

境界要素法による土-杭系の動的相互作用に関する研究

豊橋技術科学大学大学院 ○ 張 海洲
豊橋技術科学大学 正会員 栗林栄一

1. はじめに

杭基礎は沈下量が小さい割に大きな荷重に耐えられることから、橋梁や高層ビルなど巨大構造物の耐震安全性向上のため利用される場合が多い。しかし、近年、人工島のような大規模な埋め立て地の建設や、改良した建設残土の埋め戻しなど、構造物の立地条件がより複雑になったため、深く埋め込み杭基礎周辺の土の影響を検討する必要がある。本研究では、杭基礎およびその周辺の土、地盤をすべて境界要素でモデル化し、三次元境界要素により埋め込み杭のimpedance関数^{[1][2]}（動的剛性および動的減衰）の評価法を示し、その特性を報告する。

2. 解析手法

図-1に示す杭基礎-土系モデルを境界要素法による領域分割法により、定式化を行う。境界要素法の基礎方程式は式(1)で表示される。

$$[c]^i \{u\}^i + \int_{\Gamma} [P^*] \{u\} d\Gamma - \int_{\Gamma} [U^*] \{p\} d\Gamma = 0 \quad (1)$$

ここで、 $[c]^i$ は点*i*における境界の形状により決まる定数マトリックス、 $\{u\}^i$ は点*i*における変位ベクトル、 $[U^*]$ 、 $[P^*]$ は点*i*に単位力、単位変位が作用することによる点*j*に生じた変位を表す基本解。 $\{u\}$ 、 $\{p\}$ は、それぞれ境界における変位および表面力を表す。本研究では土-杭全ての表面を境界要素で離散化するため、基本解として全無限弾性体のKelvinの動的な基本解を用いる。このため、地表面も含め物性値の異なる全ての境界が積分領域 Γ の対象となる。

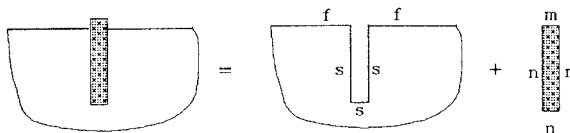


図-1 土-杭系モデル

式(1)を離散化し、杭、土に関するマトリックス方程式は式(2)、(3)、変位の連続条件と表面力の釣り合い式は式(4)で与えられる。

土層について

$$\begin{bmatrix} H_{ss} & H_{st} \\ H_{ts} & H_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ss} & G_{st} \\ G_{ts} & G_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

杭基礎について

$$\begin{bmatrix} H_{mn} & H_{mt} \\ H_{tn} & H_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_m \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{mn} & G_{nt} \\ G_{tn} & G_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{ここで、} u_n = u_s, \quad q_n = -q_s \quad (4)$$

よって、杭基礎の動的impedance関数は次式となる。

$$[K] = [[G_{mn}] - [A][B]^{-1}[G_{nt}]]^{-1} [[H_{mn}] - [A][B]^{-1}[H_{tn}]] \quad (5)$$

ただし

$$[A] = [H_{mn} + [G_{mn}][R]] \quad [B] = [H_{nn} + [G_{nn}][R]] \quad (6)$$

$$[R] = [[G_{ss}] - [H_{st}][H_{tt}]^{-1}[G_{ts}]]^{-1} [[H_{ss}] - [H_{st}][H_{tt}]^{-1}[H_{ts}]] \quad (7)$$

3. 解析モデル

本研究は3種類の土を対象として解析する(表-1)。土層のせん断波速度はそれぞれ100m/s、200m/s、500m/s、密度 $\rho=1.8\text{t/m}^3$ 、ポアソン比 ν の変動範囲は0.3~0.49、損失係数Dsの変動範囲は0~0.3とする。杭について $\rho=2.4\text{t/m}^3$ 、 $G=2.4\text{E6tf/m}$ 、 $\nu=0.156$ 、 $L_i=20\text{m}$ 、 $L_e=30\text{m}$ 。また杭の振動数 ω の範囲は0~150とする。

表-1 土物性値

土層モデル	Vs (m/s)	ν	ρ (t/m ³)	Ds
case1	100	0.3~0.49	1.8	0~0.3
case2	200	0.3~0.49	1.8	0~0.3
case3	500	0.3~0.49	1.8	0~0.3

4. 解析結果

図-2は杭の縦方向のimpedanceを示す。円振動数 ω は大きければ大きいほど杭の減衰も大きくなる。一方、杭の剛性は周期的に変動し、土のせん断波速度は大きいほど、剛性の変動は小さくなることがわかる。土のせん断波速度Vs=100m/sの場合、低振動数域($\omega < 20$)における両杭のimpedanceはほぼ同じだが、高い振動数域において、長い杭は短い杭より剛性が大きいと同時に、減衰が小さい。また、振動数の増加につれ、短い杭は減衰が

早く増大する傾向が認められる。 $V_s=200\text{m/s}$ の場合、短い杭は長い杭に比べ、全振動数域においてimpedanceが大きい、特に高い振動数域において減衰が早く増大する。 $V_s=500\text{m/s}$ の場合、両杭の減衰は同じだが、杭は短いほど剛性が大きいことがわかる。図-3は杭の横方向のimpedanceを示す。杭の減衰は振動数の増加と共に増大するのに対して、剛性はほぼ振動数によらず一定であることが認められる。両杭のimpedanceを比較すると、杭は短いほど剛性が大きい。しかし、 $V_s=100\text{m/s}$ の場合、高い振動数($\omega>120$)のところ、長い杭は短い杭より剛性が大きいことがわかる。減衰についてみると、全ての土層において、低振動数($\omega<40$)の時、杭の長さを問わず両者ほぼ同じだが、 $\omega>40$ と、杭は長いほど減衰が大きくなるが見られる。図-4は杭のimpedanceと土の損失係数 D_s および土のせん断波速度の関係を示す。杭の剛性は土の損失比 D_s にほとんど影響されず、土のせん断波速度に比例する。一方、杭の減衰は D_s の増加によって大きくなるがわかる。

結論

本研究は3次元境界要素による領域分割法を適用して均質地盤に埋め込まれた杭基礎のimpedance関数を定式化した。前述の解析結果より以下の結論が得られた。

- (1) 杭の動的剛性は振動数及び土の損失率に影響されずほぼ一定であり、土層のせん断波速度に比例する。
- (2) 加振力の振動数、土の損失率及びせん断波速度が大きくなればなるほど杭の動的減衰は大きくなる。
- (3) 短い杭は長い杭に比べ剛性が大きい。減衰について短い杭は縦方向の減衰が大きいが、横方向の減衰が小さい。

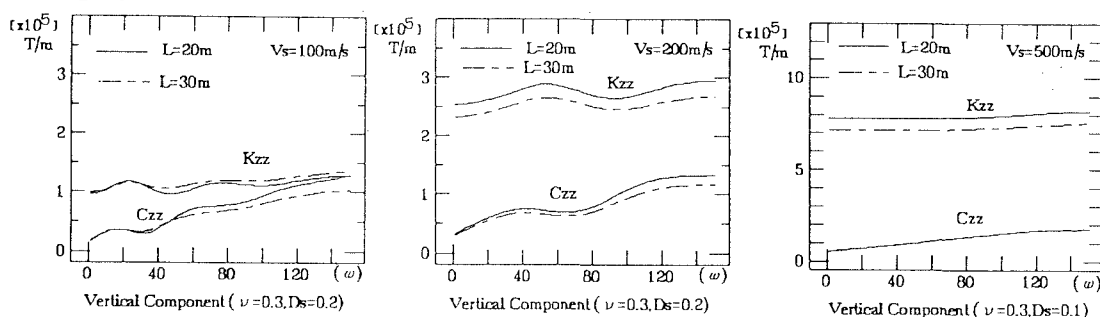


図-2 杭の上下impedance関数

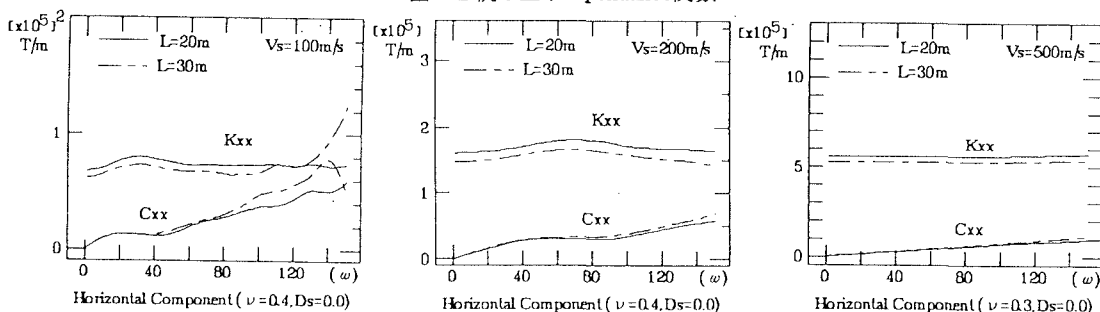


図-3 杭の水平impedance関数

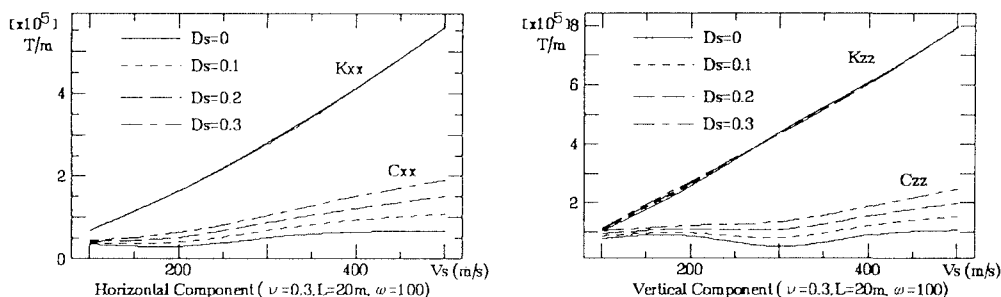


図-4 杭のimpedance関数と土のせん断波速度の関係

参考文献

- [1] C.A. Brebbia, J.C.F. Telles & L.C. Wrobel, Boundary Element Techniques, Theory and Applications in Engineering, pp376-379, 1984
- [2] Dominguez, J., and Alarcon, E., Elastodynamics, in *Progress in Boundary Element Methods Vol.1*, (C.A. Brebbia, Ed.), Pentech Press, London, Halstead Press, N.Y., 1981