

軸力変動を考慮した動的非線形解析による 杭基礎の耐震性に関する一考察

¹立石章・¹古池章紀

¹正会員 工修 大成建設土木設計第一部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

杭基礎のレベル2地震動に対する耐震設計では、上部構造物、杭、地盤のいずれも非線形特性を考慮することとなるが、特に杭は上部構造物の慣性力による軸力変動が杭の変形特性に大きく影響することが実験でわかっている。本研究では、杭は軸力変動を考慮できるファイバーモデルを用いた梁要素で、地盤は軸差ひずみおよびせん断ひずみに対して非線形性を発揮する履歴モデルを用いた平面歪要素で表して、2次元動的な非線形解析を実施した。その結果、(1)上部構造物の慣性力による軸力変動の影響から杭頭内側が大きく損傷すること、(2)地盤変形により硬軟の地層境界で無視しえない損傷が発生すること、がわかった。

Key Words : *pile foundation, fiber model, soil-structure dynamic interaction, 2-dimensional FEM analysis*

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、杭基礎のレベル2地震動に対する耐震設計法が研究されつつある。レベル2地震動に対しては、上部構造物、杭、地盤のいずれも非線形変形特性を考慮することとなるが、特に杭は上部構造物の慣性力による軸力変動が杭の変形特性に大きく影響することが実験でわかっている。

本研究では、軸力変動が杭の損傷に及ぼす影響を検討することを目的として、杭は軸力変動を考慮できるファイバーモデルを用いた梁要素でモデル化し、レベル2地震動に対して2次元動的FEM解析を実施した。解析にあたっては、地盤変形が杭の損傷に及ぼす影響に関しても検討を行った。

2. 検討条件

(1) 検討対象構造物

検討対象とする構造物および地盤は既存の試設計例²⁾を参考に設定した。対象とした杭基礎構造物と地盤の検討モデルを図-1に示す。

杭基礎構造物は道路橋で、上部工が単純桁橋、下部工がRCのT形橋脚、基礎は場所打杭 ($D=1.0\text{m}$, $L=23.0\text{m}$, $4\times 3=12$ 本)である。下部工については、試設計例において道路橋示方書IV下部構造編(以下道示IV)により

耐震設計されている。本検討では、橋軸直角方向を検討対象断面とした。

地盤は、N値2の軟弱粘性土、N値15の硬質粘性土、N値45の砂礫、基盤からなる成層地盤であり、砂礫層が杭の支持地盤である。基本地盤物性値を表-1に示す。地盤物性値は、試設計例で設定されているN値と土質から、既往の知見に基づきせん断波速度、基準ひずみ、最大減衰を与えた。

入力地震動は、レベル2地震動として兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測波のNS成分とし、主要動13秒間を入力した。

(2) 解析モデル

2次元FEM解析モデルを図-2に示す。

上部工は質点で、橋脚は質点と $M\sim\phi$ 関係をバイリニアモデルで表した塑性ヒンジ部および剛梁からなる梁要素で、フーチングは質点と剛梁でモデル化した。ここに、橋脚の $M\sim\phi$ 関係は道路橋示方書V耐震設計編(以下道示V)の保有水平耐力法により与えられている。

杭は2次元ファイバーモデル³⁾を用いた梁要素で表した。ここに、コンクリートの構成則は、骨格曲線は道示Vにより与え、履歴曲線は修正六車モデルとした。鉄筋の構成則は、骨格曲線は道示V、履歴曲線はバイリニアモデルとした。杭のコンクリートと鉄筋の構成則を図-3に示す。

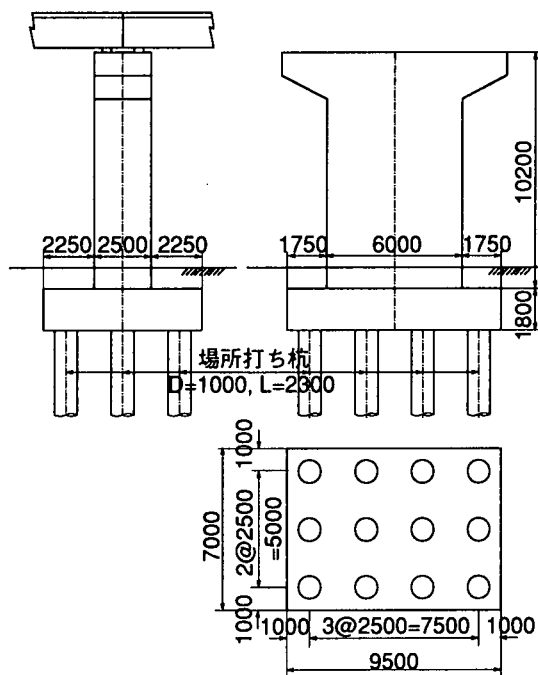


図-1 杭基礎構造物と地盤の検討モデル

杭と地盤の接触面はばねで結合するものとし、杭側面の水平ばねは剛ばね、杭側面のせん断ばねは杭周囲の摩擦力を極限值とするパイリニアモデル、杭下端の鉛直ばねは引張カットの非線形弾性ばねとした。

地盤は、軸差ひずみおよびせん断ひずみに対して非線形性を発揮することのできる Shawky モデル⁴⁾を用いた平面歪要素でモデル化した。Shawky モデルは1次元では修正 R-O モデルと一致し、そのパラメータは基本地盤物性値による $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ の 0.2～2.0% のひずみレベルの範囲をフィットするように設定した。地盤の奥行きは、本検討では大平らの研究⁵⁾を参考にフーチング奥行きの2倍とした。

境界条件としては、側方境界は粘性境界とし自由地盤からの切り欠き力を作用させ、底面境界は剛基礎とした。減衰は、橋脚および地盤の弾性応答に対する減衰を3%の Rayleigh 減衰により表した。

(2) 解析手順および解析ケース

解析手順としては、杭、接触面ばねおよび地盤の常時応力を設定するため、上部工、橋脚、フーチングの自重を作用させる解析を行った後、動的解析を実施した。

解析ケースとしては、通常の動的解析のケース（以下基本ケース）の他に、上部構造物の質量をすべて0として地盤変形の影響を調べたケース（以下地盤変形ケース）についても動的解析を実施した。

3. 検討結果および考察

表-1 基本地盤物性値

	土質名	層厚 (m)	単位体 積重量 (tf/m^3)	代表 N 値	せん断 波速度 (m/sec)	動的 おアソ 比	基準 歪み (%)	最大 減衰 定数
フーチング ▽下面		4.0	1.6	2	130	0.49	0.2	0.25
	粘性土	10.0	1.6	2	130	0.49	0.2	0.25
	粘性土	12.0	1.6	15	250	0.49	0.2	0.25
支持層	砂礫	10.0	2.1	45	280	0.49	0.1	0.30

(1) 全体応答結果と地盤変形の影響

非線形動的解析の全体の応答結果について述べる。最大水平加速度分布を図4に、地盤の最大せん断ひずみ分布を図5に、杭の最大軸力分布および最大曲げモーメント分布を図6、図7に示す。図には地盤変形ケースも併せて示した。

最大水平加速度は、下部の砂礫層内で減衰し、中央部から上部の粘性土層内で増幅し、地表で1G近くとなっている。杭の測線Aでは、基本ケースが地盤変形ケースより10～20%大きくなっているが、杭からフーチング幅程度離れた測線Bでは両ケースの違いは消失している。

地盤の最大せん断ひずみ分布は、ここでは偏差ひずみの第二不変量の最大値を表示しているが、砂礫層および上部軟弱粘性土層内で2%近いひずみが発生している。杭側面の地盤aでは、上部軟弱粘性土層内で基本ケースが地盤変形ケースより大きく、地表近くでも3%近いひずみが発生している。杭からフーチング幅程度離れた測線bでは両ケースの違いはほぼ消失している。

杭の最大軸力分布は、基本ケースでは、上部構造物のロッキング振動により外側の杭で大きく内側の杭で小さいのに対し、地盤変形ケースでは、ロッキング振動の影響がないため4本とも常時軸力分布が示されている。

杭の最大曲げモーメント分布は、基本ケースでは、杭全長にわたって外側の杭で大きく内側の杭で小さいのに対し、地盤変形ケースでは4本とも同じ分布となっている。これは、基本ケースでは外側の杭ほど大きな軸力が作用するため、外側の杭ほど杭の終局曲げモーメントおよび曲げ剛性が増大したことによるものである。

地盤変形の影響を杭の最大曲げモーメントで見ると、基本ケースに対する地盤変形ケースの比率は、杭頭で40～50%、軟弱粘性土層と硬質粘性土層の境界付近で70～90%と、特に硬軟の地層境界で地盤変形の影響が大きく無視しえないことが明らかである。

(2) 軸力変動の影響を考慮した杭の耐震性

軸力変動の影響を考慮した杭の耐震性を調べるため、基本ケースについて、杭の曲げモーメントと軸力の時刻歴を図8に、杭の曲げモーメント～曲率の履歴曲線を図9に、1本の杭の内側と外側のコンクリート

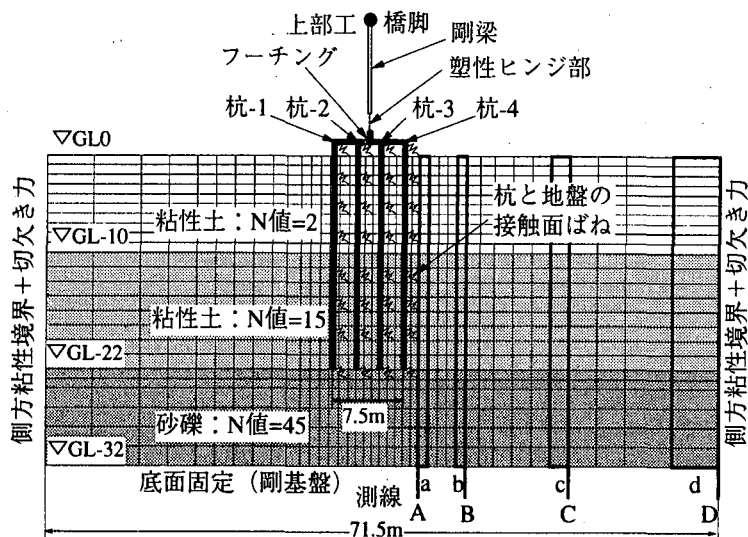
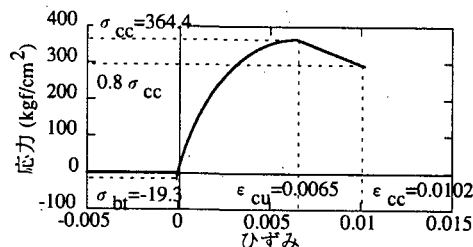
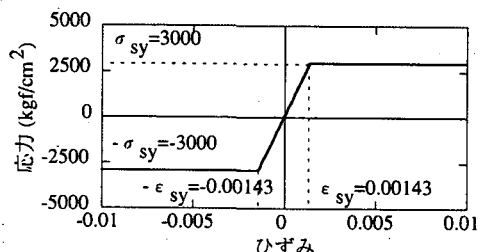


図-2 2次元 FEM モデル



a) コンクリートの構成則 (帯鉄筋間隔15cm)



b) 鉄筋の構成則

図-3 杭のコンクリートおよび鉄筋の構成則

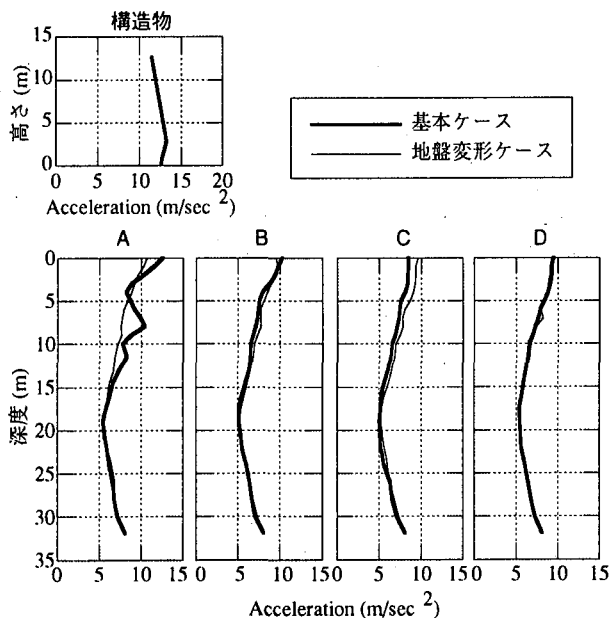


図-4 最大水平加速度分布

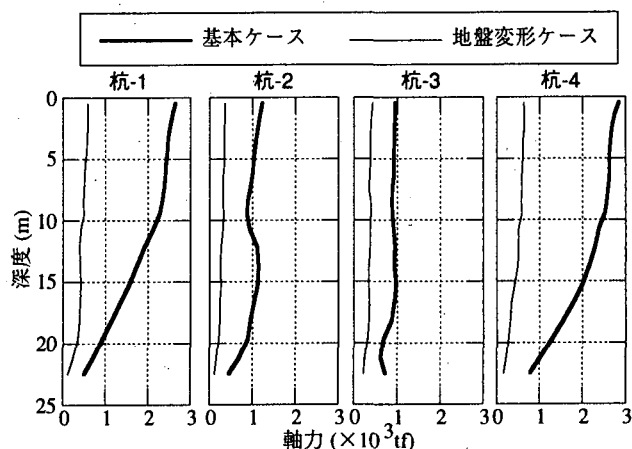


図-6 杭の最大軸力分布

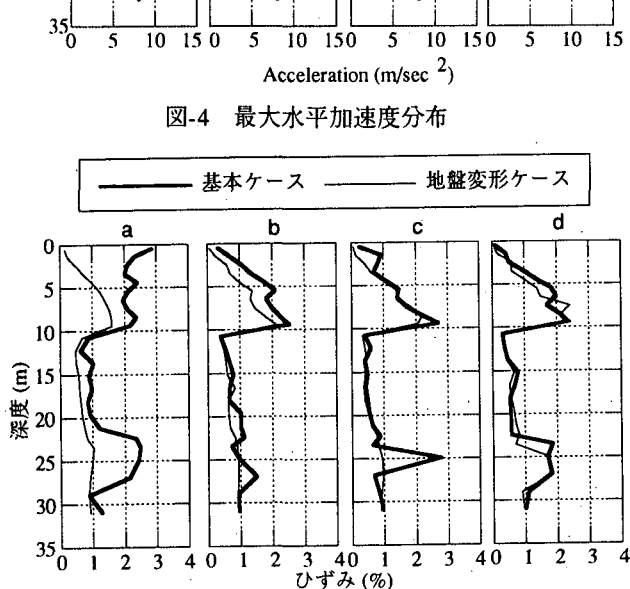


図-5 地盤の最大せん断ひずみ分布

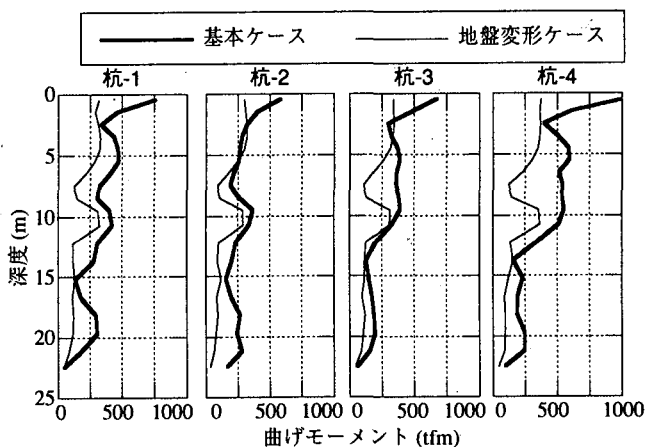


図-7 杭の最大曲げモーメント分布

の応力～ひずみ関係を図-10に示す。図はすべて両端の杭の杭頭および硬軟粘性土層境界を示した。

杭の曲げモーメントと軸力の時刻歴より、主要動では軸力と曲げモーメントの位相がほぼ一致しており、曲げモーメントは軸力が圧縮となる振幅では大きく増加し、引張となる振幅では小さく抑えられる傾向が見られる。この傾向は杭の曲げモーメントと曲率の履歴曲線にも表

れており、終局曲げモーメントおよび曲げ剛性が軸圧縮時に増大し軸引張時に低下した結果であることがわかる。

さらに、両端の杭の内側と外側のコンクリートの応力とひずみの履歴曲線を見ると、特に杭頭では、杭内側でコンクリートの圧縮応力、圧縮ひずみが大きく、杭外側では小さい。これは、上部構造物の慣性力による水平力および回転モーメントが同方向に作用すると、押し込みとなる杭では曲げモーメントにより常に杭内側が圧縮力を受けるためである。このような損傷モードは気中における組杭の正負交番水平載荷試験結果⁷⁾でも見られており、軸力変動を受ける杭の損傷モードの特徴と言える。

4. おわりに

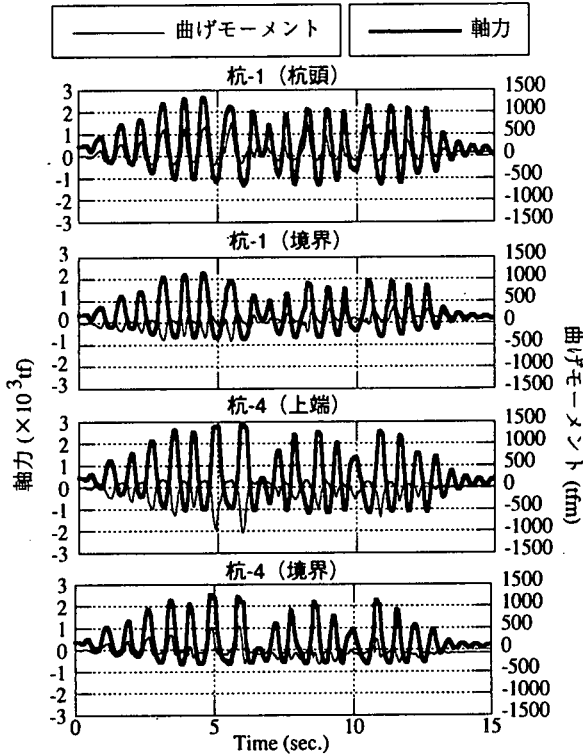


図-8 杭の曲げモーメントと軸力の時刻歴

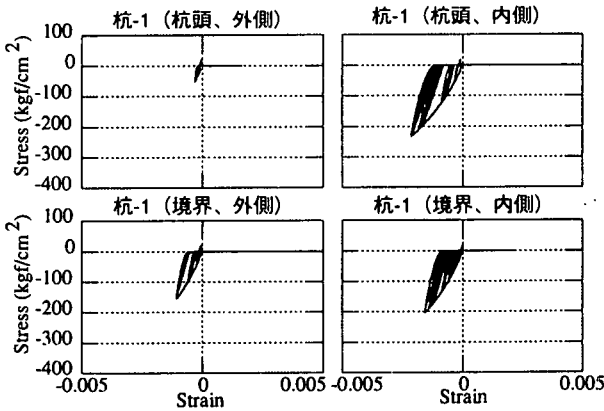


図-10 杭のコンクリートの応力～ひずみ関係

杭の軸力変動を考慮した2次元動的 FEM 解析を実施した。その結果、(1)上部構造物の慣性力により軸力変動の影響から杭頭内側が大きく損傷するというモードが表れること、(2)地盤変形により軟弱層と硬質層の境界で無視しえない損傷が発生すること、が明らかとなった。

今後は3次元問題へと拡張していきたい。

参考文献

- 1) 福井・中野・木村・石田・大越・阪野：杭基礎の変形性能に関する載荷試験，土木研究所資料，第3553号，1998。
- 2) 道路橋設計計算例委員会：土木施工1998年4月号別冊 実際に役に立つ道路橋の設計計算例，pp.121-141，山海堂，1998。
- 3) 白石・田中・畑・趙：ファイバーモデルによる非線形フレーム解析とその検証，大成建設技術研究所報，第29号，pp.119-126，1996。
- 4) Shawky, A.A.：Nonlinear static and dynamic analysis for underground reinforced concrete, 東京大学博士論文，pp.75-80，1994。
- 5) 大平・田蔵・中松・清水：地盤反力の三次元的効果を考慮した群杭基礎構造物の二次元有限要素法解析モデルの作成方法，土木学会論文集，第356号/I-3，pp.303-312，1985。

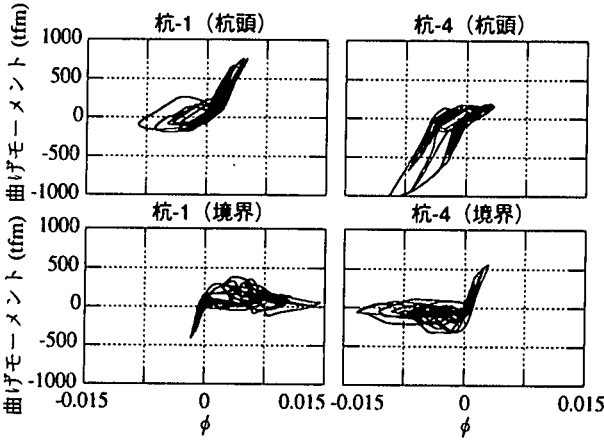


図-9 杭の曲げモーメント～曲率関係

