

周波数依存性を考慮した杭の鉛直および水平方向の動的载荷試験解析プログラムの開発

杭 水平载荷 動的

金沢大学 学生会員 ○沼田 篤志
 金沢大学 国際会員 Kitiyodom Pastsakorn
 金沢大学 国際会員 松本 樹典
 JapanPile(株) 正会員 小嶋 英治
 JapanPile(株) 正会員 熊谷 裕道

1. はじめに

鉛直および水平方向の動的杭载荷試験解析プログラム KwaveHybrid¹⁾においては、これまで地盤振動の周波数に依存しないばねとダッシュポットで地盤をモデル化していた。しかし、急速载荷試験と衝撃载荷試験では载荷時間がそれぞれ異なり、これらの载荷試験を統一的に解析するには、周波数依存性を考慮する必要がでてきた。

本報告では、Nogami & Konagai (1986, 1988)によって提案された地盤モデルを採用し、周波数依存性を考慮できるよう既存の KwaveHybrid を拡張した。

2. 解析手法

図1に、既存の杭载荷解析プログラム KwaveHybrid¹⁾で用いている杭と地盤のモデル化を示す。杭は梁要素、地盤は杭節点に連結されたばねとダッシュポットで表現する。杭の運動方程式は、式(1)の増分形式で表現する。

$$\{F\}_t + [K] \{\Delta w\}_{t+\Delta t} + [C]_t \{\dot{w}\}_{t+\Delta t} + [M]_t \{\ddot{w}\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

ここで、[K], [C], [M]は剛性、減衰および質量マトリクスである。 $\{w\}$ は変位ベクトル、 $\{F\}$ は外力ベクトルである。式(1)を Newmark のβ法で解いている。

(1) 従来の地盤モデル

杭周面における鉛直ばね k^z 、鉛直ダッシュポット(逸散減衰) c^z 、2方向の水平ばね k^x, k^y 、2方向の水平ダッシュポット(逸散減衰) c^x, c^y は、次式で近似的に与えられる。

$$k^z = \frac{2.75G_s}{\pi d}, k^x = k^y = \frac{4G_s}{d} \quad (2)$$

$$c^z = \frac{G_s}{V_s}, c^x = c^y = \frac{4.5G_s}{V_s} \quad (3)$$

ここで G_s と V_s は地盤のせん断剛性とせん断波速度、 d は杭の直径である。杭先端ばねとダッシュポットおよび杭と地盤の滑りの考慮については参考文献1)を参照されたい。

(2) Nogami & Konagai (1986, 1988) による地盤モデル

図2と図3はNogami & Konagai によって提案された鉛直方向地盤モデルおよび水平方向地盤モデルである。図中の k_n は杭の単位長さあたりのばね定数、 c_n は単位長さあたりの減衰定数、 m_s は単位長さあたりの付加質量である。 m_s, k_n, c_n は式(4)、式(5)、式(6)のように表される。

$$m_s = \xi_m(v_s) \rho_s \pi r_0^2 \quad (4)$$

$$k_n = \xi_k(v_s) G_s \begin{cases} 3.518 & n=1 \\ 3.581 & n=2 \\ 5.529 & n=3 \end{cases} \quad (5)$$

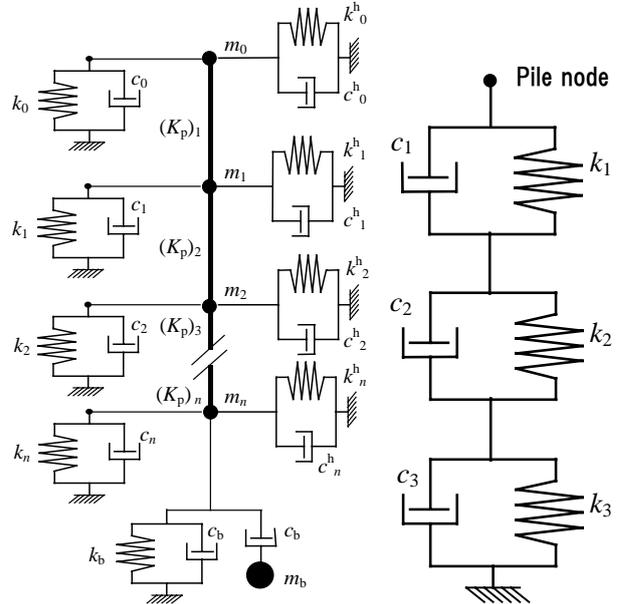


図1 杭と地盤のハイブリッドモデル 図2 Nogami & Konagai (1986) による鉛直地盤モデル

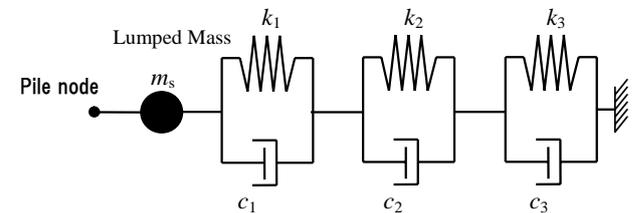


図3 Nogami & Konagai (1988)による水平地盤モデル

$$c_n = \xi_k(v_s) \frac{G_s r_0}{V_s} \begin{cases} 113.097 & n=1 \\ 25.133 & n=2 \\ 9.362 & n=3 \end{cases} \quad (6)$$

ここで $a_0 = r_0 \omega / V_s$ 、 r_0 は杭半径である。 ω は円周波数である。 ξ_m, ξ_k はポアソン比のみに依存する関数で、鉛直方向地盤モデルに関しては $\xi_k = 1, \xi_m = 0$ である。

(3) 地盤モデルの比較

Nogami & Konagai (1986, 1988) による地盤モデルと従来の地盤モデルの比較解析を行った。解析に用いたパラメータは、地盤せん断剛性 $G_s = 1 \text{ kN/m}^3$ 、密度 $\rho = 1 \text{ ton/m}^3$ 、杭半径 $r_0 = 1 \text{ m}$ で、载荷荷重 F は、周波数が異なる振幅1kNの正弦波を与える。

各周波数においてばねおよび減衰パラメータ $S_{w1}, S_{w2}, S_{u1}, S_{u2}$ は式(7)、(8)の関係を用いて求める。

$$F = GS_{w1}w + \frac{Gr_0 S_{w2}}{V_s a_0} \dot{w} \quad (7)$$

$$F = G\pi S_{u1}u + \frac{G\pi r_0 S_{u2}}{V_s a_0} \dot{u} \quad (8)$$

図4と図5はそれぞれ鉛直方向および水平方向の場合の各周波数におけるばねおよび減衰パラメータの比較を示している。図中には、Novak et al. (1978)によって提案された理論値も示している。従来のKwaveHybridの地盤モデルは、鉛直の衝撃荷重の場合 ($a_0 > 1.0$) では妥当な近似である。しかし、 a_0 が小さい場合には、ばね値を過大評価し、逸散減衰を過小評価している。一方、Nogami & Konagai (1986)のモデルは、無次元周波数 a_0 に関わらず、理論解と一致している。

図5の水平荷重の場合、従来の地盤モデルでは、限られた範囲の土のポアソン比 ν と無次元周波数 a_0 に対してのみ有用である。一方、Nogami & Konagai (1988)のモデルは、土のポアソン比 ν と無次元周波数 a_0 に関わらず、理論解と一致している。

したがって、Nogami & Konagai (1986, 1988)によって提案された地盤モデルを採用し、周波数依存性を考慮できるように既存のKwaveHybridを拡張した。Nogami & Konagaiの地盤モデルを採用するもう一つの利点は、時間領域の計算によって、Novak et al. (1978)による理論値を再現できることである。

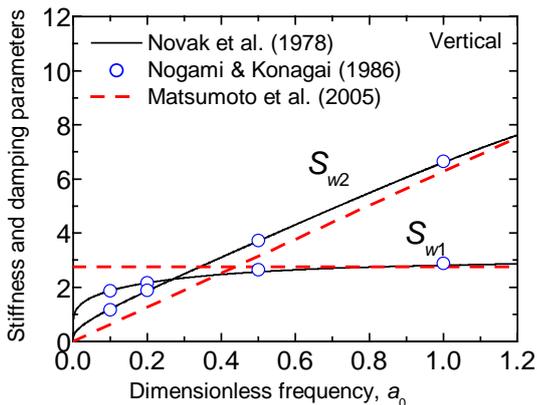


図4 鉛直方向の比較結果

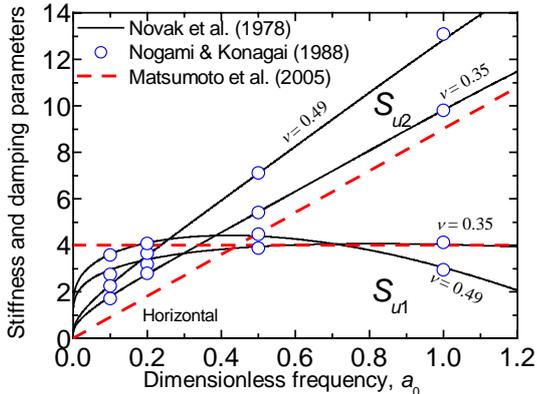


図5 水平方向の比較結果

3. 拡張したKwaveHybridの妥当性の検討

次に拡張したプログラムの妥当性の検討を行った。杭頭に急速荷重から衝撃荷重までを想定して、 $a_0 = 0.05, 0.1, 1.0$ のように周波数が異なる振幅 10000 kNの正弦波の荷重を与えた。用いた杭条件、地盤条件を表1、表2に示す。

図6と図7は各周波数の荷重を与えたときの鉛直変位および水平変位を示している。載荷荷重の周波数が高いときは、変位が小さく、載荷荷重の周波数が低いときは、変位が大きい。すなわち、地盤モデルの周波数依存性をうまく表現していることが分かる。

表1 杭条件

Length (m)	10
Diameter (m)	0.4
Cross-sectional area (m ²)	0.126
Young's modulus (kN/m ²)	3.0×10^7
Bar wave velocity (m/s)	5000
Density (ton/m ³)	1.2
Mass (ton)	1.51
Poisson's ratio	0.16

表2 地盤条件

Young's modulus (kN/m ²)	3.0×10^5
Density (ton/m ³)	2.0
Poisson's ratio	0.5
Shear stiffness (kN/m ²)	1.0×10^5
Shear velocity (m/s)	257.34

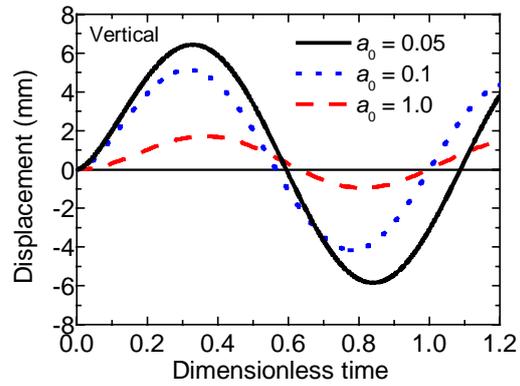


図6 杭頭の鉛直変位

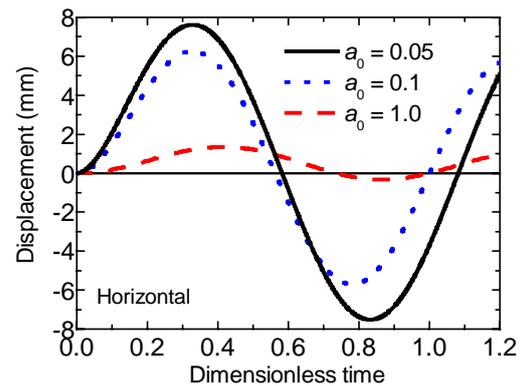


図7 杭頭の水平変位

参考文献

- 1) 松本 樹典, Kitiyodom Pastsakorn, 小嶋 英治. 2005. 鉛直および水平方向の動的・静的杭載荷試験解析プログラムの開発, 2005年度日本建築学会大会学術講演梗概集.
- 2) Nogami T., and Konagai K., 1986. Time domain axial response of dynamically loaded single piles. *Journal of Engineering Mechanics*; **112**, 1241-1252.
- 3) Nogami T., and Konagai K., 1988. Time domain flexural response of dynamically loaded single piles. *ditto*; **114**, 1512-1525.
- 4) Novak M., Nogami T., and Aboul-Ella. F., 1978. Dynamic soil reaction for plane strain case. *ditto*; **104**, 953-959.