

M1、M2 モデルによる群杭基礎の耐震検討

岐阜大学 学生会員 〇宮口博孝・叶 冠林
岐阜大学 正会員 張 鋒・八嶋 厚・沢田和秀

1. はじめに

従来、耐震設計法には、震度法や応答変位法といった静的解析手法が多用されてきた。しかし、これらの手法では上部構造物の慣性力および地盤変形による外力を適切に評価することができない。また、地震の挙動が複雑な場合、静的解析ではその挙動を十分に表すことができない可能性がある。そこで、有効な解析手法として、上部工・杭基礎・地盤を一体として取り扱うことのできる一体系動的解析が考えられる。この解析手法は、現段階では確立されつつあるものの、実務レベルで手ごろに使える段階には至っていない。本研究では、大規模地震に対する耐震設計に有効な解析手法として、弾塑性構成式に基づいた上部工・杭基礎・地盤の一体系静的・動的解析コード DGPILE-3D¹⁾を用い、実務段階で適用できる解析モデルの確立を目指す。具体的な検討方法は、まず、地盤のみの地震応答解析を行い、次に、実構造モデルに対し、上部工・杭基礎・地盤の一体系の3次元動的解析（以下 M2 モデルという）を行う。その後、実務段階で用いられるような簡易型のモデル（以下 M1 モデルという）を提案し、動的解析を行い、両モデルを比較し、M1 モデルの適用性について検討する。

2. M1、M2 モデルを用いた地震応答解析

本研究で提案する M1 モデルと M2 モデルを用いて、(1)弾性地盤のみ、(2)弾塑性地盤のみ、(3)上部工・杭基礎・地盤の一体系の弾性解析について比較解析を実施し、M1 モデルの解析精度を検討した。入力地震動を図-1 に示す。

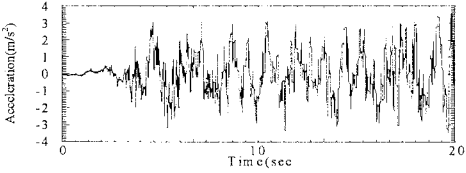


図-1 入力加速度

M1 モデルの概要を図-2(a)に示す。ここでは、フーチング部を剛体として取り扱い、橋脚～桁構造は等価な梁要素と質点に置換し表現した。地盤および地盤・構造物相互作用等を6種類の等価バネを用いて表現し、杭、柱およびフーチングはビーム要素を用いてモデル化する。地盤バネ算出式を以下に示す。地盤の非線形性には、トリリニアモデルと R-O モデルを用いる。

自由地盤せん断バネ K_g

$$K_g = \frac{A \cdot E_0}{2(1 + \nu)} \cdot \frac{1}{t}$$

杭周囲の設計せん断バネ K_{v1}

$$K_{v1} = \frac{\pi D}{2} \cdot (t_{i-1} \cdot k_{v1}^{i-1} + t_i \cdot k_{v1}^i)$$

杭先端の設計鉛直バネ K_{v2}

$$K_{v2} = k_{v2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} + \frac{1}{2} \cdot t_n \cdot \pi D \cdot k_{v1}^n$$

杭・地盤相互作用バネ

$$K_{h0} = \frac{D}{2} \cdot (t_{i-1} \cdot k_h^{i-1} + t_i \cdot k_h^i)$$

杭間相互作用バネ K_{hi}

$$K_{hi} = \lambda \cdot K_{h0}$$

フーチング前面の水平バネ K_f

$$K_f = k_{hf} \cdot A_h$$

M2 モデルの概要を図-2(b)に示す。杭、柱はビーム要素を用いてモデル化する。地盤の弾塑性構成モデルには、

t_{ij} models^{2),3)}を用いる。
解析の対象とする構造物は、直杭3本の群杭基礎を3組並列配置した場所打ち杭基礎である。場所打ち杭の諸元を表-1に示す。M1 モデルについては、一列3本杭をまとめて、1本の杭でモデル化した。M2 モデルについては、幾何学対称、および地震荷重の対称により、半断面で計算を実施する。今回の解析では、地盤の液状化は考慮せず、全応力解析として扱った。解析領域の左右側方境界面には等変位境界を採用する。解析に用いる地盤定数を表-2に示す。

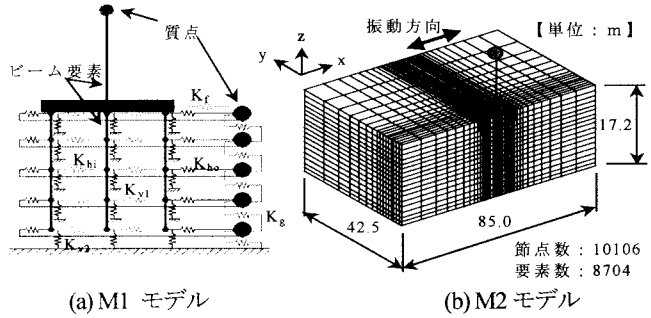


図-2 解析モデル

表-1 杭の諸元

杭種	杭径	杭長	降伏強度	ヤング係数(鉄筋)	ヤング係数(コンクリート)	断面2次モーメント	配筋
D	D (m)	L (m)	σ_y (MPa)	E_s (kPa)	E_c (kPa)	I (m ⁴)	D29-24(長さ:3.6m) D29-24(長さ:10.7m)
直杭	1.2	15.0	295	2,000E+08	2,500E+07	1.018E-01	D22-12(長さ:0.7m)

表-2 地盤定数

層別	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	初期間隙比	破壊時主応力比	圧縮指数	膨潤指数
	H	ρ	ν	e_0	R_f	C_t	C_e
A _{S1}	2.2	1.7	0.30	0.93	4.5	0.0234	0.0140
A _{C1}	2.6	1.7	0.40	0.88	3.5	0.0191	0.0124
A _{S2}	4.0	1.7	0.30	0.93	4.6	0.0124	0.0092
A _{C2}	3.5	1.7	0.40	0.88	3.5	0.0168	0.0097
A _{S3}	3.5	1.9	0.30	0.87	4.7	0.0084	0.0060
D _S	1.4	1.9	0.30	0.65	---	---	---

2.1 地盤のみ比較解析(弾性解析)

地表面の加速度時刻歴と変位時刻歴においてM1モデル、M2モデルを比較したところ、両モデルともに等しくなった⁴⁾。この結果より、提案する M1 モデルの地盤および地盤・構造物相互作用等の6種類の等価バネが適切であることがわかった。

2.2 地盤のみ比較解析(弾塑性解析)

より詳細な検討を行うために、A,Bの2種類地盤を用いて解析を実施した。A地盤は均一粘土地盤であり、その地盤特性は表-2中のA_{C1}粘土の特性と同様である。B地盤は表-2に示す6層の異なる土からなる地盤である。

A地盤では、M1モデルにはトリリニアモデルとR-Oモデルの2通りの地盤の非線形特性が解析に用いられた。

図-3 に地表面の応答加速度と応答変位の時刻歴を示す。M2 モデルによる解析と R-O モデルを用いた M1 モデルによる解析はほぼ同様な応答解析結果が得られ、モデル化の適切性が確認できた。一方、トリリニアモデルを用いた M1 モデルによる解析結果は M2 モデルの解析結果とかなりの差異が見られ、トリリニアモデルが M1 モデルの地盤の非線形特性として適切でないことがわかった。

B 地盤を対象とした解析結果を図-4 に示す。互層地盤の場合、R-O モデルを用いた M1 モデルにより得られた応答加速度はおおむね M2 モデルの解析結果と相似しているが、振動の後半でかなり小さくなった。これは、R-O モデルが地盤のラチェット現象を表現できないことにより生じたものと思われる。

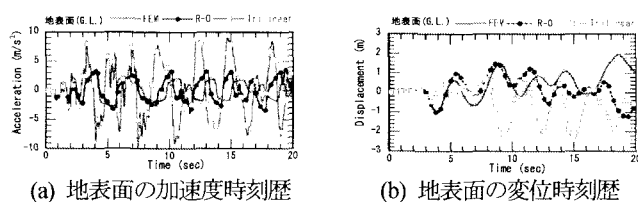


図-3 A 地盤における弾性地盤のみの比較解析

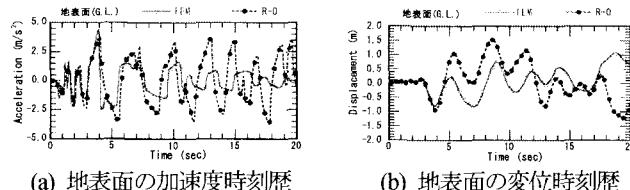


図-4 B 地盤における弾性地盤のみの比較解析

2.3 上部工・杭基礎・地盤の一体系の弾性解析

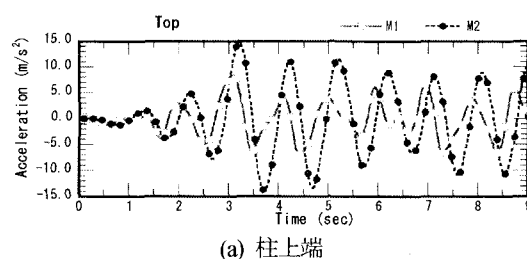
図-5 に柱上端とフーチングにおける応答加速度の比較を示す。両モデルの解析結果はほぼ一致しているが、柱上端の加速度は M2 モデルに比べ M1 モデルの方が小さい傾向が見られた。

図-6 に柱下端と真中杭の杭頭曲げモーメント時刻歴の比較を示す。両モデルの解析結果がほぼ一致していることがわかった。

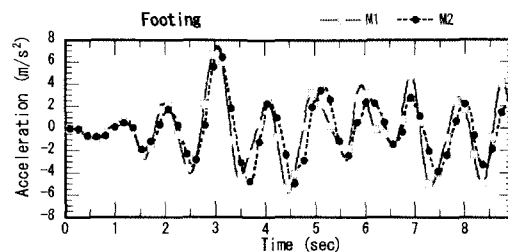
図-7 に杭頭曲げモーメントが最大の時の真中杭の断面力の分布の比較を示す。両モデルの解析結果がほとんど一致していて、M1 モデルの解析精度が弾性解析の領域において十分あることがわかった。

3. まとめ

本研究で提案した一体系 3 次元動的解析の簡便モデル (M1 モデル) は、M2 モデルと比較して、弾性解析においては等価であることが確認できた。また、地盤のみの場合、弾塑性解析においても M1 モデルの解析精度が確認できた。今後さらに、一体系弾塑性動的解析における M1 モデルの妥当性を検討する予定である。

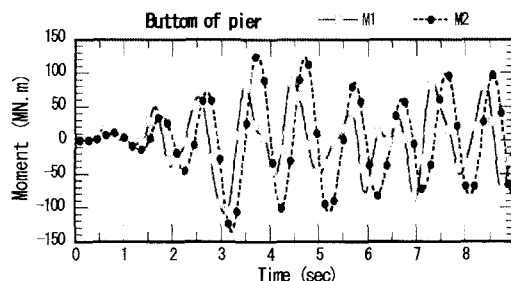


(a) 柱上端

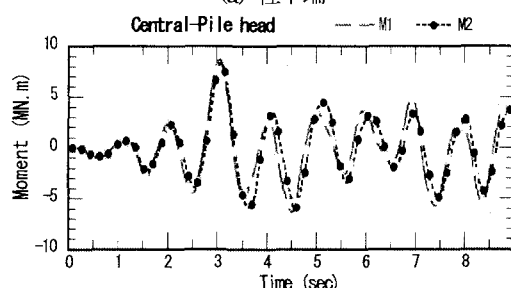


(b) フーチング

図-5 時刻歴応答加速度の比較

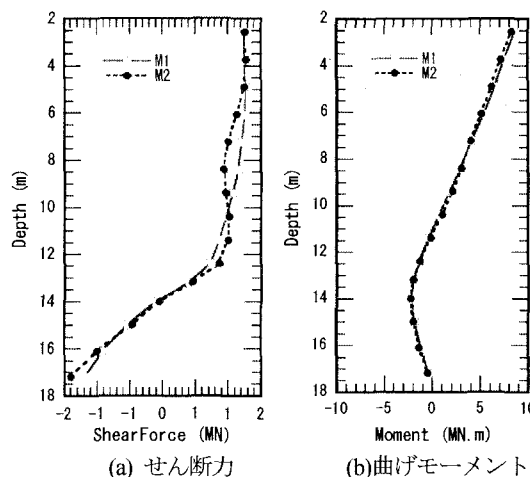


(a) 柱下端



(b) 真中杭の杭頭

図-6 時刻歴曲げモーメントの比較



(a) せん断力

(b) 曲げモーメント

図-7 杭頭曲げモーメントが最大の時の真中杭の断面力の比較

参考文献

- Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic Evaluations of Pile Foundations with Three Different Methods Based on Three-Dimensional Elasto-Plastic Finite Element Analysis, Soils and Foundations, Vol.40 No.1, pp.113-132, 2000
- Chowdhury, E. Q., Nakai, T., Tawada, M. and Yamada, S.: A model for clay using modified stress under various loading conditions with the application of subloading concept, Soils and Foundations, Vol. 39, No.6, pp.103-116, 1999.
- Nakai, T.: An Isotropic Hardening Elastoplastic Model for Sand Considering the Stress Path Dependency in Three-Dimensional Stress, Soils and Foundations, Vol.29 No.1, pp.119-137, 1989
- 野田義貴ら: M1、M2モデルによる群杭基礎の耐震性能評価, 第38回地盤工学研究発表会, pp. 1467-1468, 2003