

巨大群杭基礎の水平方向動的剛性の簡便な表現方法

尹 元彪¹・小長井 一男²

¹正会員 工修 新構造技術株式会社技術部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸 1-42-20) (東京大学社会基盤工学専攻博士課程)

²正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

構造物を支える群杭基礎は、地震時においてその周辺地盤との動的な相互作用をもたらす、構造物の地震応答に影響を及ぼすため、地震時の地盤の動的剛性を精度よく評価することが重要である。本研究は、群杭を一本の等価ビームに置き換える簡便法により、巨大群杭基礎の動的剛性を評価する。さらに、その水平方向の動的剛性関数の特徴から、指数関数、指数的に減衰する余弦・正弦関数の組み合わせによってインパルス応答関数に近似する方法を提案した。本簡便法は、非線形的な構造物-地盤の動的相互作用解析やリアルタイム振動台実験に特に有効であると考えられる。

Key Words: *dynamic soil-pile interaction, large-scaled grouped piles, equivalent single upright beam, impulse response function*

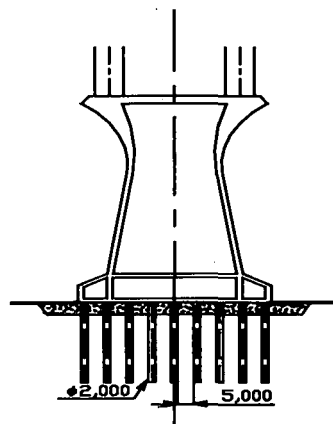
1. まえがき

これからの海峡横断道路プロジェクトにおける超長大橋梁の基礎は、設置深度や海底支持岩盤が非常に深い場合が多いと考えられる。従来は海底掘削を行い、基礎を岩盤の上に設置する方法がとられていたが、基礎が大きいくほど支持岩盤が深いほど海底地盤の掘削量が多くなり、環境への影響、工期や経済性が不利となる。このため、海底掘削をほとんどせず、鋼管杭の打設による地盤改良を行い、より浅いところで基礎を設置する方法(図-1)^{1) 2)}は、従来の概念と大きく異なる意欲的な試みであると考えられる。この手法の合理性を検証するために、地盤、特にその地震時の動的剛性等を精度よく評価することが一つの重要な課題になる。本研究は等価ビームの概念に基づいた薄層要素法によって巨大群杭基礎の剛性が評価できる簡便法を用い、さらにその水平方向の動的剛性については、振動数に依存しないパラメータを用いる表現方法を提案した。

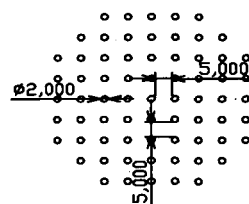
2. 薄層要素法^{3) 4)}による群杭基礎動的剛性の簡便な評価法の概要

構造物を支える群杭基礎は、地震時においてその周辺地盤との動的な相互作用をもたらす、構造物の地震応答に影響を及ぼす。しかし、このような杭-地盤の

動的相互作用効果を直接評価することが非常に煩雑であり、特に杭本数が数十本にもある場合には必ずしも効率でないことから、より簡便な評価方法が必要となる。そのため、ここでは、群杭を1本の等価ビーム



(a) 立面図



(b) 平面図

図-1 大水深基礎の一つの新提案

(Equivalent Single Beam) に置き換え、薄層要素法 (Thin Layered Element Method=TLEM) を用いた定式化⁵⁾による巨大群杭基礎の剛性の簡便な評価手法を試みた。

等価ビームとは、図-2 に示すような群杭とこれを取り込む土を一体として取り扱うものである。等価ビームの剛性マトリックスは以下の仮定を満たすように設定される。すなわち、

- 1) 各杭は、Bernoulli-Euler 梁とし、お互いの間隔を等しく保って変形する。この際、杭間に挟まれた土は杭とともに動く；
- 2) 周辺地盤から各杭に伝達される周辺せん断力によるモーメントの寄与は無視する；
- 3) 杭頭部分は剛体フーチングで固定されている。すなわち各杭頭の回転角は等しく同じ平面上にある。
- 4) 薄層各要素の境界面と杭の中心軸線の交わる点はすべて同じ平面上にある。しかし、杭そのものの断面はこの平面と必ずしも一致しない。

このような仮定で求められた近似解は厳密解を実用上十分な精度で近似する⁶⁾。さらに、この方法により、種々な地盤条件や杭配置等について、巨大群杭基礎の水平および回転運動の動的剛性 K_{xx} 、 K_{RR} を求め、その結果の一例を図-3 に示す。また、これらと 3 次元有限要素法 (FEM) による静的解析との比較検討を行った結果、十分な精度を有することが分かった⁷⁾。

3. 巨大群杭基礎水平方向動的剛性の簡易表現法

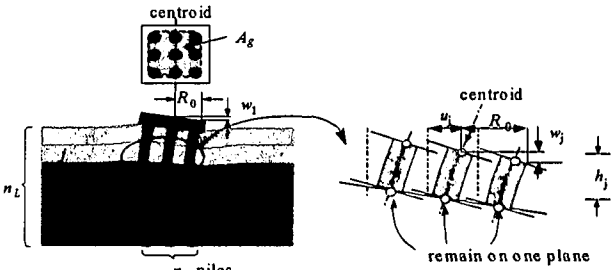
ここでは、図-3(a) に示したような巨大群杭基礎の水平方向の動的剛性 K_{xx} に着目する。表層地盤の共振点で大きくばみが現れることがわかる。これは、従来の付加質量の概念を導入し、 K_{xx} の実部を $k_j - \omega^2 m_j$ で置換える近似方法⁸⁾⁹⁾の限界を示唆している。このような特徴を反映させるためには、新たな近似方法の導入が必要であると考えられる。そこで、柔関数 (flexibility) の逆フーリエ変換関数、すなわちインパルス応答関数 (図-4) の特徴から、指数関数、指数的に減衰する余弦や正弦関数の組み合わせによってそれに近似する方法¹⁰⁾を試みた。この方法により、インパルス応答関数 $h^*(t)$ は次のように表される。

$$h^*(t) = \sum_m (A_{e,m} \cdot h_{e,m}(t) + A_{c,m} \cdot h_{c,m}(t) + A_{s,m} \cdot h_{s,m}(t)) \quad (1)$$

ここに、

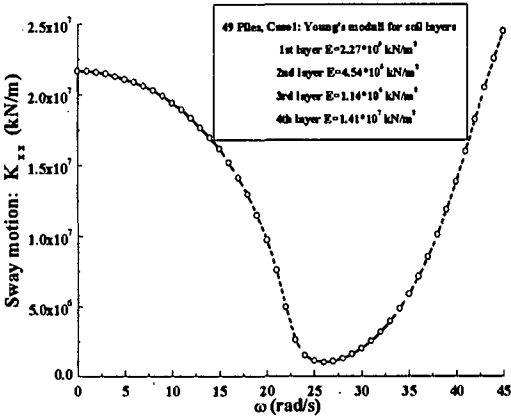
$$h_{e,m}(t), h_{c,m}(t), h_{s,m}(t) = \begin{cases} e^{-\alpha_{e,m} t}, e^{-\alpha_{c,m} t} \cos \omega_{c,m} t, e^{-\alpha_{s,m} t} \cos \omega_{s,m} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$A_{e,m}$, $A_{c,m}$, $A_{s,m}$, $\alpha_{e,m}$, $\alpha_{c,m}$, $\alpha_{s,m}$ は未知数である。

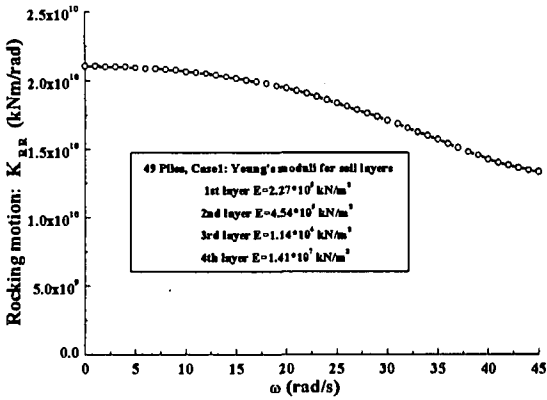


(a) 地盤-群杭システム (b) 薄層要素のスライス

図-2 等価ビームの変形



(a) 水平運動 (Sway) の動的剛性 K_{xx}



(b) 回転運動 (Rocking) の動的剛性 K_{RR}

図-3 等価ビーム法による計算結果

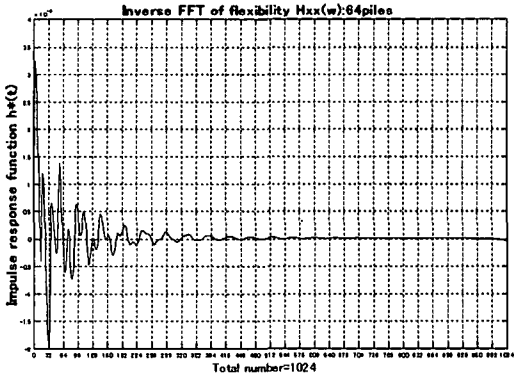


図-4 インパルス応答関数

$h_{e,m}(t)$ 、 $h_{c,m}(t)$ 、 $h_{s,m}(t)$ のフーリエ変換は、

$$\begin{aligned} H_{e,m}(\omega) &= F(h_{e,m}(t)) = \frac{1}{i\omega + \alpha_{e,m}} \\ H_{c,m}(\omega) &= F(h_{c,m}(t)) = \frac{i\omega + \omega_{c,m}}{(i\omega + \alpha_{c,m})^2 + \omega_{c,m}^2} \\ H_{s,m}(\omega) &= F(h_{s,m}(t)) = \frac{\omega_{s,m}}{(i\omega + \alpha_{s,m})^2 + \omega_{s,m}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

になり、よって、柔性関数 H^* は次のように近似される。

$$\begin{aligned} H^*(\omega) &= A_{e,m} \frac{1}{i\omega + \alpha_{e,m}} + A_{c,m} \frac{i\omega + \omega_{c,m}}{(i\omega + \alpha_{c,m})^2 + \omega_{c,m}^2} \\ &+ A_{s,m} \frac{\omega_{s,m}}{(i\omega + \alpha_{s,m})^2 + \omega_{s,m}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$H_{e,m}(\omega)$ 、 $H_{c,m}(\omega)$ 、 $H_{s,m}(\omega)$ は図-5 に示す 3 つのバネ k_{a1} 、 k_{a2} 、 k_{a3} と 2 つのダッシュポット c_{a1} 、 c_{a2} の組み合わせである。ただし、各ケースのパラメータは次のようになる。

$$H_{e,m}(\omega) \text{ の場合: } k_{a1} = 0.618\alpha_{e,m} \quad (5a)$$

$$k_{a2} = -1.618\alpha_{e,m} \quad (5b)$$

$$k_b = 0 \quad (5c)$$

$$c_{a1} = 0.618 \quad (5d)$$

$$c_{a2} = -1.618 \quad (5e)$$

$$H_{c,m}(\omega) \text{ の場合: } k_{a1} = 0.618\alpha_{c,m} + \omega_{c,m} \quad (6a)$$

$$k_{a2} = -(1.618\alpha_{c,m} + \omega_{c,m}) \quad (6b)$$

$$k_b = -2.236\omega_{c,m} \quad (6c)$$

$$c_{a1} = 0.618 \quad (6d)$$

$$c_{a2} = -1.618 \quad (6e)$$

$$H_{s,m}(\omega) \text{ の場合: } k_{a1} = \alpha_{s,m} - \omega_{s,m}/2 \quad (7a)$$

$$k_{a2} = -\alpha_{s,m} - \omega_{s,m}/2 \quad (7b)$$

$$k_b = 1.25\omega_{s,m} \quad (7c)$$

$$c_{a1} = 1 \quad (7d)$$

$$c_{a2} = -1 \quad (7e)$$

以上より、巨大群杭基礎の水平方向動的柔性は、式(5)～(7)の各基本応答関数の組み合わせによって表現される。特に、パラメータ $A_{e,m}$ 、 $A_{c,m}$ 、 $A_{s,m}$ 、 $\alpha_{e,m}$ 、 $\alpha_{c,m}$ 、 $\alpha_{s,m}$ は振動数に依存しないため、地盤-基礎-構造物の動的相互作用を考慮した地震応答解析やリアルタイム振動台実験に応用されやすい。

4. 解析結果及び提案式

本研究では、表-6、7 に示したような地盤にある群杭基礎について、その水平運動の柔性関数に近似する式(4)の各パラメータの決定を行った。杭の本数を16、25、36、49、64、69の計6タイプとした。

まず、 $A_{e,m} * H_{e,m}(\omega)$ 、 $A_{c,m} * H_{c,m}(\omega)$ の2項による近似を行った。非線形の最小2乗法によりパラメータ $A_{e,m}$ 、 $A_{c,m}$ 、 $\alpha_{e,m}$ 、 $\alpha_{c,m}$ を決めた。図-8～10 は、解析結果の一部分を示す。これらにより、式(4)による近似解は、全体的に元の柔性関数の特徴をよく表現できることが分かった。また、杭本数の増加に伴い、近似解と元の曲線との偏離がやや大きくなる傾向が見られる。

次に、これらの解析結果に基づいて、以下のようなパラメータ $A_{e,m}$ 、 $A_{c,m}$ 、 $\alpha_{e,m}$ 、 $\alpha_{c,m}$ を決める式を提案する。

$$\begin{aligned} A_e &= (f_e + g_e * \log(L/R_0) + h_e * \log(L/R_0) * \log(E_s/E_p) \\ &+ q_e * \log(E_s/E_p)) / (2 * \pi * E_s * L) \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} A_c &= (f_c + g_c * \log(L/R_0) + h_c * \log(L/R_0) * \log(E_s/E_p) \\ &+ q_c * \log(E_s/E_p)) / (2 * \pi * E_s * L) \end{aligned} \quad (8b)$$

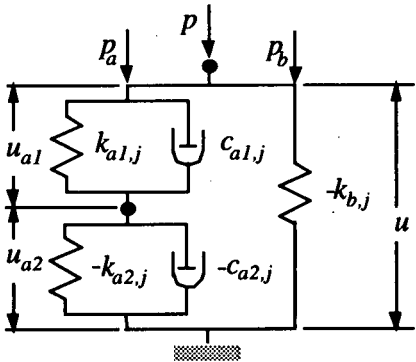


図-5 基本応答関数の力学モデル

表-6 地盤特性

地層番号	層厚(m)	ポアソン比 ν	単位重量 γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	
				case 1	case 2
1	25	0.49	20.678	190	60
2	15.5	0.49	20.482	270	85
3	12.0	0.47	19.502	441	441
4	30.0	0.39	25.382	1,400	1,400

表-7 杭特性

杭長(m)	杭外径(m)	厚さ(cm)	E (kN/m ²)	杭間隔	
				Case-S1	Case-S2
20	2	2	2.058E+08	7.0m	5.0m

$$\alpha_e = (a_e + b_e \log(L/R_0) + c_e \log(L/R_0) \log(E_f/E_p) + d_e \log(E_f/E_p)) * \omega_1 \quad (8c)$$

$$\alpha_c = (a_c + b_c \log(L/R_0) + c_c \log(L/R_0) \log(E_f/E_p) + d_c \log(E_f/E_p)) * \omega_1 \quad (8d)$$

ここに、 L :杭長、 R_0 :群杭の等価半径、 E_s :地盤のヤング係数の代表値、 E_p :鋼管杭のヤング係数、 ω_1 :表層地盤の1次卓越振動数であり、各定数は次のようになる。

$a_e = 3.3968$	$a_c = -0.6092$
$b_e = -0.3662$	$b_c = -0.5756$
$c_e = -0.0570$	$c_c = -0.0797$
$d_e = 0.3073$	$d_c = -0.0994$
$f_e = 937.3719$	$f_c = 145.6523$
$g_e = 1267.9903$	$g_c = -20.1625$
$h_e = 133.2046$	$h_c = -9.8059$
$q_e = 97.9882$	$q_c = 9.8277$

5. あとがき

本研究は、巨大群杭基礎の水平方向の動的剛性に着目し、そのインパルス応答関数の特徴により、振動数に依存しないパラメータを用いて、簡便な近似方法を提案した。パラメータは、振動数に依存しないため、地盤-基礎-構造物の動的相互作用を考慮した地震応答解析やリアルタイム振動台実験に応用されやすいと考えられる。

参考文献

- 1) A. Pecker, T. Guyot, J. P. Teyssandier, J. Combault: Seismic Design for the Foundations of the Rion Anti-Rion Bridge, pp.831-842, IABSE, Copenhagen, Denmark, June, 1996
- 2) 若狭, 山下, 尹: “大水深基礎構造形式の新提案”, 2000年5月(財)海洋架橋調査会‘海峡横断’第16号 pp44-49
- 3) H. Tajimi, Y. Shimomura: Dynamic Analysis of Soil-Structure Interaction by the Thin Layered Element Method, Trans. Arch. Inst. Japan, pp.41-51, Vol.243, 1976
- 4) K. Konagai: Guide to TLEM, program manual 5, Konagai Lab., IIS, University of Tokyo, 1998
- 5) K. Konagai: Shaking Table Test Allowing Interpretation of Damage to Structure in Terms of Energy Influx and Efflux through Soil-Structure Interface, Report of Research Project, 1999 Grant-in-Aid for Scientific Research (B), No.10450174, The Ministry of Education, Science, Sports and Culture
- 6) Konagai, K., Ahsan, R., and Maruyama, D.: Simple Expression of the Dynamic Stiffness of Grouped Piles in Sway Motion, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3 (2000), 355-376, 2000
- 7) 尹, 小長井: “巨大群杭基礎の剛性の簡便な評価手法”, 2001

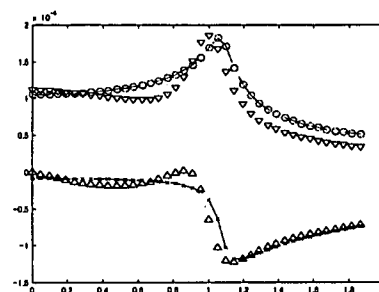


図-8 16本の杭の柔性関数 (S=5m; D=2m; Csacl)

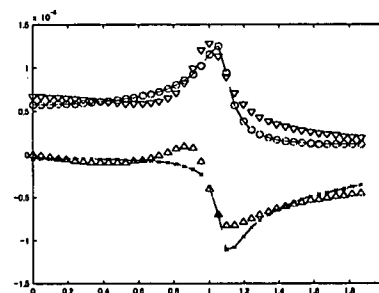


図-9 49本の杭の柔性関数 (S=5m; D=2m; Csacl)

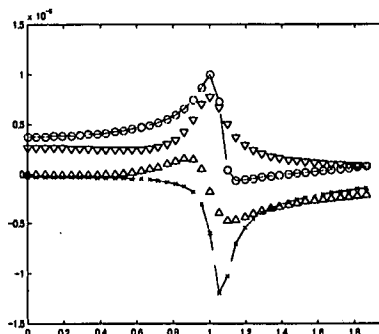


図-10 69本の杭の柔性関数 (S=7m; D=2m; Csacl)

(注: 図-8~10には: x軸= ω/ω_1 ; ○=元の K_{xx} の実部; ×=元の K_{xx} の虚部; ▽=近似の K_{xx} の実部; △=近似の K_{xx} の虚部)

年3月, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 pp4-5

8) 土木学会: “動的解析と耐震設計(第2巻) 動的解析の方法”, 技報堂, 1989年

9) 土木学会鋼構造委員会鋼構造物の耐震検討小委員会: “橋梁システムの動的解析と耐震性”, 平成12年4月

10) K. Konagai: Real Time Control of Shaking Table Test for the Simulation of Structure-Base Interaction during Earthquakes, Report of Research Project, 1998 Grant-in-Aid for Exploratory Research, No.09875109, The Ministry of Education, Science, Sports and Culture