

軸力変動による影響を考慮した場所打ち群杭基礎の繰返し水平載荷試験の3次元弾塑性有限要素解析によるシミュレーション

張 鋒¹・八嶋² 厚・木村 亮³・渦岡 良介⁴

¹正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 理化学研究所地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

ABSTRACT: In this paper, a real scale field test of 9-pile foundation, with a diameter of 1.2 m, subjected to cyclic lateral loading up to an ultimate state, is simulated using a 3-dimensional elasto-plastic finite element analysis (DGPILE-3D). The nonlinear behavior of RC pile is simulated with an axial-force dependent hysteretic model proposed in this paper. Meanwhile, the soil of the ground is simulated with *tij-sand model* and *tij-clay model*. The purpose of the paper is to provide an applicable numerical way of evaluating the mechanical behavior of a pile foundation subjected to cyclic lateral loading up to an ultimate state.

Key word: *Cyclic lateral loading, group-pile foundation, 3D-FEM, axial-force dependent hysteretic model of RC, elasto-plastic constitutive model of soil*

はじめに

大地震の場合、杭基礎の塑性化と地盤の降伏が予想され、この非線形挙動を適切に評価しなければならない。著者らは群杭の終局挙動を表現しうる3次元弾塑性静的・有限要素の解析コード DGPILE-3D¹⁾を開発し、水平載荷を受ける群杭の終局状態の力学挙動をシミュレートした。しかし、RC杭の軸力変動による曲げ剛性の非線型特性に対する影響の適切評価が難問視されてきた。本研究では新たに建築構造分野ですでに使われているRC部材の *Multi-Spring model (MS Model)* や *Fiber model* の概念を有限要素法に導入し、梁要素のつりあい式の弱式を再定式化し、軸力変動による影響を適切に表現できる解析手法を開発した。地盤には一般応力状態での応力～ひずみ関係を説明できる *t_{ij}-clay model*²⁾ と *t_{ij}-sand model*³⁾ を採用した。さらに、杭径1.2mの9本杭の群杭基礎繰返し原位置水平載荷試験の数値シミュレーションも実施した。その結果、本研究で提案された解析手法の有効性が確認され、杭基礎耐震評価の手法の一つとして、期待できると考えられる。

軸力変動による影響を考慮したRC部材の定式化

建築分野では、軸力変動による影響を考慮したRC部材の非線形モデルが幾つか提案されている。その代表として、*MS Model*⁴⁾ と *Fiber Model*⁵⁾ がある。これらのモデルはいずれも曲げ・軸力の相互作用を考慮でき、コンクリート・鉄筋部材を幾つかのばねあるいはファイバー要素で離散化するものである。RC部材が2方向の曲げ、せん断および軸力をうける場合には、ファイバーの軸方向を横断する断面については平面則が保たれ、ファイバーの軸ひずみが2方向の曲げおよび軸変形によるものと仮定している。そ

のファイバー要素の応力・ひずみ関係は図1に示すようなコンクリート・鉄筋部材の非線形特性で厳密に表すものである。円形杭のコンクリート部材の離散化については図2に示すように、まず、この円をm個の厚さが同様なリング($r=r_j-r_{j-1}=R/m$)に分割し、さらにj個目リングを8j-4等分割する($j=1,2,\dots,m$)。それにより、 $4m^2$ の等分割された要素が得られる。また、j個目リング上の要素の中心と円の中心との距離は次式で表される。

$$\bar{r}_j = 2(r_{j-1}^2 + r_j - r_{j-1}r_j + r_j^2) / (r_{j-1} + r_j) / 3$$

ここに、 r_j 、 r_{j-1} はj個目リングの外と内の半径である。*MS model* や *Fiber model* は主に建築構造物、すなわち気中の構造物に適応しているが、杭基礎のような地盤・杭基礎の相互作用を考慮する場合は、地盤と杭構造物の変位の適合条件を満足しなければならない。そこで本研究では *MS model* や *Fiber model* の離散化の概念を有限要素法に導入し、梁要素のつりあい式の弱式を再定式化し、軸力変動による影響を適切に表現できる有限要素の梁理論を提案した。

図3、4はこの梁理論に基づいて、RC部材の片持ち梁の曲げ・軸力を受けた時の力学挙動のシミュレーションを示したものである。片持ち梁は長さが8m、直径が1.2mであり、その諸元および力学特性が表1および図1に示されている。梁が11個の梁要素に分割され、その自由端に横方向および軸方向に単調・繰返し荷重を加える。図3は軸力一定で、横方向単調にポシュオーバする時の固定端要素のM-Φ関係およびM-N関係を示したものである。図4は軸・横方向に交番載荷を受ける時の固定端要素のM-Φ関係を示したものである。これらの図より、RC部材の軸力変動による影響がこの理論より説明できることがよくわかる。

表1 RC部材の片持ち梁の諸元

E_c (KPa)	σ_c (KPa)	σ_t (KPa)	鉄筋	E_s (KPa)	σ_v (KPa)
2.5×10^7	3.6×10^4	30	D29-24	2.1×10^8	3.8×10^5

杭基礎の大変形繰返し水平載荷試験の概要

本研究では、阪神高速道路公団湾岸線岸和田大橋における仮設ベントに用いられた9本群杭の杭基礎の大変形繰返し水平載荷試験を DGPILE-3D を用いてシミュレーションし、水平載荷試験への適用性を検証する。

杭はベント工法で設置された場所打ちコンクリート杭で、杭長Lは30.4m、杭径Dは1.2mである。試験杭の載荷試験杭の配置図を図5に示す。9本群杭の載荷試験では隣接する2つのフーチング(6本群杭と9本群杭)を反力杭にした。9本群杭への載荷は、片方向多サイクル繰返し方式により行い、20.50 MN まで7サイクルの載荷を実施した。載荷時間は処女荷重時については15分間、サイクル間の無荷重時(0荷重時)が15分間、履歴荷重段階時は3分間一定荷重を保持させるものとした。

また、載荷試験周辺地盤は上層約10mが砂礫主体の埋立層であり、下層は粘性土層と砂質土層の互層である沖積層が分布している。

解析結果と実験結果の比較

解析において、地盤には粘土および砂の弾塑性構成モデルである t_{ij} -clay model と t_{ij} -sand model を用いている。本解析で用いている地盤定数を表2に示す。これらの地盤定数の決定については、室内試験によって決定することが望ましいですが、ない場合はN値により推定する。図6は繰返し正規圧密深草粘土の一般応力状態での構成式のパフォーマンスを示したものである。RC杭の諸元および非線形特性は表3、図1に示す。また解析地盤のメッシュは図7に示す通りに、節点数が4584、要素数が3696である。なお、解析には載荷・除荷の7サイクルで412ステップの荷重増分をとり、漸増載荷あるいは漸減除荷を与えることで、繰返し水平荷重載荷過程をシミュレートした。解析結果と実験結果の比較は以下の3項目について行った。

表2 地盤定数

Soil	Thick-ness(m)	E (MPa)	ν	D_r	m	α	e_0	R_f	λ (C ₁)	κ (C ₂)
B	10.0	---	0.30	-0.6	0.3	0.85	0.904	0.05	0.0034	0.0016
As1	11.0	---	0.30	-0.6	0.3	0.85	0.8	4.35	0.0024	0.0010
Ac1	5.0	---	0.38	---	---	0.70	0.7	3.5	0.03	0.01
Dc	6.0	100.0	0.30	---	---	---	---	---	---	---

表3 杭の諸元

1. PHYSICAL PROPERTIES OF RC:	
Compressive strength of concrete :	$\sigma_c = 3.8 \times 10^4$ kPa
Young's modulus of concrete:	$E_c = 2.5 \times 10^7$ kPa
Young's modulus of steel:	$E_s = 2.1 \times 10^8$ kPa
Yielding strength of steel:	$\sigma_v = 3.8 \times 10^5$ kPa
2. ARRANGEMENT OF THE REINFORCEMENT:	
Part A:	D29-24 (length: 345 cm)
Part B:	D22-12 (length: 1050 cm)
Part C:	D22-12 (length: 1600 cm)
Overburden of the reinforcement:	15 cm

1) 荷重～変位曲線の比較を図8に示す。杭の挙動は、3サイクル目まで表現できているが、その後の解析値が実験値よりかなり小さい値となっている。杭部材と地盤の非線形特性がそれぞれ精密なモデルで計算しているにもかかわらず、終局状態の変形特性がまだ十分説明できていないことは地盤定数の決定についてN値で推定するのは限界があることを意味する。

2) フーチング直下における杭部材の M- Φ 履歴の解析値を図9に示す。M- Φ 履歴ループはいずれの杭においても形が相似しているが、大きさが前方・中間・後方杭の順で小さくなっている。軸力の変動による M- Φ 関係への影響がはっきりみられる。

3) 前方・中間・後方杭の曲げモーメント分布の実験値および計算値の比較を図10に示す。この図より、最大曲げモーメントの発生位置がいずれもフーチング付近にあることがわかった。また、最大曲げモーメントが、前方・中間・後方杭の順で減少していき、軸力の変動による M- Φ 関係への影響が本解析より説明できることがわかった。

結論

MS model や Fiber model の離散化の概念を有限要素法に導入し、梁要素のつりあい式の弱式を再定式化することによって、軸力変動による影響を適切に表現できる有限要素の梁理論を提案した。

提案した梁理論および一般応力状態での応力～ひずみ関係を説明できる t_{ij} models に基づいた有限要素解析により、杭径1.2mの9本杭の群杭基礎繰返し原位置水平載荷試験の数値シミュレーションを実施した。その結果、荷重～変位関係、前方・中間・後方杭の曲げモーメント分布の差異、すなわち、軸力の変動による M- Φ 関係への影響が本解析より説明できることが確認された。また、解析の精度をあげるためには、土の室内試験の実施によって構成式のパラメータを決定することが望ましいと考えられる。

参考文献

- Kimura, M. and Zhang, F. 1999. Seismic evaluation of pile foundation by Static and Dynamic 3-D Finite element analyses, Proc. of the 11th Asian Regional Conference of Int. Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp.507-510
- Nakai, T. and Matsuoka, H. 1986. A generalized Elastoplastic Constitutive Model for Clay in Three-Dimensional Stresses, Soils and Foundations, Vol.26 No.3, pp81-98
- Nakai, T. 1989. An Isotropic Hardening Elastoplastic Model for Sand Considering the Stress Path Dependency in Three-Dimensional Stresses, Soils and Foundations, Vol.29 No.1, pp119-137
- Lai, S.-S., Will, G T. and Otani, S. 1984. Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Member, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp2568-2584.
- Li, K. N. and Kubo, T. 1999. Analysis of circular RC member in MS/fiber Model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting (Hiroshima), St. II, AIJ.

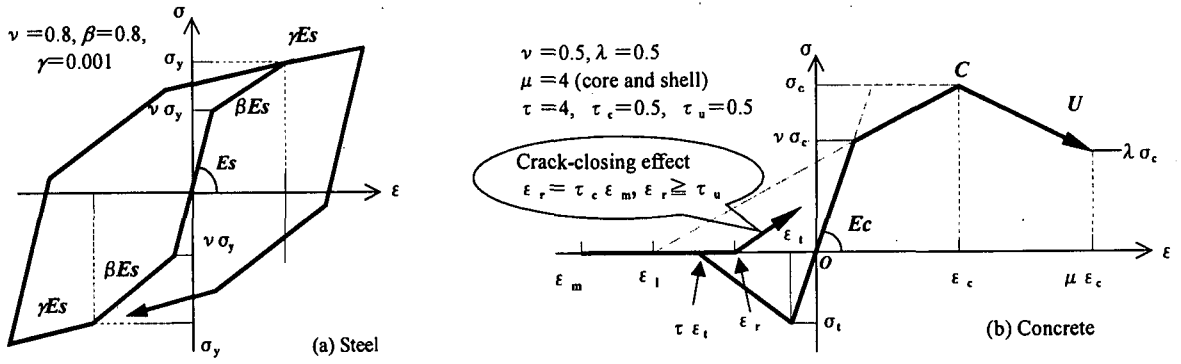


図1 鉄筋およびコンクリートの非線形特性

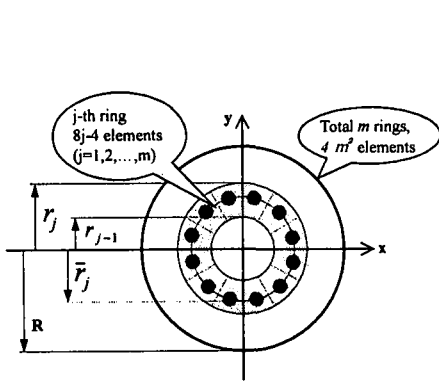


図2 円形断面のRC 杭の離散化
(Li and Kubo, 1999)

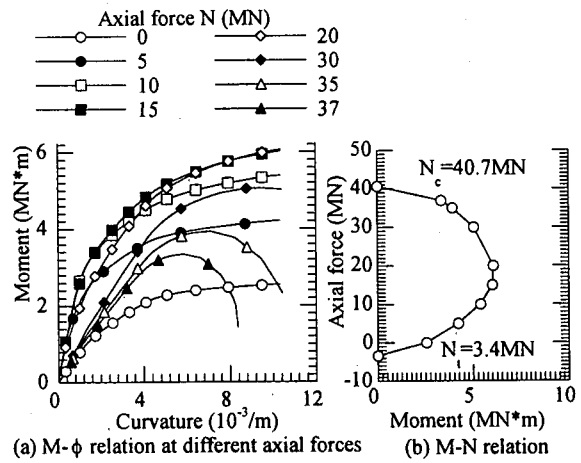


図3 片持ち梁の単純載荷時の非線形特性

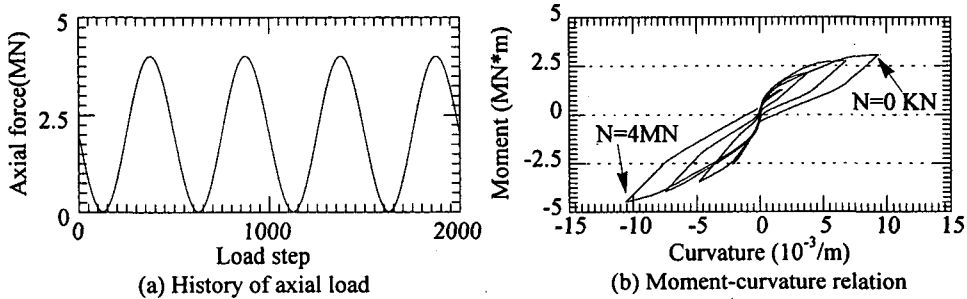


図4 片持ち梁の繰り返し載荷時の非線形特性

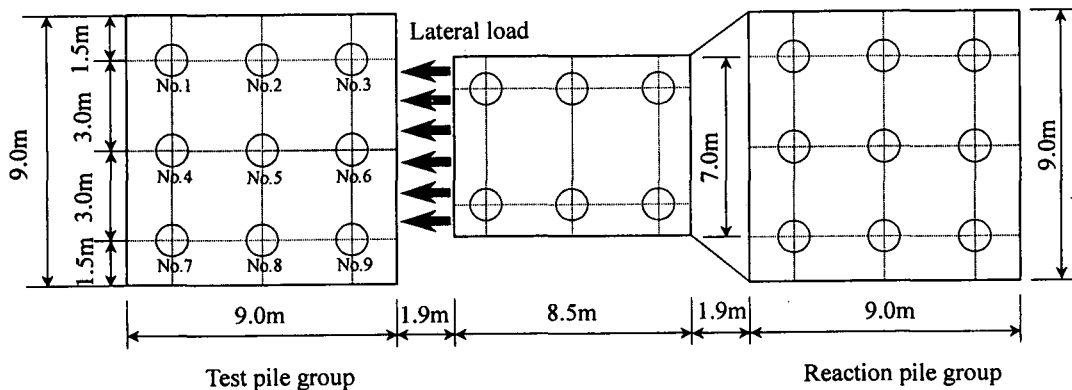


図5 試験杭および反力杭の平面位置

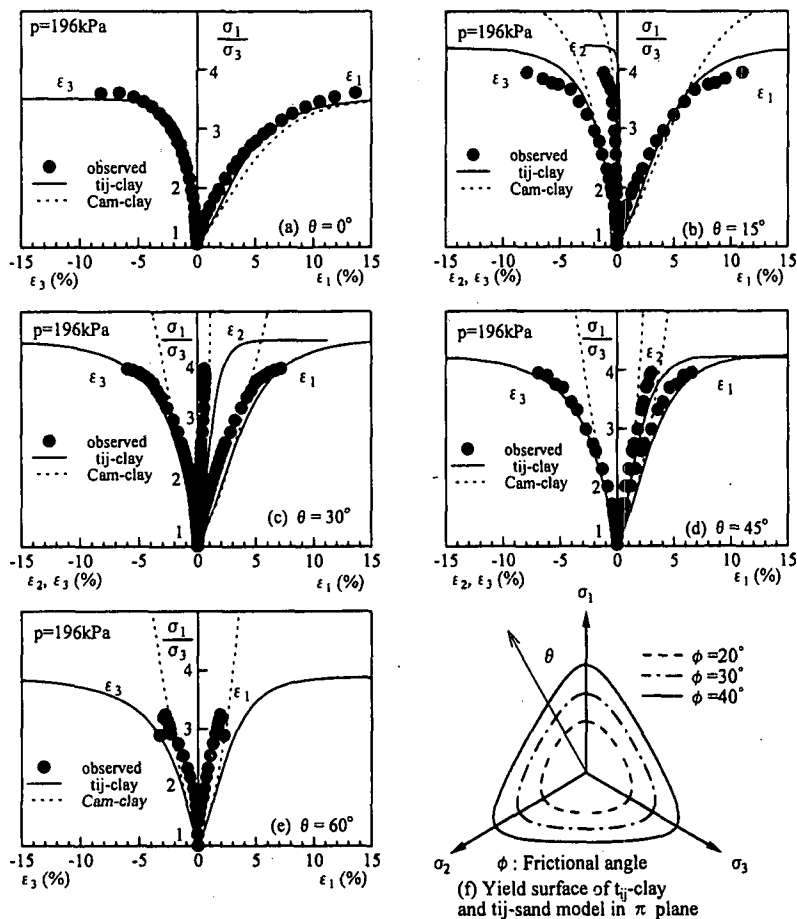


図6 正規圧密深草粘土の一般応力状態での応力・ひずみ関係
(Nakai and Matsuoka, 1986)

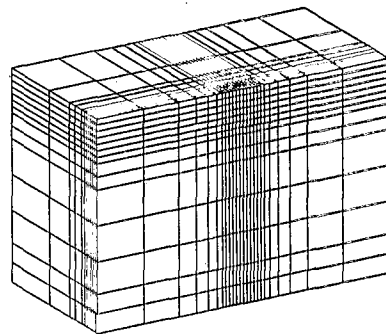


図7有限要素解析に用いられるメッシュ

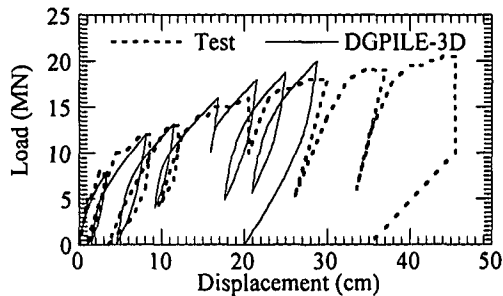


図8 荷重—変位曲線の実験値と解析値の比較

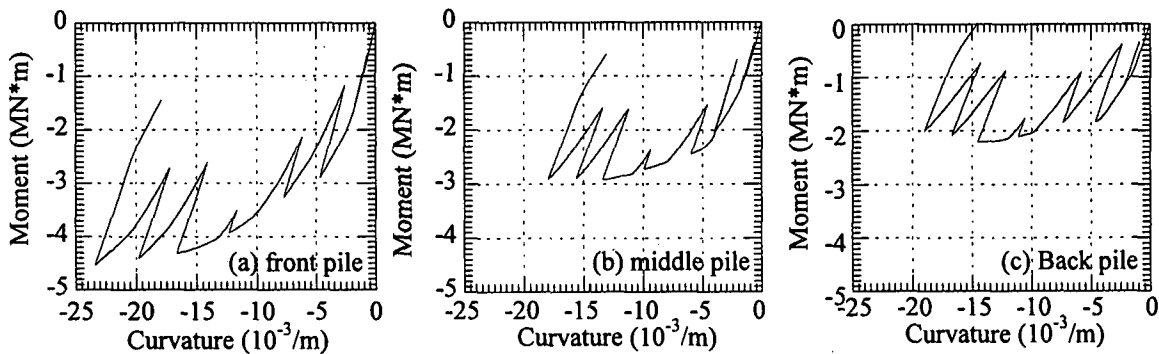


図9 フーチング直下における杭部材のM-φ履歴の解析値

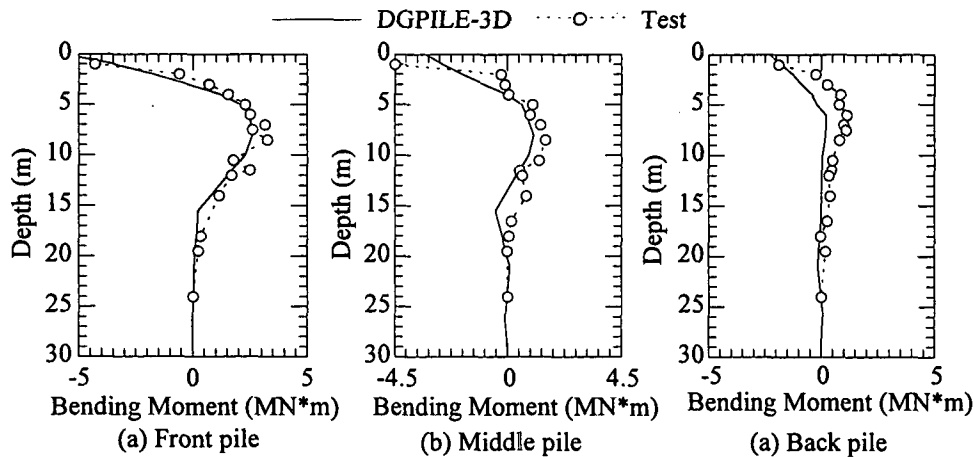


図10 最大荷重時杭の曲げモーメント分布の実験値と解析値の比較