

# 2次元FEM解析による杭基礎の動的挙動について

岸下崇裕<sup>1</sup>・三浦房紀<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

杭基礎耐震設計研究小委員会のワーキンググループAでは、同一の杭基礎モデルを用いて設計計算ソフト、フレーム解析、2次元FEM解析および3次元FEM解析による耐震解析を行ない、地震時挙動を合理的に反映した地震応答解析法について検討を行なった。本報告では、2次元FEM解析による杭基礎構造物の地震応答解析を行ない、他の解析手法の結果と比較するためのデータを示したものである。

**Key Words** : 2-D nonlinear seismic analysis, Dynamic interaction, Pile foundation

## 1. はじめに

杭基礎構造物を地盤と構造物の一体で動的解析を行なう場合、通常2次元問題として解析されていることが多い。その理由としては、2次元解析が3次元解析に比べ解析に費やす時間が短くてすむ、コンピューターに制限が有るため3次元解析を行なう容量が足りない等である。

上記の理由により、杭基礎構造物の地震応答解析を2次元でモデル化を行う場合、杭が分担する地盤の幅が問題となる。

本資料は、汎用の2次元地盤・構造物連成地震応答解析システムにより、杭基礎構造物の地震応答解析を行い、フレーム解析や3次元FEM解析の結果と比較するための資料を示すとともに、解析地盤幅が杭断面力に与える影響について記述する。

## 2. 解析概要

解析は、3次元地盤・構造物連成地震応答解析システム「DINAS」を用い、杭基礎構造物を2次元モデルとして解析を行った。

### (1)解析条件

地震応答解析は、直接積分法で行い、直接積分にはニューマークのβ法を用いた。

解析で用いた要素は、次のとおりである。地盤部

は、平面ひずみ要素を用い、非線形解析時には修正R-Oモデルを用いモデル化を行った。杭基礎および下部構造部で、2次元梁要素を用い、非線形解析時には、修正武田モデルを用いてモデル化を行った。図1に解析に用いたメッシュ図を示す。

境界条件は、左右は水平方向自由とし、底面は固定境界とした。

### (2)地盤条件

解析で用いた材料定数を表1示す。解析に用いる地盤の動的変形特性は、今津・福武<sup>1),2)</sup>の式を用いた。

$$G/G_0 = \frac{1}{(1+a \cdot \gamma^b)} \quad (1)$$

$$h = c \cdot \gamma^d \quad (2)$$

ここに、G：せん断弾性係数、G<sub>0</sub>：初期せん断弾性係数、γ：せん断ひずみ、h：減衰定数、a, b, c, d：定数(表2による)

表1 解析で用いた定数

| 番号 | 地層  | 層厚 (m) | 平均 N値 | γ (tf/m <sup>3</sup> ) | φ (deg.) | C (tf/m <sup>2</sup> ) | G0 (tf/m <sup>2</sup> ) |
|----|-----|--------|-------|------------------------|----------|------------------------|-------------------------|
| 1  | 埋土  | 4.0    | 4     | 1.8                    | —        | —                      | 2962.10                 |
| 2  | 粘性土 | 10.0   | 2     | 1.7                    | 0        | 2                      | 2753.65                 |
| 3  | 粘性土 | 14.0   | 8     | 1.8                    | 0        | 8                      | 7346.94                 |
| 4  | 砂質土 | 4.0    | 16    | 1.9                    | 31       | 0                      | 7878.69                 |
| 5  | 砂質土 | 2.0    | 50    | 2.0                    | 42       | 0                      | 17726.81                |

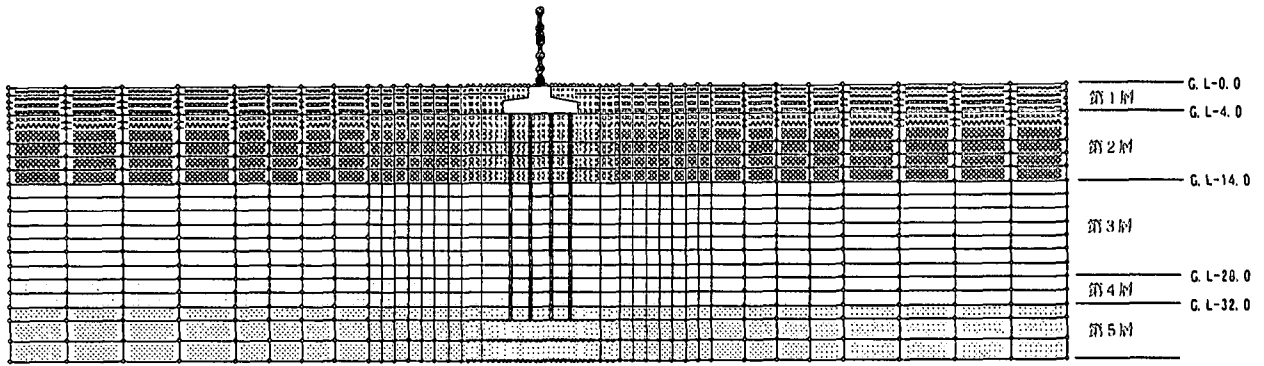


図1 解析に用いたメッシュ図

表2 土質別定数一覧

|     | a     | b    | c     | d    |
|-----|-------|------|-------|------|
| 砂質土 | 12.11 | 0.89 | 38.81 | 0.47 |
| 粘性土 | 4.71  | 0.79 | 13.51 | 0.27 |
| 砂礫  | 12.42 | 0.75 | 18.96 | 0.30 |

表3 修正R-Oモデルに用いた入力定数

|     | 基準ひずみ<br>$\gamma_{0.5}$ | 最大減衰定数<br>$h_{max}$ |
|-----|-------------------------|---------------------|
| 砂質土 | 5.380E-04               | 0.281               |
| 粘性土 | 1.294E-03               | 0.165               |
| 砂礫  | 3.170E-04               | 0.200               |

地盤要素の非線形性は、上記の動的変形特性を基本に、修正R-Oモデルを用いるものとした。図2に、土質別の解析に用いた動的変形特性を示す。図中の▲および■マークは、今津・福武の式により得られた結果を、実線および破線は、修正R-Oモデルによる動的変形特性を示している。修正R-Oモデルの骨格曲線は式(3)で現される。

$$\text{骨格曲線 } \gamma = \frac{\tau}{G} (1 + \alpha \cdot |\tau|^\beta) \quad (3)$$

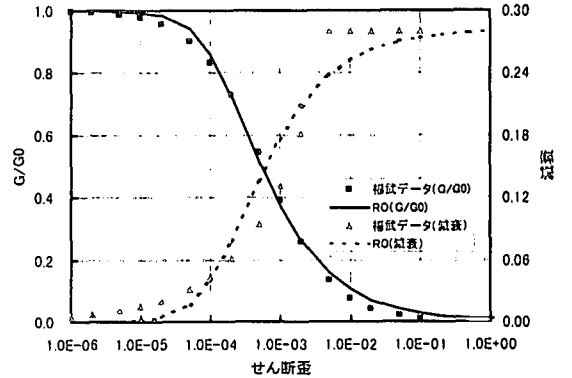
ここに、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：修正R-Oモデルのパラメータで以下に示される。

$$\alpha = \left( \frac{2}{\gamma_{0.5} \cdot G_0} \right)^\beta \quad (4)$$

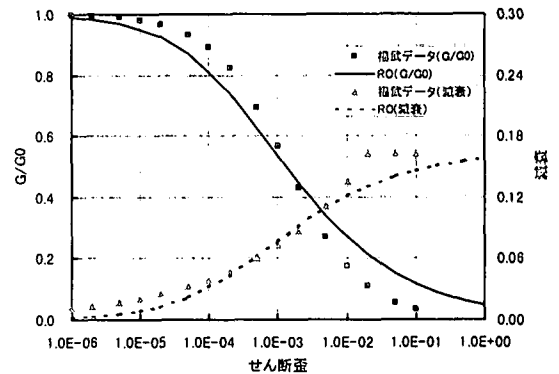
$$\beta = \frac{2\pi \cdot h_{max}}{2 - \pi \cdot h_{max}} \quad (5)$$

$\gamma_{0.5}$ ： $G/G_0 = 0.5$ の時のひずみ  
 $h_{max}$ ：最大減衰定数

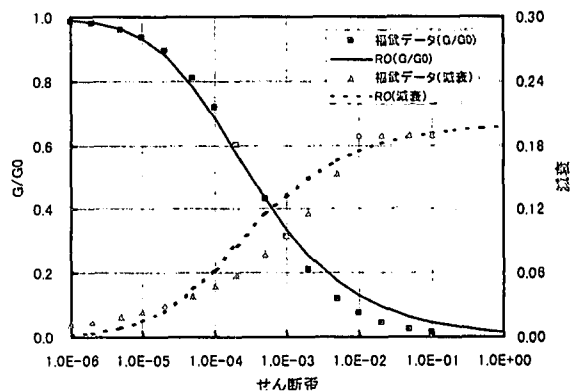
上記に示すように、修正R-Oモデルに必要なパラメータは、基準ひずみ ( $\gamma_{0.5}$ ) と最大減衰定数



(a) 砂質土



(b) 粘性土



(c) 砂礫

図2 解析に用いた動的変形特性

( $h_{max}$ ) である。表3に解析に用いた基準ひずみおよび最大減衰定数を示す。

表4 杭の諸元

|     | 直径<br>φ (m) | 断面積<br>A(m <sup>2</sup> ) | 長さ<br>L(m) | 弾性係数<br>E(N/mm <sup>2</sup> ) | 断面二次<br>モーメント<br>I(m <sup>4</sup> ) |
|-----|-------------|---------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 断面1 | 1.2         | 1.131                     | 2.4        | 2.50E+04                      | 0.116989                            |
| 断面2 |             |                           | 7.6        |                               | 0.116989                            |
| 断面3 |             |                           | 20         |                               | 0.109462                            |

表5 杭および下部構造物の非線形特性

|       |     | ひび割れ       |           | 初降伏         |            | 終局         |           |
|-------|-----|------------|-----------|-------------|------------|------------|-----------|
|       |     | Mc<br>kN・m | φc<br>1/m | My0<br>kN・m | φy0<br>1/m | Mu<br>kN・m | φu<br>1/m |
| 杭     | 断面1 | 662.2      | 2.304E-04 | 2157.2      | 2.449E-03  | 3129.4     | 2.110E-02 |
|       | 断面2 | 662.2      | 2.304E-04 | 2182.7      | 2.449E-03  | 3049.9     | 1.261E-02 |
|       | 断面3 | 635.7      | 2.368E-04 | 1526.4      | 2.295E-03  | 2065.0     | 1.493E-02 |
| 下部構造物 |     | 23306.6    | 7.380E-05 | 78073.9     | 7.845E-04  | 101651.2   | 1.392E-02 |

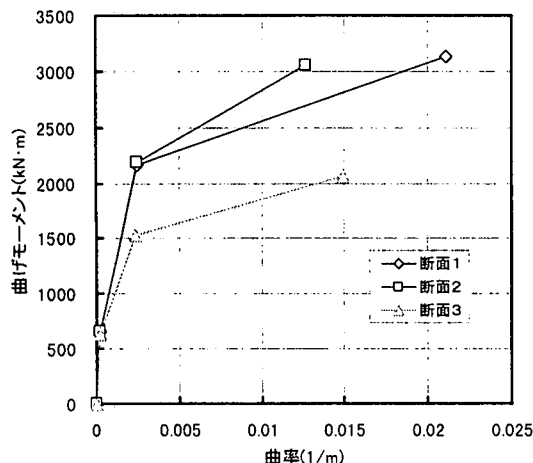


図3 杭のM~φ関係

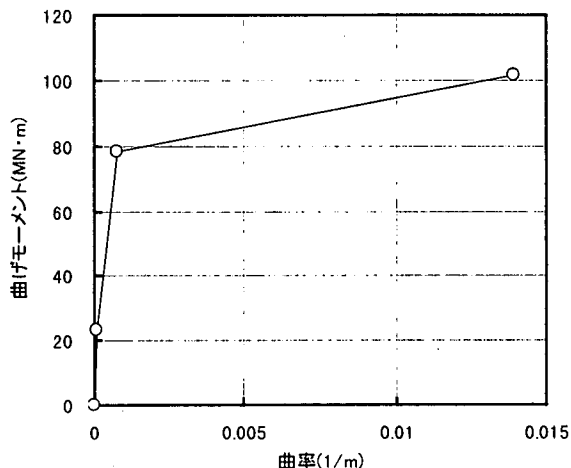


図4 下部構造物のM~φ関係

### (3) 杭および下部構造物条件

杭体の諸元を表4に示す。本解析で用いた杭は、杭径が1200mmの場所打ち杭で、杭の3区間で配筋が変わっている。

表5に杭および下部構造物の非線形特性を示す。図3に杭のM~φ関係を、図4に下部構造物のM~φ関係を示す。杭のM~φ関係は、自重(1920kN)作用時の値を用いた。

杭および下部構造物の復元力特性は、上記のM~φ関係を基に修正武田モデルを用いることとした。

### (4) 解析ケース

解析では、フーチングの奥行き幅(L=8.4m)を基準にして、0.5L(4.2m)、2L(16.8m)、3L(25.2m)の4ケースを行い、奥行き幅が杭断面に与える影響について検討を行った。

図5に入力加速度波形を示す。解析では、この入力波をE+F波として、基盤底部より入力した。

## 3. 解析結果

解析結果は、地盤のせん断ひずみ、杭と下部構造物の絶対加速度、杭下端を基準とした杭と下部構造物の相対変位および杭の曲げモーメントについて各々絶対最大量を示した。図中の○印は解析幅8.4mの結果を、□印は解析幅4.2mの結果を、△印は解析幅16.8mの結果を、◇印は解析幅25.2mの結果を表している。また、曲げモーメントの結果には、ひび割れ時(Mc)、初期降伏時(My0)および終局時(Mu)の値についても示している。

表6 解析ケース

|       | 杭および下部構造物 | 地盤  | 幅(m) |
|-------|-----------|-----|------|
| case1 | 線形        | 線形  | 8.4  |
| case2 |           |     | 4.2  |
| case3 |           |     | 16.8 |
| case4 |           |     | 25.2 |
| case5 | 非線形       | 非線形 | 8.4  |
| case6 |           |     | 4.2  |
| case7 |           |     | 16.8 |
| case8 |           |     | 25.2 |

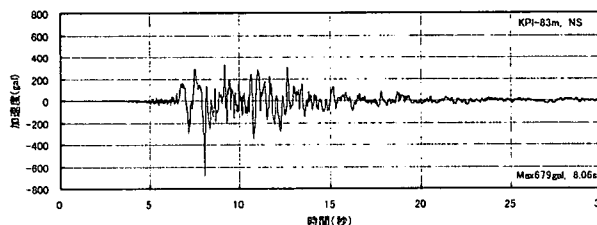


図5 入力加速度波形

### (1) 線形解析結果

図6に線形解析結果を示す。地盤のせん断ひずみは、第2層と第3層の層境において差が生じている。その傾向としては、case2の結果が小さく、続いてcase1, case3, case4の順に大きくなり、case3とcase4の結果はほぼ同じ値を示した。杭および下部構造物の絶対加速度は、同様の傾向を示した。

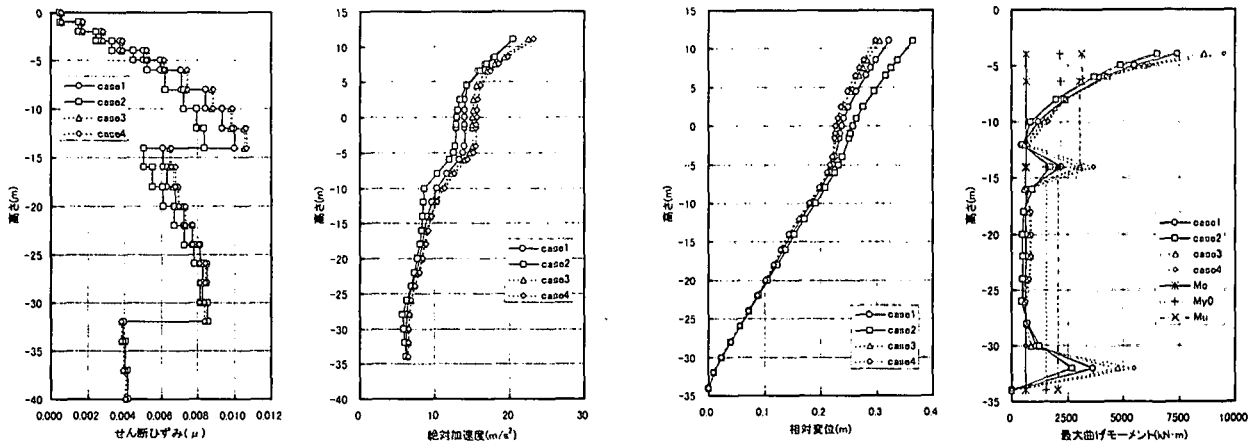


図6 線形解析結果

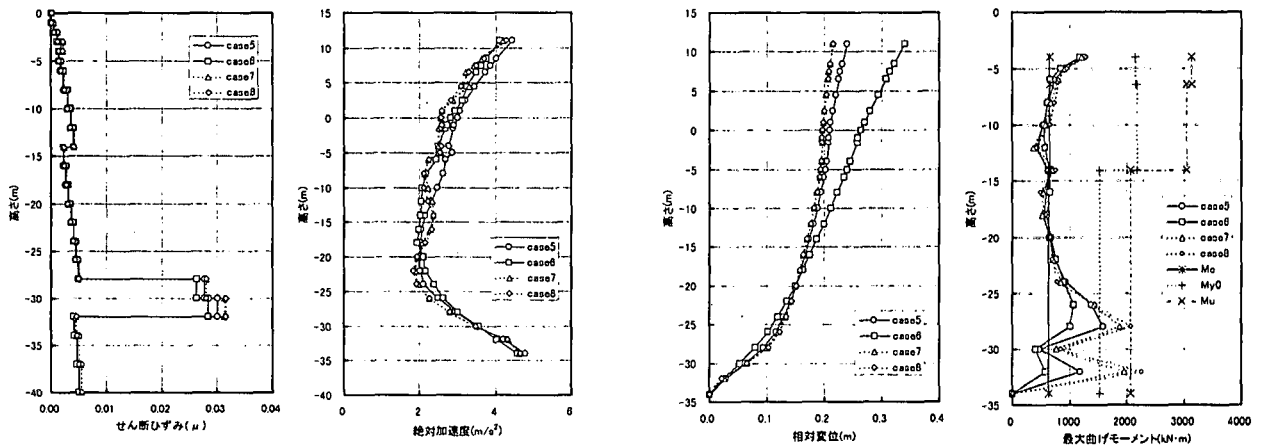


図7 非線形解析結果

杭および下部構造物の相対変位は、G.L-4m以深の杭部においてほぼ同じ値を示したが、下部構造物部では、解析幅の小さな結果(case2)ほど大きな応答を示した。これは、解析幅が小さいケースほど、杭に生じる軸力に対する地盤の変形量が大きくなるため、フーチングに回転が生じ、下部構造物の相対変形量が大きくなる結果になったものと考えられる。

曲げモーメントは、杭頭部およびせん断ひずみ差の生じている(初期せん断剛性の差が大きい)第2層と第3層の層境、第4層と第5層の層境に発生している。その分布は、同じ傾向を示したが、値は解析幅が大きい結果ほど大きな値を示した。また、他(ひずみ、加速度や相対変位)の解析結果と違い、case3とcase4の結果では、解析幅の大きいcase4のほうが大きな値を示し、収束する傾向は見られなかった。

(2)非線形解析結果

図7に非線形解析結果を示す。解析幅の違いによる解析結果比較の傾向は、線形解析結果比較と同じ傾向を示した。

非線形解析結果では、第4層の砂質土層において大きなひずみが生じる結果となった。そのために、杭の曲げモーメント量は、杭頭部より地中部において大きな値を示した。表7に解析幅の違いによる杭の損傷状況を示す。表で示されるように、解析幅が大きいものほど損傷状況がひどくなっており、2次

元地震応答解析による杭の耐震設計では、解析幅が重要なポイントになるものと考えられる。

表7 杭の損傷状況

|     | case5 | case6 | case7 | case8 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 断面1 | ひび割れ  | ひび割れ  | ひび割れ  | ひび割れ  |
| 断面2 | ひび割れ  | ひび割れ  | ひび割れ  | ひび割れ  |
| 断面3 | 降伏    | ひび割れ  | 降伏    | 終局    |

4. おわりに

解析幅を変えて、杭基礎構造物の2次元地震応答解析を実施した。その結果以下の示す知見が得られた。

- ① 地盤のひずみや杭や下部構造物の応答(加速度、変位)は、解析幅をフーチング幅の2倍以上取ることにより収束する傾向にあった。
- ② 杭に生じる曲げモーメントは、解析幅を大きくすると大きくなり、設計上重要なポイントになることが分かった。

参考文献

- 1) 今津, 福武: 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第21回土質工学研究発表会, pp.533-536, 1986
- 2) 今津, 福武: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp.509-512, 1986