

地震荷重を受ける杭基礎構造物の簡易動的解析 (その3: パイルド・ラフト)

正会員 ○Kitiyodom Pastsakorn\*  
 正会員 園田 隆一\*\*  
 正会員 松本 樹典\*\*\*

パイルド・ラフト 動的 変形解析  
 地震荷重 水平変位 曲げモーメント

1. はじめに 著者らが開発しているパイルド・ラフト基礎の簡易三次元静的変形解析プログラム PRAB<sup>1)2)</sup>を動的解析が可能のように拡張した<sup>3)4)</sup>。本報では、拡張した簡易三次元動的変形解析プログラム D-PRAB を用いて地震荷重を受ける群杭およびパイルド・ラフト基礎の動的解析を行い、FLAC3D の解析結果と比較することにより、D-PRAB の妥当性を検討する。

2. 解析手法 図1に拡張した簡易動的解析プログラム D-PRAB で用いているパイルド・ラフトのモデル化を示す。ラフトは薄板要素、杭は梁要素、地盤はラフト節点あるい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。各節点には鉛直方向および水平方向2つ、計3つのばねと3つのダッシュポットが連結されている。

ラフト節点における鉛直ばね  $k_r^z$ 、鉛直ダッシュポット  $c_r^z$ 、2方向の水平ばね  $k_r^x, k_r^y$ 、2方向の水平ダッシュポット  $c_r^x, c_r^y$  は、次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$k_r^z = \frac{4G_s}{\pi a(1-\nu_s)}, k_r^x = k_r^y = \frac{32(1-\nu_s)G_s}{\pi a(7-8\nu_s)} \quad (1)$$

$$c_r^z = \frac{3.4 G_s}{\pi(1-\nu_s)V_s}, c_r^x = c_r^y = \frac{18.4(1-\nu_s)G_s}{\pi(7-8\nu_s)V_s} \quad (2)$$

ここで、 $G_s$  と  $\nu_s$  は地盤のせん断剛性およびポアソン比である。 $V_s$  は地盤のせん断波速度である。また  $a$  は正方形ラフト要素の等価半径である。

図2に杭と地盤のモデル化を示す。地盤が均質な等方弾性体の場合、杭周面節点における鉛直ばね  $k$ 、鉛直ダッシュポット  $c$ 、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  $c^x, c^y$  は、次式で近似的に与えられる<sup>6)</sup>。

$$k^z = \frac{2.75G_s}{\pi d}, k^x = k^y = \frac{4G_s}{d} \quad (3)$$

$$c^z = \frac{G_s}{V_s}, c^x = c^y = \frac{4.5G_s}{V_s} \quad (4)$$

ここで  $d$  は杭の直径である。

杭先端における鉛直ばね  $k_b$ 、鉛直ダッシュポット  $c_b$ 、鉛直付加質量  $m_b$  は、式(5)で与えられる<sup>7)</sup>。

$$k_b = \frac{8G_s}{\pi d(1-\nu_s)}, c_b = \frac{3.4 G_s}{\pi(1-\nu_s)V_s}, m_b = 8d\rho_s \frac{0.1-\nu_s^4}{\pi(1-\nu_s)} \quad (5)$$

上式で  $\rho_s$  は土の密度である。

パイルド・ラフトの運動方程式を式(6)に示す。

$$[K]\{w\} + [C]\{\dot{w}\} + [M]\{\ddot{w}\} = \{F\} \quad (6)$$

ここで、 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ は剛性、減衰および質量マトリックスであり、 $\{F\}$ は外力ベクトルである。

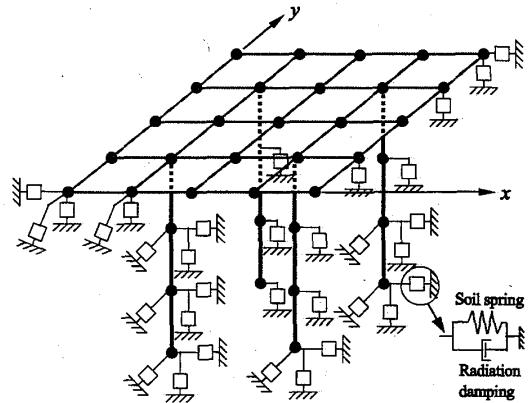


図1 パイルド・ラフト基礎のモデル化

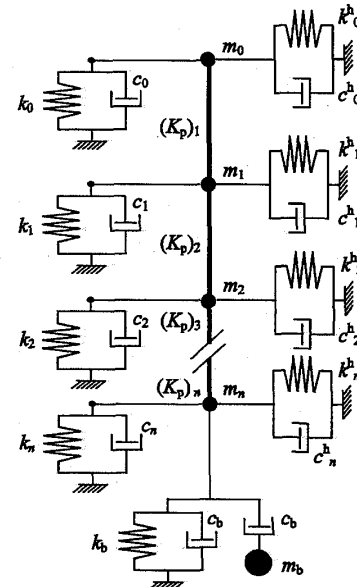


図2 杭と地盤のモデル化

地震を受けるパイルド・ラフトの場合では、外力ベクトル  $\{F\}$  は次式で計算する。

$$\{F\} = [K_s]\{w_0\} + [C_s]\{\dot{w}_0\} \quad (7)$$

ここで、 $[K_s]$  と  $[C_s]$  は地盤剛性および減衰マトリックスである。 $\{w_0\}$  と  $\{\dot{w}_0\}$  は地震により起こされる自由地盤の強制地盤変位および強制地盤速度である。本報告では、FLAC3D を用いて自由地盤の時刻歴線形応答解析を行う。

Newmark- $\beta$  法を用いて式(6)からパイルド・ラフト基礎の変形および部材応力を計算する。

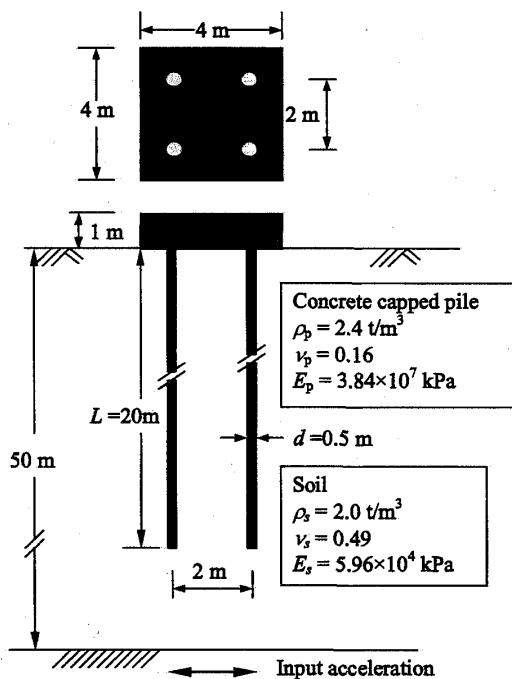


図3 解析対象

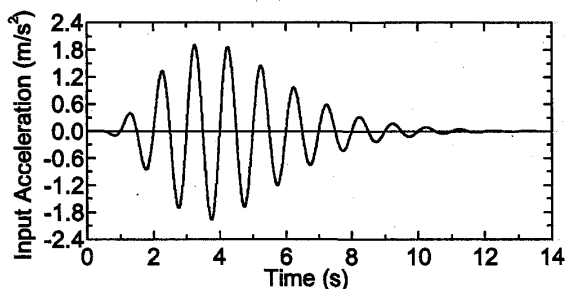


図4 地震入力加速度

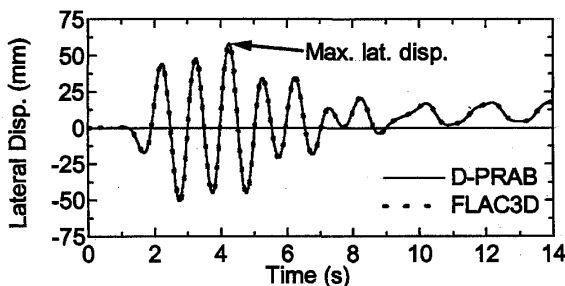


図5 杭頭の応答水平変位 (群杭)

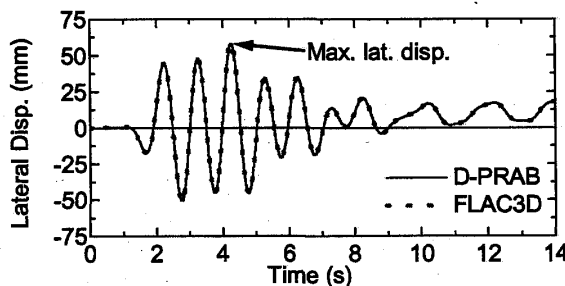


図6 杭頭の応答水平変位 (パイルド・ラフト)

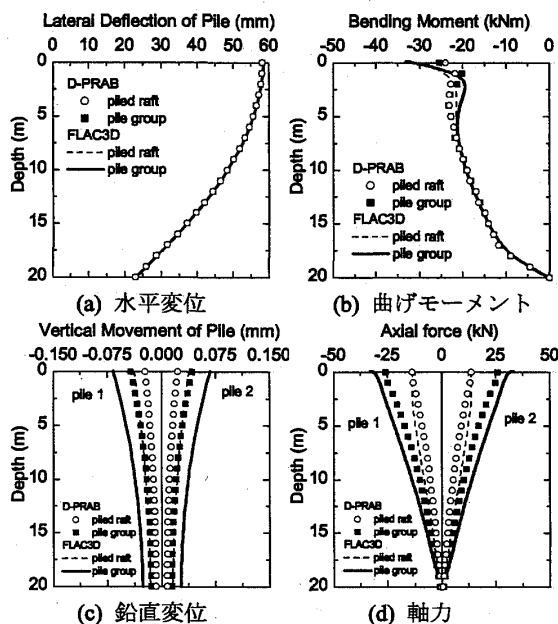


図7 パイルド・ラフトと群杭の応答比較

3. 検証解析 図3に解析対象および材料定数を示す。群杭とパイルド・ラフトの二通りの解析を行った。群杭の解析においては、FLAC3Dでは、ラフト底面を地表面から0.1m離し、一方PRABでは、ラフト底面の地盤ばねおよびダッシュポットを0として解析を行った。式(8)で計算した地震基盤での入力加速度を図4に示す。入力地震加速度の振動数 $f$ は、 $f=1.0\text{ Hz}$ とした。

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{\beta} e^{-\alpha t} t^\gamma \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

ここで、 $\alpha=2.2$ ;  $\beta=0.375$ ;  $\gamma=8.0$ 。

図5と図6に、群杭とパイルド・ラフトの杭頭における応答水平変位時刻歴を示す。いずれのケースにおいても、D-PRABとFLAC3Dの解析結果は非常によく一致している。図7に、杭頭水平変位が最大値を示した時点の群杭およびパイルド・ラフトの杭の水平変位、曲げモーメント、鉛直変位、軸力分布を示す。D-PRABとFLAC3Dの解析結果はほぼ一致している。いずれの解析結果においても、パイルド・ラフトの杭頭曲げモーメント、鉛直変位、軸力は群杭に比べて小さい。地震荷重に対してもパイルド・ラフトが有効な基礎形式であることが分かる。

参考文献 1) Kitiyodom P & Matsumoto T (2002). A simplified method for piled raft and pile group foundations with batter piles. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26, 1349-1369. 2) Kitiyodom P & Matsumoto T (2003). A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, 85-109. 3) Kitiyodom P, 園田隆一, 松本 樹典 (2005). 地震荷重を受ける基礎構造物の簡易動的解析(その1:単杭), 第40回地盤工学研究発表会(投稿中). 4) 園田隆一, Kitiyodom P, 松本 樹典 (2005). 地震荷重を受ける基礎構造物の簡易動的解析(その2:群杭), 第40回地盤工学研究発表会(投稿中) 5) Richart FE, Hall JR & Woods RD (1970). *Vibrations of soils and foundations*. Prentice-Hall: New Jersey. 6) Novak M, Nogami T & Aboul-Ella F (1978). Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of Mechanical Engineering ASCE*, 104(EM4), 953-959. 7) Deeks AJ & Randolph MF (1995). A simple model for inelastic footing response to transient loading. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 19, 307-329.

\*金沢大学大学院 助手・工博  
 \*\*金沢大学大学院 工修  
 \*\*\*金沢大学大学院 教授・工博

\*Research Associate, Kanazawa University, Dr. Eng.  
 \*\*Kanazawa University, M. Eng.  
 \*\*\*Professor, Kanazawa University, Dr. Eng.