

# (118) 地盤との動的相互作用における杭基礎構造物の耐震設計法の合理化

岡山大学 正会員 竹宮 宏和

○岡山大学大学院 学生員 片山 吉史

## 1、はじめに

本研究は、上部構造物を伴う杭基礎の動特性を、振動数領域で数値解析することによって評価したものである。上部構造物の固有周期をパラメーターとし、地盤震動と上部構造物の慣性力がどのような割合で杭応答（たわみ、断面力）に影響を及ぼすかを主眼に、その大きさと位相について解析結果を示し、考察を述べる。実務的な杭設計の観点から、杭頭の最大許容変位、杭頭、杭先端での最大許容断面力、特に曲げモーメントの杭軸方向への分布では、いわゆるの1/β範囲を考慮するなどのアプローチが挙げられる。ここでは、例題解析を通して上記について言及する。

## 2、定式化<sub>1)</sub>

地盤-杭-上部構造物の全体系の振動解析を動的サブストラクチャ法により、地盤-杭系（下部構造系）、下部構造-上部構造系に分けて定式化する。

層状地盤-杭系における地盤解析には薄層要素法を適用し、杭解析には杭を分布質量系のはりで表現し、伝達マトリックス法を適用する。両系の連成は、地盤反力を未知数とするフレキシビリティ法により定式化を行う。その結果、同杭基礎に対し水平基盤入力 $u_g$ がある場合、フーチング重心への全作用力は

$$\mathbf{P}_{\text{sub}} = \mathbf{K}_F^* \mathbf{u}_F + \mathbf{P}_F^* u_g \quad (1)$$

ここで $\mathbf{K}_F^*$ は杭頭インピーダンスを、 $\mathbf{P}_F^*$ は杭頭有効入力をそれぞれフーチング重心で評価したものである。

下部構造-上部構造系では、上部構造物の運動は、基礎の運動に伴う変位と、基礎固定時の弾性変位からなるものとする。

$$\mathbf{X}_{\text{sup}} = \gamma \mathbf{u}_F + \mathbf{u}_{\text{sup}} \quad (2)$$

ここで $\gamma$ は基礎の運動による上部構造物への変位影響マトリックスを定義している。上部構造物が多自由度でモデル化される場合、その基礎固定時の応答を固有モード分解から求め、これを利用すると、

$$\mathbf{u}_{\text{sup}} = \Phi \mathbf{D} \Phi^T \mathbf{M}_{\text{sup}} \gamma \mathbf{u}_F \quad (3)$$

ただし、 $\Phi$ は固有モードマトリックスで、 $\mathbf{D}$ は各固有モード応答の増幅度から成る対角マトリックスである。その結果、フーチング変位は

$$\left[ \omega^2 \left\{ \mathbf{M}_F + \gamma^T \left( \mathbf{M}_{\text{sup}} + \mathbf{M}_{\text{sup}} \Phi \mathbf{D} \Phi^T \mathbf{M}_{\text{sup}} \right) \gamma \right\} - \mathbf{K}_F^* \right] \mathbf{u}_F = \mathbf{P}_F^* u_g \quad (4)$$

さらにフーチング変位を式(2)、(3)へ代入することにより上部構造物の全体応答を求めることができる。

## 3、解析結果とその考察

解析モデルは、Fig.1に示す卓越周期 $T_{\text{soil}}$ の様な表層地盤中の先端支持杭に、Table 3のフーチングを含む上部構造物を備えたものを対象とした。上部1質点系モデルでは、モデル1、2、3と上部構造物の固有周期 $T_{\text{struc}}$ を変化させる。上部2質点系モデルでは、1質点系の各モデルに同じ物性の上部構造を追加した。つまり、モデル4はモデル1に、モデル5はモデル2に、モデル6はモデル3にそれぞれ対応している。応答結果のFig.2、4はそれぞれのモデルにおいて水平基盤入力の下でのフーチングと上部構造の変位に関する振動数伝達関数を、Fig.3、5は杭体のたわみ分布、曲げモーメント分布を、代表的な振動数において調べた。そのとき地盤の震動のみを考慮した地盤震動系と、地盤の震動と上部構造からの慣性力の両方を考慮した全体系の結果を与えているが、さらに簡易解析手法としての修正Chang公式<sub>2)</sub>による計算結果も描いている。それらの応答の差が慣性力の効果によるものであるといえる。なお、上部構造と下部構造の連性におけるフーチングの自由度は回転を含まず並進のみとした。

### 上部1自由度系の解析結果

(i)  $T_{\text{struc}} < T_{\text{soil}}$ の場合（例えば橋軸直角方向の橋脚モデル）：地盤周期に比べて上部構造物の周期が短いので、構造物の振動は相互作用よりもむしろ地盤震動が卓越する状態にある。従って慣性力による相互作用の杭応答へ現われる比率は小さい。周期 $T_{\text{soil}}$ において杭先端にかなりの曲げモーメントが発生する。周期 $T_{\text{struc}}$ では上部構造物の効果は無視できる程度に小さい。

(ii)  $T_{\text{struc}} = T_{\text{soil}}$ の場合：地盤と構造物の共振現象が起こる状態で、周期 $T_{\text{soil}} (= T_{\text{struc}})$ で上部構造物は大きな変位応答となり、そのため大きな慣性力が基礎に作用する。この効果は地盤震動効果とは逆位相であるため、基礎先端の変位は抑制される。それによって杭体は杭頭近くで変曲点をもつ応答様相となり、いわゆる1/βより上の杭頭には非常に大きな曲げモーメントが発生する。その他の振動数では上部構造物の効果はほとんど無い。

(iii)  $T_{struc} > T_{soil}$  の場合 (例えば橋軸方向の橋脚モデル) : 上部構造物が長周期系となっているため、低振動数領域で杭体には地盤震動とは逆位相の慣性力の作用となる。周期  $T_{soil}$  では(ii)の共振時と同様な特性を示すが、上部構造の慣性力の効果は大きくなく、従って杭頭曲げモーメント自身もそれほど大きくなく、むしろ杭先端に地盤震動によって大きな曲げモーメントが発生する。周期  $T_{struc}$  では杭体変位は地盤震動と逆位相で生じ、そのため杭頭付近はあまり動かず同断面の曲げモーメントはほとんど上部構造物の慣性力によっている。杭先端部には曲げモーメントはほとんど発生しない。

上記の結果は上部構造物とフーチングの質量比  $m_s/m_F$  を変えたときの考察であるが、質量そのものが大きくなると(i)、(ii)、(iii)の性状が強調される。一般に、杭基礎構造物の応答は地盤震動により大きく支配されることを考えると、Fig.3の周期  $T_{soil}$  の応答性状から、地盤震動による杭先端の断面力と共に杭頭の変位、そして上部構造物の周期の長い場合の杭頭付近の慣性力による断面力が設計に重要な応答指標となる。

上部2自由度系の解析結果

(i)  $T_{struc2} < T_{struc1} \leq T_{soil}$  の場合 : 上部構造物の剛性が大きく、周期  $T_{struc1}$  が地盤の周期とほぼ同じであるため、周期  $T_{struc1}$ 、 $T_{soil}$  では全体系の応答には地盤震動が大きく反映されている。しかし、1自由度系の場合よりも質量が2倍になっているため慣性力の効果が杭の上部に顕著に現われて変位応答は順位相効果で増大し、曲げモーメントは杭頭部、杭先端部で非常に大きい。

(ii)  $T_{struc2} < T_{soil} < T_{struc1}$  の場合 : 上部構造物の慣性力の効果は1次モードのものが大きく現われてくるため、周期  $T_{struc1}$ 、 $T_{soil}$  では1自由度系の(iii)の応答状態となる。周期  $T_{struc2}$  のところでは2次モードの卓越によって杭体は1自由度系の(i)の応答状態となる。

(iii)  $T_{soil} \leq T_{struc2} < T_{struc1}$  の場合 : 上部構造物の1次、2次モードが卓越しているが、杭への慣性力の効果は1次モードが大きく、従って杭体の応答は1自由度系の(iii)の状態に近い。

4、むすび

地盤の卓越周期  $T_{soil}$  と構造物の固有周期  $T_{struc}$  の関係で、地盤一構造物系としての動的応答解析から杭体の変形、曲げモーメントの様相を明らかにした。慣性力による杭体の曲げモーメントは  $1/\beta$  の範囲で大きく、地盤震動は杭先端で大きい。杭基礎構造物の耐震設計では、杭体の変形、断面力を  $T_{struc} < T_{soil}$  の状態では地盤震動と慣性力効果を順位相で、 $T_{struc} > T_{soil}$  では逆位相で組み合わせればよい。

参考文献

- 1) 竹宮他、フレキシビリティ法による多層地盤内の動的群杭解析、土木学会論文集投稿中(1993)
- 2) H.Takemiya and Y.katayama, Seismic Design Procedure of Pile Foundation, EASE4, Korea (1993)

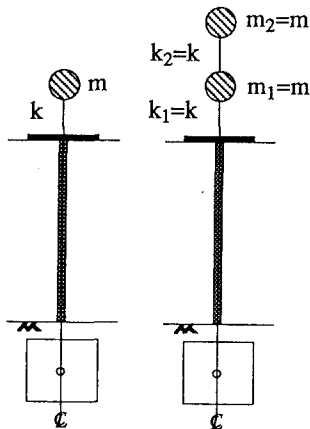


Fig.1 Pile foundation for analysis

Table 1 Soil Properties

Layer	Shear Velocity	Unit Weight	Poisson Ratio	Dampin g
Thickness 20 m	160m/s	1.5 tf/m <sup>3</sup>	0.49	0.01

Table 2 Pile Properties

Piles	Solid Prestress Concrete
Diameter	3 m
Spacing	7.5m
Youngs modulus	2.50 x 10 <sup>6</sup> tf/m <sup>2</sup>
Unit Weight	2.5 tf/m <sup>3</sup>
Poisson Ratio	0.17

Table 3 Superstructure Properties (Model 1.2.3)

	Footing Weight	Super-Mass	Period	Dampin g
Model1	250 tf/m <sup>3</sup>	625 tf/m <sup>3</sup>	0.25 s	0.02
Model2	250 tf/m <sup>3</sup>	2500 tf/m <sup>3</sup>	0.50 s	0.02
Model3	250 tf/m <sup>3</sup>	10000 tf/m <sup>3</sup>	1.00 s	0.02

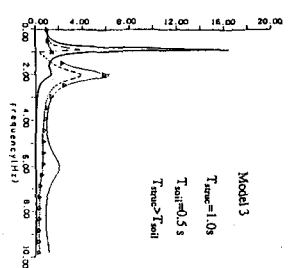
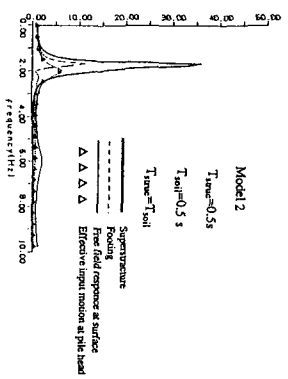
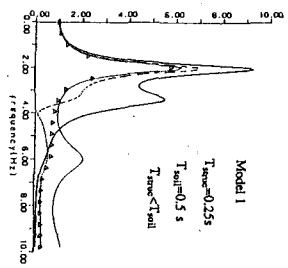


Fig.2 Frequency response function for 1 DOF Model

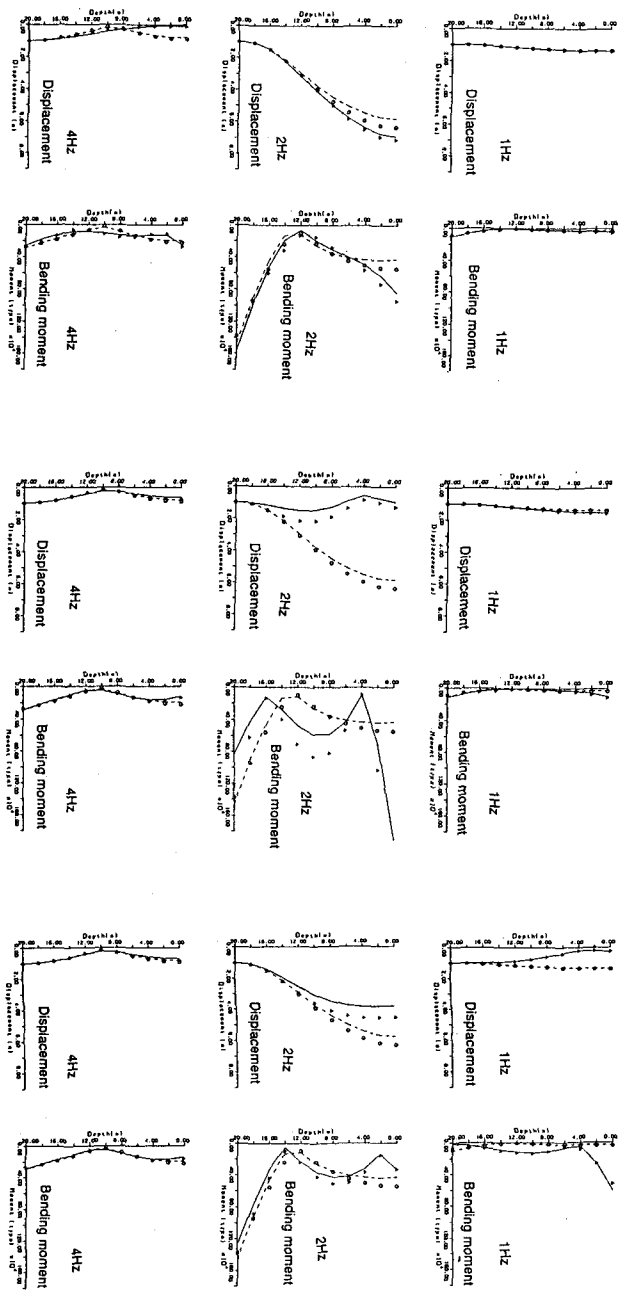


Fig.3 Pile responses, Deformation and bending moment profiles for 1 DOF Model

○ ○ ○ ○ Pile head released  
 △ △ △ △ Modified Chang's formula  
 — — — — Rigorous  
 — — — — Modified Chang's formula Total SSI

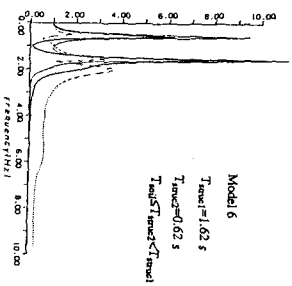
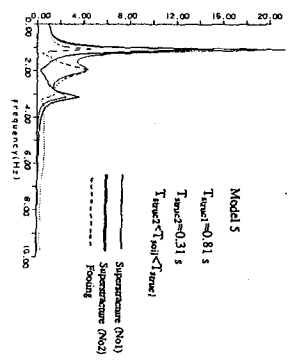
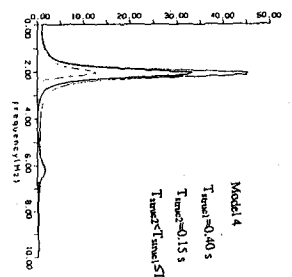


Fig. 4 Frequency response function for 2 DOF Model

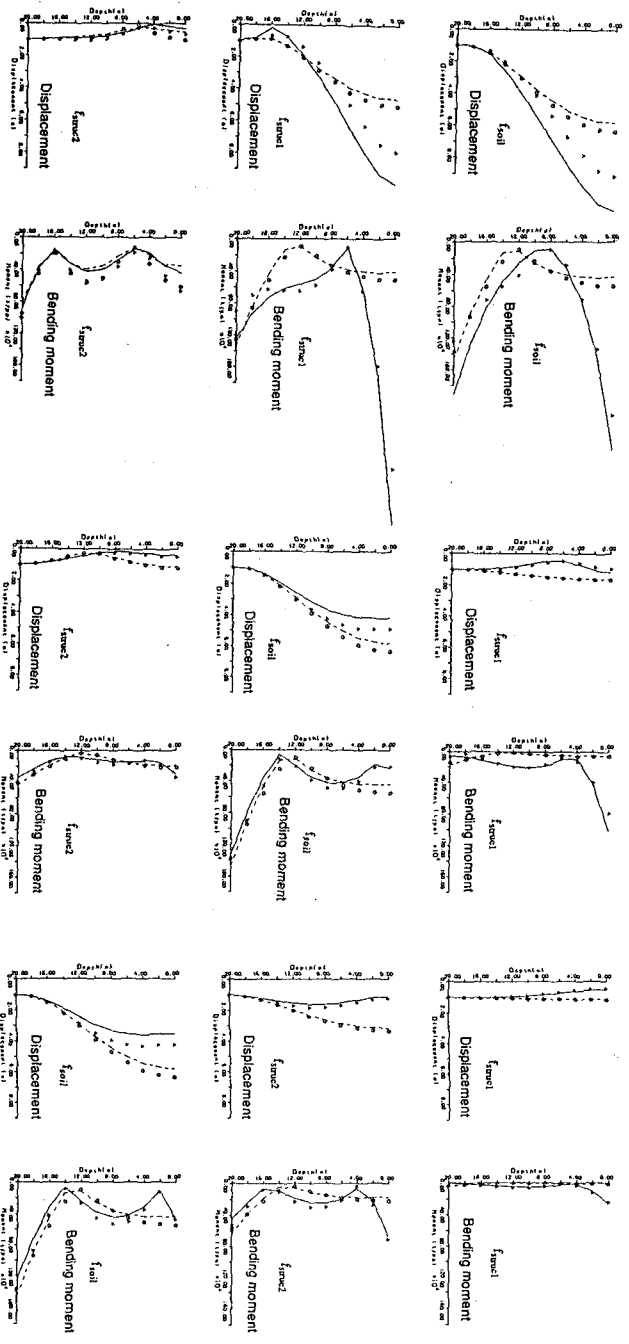


Fig. 5 Pile responses, Deformation and bending moment profiles for 2 DOF Model

○ ○ ○ ○ ○ Pile head released  
 ○ ○ ○ ○ ○ Modified Chang's formula  
 △ △ △ △ △ Rizecosus  
 Modified Chang's formula | Kinematic SSI  
 | | | | | Total SSI