

応用要素法を用いた杭基礎の破壊挙動に関する基礎的研究

Fundamental Study on Failure Behavior of Pile Foundation using Applied Element Method

菅野有美*・目黒公郎**

Yumi SUGANO and Kimiro MEGURO

1. はじめに

一般に土木構造物は地盤の上に建設され、地盤によって支えられている。また、構造物の多様化により軟弱地盤上に建設される構造物が増加し、杭基礎が用いられるケースが増えている。構造物の地震挙動を理解する上で、その構造物を支える基礎と周辺地盤との相互作用を把握することの重要性は高い。事実、過去の地震被害では、地盤状態により基礎の破壊状況が異なり、それにより上部構造物の応答にも影響があったことが報告されている¹⁾。周辺地盤を含めた構造物全体の地震時挙動を追跡可能な解析モデルの構築が求められている。さらに、杭基礎の地震被害は構造物の慣性力によるものと地盤の変形によるものに大別される。そのため、構造物の破壊・崩壊だけでなく地盤の大変形も取り扱うことが必要となる。

そこで本研究では、大変形問題の解析に適している応用要素法 (Applied Element Method: AEM)²⁾ を用いて、地盤と基礎の相互作用を考慮できる解析モデルを構築し、地盤の差による杭基礎の耐力や破壊過程への影響を定性的・定量的に把握することを目的とする。ここでは、その第1歩として、乾燥砂地盤中における杭基礎の静的解析を行うが、AEMによる解析では動的解析や液状化地盤解析にも発展し得るものとする。

2. 応用要素法 (Applied Element Method ; AEM)

AEMでは、解析対象を仮想的に分割した矩形要素の集合体として扱う (図1)。図2に示すように、各要素には、その材料特性を有した法線方向と接線方向の2種類の分布バネで結合されている。この接触点における剛性マトリクスを計算するが、この剛性マトリクスの左上4分の1は式(1)の通りである。

クラックの発生は個々のバネが破壊することで表現されるため、クラックの発生位置や方向をあらかじめ仮定することなく進行性破壊現象を追跡できる。このようなメカニ

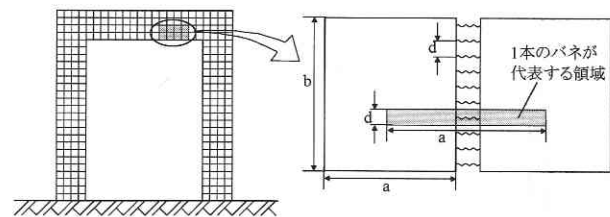


図1 要素分割とバネ代表領域

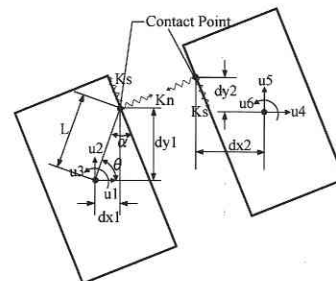


図2 要素バネの幾何学的関係

ズムによって、AEMは破壊・崩壊までを統一的に解析できる手法となっている。

また、鉄筋コンクリートのような複合材料を扱う場合、鉄筋位置には鉄筋の材料特性を有するバネを重ねて配置するなど、各々のバネ位置に合わせた特性を持たせることで複合材料の挙動を表現することができる。

$\sin^2(\theta + \alpha)K_n$ $+\cos^2(\theta + \alpha)K_s$	$-K_n \sin(\theta + \alpha)$ $\cos(\theta + \alpha)$ $+K_s \sin(\theta + \alpha)$ $\cos(\theta + \alpha)$	$\cos(\theta + \alpha)$ $K_n L \sin \alpha$ $-\sin(\theta + \alpha)$ $K_n L \cos \alpha$
$-K_n \sin(\theta + \alpha)$ $\cos(\theta + \alpha)$ $+K_s \sin(\theta + \alpha)$ $\cos(\theta + \alpha)$	$\sin^2(\theta + \alpha)K_s$ $+\cos^2(\theta + \alpha)K_n$	$\cos(\theta + \alpha)$ $K_s L \cos \alpha$ $+\sin(\theta + \alpha)$ $K_n L \sin \alpha$
$\cos(\theta + \alpha)$ $K_s L \sin \alpha$ $-\sin(\theta + \alpha)$ $K_n L \cos \alpha$	$\cos(\theta + \alpha)$ $K_s L \cos \alpha$ $+\sin(\theta + \alpha)$ $K_n L \sin \alpha$	$L^2 \cos^2(\theta + \alpha)K_n$ $+L^2 \sin^2(\theta + \alpha)K_s$

(式1)

*大阪ガス株式会社 (東京大学大学院工学系研究科)

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

3. 材料特性

(1) コンクリート

図3にコンクリートの材料モデルを示す。圧縮域では前川らによるモデル³⁾，引張域では線形のモデルを用いた。ただし，引張強度に達すると，剛性，応力ともにゼロとなるものとした。

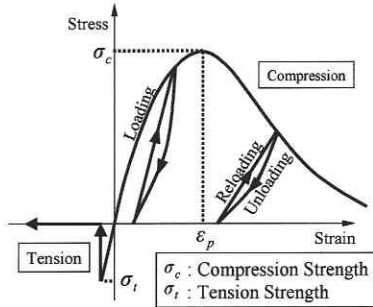


図3 コンクリートモデル

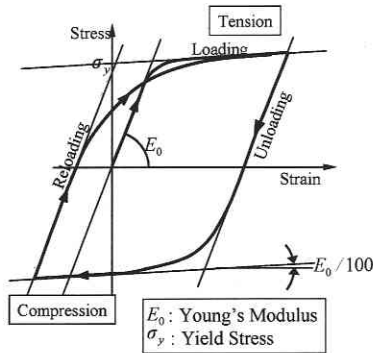
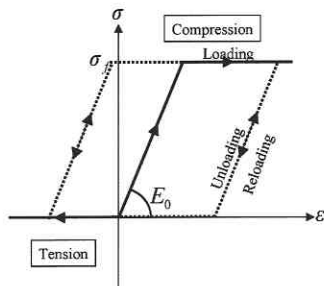
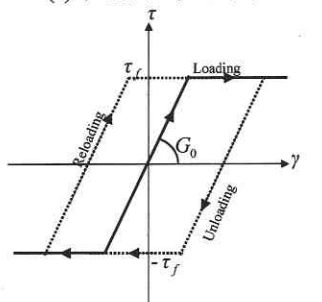


図4 鉄筋モデル



(a) 直応力-直ひずみ



(b) せん断応力-せん断ひずみ

図5 土モデル

るものとした。

(2) 鉄筋

鉄筋モデルには，2本の漸近線を持つ Menegotto-Pinto モデル⁴⁾ (図4)を用いた。

(3) 土(乾燥砂)

土のモデルとしては，図5に示すバイリニア型のモデルを用いた。初期剛性 E_0 ， G_0 は，式(2)⁵⁾と(3)を用いて，間隙比 e ，鉛直有効応力 σ' ，ポアソン比 ν から求めた。

$$G_0 = 630 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'^{0.321} \dots \dots \dots (2)$$

$$E_0 = 2(1 + \nu)G_0 \dots \dots \dots (3)$$

また，降伏強度は Mohr-Coulomb の破壊規準により決定した。

4. 単杭解析

(1) 解析モデル

牧，睦好らによる砂質地盤中における RC 単杭の水平交番載荷実験⁶⁾を参考に単杭の解析を行った。解析モデルを図6に示す。杭下端と土槽は完全固定とし，杭上端部に強制変位を与える静的単調載荷解析を行った。解析に用いた材料諸元は表1に示すとおりである。また，解析ケースを表2にまとめる。ただし，表1の間隙比と式(1)より算出されるせん断剛性を G_{org} としており，地盤剛性の変化は間隙比の差として表した。

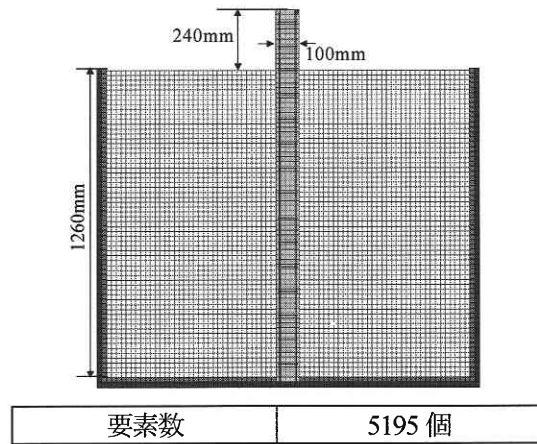


図6 単杭解析モデル

表1 材料諸元

コンクリート	弾性係数 $[N/mm^2]$	2.41×10^6
	強度 $[N/mm^2]$	45.3
鉄筋	弾性係数 $[N/mm^2]$	378.9
	降伏強度 $[N/mm^2]$	1.713×10^5
砂	間隙比	0.8989
	比重	2.643

(2) 解析結果

地盤剛性の異なる No. 1 ~ No. 3 の復元力-変位履歴を図 7 に示す。また、内部摩擦角の異なる No. 1, 4, 5 の復元力-変位履歴を図 8 に、杭頭変位 5 mm 時のひび割れ図を図 9 に示す。

表 2 解析ケース

No.	地盤剛性比 $G_0/Gorg$	内部摩擦角 [°]
1	1	28.5
2	1.2	28.5
3	1.4	28.5
4	1	33
5	1	35

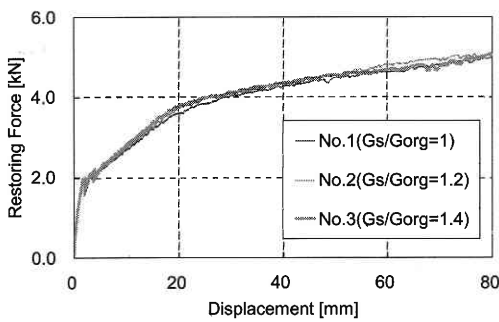


図 7 復元力-変位履歴

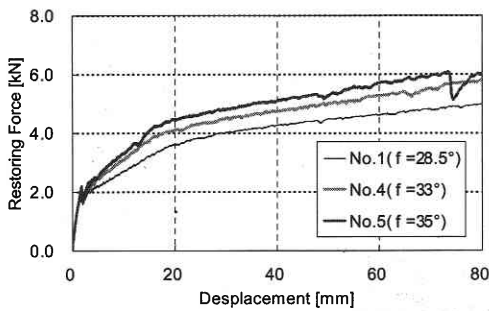


図 8 復元力-変位履歴

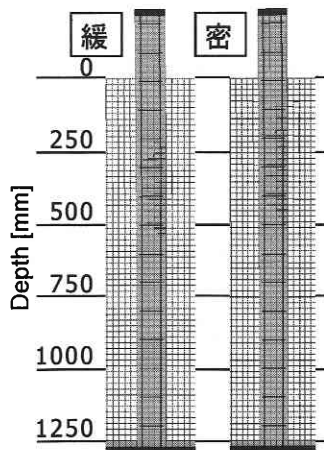


図 9 ひび割れ図 (杭頭変位 5 mm 時)

地盤剛性のみを変化させたケースでは、履歴曲線の変化は見られなかった。しかし、内部摩擦角のみを変化させた解析では、内部摩擦角が大きくなると復元力は大きくなり、ひび割れの発生位置は浅くなった。

地盤剛性よりも内部摩擦角の方が復元力の大きさに与える影響が大きいことがわかる。

5. 群 杭 解 析

(1) 解析モデル

単杭解析と同じ杭を 3 本設置し、全ての杭頭に同じ強制変位を与える解析を行った。この解析モデルを図 10 に示す。

(2) 解析結果

各杭の復元力-変位履歴を図 11 に、3 本の平均復元力と単杭の復元力との比較を図 12 に示す。また、杭頭変位が 5 mm 時のひび割れ図を図 13 に示す。

先頭杭に比べ中間杭、後杭の復元力は小さく、3 本の平均復元力は単杭の場合よりも減少していることがわかる。また、後の杭ほど深い位置からひび割れが発生し始めている。

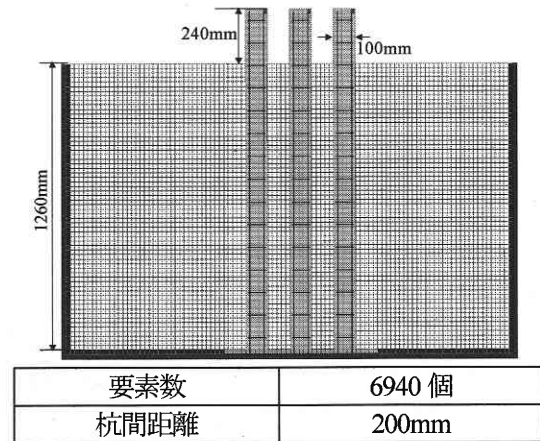


図 10 群杭解析モデル

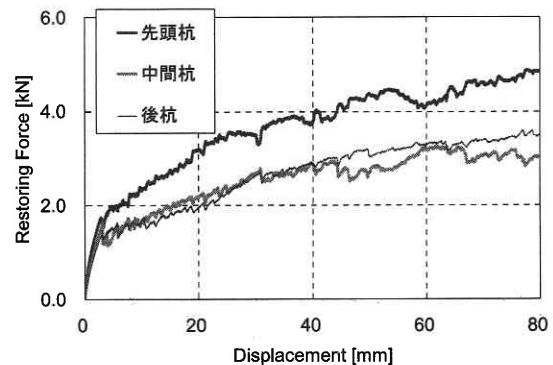


図 11 復元力-変位履歴

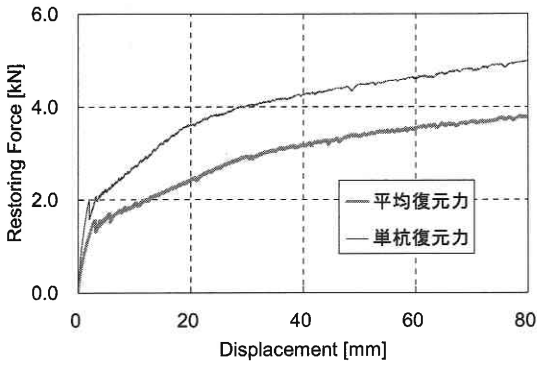


図 12 復元力-変位履歴

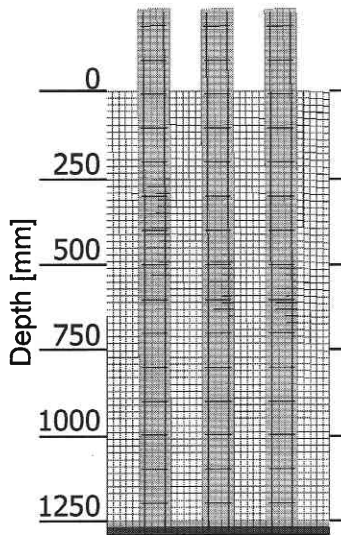


図 13 ひび割れ図 (杭頭変位 5 mm 時)

6. お わ り に

構築した解析モデルにより、地盤剛性よりも内部摩擦角の方が復元力の大きさに与える影響が大きいことが示された。また、複数本の杭が存在する場合には、群杭効果が表

現されている。

本研究で用いた地盤モデルはバイリニア型であり降伏応力に重点を置いたものとなっている。故に、応力-ひずみ関係に関しては充分とは言えず、動的解析や著しく大きい地盤変形の解析には適していない。そのため、今後は地盤要素の分離や再接触を考慮したモデル⁷⁾を用いる必要がある。

さらに、精度向上のためには 3D-AEM⁸⁾ への拡張も重要と考えられる。

(2004 年 4 月 14 日受理)

参 考 文 献

- 1) Tamotsu Matsui, Kazuo Oda: Foundation Damage of Structures, special Issue of Soils and Foundations, pp. 189-200, 1996, 1.
- 2) Meguro.K, Tagel-Din Hatem: Applied Element Method for Structural Analysis: Theory and Application for Linear Materials, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, 4, Vol. 647, pp. 31-45, 2000.
- 3) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 4) Y. Yamada, H. Iemura: Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures Under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads—Development and Verification, Kyoto University School of Civil Engineering Research Report, No. 86-ST-01, 1986, 3.
- 5) 石田 毅, 渡辺 啓行, 伊藤 洋, 北原 義浩, 松本 正毅: 低拘束圧下の模型実験材料 (岐阜砂等) の静的・動的特性, 電力中央研究所報告, No. 380045, 1981, 5.
- 6) 牧 剛史, 睦好 宏史: 鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形性状に関する研究, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 103-118, 2001, 8.
- 7) Hatem Tagel-Din and Kimiro MEGURO: Applied Element Method for Dynamic Large Deformation Analysis of Structures, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 17, No. 2, pp. 215-224, 2000, 10.
- 8) 目黒公郎, ハテム・タグエルディン: 3次元応用要素法による構造物の破壊シミュレーション, 生産研究, 9, 1999, 11.