

I-108

地盤との相互作用における杭基礎の耐震設計法に関する一提案

岡山大学大学院 学生員 片山 吉史

岡山大学大学院 学生員 佐藤 直毅

岡山大学 正会員 竹宮 宏和

1 まえがき

本研究は、杭基礎の地盤との慣性、並びにキネマチックな動的相互作用を考慮した杭の実務耐震設計を実施するための合理的な手法を、現行の杭の耐震設計基準である Chang 公式をベースとして、その修正法を提案するものである。また、上部構造との連成振動要素として杭頭インピーダンスを評価すると共に、地盤震動による杭体の変形・断面力の算定を行い、その安全性を確保する。

2 定式化

杭基礎は、一般に先端支持杭の形態を採用することが多い。同杭基礎に対し基盤入力 u_g が行われた場合、周辺地盤との動的相互作用式は、フレキシビリティ法から定式化すれば

$$(F_p + F_s) P_s = \alpha u_F + (\gamma - \delta) u_g$$

ここに杭体の変形を杭頭変位によるもの αu_F 、地盤反力によるもの $F_p P_s$ 、杭先端の変位によるもの γu_g とし、また地盤の変位を基盤変位によるもの δu_g 、杭の運動によるもの $F_s P_s$ としている。ここに、 P_s は相互作用力を、 F_s, F_p はそれぞれ地盤、杭体のフレキシビリティを、 α は杭頭変形による杭体の変位影響関数を定義している。杭頭断面力をフーチング重心へ変換すると

$$P_F = K_F^* u_F + P_F^* u_g$$

ここに $K_F^* = (\alpha)^T (F_p + F_s)^{-1} \alpha + K_F^h$ は杭頭インピーダンスを、 $P_F^* u_g = \alpha^T (F_p + F_s)^{-1} (\gamma - \delta) u_g + P_F^{hg} u_g$ は同位置での有効入力を定義している。そして $u_F = (K_F^*)^{-1} P_F^* u_g$ は、杭頭有効入力動と呼ばれ、上記の固定拘束力を杭頭インピーダンスで解除したときの運動(キネマチックな相互作用)として定義される。フーチングの応答 u_F を水平並進 u と回転 ϕ の2自由度と規定した場合、杭の周面における地盤反力を円筒座標でフーリエ級数展開で $n=1$ を採って表現する。地盤解析には薄層要素法を適用する。

道路橋の杭基礎の実務設計では、杭体の変形・断面力の検討を一樣地盤の下で Chang 公式が適用されているが、上部構造物の慣性力のみを考慮している。基盤入力を対象とした耐震解析では、杭体の応答にキネマチックな相互作用効果も導入する必要がある。これに対処するため、一樣な層状地盤内の杭体の変形・断面力の算定を地盤反力に平面歪の仮定を用いて行う。このとき杭体の変形は

$$u(z) = C_1 \sin \beta z + C_2 \cos \beta z + C_3 \sinh \beta z + C_4 \cosh \beta z + \frac{k_u}{(EI)_p \left(\frac{\omega}{V_s} \right)^4 - m_p \omega^2 + k_u} \cdot \frac{u_g}{\cos \left(\frac{\omega}{V_s} \right)} \cos \left(\frac{\omega}{V_s} z \right)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{m_p \omega^2 - k_u}{(EI)_p}}$$

ただし、 $\beta = \sqrt[4]{\frac{m_p \omega^2 - k_u}{(EI)_p}}$ $k_u = G (S_{ul} + i S_{\omega})$, V_s : せん断波速度、 m_p : 杭の単位長さ当りの質量、 l : 杭長、 ω : 振動数、係数 C_1 - C_4 は境界条件から決定される。

3 数値解析例

半無限基盤上の摩擦杭(PC杭)の杭頭インピーダンス水平成分を単杭、4本杭、9本杭において調ベスティフネス法と比較した。地盤、杭の物性を Table 1, 2 に示す。杭の配置は正方配列で、杭間隔7.5mピッチの4本、9本杭を構成する。Fig1は、単杭、4本杭、9本杭のそれぞれ杭1本あたりに換算した杭頭インピーダンス水平成分実数部を、Fig2は、同虚数部を示す。実数部より杭本数の増加に伴い杭1本あたりの剛性が低下していることが分かる。虚数部より杭本数による大きな差はなく高振動数帯域で、杭本数の増加に伴い減衰がやや増大していることが分かる。また解析法による差もほとんど見られず、近似解法としてのリング杭解析の有効性が認められる。

さらに、Table3に示す一樣な表層地盤中の先端支持杭に Table 4 のフーチングを含む上部工を備え、基盤入力を行ったときの杭体のたわみと曲げモーメントを、地盤の振動だけを考慮した基盤系、地盤の振動と上部工からの慣性力の両方を考慮した全体系において調べ、その結果を修正 Chang 公式と比較した (Fig 2)。高振動数 (6Hz) を除いて、たわみ、断面力ともに修正 Chang 公式と本解析の結果はよく一致している。地盤の卓越周期 T_{soil} と上部構造物の固有周期 T_{s1} の関係において、両者の一致する共振状態 ($T_{soil} = T_{s1}$) では、上部構造物の慣性力が杭の変形を減少させ大きな曲げモーメントを発生させている。共振状態を離れるとその効果は小さくなる。両周期の大小によって慣性力の効果は逆で $T_{soil} > T_{s1}$ のとき構造物の共振時の慣性力は地盤振動による変形を増加させ、 $T_{soil} < T_{s1}$ のとき減少させている。地盤の卓越振動数を越えた振動数領域では、構造物の固有振動数より高い慣性力の効果は小さく無視できる程になる。そしてそのほとんどが地盤振動による応答となる。地盤の卓越振動数より低い振動数領域では、慣性力の効果が値は小さいが支配的である。

Table 1 Soil Properties for Case 1 Model (PC piles)

	Layer Thickness	Shear Velocity	Unit Weight	Poisson Ratio	Dampin g
1	10 m	150 m/s	1.6 tf/m ³	0.49	0.05
2	5	160	2.0	0.49	0.13
3	5	210	2.0	0.49	0.10
4	24	500	2.4	0.45	0.02

Table 2 Pile Properties for Case 1&2 Model (PC piles)

Piles	Solid Prestress Concrete
Diameter	3 m
Spacing	7.5m
Youngs modulus	2.50×10^6 tf/m ²
Unit Weight	2.5 tf/m ³
Poisson Ratio	0.17

Table 3 Soil Properties for Case 2 Model

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

Table 4 Superstructure Properties for Case 2 Model

Footing Weight	Super-mass	Period	Damping
250 tf	625/2500/10000 tf	0.25/0.5/1.0s	0.02

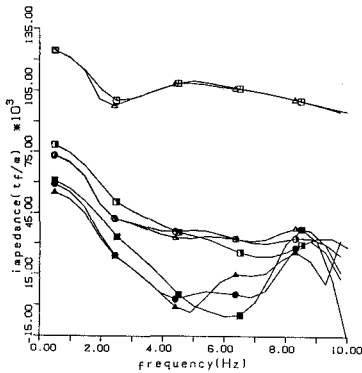


Fig.1 Pile head impedance function(Real)

	Single	4-Group	9-Group
3D Flexibility	△△△	▲▲▲	◆◆◆
Ring Flexibility	○△○	○●○	○◆○
3D Stiffness	□□□	■□■	■◆■

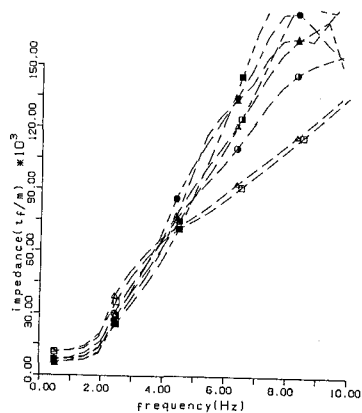


Fig.2 Pile head impedance function(Imaginary)

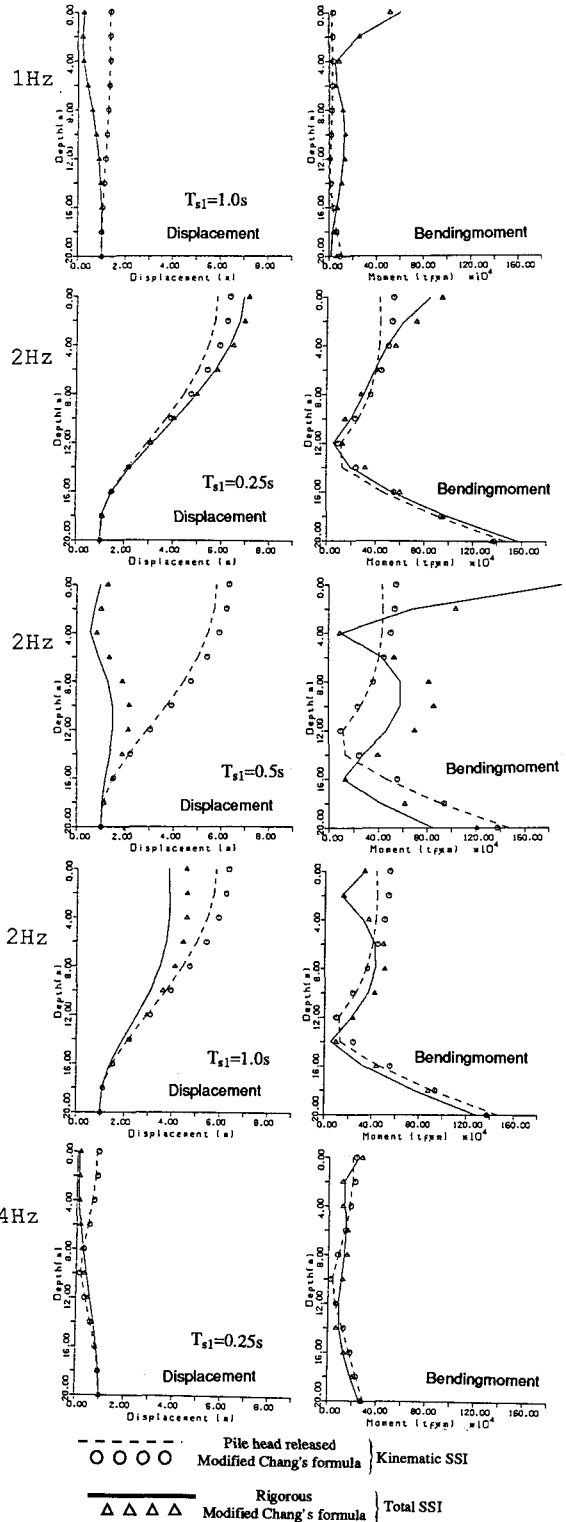


Fig.3 Pile behavior under inertial and kinematic interactions