

変動軸力を考慮した杭基礎の非線形相互作用解析法

Nonlinear Soil Structure Interaction Analysis Method
that Takes Account of the Fluctuating Axial Force on Piles

萩原 一 岩本 賢治 鈴木 康嗣

要 約

杭支持建物の非線形相互作用を詳細に考慮するには、上部構造に加えて基礎や地盤の非線形挙動も同時に評価する必要があるが、杭の曲げ強度の軸力依存性や、地盤のひずみ依存性など非線形特性に関わる影響因子が多いこともあり精度の高い挙動評価は容易ではない。今回、薄層要素法に基づく相互作用解析法を拡張して、杭のモデル化にファイバーモデルを用いる手法を開発した。本手法を用いて、変動軸力が杭の非線形性状に与える影響を解析的に検討するとともに、試験解析建物を用いて地震応答解析を実施し、入力地震動の大きさが杭の非線形挙動に与える影響を検討した。検討の結果、建物の転倒モーメントにより生じる変動軸力のため、杭の塑性化状況が杭の位置によって異なること、および入力地震動が大きくなると杭の応答に与える変動軸力の影響が大きくなることが分かった。

目 次

- I. はじめに
- II. 解析法の概要
- III. 変動軸力が杭の塑性化に与える影響
- IV. 群杭建物を対象とした試験解析
- V. おわりに

I. はじめに

兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震において、杭基礎建物が被害を受けた事例が報告されており^{例えば 1)}、大地震を想定した構造物の強非線形時の応答解析を高い精度で行うことが課題となっている。そのためにはより実状に近い条件を評価モデルに取り込む必要がある。杭基礎建物の非線形相互作用を詳細に考慮するには、上部構造に加えて基礎や地盤の非線形挙動も同時に評価する必要があるが、杭の曲げ強度の軸力依存性や、地盤物性のひずみ依存性など非線形特性に関わる影響因子が多いこともあり精度の高い挙動評価は容易ではない。地盤と建物の動的な非線形性を考慮できる相互作用解析手法として、これまでもいくつかのモデルが提案されている。基礎を剛体として群杭を1本のビーム要素に集約し、杭周地盤をスカラーばねとしてモデル化する Penzien モデル²⁾は杭および地盤に非線形性を考慮することが可能で、これまで多くの動的相互作用の検討に用いられその有用性が確認されているが、任意に配置された杭の詳細な非線形挙動や基礎梁の柔性を考慮することは難しい。群杭を集約せずに、杭周地盤ばねを各杭の節点に配分した解析手法も提案されおり、杭間の連成は考慮できないものの、杭の位置による

非線形挙動の違いを検討した研究^{3,4)}も行われている。特に、文献3)では、2次元モデルであるが、杭の非線形性に変動軸力の影響を考慮したモデルで検討が行われている。また、有限要素法(FEM)は地盤や杭を詳細にモデル化することが可能で、振動実験のシミュレーション解析⁵⁾において実験結果を高い精度で再現できることが確認されているが、データの作成や解析に多大な手間と時間が掛かるため、大規模な群杭基礎建物に適用するにはコンピューターの性能や数値解析法のさらなる発展が必要である。

筆者らはこれまで、群杭基礎を対象に薄層要素法に基づく手法を用いて、建物基礎の動的相互作用に関する研究⁶⁾を実施してきた。本報では、この手法を基に、杭にファイバーモデルを用いて変動軸力が杭の非線形性状に与える影響を解析的に検討するとともに、試験解析建物を用いて地震応答解析を実施し、入力レベルの違いが杭の非線形挙動に与える影響を検討した。

II. 解析法の概要

本報では、構造物と地盤の強非線形時応答を評価するため、建物・基礎・地盤の相互作用を考慮できる一体モデルを用い、それぞれの非線形性を考慮した解析を行う。Fig.1に解析モデルを示す。上部構造は多質点の曲げせん断棒でモデル化し、基礎梁・基礎スラブは剛体として扱う。地盤ばねはX, Y, Z方向の自由度を有し、各杭の深さ方向の離散点に対して、薄層要素法により求めた杭間の連成を考慮したフルマトリックスの地盤ばね(連成地盤ばね)と、杭周非線形を時刻歴で考慮できるスカラーばね(杭周ばね)でモデル化する。スカラーばねの非線形特性は双曲線モデルを用いる。杭は2軸の曲

キーワード: 非線形相互作用, 変動軸力, 杭基礎, ファイバーモデル, 薄層要素法, 群杭基礎

Keywords: nonlinear interaction analysis, fluctuating axial force, pile foundation, fiber model, thin layer method, pile group foundation

げモーメントと軸力の相関を考慮できるマルチスライスファイバーモデル (MS ファイバーモデル) によりモデル化する。以下に MS ファイバーモデルの詳細を示す。

本論で用いる MS ファイバーモデルは Kaba & Mahin⁸⁾ によって提案された MS ファイバーモデルを石田⁷⁾ が拡張したものであり、要素は材軸に直交し断面力を評価する複数のスライス面を有する。スライスは応力を評価する離散化したコンクリートおよび鉄筋からなるセグメントで構成される。以下に基本仮定および要素の構成則の概要を示す。詳細は文献⁷⁾ を参照されたい。

- a. スライス面は平面保持の仮定が成り立つとし、変形後も断面の形状は変化しないものとする。
- b. 要素内では微小ひずみとする。
- c. スライス間の柔性は線形に変化する。
- d. セグメントの自由度は軸方向歪み ϵ_x と2方向のせん断歪み γ_x, γ_y とする。

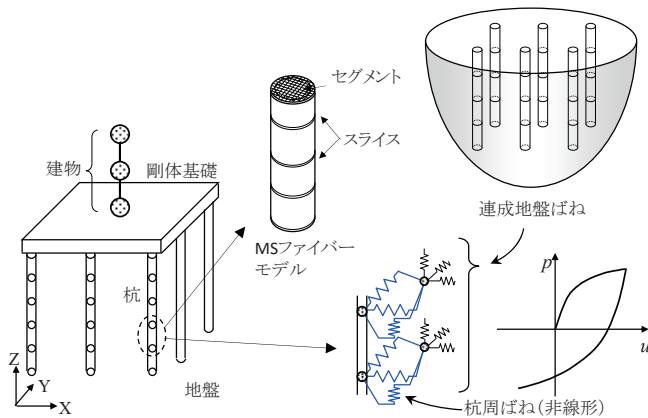
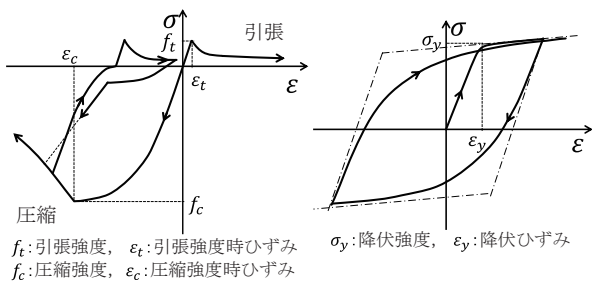


Fig.1 変動軸力を考慮した解析モデルの概要
(Overview of Analytical Model Considering Fluctuating Axial Force)



(a) コンクリート (b) 鉄筋
Fig.2 要素の非線形特性
(Non-Linear Characteristics of Elements)

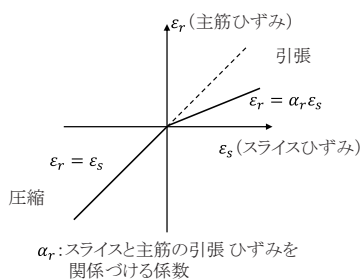


Fig.3 鉄筋のひずみとスライスひずみの関係
(Relationship between Rebar of Strain and Slice Strain)

e. 要素内の形状関数は柔性に依存する。

断面の曲げ非線形を表現するために、コンクリートおよび鉄筋のセグメントにそれぞれ軸方向の非線形性を表す構成則が定義されている (Fig.2)。コンクリートの構成則は、圧縮側の載荷曲線に Fafitis-Shah⁹⁾ のモデルを採用し、引張側のひび割れ発生後は出雲式¹⁰⁾を採用する。また、繰り返し履歴は最大応力と最大歪みによって一意に定まる前川らのモデル¹¹⁾を採用する。

鉄筋は軸方向にのみ抵抗するセグメントとして定義される。主筋の履歴特性は、バウシinger 効果を表すことができる Mennegotto-Pinto モデル¹²⁾を採用する。各スライスでは付着すべりを生じない完全付着とするが、杭頭や層境界となる要素端部のスライスについては、主筋の引張時にひずみを係数倍することで主筋の抜け出しを近似的に表現している (Fig.3)。

III. 変動軸力が杭の塑性化に与える影響

1. 検討概要

提案した手法を用いて、建物の転倒モーメントによる変動軸力の有無が杭の応答に与える影響について検討した。検討のため、提案手法による解析モデル (変動軸力モデル, Fig.1) のほかに、比較対象として杭の曲げ特性が変動軸力の影響を受けないモデル (一定軸力モデル, Fig.4) も作成した。一定軸力モデルの建物には変動軸力モデルと同じ曲げせん断棒を用いる。1本の杭は長期軸力および上部建物の曲げモーメントとせん断力を負担する要素 (杭要素 m) と、変動軸力を負担する要素 (杭要素 n) の2要素からなり、杭要素 m は MS ファイバー要素, 杭要素 n は線形のトラス要素でモデル化する。また、連成地盤ばねは、水平方向は杭要素 m、鉛直方向は杭要素 n と接続する。

2. 検討対象モデル

検討に用いたモデルを Fig.5 に示す。建物は仮定の11階建て壁式鉄筋コンクリート (RC) 造で、建物を2本の杭基礎で支持し、杭が建物の転倒モーメントによる変動軸力を受けやすくした。建物はせん断に非線形 (武藤モデル) を考慮した。地盤ばねには地盤の等価線形解析を行って求めた物性を使用した。地盤の非線形特性は文献¹³⁾のモデルを使用し、静的解析では告示波 (乱数位相) の稀レベル (L1)、動的解析では極稀レベル (L2) 入力時の等価物性値 (Fig.6) を使用した。なお、本検討では杭周の非線形性は考慮していない。

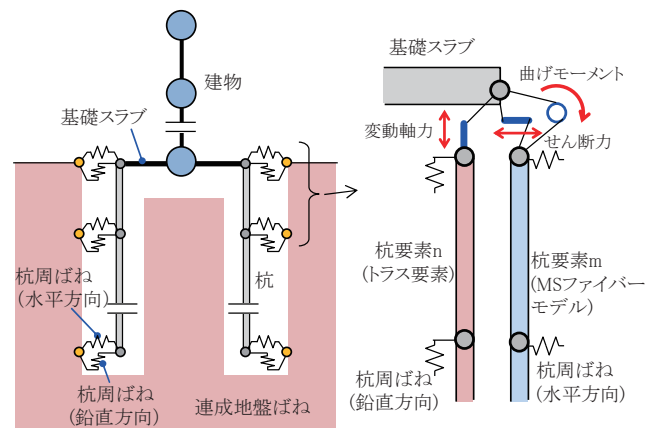


Fig.4 一定軸力モデルの概要
(Overview of Constant Axial Force Model)

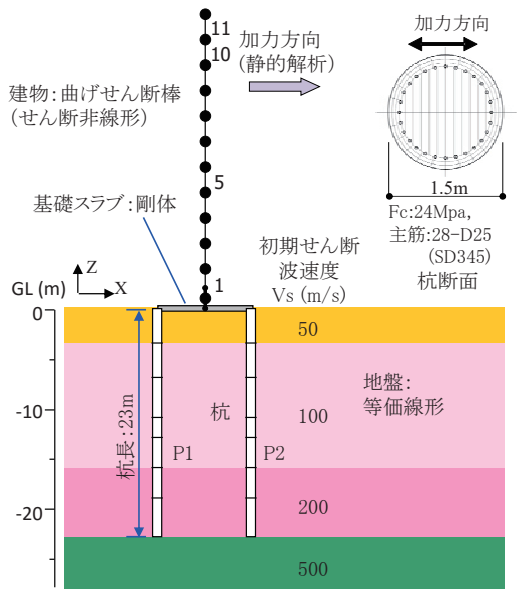


Fig.5 検討用モデル (Study Model)

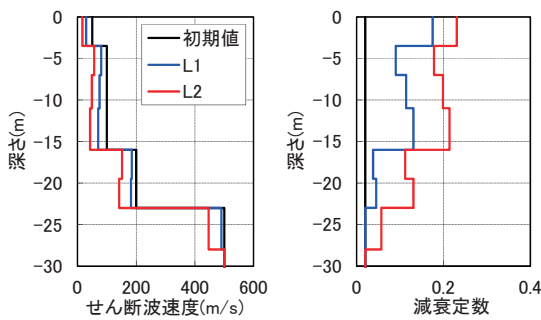


Fig.6 地盤物性 (Soil Property)

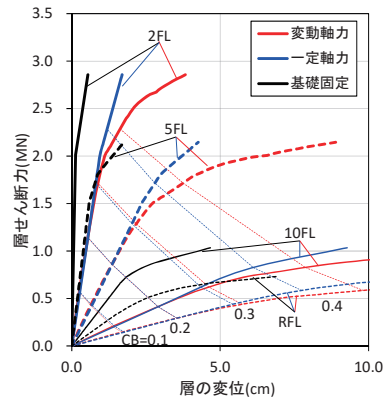


Fig.7 建物の層せん断力と基礎スラブからの各層の変位の関係 (Story Shear Force - Story Displacement from Foundation Slab Relationship)

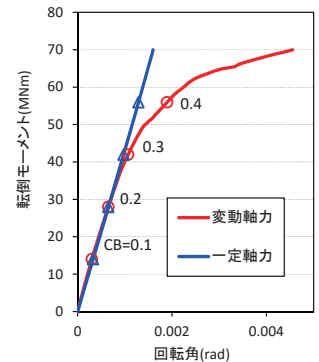


Fig.8 基礎スラブの転倒モーメントと回転角の関係 (Overturning Moment - Rotation Angle of Foundation Slab Relationship)

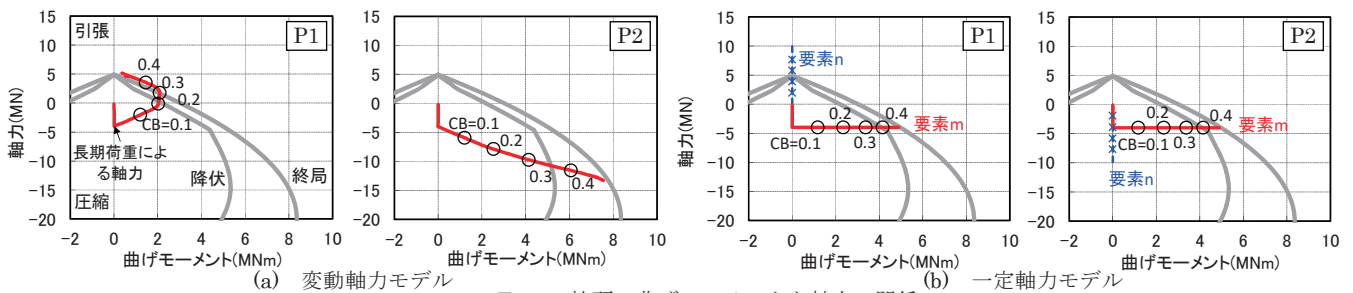


Fig.9 杭頭の曲げモーメントと軸力の関係 (Bending Moment - Axial Force of Pile Head Relationship)

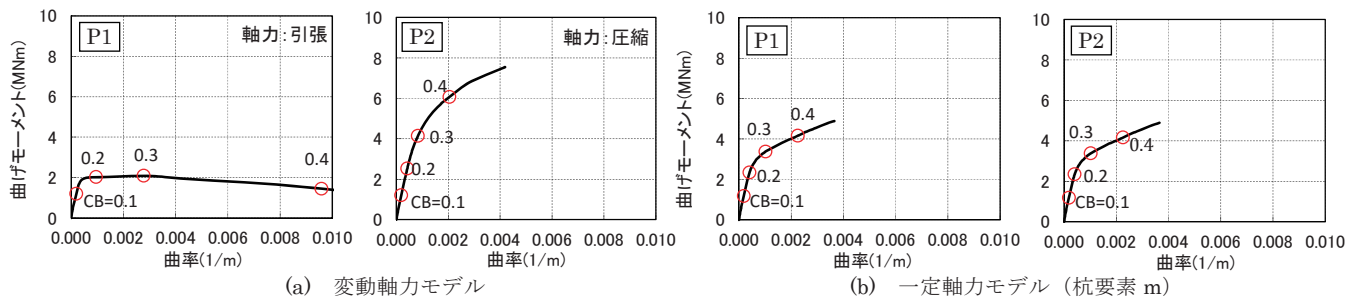


Fig.10 杭頭の曲げモーメントと曲率の関係 (Bending Moment - Curvature of Pile Head Relationship)

3. 静的解析

静的解析において変動軸力モデル、一定軸力モデルの比較を行い、変動軸力が構造物の応答に与える影響を検討する。荷重条件は杭頭に長期荷重として 4MN (軸圧比: 0.09) の鉛直荷重を載荷後、Ai 分布に基づく水平荷重を建物に載荷した。

Fig.7 に建物の層せん断力と基礎スラブからの層の変位の関係を、変動軸力モデル、一定軸力モデルおよび基礎固定モデルを比較して示す。変動軸力モデルと一定軸力モデルは、転倒モーメントにより基礎が回転するため基礎固定モデルより変位は大きくなっている。水平荷重がベースシア係数(CB)0.2 程度までは変動軸力モデルと一定軸力モデルの履歴は一致するが、CBが大きくなると変動軸力モデルの剛性が低下し、一定軸力モデルに比べて変位が大きくなる。これは、Fig.8 に示す基礎スラブの転倒モーメントと回転角の関係のように、一定軸力モデルでは杭の軸剛性が弾性的ため基礎の回転が線形で増加するのに対し、変動軸力モデルでは杭の塑性化により軸剛性が低下するため基礎の回転剛性も低下し、基礎の回転量が大きくなるためである。

Fig. 9, 10 に杭頭の曲げモーメントと軸力 (M-N), 曲げモーメントと曲率 (M- ϕ) の関係を示す。M-N 関係については断面解析¹⁴⁾により求めた降伏および終局曲線を合わせて示す。M-N 関係において、両モデル共に杭に長期荷重により圧縮軸力が生じるが、変動軸力モデルでは P1 杭は水平力により曲げモーメントが増大するとともに軸力が減少するため、ベースシア係数 0.3 程度で終局曲げモーメントに達し、それ以降、終局曲線に沿って曲げモーメントは低下する。これに対し、P2 杭では軸力が増加し続けるため、曲げモーメントは終局曲線に達しない。一方、一定軸力モデルでは、転倒モーメントによる変動軸力を杭要素 n が負担するため、杭要素 m の軸力は一定で、M-N 関係は P1, P2 杭で同じ履歴を描く。M- ϕ 関係において、変動軸力モデルでは杭位置により履歴が異なっており、引張軸力を受ける P1 杭では曲げモーメントが 2MNm 程度で耐力に達して曲率が大きく伸びているのに対し、圧縮軸力を受ける P2 杭ではベースシア係数が 0.4 を超えても曲げモーメントが増加して曲率も小さい。一方、一定軸力モデルの杭要素 m は変動軸力の影響を受けないため、P1, P2 杭共に同じ履歴を描いている。このように、杭の変動軸力の影響を考慮した場合としなかった場合で、杭の塑性化状況が異なることが確認できた。

4. 動的解析

次に動的解析による検討結果を示す。入力地震波には告示波 (乱数位相) の極稀レベル(L2)を用い (Fig. 11), 杭頭に長期荷重を載荷後、時刻歴応答解析を行った。

Fig. 12 に建物の応答最大変位と層せん断力を示す。最大変位は上階に行くほどモデルの違いが大きくなっており、杭の塑性化による基礎の回転剛性の違いによるものと考えられる。また、層せん断力は分布形に大きな違いは見られないが、全層で一定軸力モデルの値が大きくなっており、変動軸力による杭の塑性化状況の違いが建物の応答に影響を与えていると考えられる。Fig. 13 に杭の曲げモーメント、せん断力、軸力について最大値の深さ方向分布を示す。軸力

は押し込み側 (負側)・引抜き側 (正側) それぞれの最大値を、一定軸力モデルについては杭要素 m, n それぞれの値を示す。曲げモーメントは杭頭および層境界の GL-16m 付近で大きくなる分布となっている。軸力一定モデルでは杭位置による違いは見られないが、変動軸力モデルでは杭位置により分布が異なり、杭頭では P2 杭の値が大きくなっている。せん断力の分布形にはモデルの違いが見られるものの、杭頭の値は両モデルでほぼ一致している。軸力は、一定軸力モデルの杭要素 m では建物の転倒モーメントによる変動軸力の影響を受けないが、曲げモーメントが大きい杭頭および GL-16m 付近で軸力変動が見られる。これは、杭が塑性化して軸変形するために生じる慣性力、減衰力による軸力である。杭要素 n は押し込み側と引抜き側で対称で、杭頭から先端に軸力が減少していく分布となっている。変動軸力モデルの押し込み側では要素 n と同様に杭頭が最大となる分布であるが、引抜き側では不規則な分布となっており、杭の塑性化により生じる軸力の影響が表れている。

建物最下層の層せん断力は一定軸力モデルの方が大きかったにも関わらず、杭頭のせん断力は両モデルでほぼ同じ値となっている。この要因を検討するため、Fig. 14 に P1, P2 杭および両者を足し合わせた杭頭せん断力の時刻歴を示す。一定軸力モデルでは P1, P2

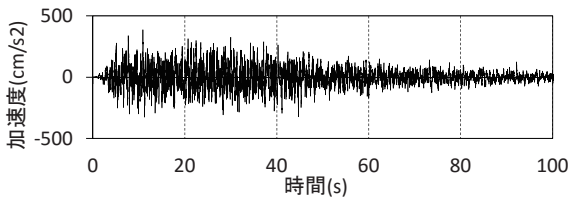


Fig.11 入力地震波 (Input Earthquake)

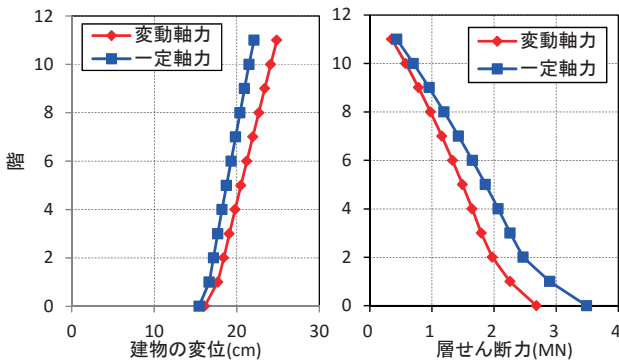


Fig.12 建物の応答最大値 (Maximum Response of Building)

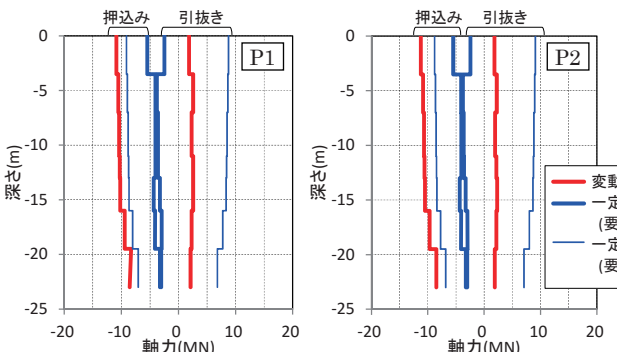
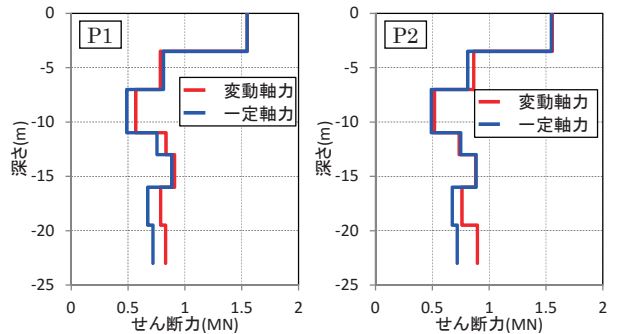
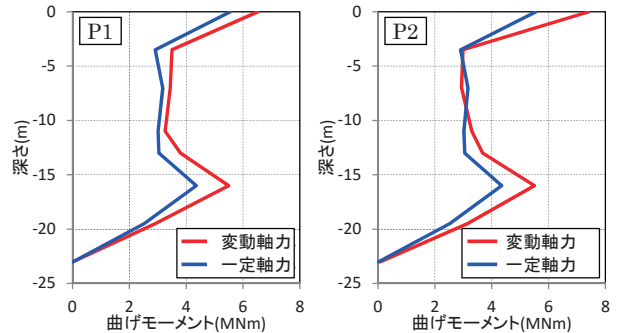


Fig.13 杭の応答最大値 (Maximum Response of Pile)

杭の応答が一致しているのに対し、変動軸力モデルでは各杭の応答は異なっており、最大値の発生時刻も異なっている。また、最大値はモデル、杭によらず約 1.5MN である。各杭のせん断力を足し合わせた波形の最大値は、一定軸力モデルでは各杭の最大値を足し合わせた値となる。一方、変動軸力モデルでは全体の最大値が P1 杭の最大値発生時刻で発生しているが、その時刻の P2 杭のせん断力が小さいため、一定軸力モデルよりも小さくなっており、建物の層せん断力の大小関係と対応する。

Fig. 15, 16 に杭頭の M-N および M- ϕ 関係を示す。一定軸力モデルは要素 m の応答である。変動軸力モデルでは、M-N, M- ϕ 関係は杭により異なった履歴形状となっている。基礎のロッキングにより P1, P2 杭にはそれぞれ逆向きの軸力が発生するが、M-N 関係は P1 杭では曲げモーメントの負側で軸力が圧縮方向に増加し、正側で減少する。P2 杭では曲げモーメントと軸力の関係が P1 杭とは逆になり、杭頭の軸力と曲げモーメントに相関が見られる。これに対応して M- ϕ 関

係は、P1 杭では曲げモーメントの負側で曲げモーメントが大きく曲率が小さいのに対し、正側では負側より小さい曲げモーメントで耐力に達して曲率が大きく伸びている。また、P2 杭では M-N 関係と同様に P1 杭と逆の性状を示している。一方、一定軸力モデルでは、P1, P2 杭の M-N, M- ϕ 関係は共に同じ履歴を描いている。杭の塑性化の影響により軸力は変動するが、要素 m は基礎のロッキングによる軸力を負担しないため、軸力の変動は曲げモーメントの正負で対称な形状になっている。M- ϕ 関係は正側・負側で履歴形状に大きな違いは見られず、曲げモーメント、曲率の最大値は概ね同じ値となっている。以上、杭に MS ファイバーモデルを用いることにより、杭や建物の応答に変動軸力が与える影響を表現できることが確認できた。

IV. 群杭建物を対象とした試験解析

1. 検討概要

次に群杭基礎を有する建物を想定した試験解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、入力地震動の大きさが杭の非線形挙動に与える影響を検討する。

検討に用いた解析モデルを Fig. 17 に示す。建物は仮想の 8 階建て RC 造であり、16 本の場所打ちコンクリート杭で支持されている。建物および杭は前章のモデルと同様、せん断に非線形（武藤モデル）を考慮した等価曲げせん断棒および MS ファイバーモデルでモデル化し、基礎スラブは剛体とした。解析に用いた地盤物性は工学的基盤面に地震波を入力し、文献 13) の非線形特性を用いた等価線形解析を行い設定した。杭周ばねの非線形特性については、文献 15) に示される砂質土の塑性水平地盤反力および杭の極限先端支持力度、極限周面摩擦力度より設定した。入力地震波は告示波（八戸 EW 位相）の稀レベル（L1, Fig. 18 の 1/5）、および極稀レベル（L2, Fig. 18）を用いた。等価線形解析を行って求めた地盤物性を Fig. 19 に示す。解析は、全杭頭に同一の長期荷重 1.98MN（軸圧比：0.07）を載荷後、地震応答解析を実施した。

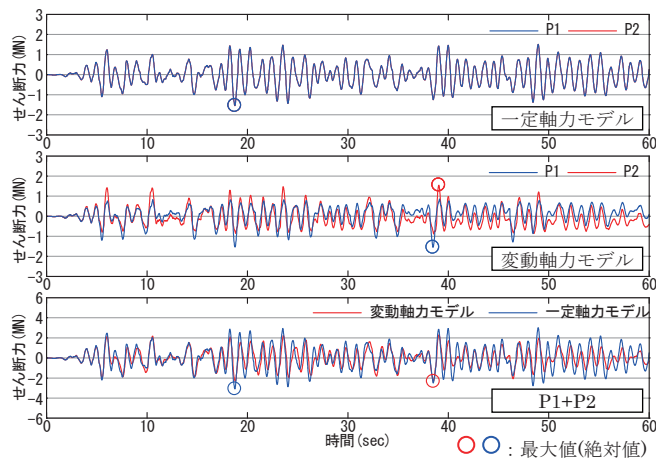


Fig. 14 杭頭せん断力の時刻歴 (Shear Force Time History of Pile Head)

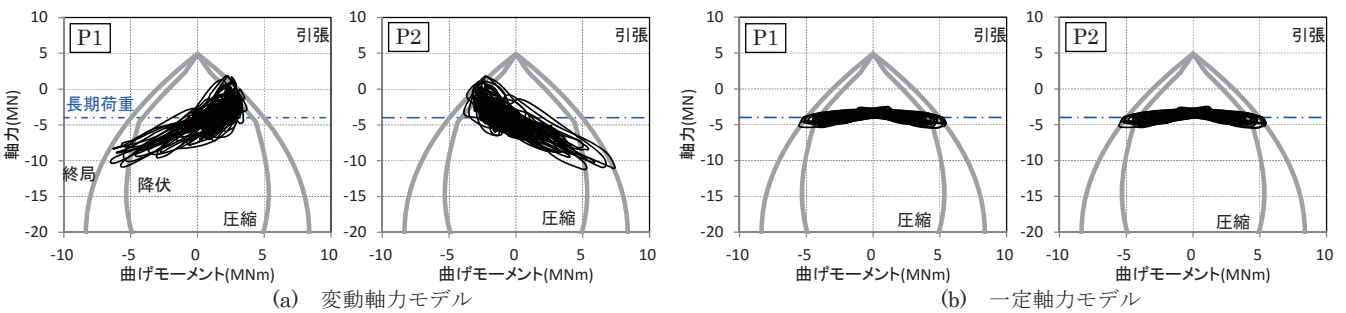


Fig. 15 杭頭の曲げモーメントと軸力の関係 (Bending Moment - Axial Force of Pile Head Relationship)

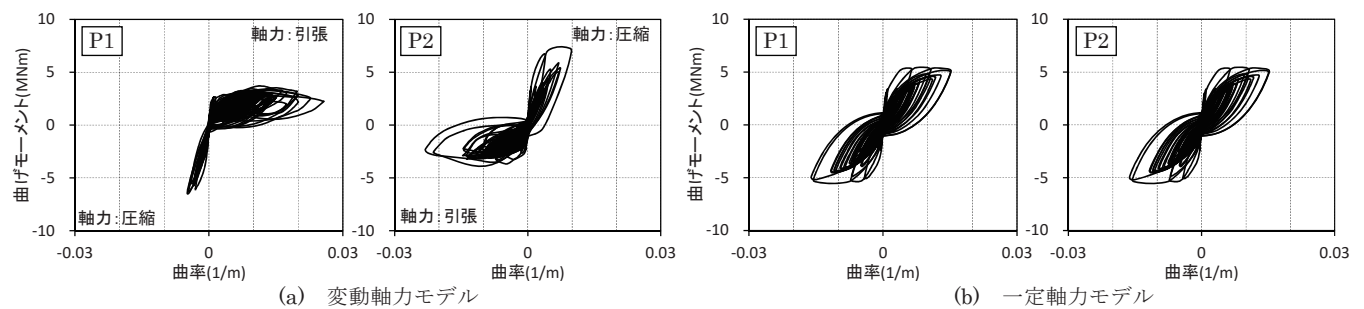


Fig. 16 杭頭の曲げモーメントと曲率の関係 (Bending Moment - Curvature of Pile Head Relationship)

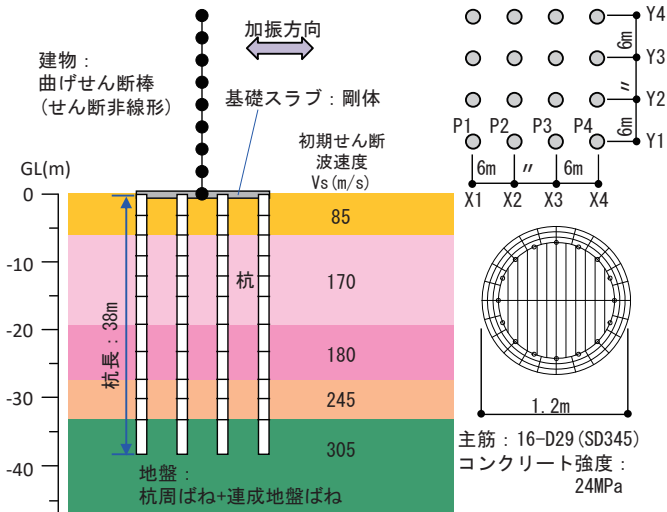


Fig.17 検討用モデル (Study Model)

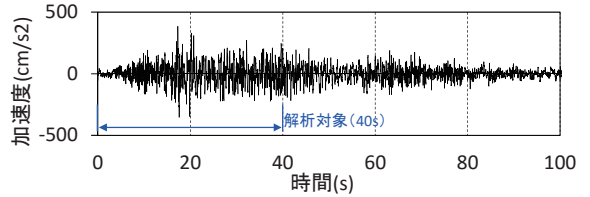


Fig.18 入力地震波 (Input Earthquake)

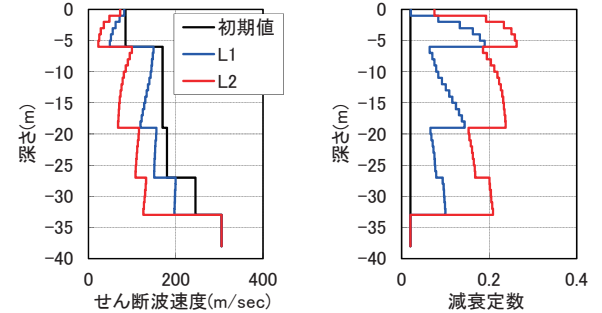


Fig.19 地盤物性 (Soil Property)

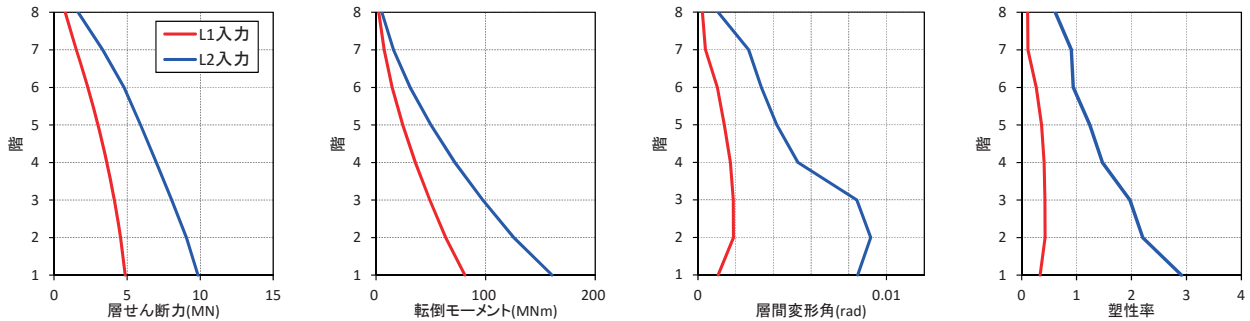


Fig.20 建物の応答最大値 (Maximum Response of Building)

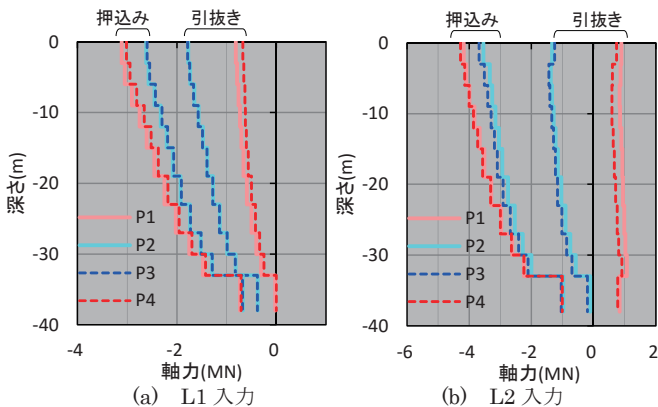


Fig.21 杭の応答最大軸力 (Maximum Response Axial Force of Pile)

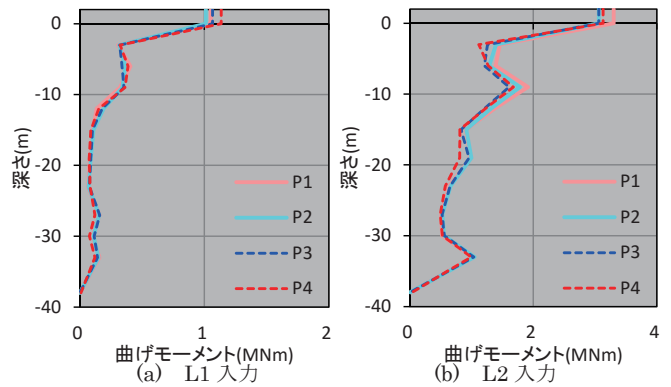


Fig.22 杭の応答最大曲げモーメント (Maximum Response Bending Moment of Pile)

2. 解析結果

建物の応答最大層せん断力、転倒モーメント、層間変形角、並びに階の塑性率を Fig. 20 に示す。最下層の層せん断力は、L2 で L1 の 2 倍程度の値となっている。層間変形角は L1 では最大 0.002 程度であるが、L2 では 2 階で 0.009 程度まで増加している。また、分布形も L1 と異なり、1~3 階の値が大きくなっている。階の塑性率は、L1 では 1 以下であるのに対し、L2 では 5 階以下で 1 を超えており、層間変形角の分布が L1 と L2 で異なることと対応している。

Fig. 21 に Y1 通り杭の応答最大軸力の深さ方向分布を押込み側、

引抜き側に分けて示す。正值が引張、負値が圧縮である。軸力は建物の転倒モーメントにより加振方向外側になる P1, P4 杭が押込み側では小さく引抜き側では大きくなり、変動量が大きい。また、転倒モーメントを直接受ける杭頭が最も大きく、杭周面摩擦ばねにより地盤に力が流れるため深度が増すと減少する。L1 では杭に引張軸力は生じていないが、L2 では P1, P4 杭に引張軸力が生じている。また、引抜き側で杭頭付近の分布が不規則になっている。これは杭の塑性化により生じる軸力の影響である。

Fig. 22 に Y1 通り杭の応答最大曲げモーメントの深さ方向分布を

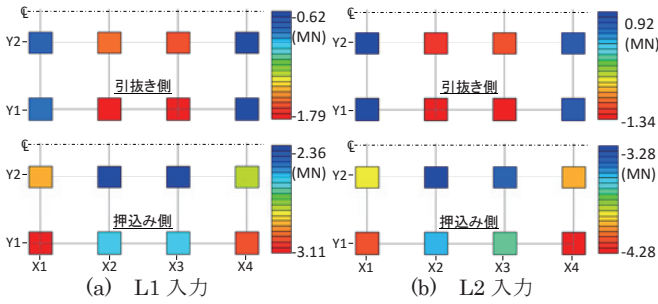


Fig.23 杭頭の応答最大軸力
(Maximum Response Axial Force of Pile Head)

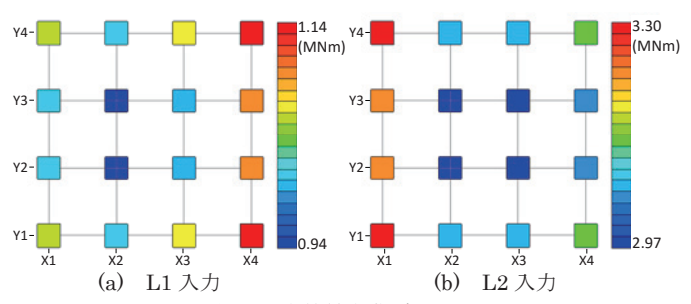
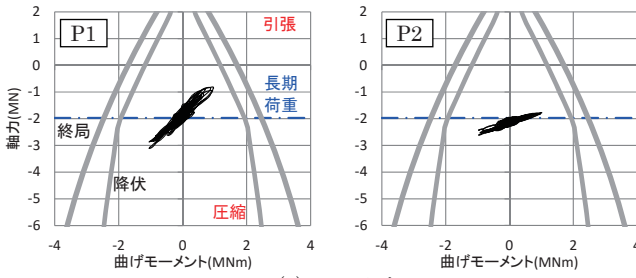
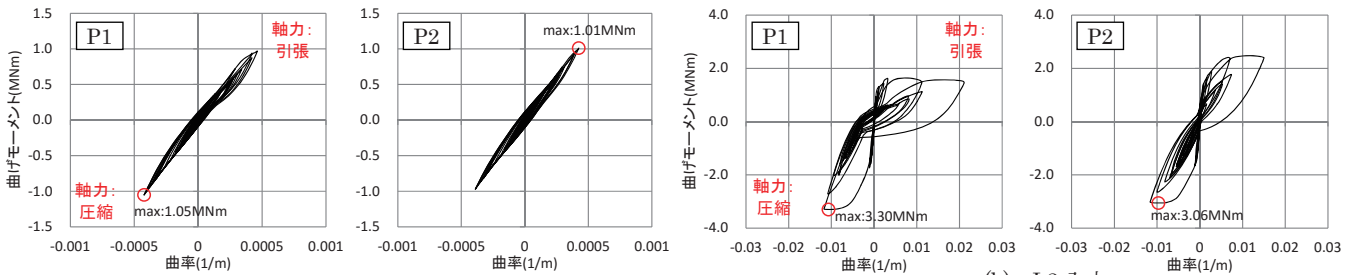


Fig.24 杭頭の応答最大曲げモーメント
(Maximum Response Bending Moment of Pile Head)



(a) L1 入力 (b) L2 入力

Fig.25 杭頭の曲げモーメントと軸力の関係
(Bending Moment - Axial Force of Pile Head Relationship)



(a) L1 入力 (b) L2 入力

Fig.26 杭頭の曲げモーメントと曲率の関係
(Bending Moment - Curvature of Pile Head Relationship)

示す。L1, L2 共に建物の慣性力の影響が大きく、杭頭付近で大きくなっている。また、L1 では、杭位置による曲げモーメントの違いは小さいが、L2 では-30m より浅い層で曲げモーメントの違いが大きくなり、また、値の大小関係も深さによって異なっている。入力が大きくなることにより、変動軸力が杭の応答に影響を与えていると判断される。

Fig. 23, 24 に杭頭の応答最大軸力および曲げモーメントの分布を示す。杭頭の軸力分布は加振方向外側の X1, X4 通りの変動量が大きい。群杭効果により、側面の Y1 通りの軸力が Y2 通りよりも大きくなるため隅杭の変動量が最も大きく、内側の杭の変動量が最も小さくなる。曲げモーメント分布も軸力と同様に隅杭の値が大きく内側の杭の値が小さいが、位置による違いは軸力ほど明確ではない。

Fig. 25 に隅杭 P1 と内側杭 P2 の杭頭 M-N 関係を、Fig. 26 に M-φ 関係を示す。Fig. 25 より、L1, L2 共に建物の転倒モーメントによる軸力変動は外側の P1 杭の方が大きくなるが、L1 では履歴が降伏曲線の内側に収まっているのに対し、L2 では終局曲線に達している。Fig. 26 より、L1 では正側、負側の違いは小さく、P1, P2 杭は共にほぼ線形の履歴を描いて変動軸力の影響は小さい。一方、L2 では P1, P2 杭は共に塑性化が進んでおり、軸力の変動が小さい P2 杭は正負で概ね対称な履歴形状を示している。しかし、変動が大きい P1 杭は

軸力が圧縮側に増加する負側の耐力が大きく変形が小さいのに対し、引張側に増加する正側の耐力が小さく変形が大きくなっている。両杭を比較すると、曲げモーメントの最大値は P1 杭の 3.3MNm に対し P2 杭は 3.06MNm でその差は小さいが、P1 杭は変動軸力の影響で正側の変形が P2 よりも大きく、最大曲げモーメントは逆に P2 よりも小さくなり、塑性化状況がかなり異なることが分かった。

V. おわりに

薄層要素法に基づき算定した地盤ばねを用いた動的相互作用解析法に、群杭の変動軸力の影響を考慮するため MS ファイバーモデルを導入した。本手法を用いて、変動軸力が杭基礎の応答に与える影響を検討し、以下の知見を得た。

- 建物転倒モーメントによる変動軸力が杭の曲げ非線形性状に影響するため、変動軸力を考慮しない場合と比べて、杭の塑性化状況が異なる。また、杭位置によって変動軸力が異なるため、杭の履歴形状も異なる。
- 杭の塑性化により杭の軸剛性が低下するため、基礎スラブの回転剛性も低下し、変動軸力を考慮しない場合より建物の変形が大きくなる。
- 変動軸力を考慮した場合、杭ごとの塑性化状況の違いにより、

杭の応答最大値は発生時刻が異なるため、建物最下層の層せん断力は、各杭の最大せん断力の合計よりも小さくなる。

また、群杭基礎を有する建物を想定した地震応答解析により、入力地震動の大きさが杭の非線形挙動に与える影響を検討し、以下の知見を得た。

- d. 入力小さい場合、杭位置による杭の最大曲げモーメントの違いは小さいが、入力が大きくなると、外側の杭で分布形状の違いが表れる。
- e. 入力大きい場合、最大曲げモーメントが同程度の杭においても、変動軸力が大きい杭では変形が大きくなり、塑性化状況が異なる場合があり、変動軸力が杭の応答に及ぼす影響が大きい。

参考文献

- 1) 第9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，2013.1.
- 2) Penzien, J., Scheffey, C.F., and Parmelee, R.A. ; Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.90, EM3, 1964, pp.223-254.
- 3) 酒向裕司，宮本裕司，池田孝；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，日本建築学会構造系論文集，第523号，1999.9，pp.79-86.
- 4) 土方勝一郎，杉山達也，伊藤賢伸ほか；群杭基礎の非線形挙動に関する振動実験および解析的研究，日本建築学会構造系論文集，第615号，2007.5，pp.109-117.
- 5) 周友昊，時松孝次，吉田洋之ほか；大型振動台実験における地盤-杭-構造物系の3次元動的挙動に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，第677号，2012.7，pp.1079-1088.
- 6) 岩本賢治，宮本裕司，古山田耕司ほか；2003年十勝沖地震での杭基礎の実被害調査と解析的検討(その3)，日本地震工学会大会，2005.1，pp.412-413.
- 7) 石田雅利；RC部材の非線形領域における軸応力とせん断応力の相関を考慮したファイバーモデルの開発，鹿島技術研究所年報，第54号，2006.9，pp.41-46.
- 8) Kaba, S. A. and Mahin, S. A. ; Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Concrete Joints, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley Report, No UCB/EERC-84/03, 1984.4.
- 9) Fafitis, A. and Shah, S.P. ; Lateral Reinforcement For High-Strength Concrete Columns, ACI Special Publication, No.SP-87, 1985, pp.213-232.
- 10) 出雲淳一，島弘，岡村甫；面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25, No.9, 1987.9, pp.107-120.
- 11) 前川宏一，福浦尚之；疑似直交2方向ひび割れを有する平面RC要素の空間的平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634/V-45, 1999.11, pp.157-176.
- 12) Mennegotto, M. and Pinto, P. ; Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures acted by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, 1973, pp.15-22.
- 13) 平成12年建築基準法告示1457号別表.
- 14) 杭のN-M図・M-φ図・せん断力図作成システムVer3.4 (COPITA版)操作説明書；コンクリートパイル建設技術協会，2014.3.
- 15) 建築基礎構造設計指針；日本建築学会，2001.10.

Nonlinear Soil Structure Interaction Analysis Method that Takes Account of the Fluctuating Axial Force on Piles

Hajime Hagiwara, Kenji Iwamoto and Yasutsugu Suzuki

To take detailed account of the nonlinear interaction of a pile foundation building, the nonlinear behavior of the building foundation and the soil, in addition to that of the superstructure, must be evaluated. However, because nonlinear characteristics depend on many factors, it is not easy to evaluate nonlinear behavior accurately. One of the most important factors is the fluctuating axial force applied to the pile head. The authors have developed an analytical method which uses a fiber model to take account of the fluctuating axial force. The pile group effect was considered using a thin-layer method. The main purpose of this paper is to investigate the effect of fluctuating axial forces on the nonlinearity of the piles using pile group foundation building models. The effect of the input level of an earthquake was also examined. The main conclusions of the study are shown below. In the case of a fluctuating axial force due to the overturning moment of the building, the plasticity of the pile differs in accordance with the position of the pile. As the input level of the earthquake increases, the effect of the fluctuating axial force applied to the pile head becomes greater.