

# 液状化地盤における杭基礎の耐震設計手法に関する研究

大熊弘行<sup>1</sup>・佐藤 博<sup>2</sup>・西村浩一<sup>3</sup>・石川利明<sup>4</sup>・佐藤正行<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東電設計株式会社 第二土木本部地盤・構造部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)  
E-mail: eohkuma@tepsc.co.jp

<sup>2</sup>東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)  
E-mail: sato.hiro@tepsc.co.jp

<sup>3</sup>東電設計株式会社 第二土木本部地盤・構造部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)  
E-mail: enishim@tepsc.co.jp

<sup>4</sup>東電設計株式会社 技術開発本部土木技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)  
E-mail: tishi@tepsc.co.jp

<sup>5</sup>東電設計株式会社 第二土木本部地盤・構造部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)  
E-mail: sato@tepsc.co.jp

液状化地盤中の杭基礎には上部工慣性力と地盤変位が作用し、両者は必ずしも同時に最大にはならず位相差を生じることがある。本研究は、慣性力と地盤変位の位相差を考慮し、杭がクリティカルとなる条件を踏まえた簡易な耐震設計手法の確立を目的として、詳細解析結果を正值と仮定し、簡易解析による詳細解析結果の再現性について検討を行った。

詳細解析として、2次元FEM有効応力解析を用い、簡易解析として、上部工慣性力と地盤変位を組合せた応答変位法による2次元骨組解析を用いた。2つの解析を比較検討した結果、簡易解析でも、慣性力最大時と地盤変位最大時の時刻に着目して解析を行えば、慣性力と地盤変位の位相差を考慮した設計を行うことができる可能性があることを把握した。

*Key Words : liquefaction, pile foundation, inertia force of the structure, ground displacement*

## 1. はじめに

地震時の液状化地盤中の杭基礎には上部工慣性力と地盤変位が作用するが、杭基礎の応答には杭剛性、地盤剛性、入力地震動の特性等種々のパラメータが影響するため挙動が複雑である。一般に、このような杭基礎の設計では、慣性力の最大値と地盤変位の最大値を同時に作用させて評価をすることが多い。しかし、慣性力と地盤変位は必ずしも同時に最大にはならず位相差を生じる場合があり、液状化地盤を対象とはしていないが、このような条件を考慮した設計法<sup>1)</sup>がある。

本研究では、慣性力と地盤変位の位相差を考慮し、杭がクリティカルとなる条件を踏まえた簡易な耐震設計手法の確立を目的として、詳細解析結果を正值と仮定し、簡易解析による詳細解析結果の再現性について検討を行った。解析には、液状化時の杭と地盤の動的相互作用を考慮できる2次元FEM有効応力解析(以下、詳細解析と称す)、および質点系応答

解析で得られた上部工の応答加速度から設定した上部工慣性力と、詳細解析で得られた地盤変位を組合せた応答変位法による2次元非線形骨組解析(以下、簡易解析と称す)を用いた。

## 2. 解析条件

解析の対象は、沖積層が比較的厚く、地震時に液状化の可能性が高い地盤中にある既設の杭基礎構造物である。図-1に地盤構成および杭基礎構造物の形状を示す。

地盤は、主に砂とシルトの互層により構成されている。また、地下水位はGL-1.15mにあり、洪積層はGL-52m以深に分布している。液状化対象層は、GL-20m以浅でN値が1~4と小さいGL-4.0~GL-18.5mの砂層とシルト質砂層とした。

杭基礎構造物は、変圧器(鋼製:重量4038kN)と基礎スラブからなる上部工を千鳥配列の8本の杭

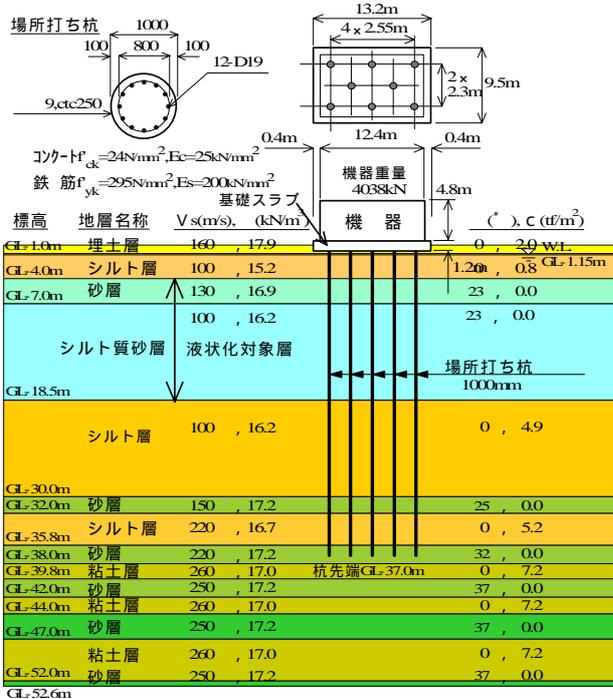


図-1 地盤構成および杭基礎構造物の形状

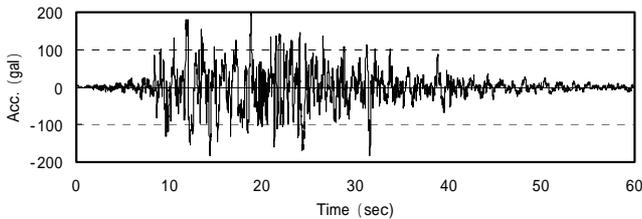


図-2 入力地震動（最大加速度 200Gal）

で支持している。杭の仕様は場所打ち杭で、直径1000mm、杭長36.3mである。

図-2に解析に用いる入力地震動を示す。入力地震動は、レベル2地震動に相当する想定南関東地震(M7.9)の地震波を用い、最大加速度(2E)を200Galに調整した。この地震動は、位相特性の設定にラウニオン波を用い、減衰5%の加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動である。

### 3. 解析モデル

#### (1) 詳細解析

詳細解析には、2次元 FEM 有効応力解析 STADAS<sup>2)</sup>を用いた。図-3に解析モデルを示す。

地盤および上部工の要素は平面ひずみ要素でモデル化し、杭ははり要素でモデル化した。地盤の非線形特性として、液状化対象層にはサイクリックモビリティを表現できる Tobita & Yoshita モデルの改良モデル<sup>3)</sup>を用い、非液状化層には双曲線モデルを用いた。杭の非線形特性として、M ~ 関係をトリリニア型とした履歴モデルを用いた。また、上部工は線形要素とした。

杭と液状化地盤間の相互作用やすり抜け効果を表現するために、杭と地盤との節点を分離し、これらをつなぐ杭軸直角方向の地盤ばねを設けた<sup>4)</sup>。初期の地盤ばね値は「鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物)」に準じて算定し、地震時にそれを低減させた。低減方法として、液状化対象層では澤田<sup>5)</sup>により示された過剰間隙水圧比と剛性低下率の関係式を用い、また非液状化層では予め本地盤モデルで解析して得られた遠方地盤の各層におけるせん断弾性係数を基にした剛性低下率を用いた。なお、杭軸方向の地盤ばねは設けなかった。

地盤の底面境界は、基礎面下の地盤が無限の剛性を有しているものと仮定して粘性境界とした。また、地盤の左右側方境界は、水平成層地盤で側方を十分遠方にとっていることから周期境界とした。

#### (2) 簡易解析

簡易解析に用いる応答変位法には、図-4に示す2次元非線形骨組解析モデルを用いた。応答変位法の入力外力である地盤変位は、詳細解析で得られた遠方地盤の地盤変位を用いた。また、もう一つの入力外力である上部工慣性力は、詳細解析で得られた遠方地盤の地表応答加速度波形を入力波形として質点系応答解析による上部工応答加速度から算定した。

2次元非線形骨組解析の解析モデルでは、杭は軸力を考慮したM ~ 関係による非線形部材とし、基礎スラブは線形部材とした。地盤ばねは詳細解析と同じように設定したものをを用いた。

質点系応答解析の解析モデルでは、杭や基礎の周辺地盤が基礎の並進および回転に対して抵抗する効果を直ばね、回転ばねおよびそれらの連成ばねを用

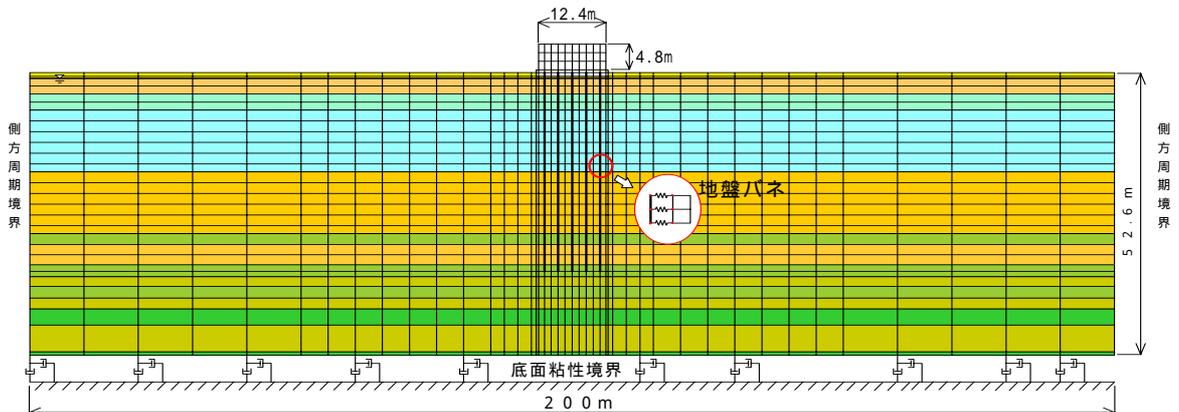


図-3 2次元 FEM 有効応力解析モデル

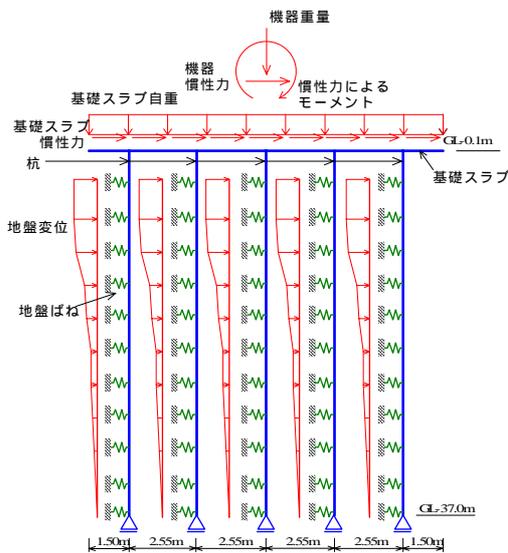


図-4 2次元非線形骨組解析モデル

いてを表現するスウェイ・ロッキングモデル (SRモデルと称す)<sup>6)</sup>を用いた。

#### 4. 解析結果

##### (1) 詳細解析による杭のクリティカルとなる時点

詳細解析による杭の曲げモーメント分布を図-5に示す。この図は、全時間の杭の最大曲げモーメントの絶対値を包絡させた分布図である。これより、杭にとって最も厳しいのは、ほぼ同程度の曲げモーメントが発生している地中部 (GL-32m 付近) と杭頭部であり、発生時刻はそれぞれ  $t_{10}=19.41s$ ,  $t_{20}=32.38s$  である。

次に、杭に作用する外力に相当する上部工応答加速度と地盤変位の関係を全時間で表し図-6に示す。ここで、地盤変位は、遠方地盤における液状化層間の相対変位で示しており、一般にこの間の相対変位が最大の時に地盤変位による外力が最も厳しくなることから選定している。同図には、地中部と杭頭部に最大曲げモーメントが発生するそれぞれの時刻  $t_{10}$ ,  $t_{20}$  を、 $t_1$ ,  $t_2$  で示してある。これより、杭頭部に最大モーメントが発生する時点  $t_{20}$  は、地盤変位最大時 ( $t_2=32.30s$ ) にほぼ一致した。また、既往の研究成果<sup>7)</sup>で示されているように、この時上部工慣性力は同時には最大にはならず、両者には位相差があることが認められる。地中部に最大曲げモーメントが発生した時点  $t_{10}$  は上部工慣性力と地盤変位がともに比較的大きい時点に対応する。ここでは、簡便に算定可能な慣性力最大時 ( $t_1=19.22s$ ) でこれを代用することとして、前述の図-5にこれらの時刻  $t_1$  と時刻  $t_2$  の最大曲げモーメントの絶対値を包含させた分布図を示す。杭頭部の最大曲げモーメントをほぼ再現し、地中部についても比較的良く再現していることが認められる。

以上のことから、今回の解析では、杭の曲げモーメントが厳しくなる時点として、上部工慣性力最大時  $t_1$  と地盤変位最大時  $t_2$  を選定することにより、

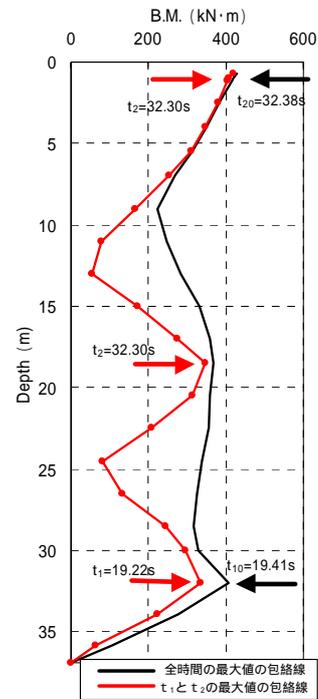


図-5 全時間と時刻  $t_1$ ,  $t_2$  における最大曲げモーメントの包絡線分布

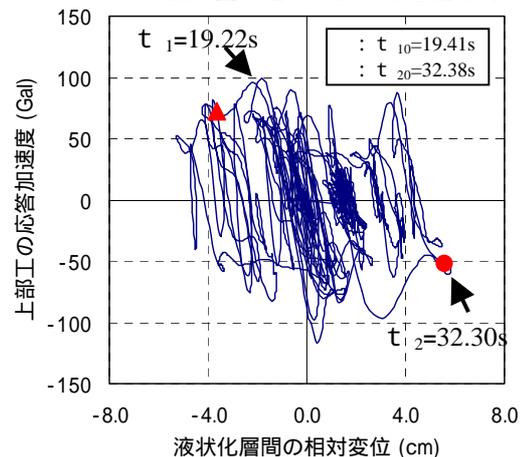


図-6 上部工の応答加速度と液状化層間の相対変位の関係

杭のクリティカルとなる条件をある程度の精度で把握できることになる。

##### (2) 簡易解析による詳細解析結果の再現性

詳細解析の結果を踏まえ、簡易解析で詳細解析結果の再現性について検討を行った。

簡易解析で着目するのは上部工慣性力最大時と地盤変位最大時である。最大地盤変位は詳細解析結果を用いることから、その時刻は  $t_2=32.30s$  であるが、上部工慣性力最大時は、質点系応答解析より求めることから、上述の詳細解析の  $t_1=19.22s$  とは若干異なり  $t_1'=19.39s$  となる。この場合、時刻  $t_1'$ ,  $t_2$  の設計震度はそれぞれ 0.09, 0.04 となり、地盤変位はそれぞれ地表で 8.7cm, 10.5cm となる。

図-7に詳細解析と簡易解析の杭断面力 (曲げモーメント,せん断力) と杭変位を比較したものを示す。詳細解析は最大曲げモーメントが発生する  $t_{10}=19.41s$ ,  $t_{20}=32.38s$  を用い、これを慣性力最大時  $t_1'=19.39s$ , 地盤変位最大時  $t_2=32.30s$  の簡易

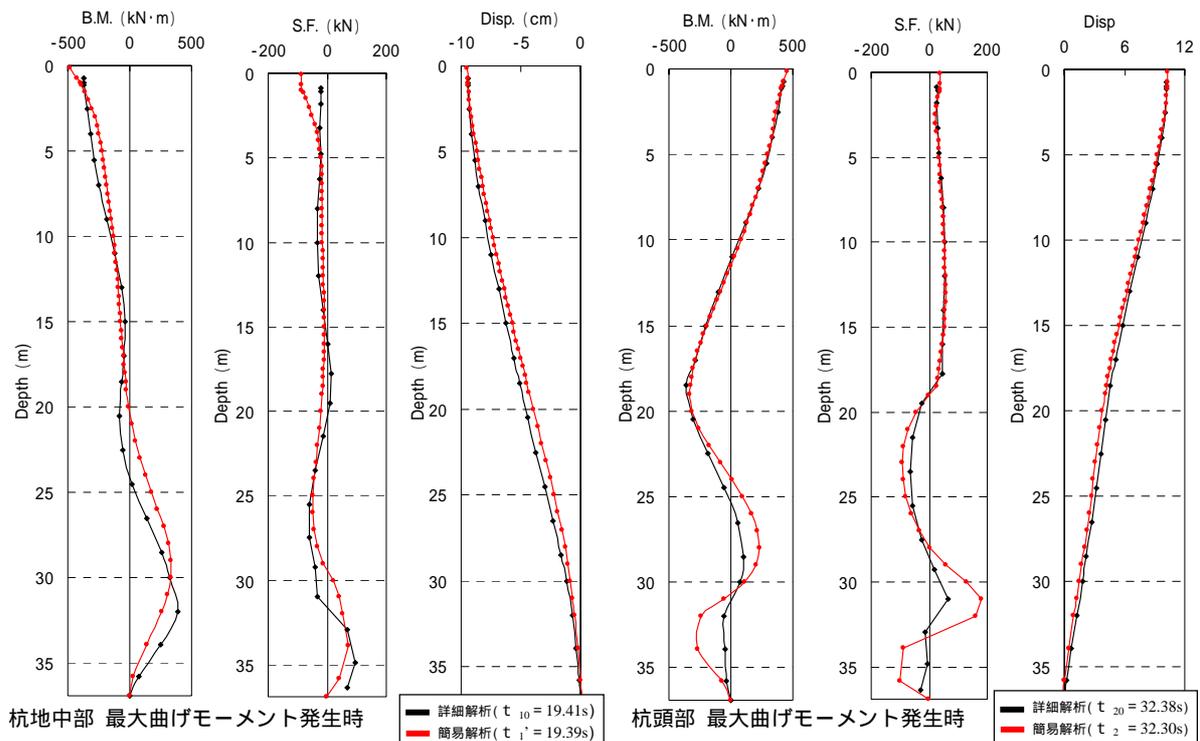


図-7 詳細解析と簡易解析の比較（杭の曲げモーメント，せん断力，変位）

解析で再現することを試みる。

慣性力最大時（ $t_{1'}=19.39s$ ）は，地中部（GL-32m付近）に最大曲げモーメントが発生する場合の再現性を検討するものである。最大曲げモーメントの発生深度，大きさは詳細解析結果とやや異なり，慣性力最大時のデータを用いていることがその主要因と考えられるが，全体の分布形状はよく一致する。せん断力分布，変位分布についても曲げモーメント分布と同程度に再現していることが認められる。

地盤変位最大時（ $t_2=32.30s$ ）は，杭頭部に最大曲げモーメントが発生する場合の再現性を検討するものである。杭頭部からGL-20m程度まで曲げモーメントは詳細解析結果とほぼ一致しており，杭頭部曲げモーメント最大時が地盤変位最大時にほぼ一致しているためと考えられる。せん断力分布，変位分布の再現性も同程度である。

このように，慣性力最大時と地盤変位最大時に着目した応答変位法により，詳細解析結果を概ね再現することができたと考えられる。

## 5. まとめ

2次元骨組解析を用いた応答変位法により，慣性力最大時と地盤変位最大時の時刻に着目して解析を行えば，慣性力と地盤変位の位相差を考慮した設計を行うことができる可能性があることを把握した。

ただし，今回の解析では，地中部の最大曲げモーメントは慣性力，地盤変位がいずれも最大ではない時点で発生しており，前記のことは厳密には正しくない。今後は，他の地盤モデルの詳細解析や模型振

動実験等を対象に，応答変位法を用いた同様な検討を行い，杭のクリティカルとなる時点の推定方法の精度向上を図ると共に，応答変位法を用いた簡易解析法の高度化について引続き検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・解説，耐震設計，1999.
- 2) Kurose,H., Sato,M., Ozeki,K. & Yoshida,N. : Effective stress analysis by shear strain controllable model and its application to centrifuge shaking model test, Proc. of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic, San Diego California, USA March,2001
- 3) Tobita,Y. & Yoshida,N. : An isotropic bounding surface model for undrained cyclic behavior of sand, Limitation and Modification, Proc. International Symposium on Pre-Failure Deformation of Geomaterials,Sapporo,1994.
- 4) Sato,H., Shimada,M., Sato,M., Ishikawa,T., & Azuma.H. : A Study on Behavior of Piles in Liquefied Ground During Earthquakes, Proc. of Satellite conferenceNo.5, XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Aug. 2001.
- 5) 澤田亮，西村昭彦：液状化地盤中の基礎構造物の動的挙動に関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1469-1474,1998
- 6) 土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会：基礎・地盤・構造物系の動的相互作用,1992.
- 7) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎構造物の地震時応力に与える地盤・構造物の非線形性の影響とその評価手法，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1717-1722,1998

(2003. 10. 20 受付)