASCE, ST12, pp.2557-2573, 1970
- 13) 鈴木紀雄、井上範夫、森川博司：ファイバーモデルによる RC 短柱と十字型部分骨組みの解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.577-582, 1993
- 14) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変形調査(ポートアイランド、六甲アイランド)報告書、平成 7 年 8 月
- 15) Finn W.D.L., K.W. Lee, G.R. Martin: An Effective Stress Model for Liquefaction, Journal of the Geotechnical Eng. Division, ASCE, Vol.103, pp.517-533, 1977
- 16) 宮本裕司、酒向裕司、喜多村英司、三浦賢治：非線形、液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 471 号、pp.41-50、1995.5
- 17) 宮本裕司、福岡篤信、安達直人、古山田耕司：液状化地盤における杭基礎の地震時杭応力に関する研究(飽和二層地盤に建つ杭基礎の遠心模型実験と解析的検討)、日本建築学会構造系論文集、No.494、pp.51-58、1997.4
- 18) 前田達哉、喜多村英司、岩本賢治、増田潔、三浦賢治：群杭基礎の非線形動的インピーダンス、第 9 回日本地震工学シンポジウム、pp.1213-1218、1994.12

(1998年11月10日原稿受理、1999年4月22日採用決定)