

(69) 杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル

清水建設(株) (正) 田蔵 隆 (正) 若原 敏裕
(正) 清水 勝美 (正) 松崎 雅彦

1. 概 説

本研究は杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトルについて検討したものである。解析理論は別報⁽¹⁾⁽²⁾で示した1質点ばね系の上部工を有する群杭基礎構造物の地震応答解に基づくものであり、加速度応答スペクトルは1質点ばね系モデルの固有周期をパラメータとして、基盤からの加速度入力に対する質点の最大加速度応答値を計算することによって求めた。

地盤の固有周期が0.5秒と1.0秒の場合について数値解析を行い、杭基礎・地盤系の動的相互作用が加速度応答スペクトルに及ぼす影響について考察した。

2. 群杭基礎構造物の地震応答解

図1に示すような1質点ばね系にモデル化された上部工を有する群杭基礎構造物について考える。表層地盤は均質一様な厚さHの弾性地盤であり、杭長およびフーチングの根入れ厚は H_p および H_b である。

この群杭基礎構造物における杭基礎部分の杭頭変位 $u_p^a(H_p, \omega)$ は、次式のように表すことができる。

$$u_p^a(H_p, \omega) = V \cdot F^{a*}(H_p, \omega) + u_g \cdot G^{a*}(H_p, \omega) \quad \dots (1)$$

ここに、

$$F^{a*}(H_p, \omega) = F^*(H_p, \omega) / (e_N^t(\omega) \cdot N) \quad \dots (2)$$

$$G^{a*}(H_p, \omega) = e_N^g(\omega) \cdot G^*(H_p, \omega)$$

であり、 ω は加振円振動数、 u_g は基盤水平変位、 V は杭頭に作用する水平荷重である。 $F^{a*}(H_p, \omega)$ および $F^*(H_p, \omega)$ は、杭頭水平荷重に対する群杭・地盤系および単杭・地盤系の杭頭複素剛性の逆数であり、 $G^{a*}(H_p, \omega)$ および $G^*(H_p, \omega)$ は、地盤のせん断振動による基盤変位 u_g に対する群杭および単杭の杭頭相対水平変位の増幅係数である。また、 $e_N^t(\omega)$ および $e_N^g(\omega)$ はそれぞれ杭頭水平加振による群杭効率および地盤変形による群杭効率、 N は杭本数である。なお、 $F^*(H_p, \omega)$ および $G^*(H_p, \omega)$ はともに杭頭部($z = H_p$)において、杭頭回転拘束の境界条件を満足するように定められたものである。紙面の都合上、 $F^*(H_p, \omega)$ および $G^*(H_p, \omega)$ の詳細は、参考文献(1)(2)に譲る。

図1の群杭基礎構造モデルにおいて、杭頭に作用する水平外力 V は以下のように与えられる。

$$V = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) - m_0(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + P_e \quad \dots (3)$$

ここに、 m_1 および m_0 は上部工およびフーチングの質量、 u_1 および u_0 は上部工およびフーチングの水平変位である。また、 P_e はフーチング側面に作用する土圧力であり、フーチングを円筒剛体と仮定し、田治見式で与えられる地盤反力をフーチングの根入れ厚 H_b で積分した合力から、以下のように得られる⁽³⁾。

$$P_e = P_1 u_0 + P_2 u_g \quad \dots (4)$$

上式における右辺第1項はフーチングの水平変位に比例する土圧力を意味し、第2項は地盤変位の増幅に伴うフーチング側方からの入力を表している。なお、 P_1 および P_2 の詳細は、参考文献(1)(2)に譲る。

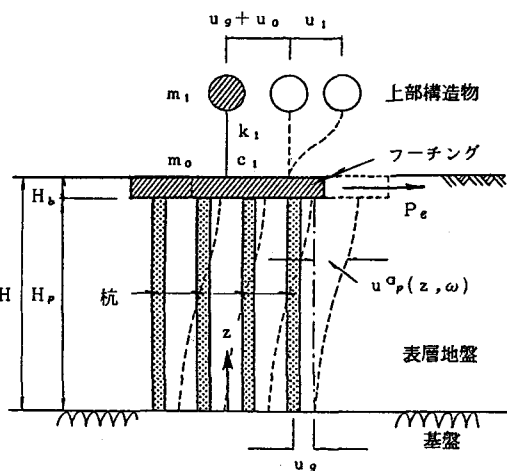


図1 群杭基礎構造物の地震応答

群杭基礎の杭頭部の水平変位 $u_p(H_p, \omega)$ とフーチングの水平変位の連続条件から、次式が成り立つ。

$$u_o = u_p(H_p, \omega) \quad (5)$$

(5)式と上部工の系に関する振動方程式、

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_o) \quad (6)$$

を連立させて解くことにより、 u_1 および u_o は基盤水平変位 u_g の関数として以下のように得られる。

$$u_1 = \frac{1 + \{B_1(H_p, \omega) - B_2(H_p, \omega)\} + G^{**}(H_p, \omega)}{-A(H_p, \omega) + \Omega_1 B_1(H_p, \omega)} u_g \quad (7)$$

$$u_o = \frac{A(H_p, \omega) + \Omega_1 \{1 - B_2(H_p, \omega) + G^{**}(H_p, \omega)\}}{-A(H_p, \omega) + \Omega_1 B_1(H_p, \omega)} u_g \quad (8)$$

ここに、 k_1 および c_1 は上部工のばね定数および減衰係数であり、 $\Omega_1 = -1 + i 2 h_1(\omega/\omega_1) + (\omega/\omega_1)$ 、 $\omega_1^2 = k_1/m_1$ 、 $2 h_1 \omega_1 = c_1/m_1$ である。また、(7)式および(8)式における $A(H_p, \omega)$ 、 $B_1(H_p, \omega)$ 、 $B_2(H_p, \omega)$ は、次式のように与えられる。

$$A(H_p, \omega) = (k_1 + i c_1) F^{**}(H_p, \omega)$$

$$B_1(H_p, \omega) = 1 - F^{**}(H_p, \omega)(\omega^2 m_o + P_1) \quad (9)$$

$$B_2(H_p, \omega) = 1 - F^{**}(H_p, \omega)(\omega^2 m_o + P_2)$$

群杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトルは、(7)式および(8)式において上部工の固有周期 $T_1 = 2\pi\sqrt{m_1/k_1}$ をパラメータとして、最大絶対加速度応答 $|\ddot{u}_1 + \ddot{u}_o + \ddot{u}_g|_{\max}$ を計算することによって求めることができる。

3. 杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル

杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトルの数値解析例について示す。数値解析の対象とした杭基礎は、図2に示すような9本(3列×3列)、16本(4列×4列)、36本(6列×6列)および64本(8列×8列)の4種類の杭基礎であり、いずれも杭径 $\phi = 600\text{mm}$ 、肉厚 $t = 9\text{mm}$ の鋼管杭である。杭間距離 L はすべて 2.5ϕ とし、フーチングの根入れ厚は $H_b = 0\text{m}$ 、杭長は $H_p = 20\text{m}$ (=表層厚 H) とした。また、上部工およびフーチングの質量は、 $m_1 = 205\text{tf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ 、 $m_o = 83\text{tf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ とした。

地盤の1次固有周期 T_a が0.5秒と1.0秒の場合に関して、基盤からの入力最大加速度を100ガルとしたEL-CENTRO波のNS成分入力および十勝沖地震八戸記録のEW成分入力による解析結果を図3と図4に示した。図3および図4の各図において、杭基礎を有しない場合、つまり自然地盤の状態での地表部の加速度応答波形に基づく加速度応答スペクトルが、比較のために破線で示してある。

これより、地盤の1次固有周期 T_a より長い周期領域では、杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した場合の加速度応答スペクトルと自然地盤に対する計算から求まる加速度応答スペクトルは一致するが、1次固有

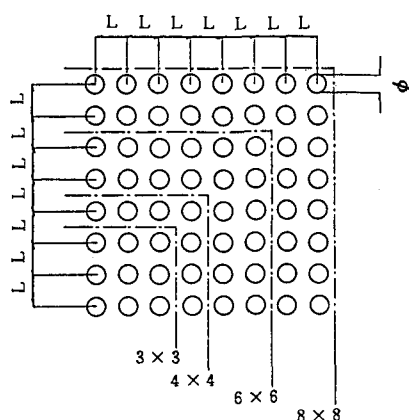


図2 群杭基礎の杭配置

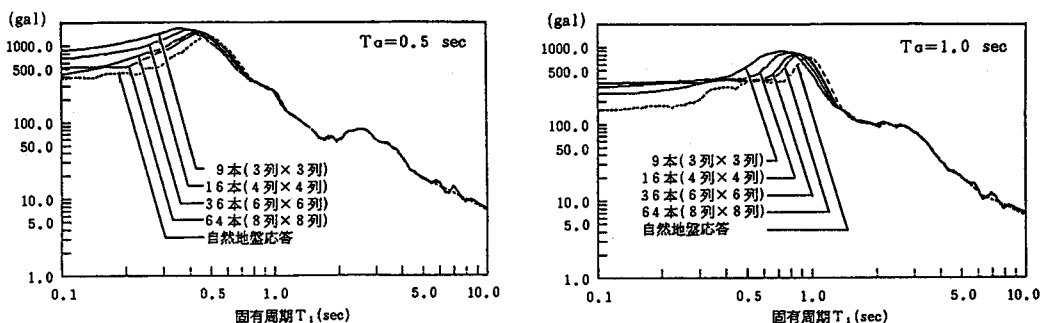


図3 EL-CENTRO波NS成分100ガル入力に対する動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル

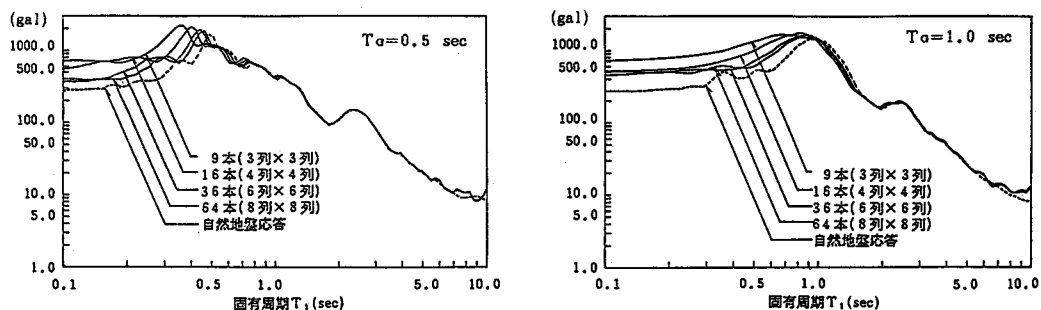


図4 十勝沖地震八戸記録EW成分100ガル入力に対する動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル

周期 T_a より短い周期領域では、杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した場合の方が大きな応答値を与える結果になることが分かる。また、杭本数 N が少ないほど加速度応答スペクトルのピークは短周期側に移行することが分かる。このことは上部工が杭基礎および地盤と連成系を成すことによって、上部工の固有周期が伸びることに起因していると考えられる。その理由を以下に解説する。

図3および図4における自然地震に対する加速度応答スペクトルとは、自然地震地表面部での加速度応答に基づいて計算した加速度応答スペクトルである。つまり、この計算結果は下端を完全固定とした1質点ばね系モデル(1次固有周期 $=T_1$)に地盤地表面部の加速度応答を入力して得られたものであり、この場合1質点ばね系モデルと地盤は連成系を成さず、上部工の固有周期 T_1 に伸びは発生しない。

一方、杭本数 N が9本から64本の群杭基礎モデルでは、1質点ばね系モデルの上部工と群杭基礎・地盤系は連成系を成しており、上部工モデルの固有周期 T_1 が連成系を成すことにより、固有周期が T_1 から $T_1 + \Delta T_N$ に伸びたモデルになっている。杭本数 N が少ないほど ΔT_N は大きくなり、このことが図3および図4に示すように杭本数 N が少ないほど加速度応答スペクトルのピークを短周期側に移行させた原因になっている。

図5はフーチングの根入れ厚 H_b が群杭基礎構造物の加速度応答スペクトルに及ぼす影響について調べたものである。地盤の固有周期 $T_a=1.0$ 秒、杭本数 $N=16$ 本(4列×4列)とした場合に関して、フーチングの根入れ厚 H_b を0 m、2 m、4 mと変化させて計算した。入力地震波は図3および図4の場合と同様、EL-CENTRO波NS成分と十勝沖地震八戸記録EW成分であり、入力最大加速度は100ガルである。これより、フーチングの根入れ厚 H_b が大きくなると、加速度応答スペクトルのピークが短周期側に移行する割合が小

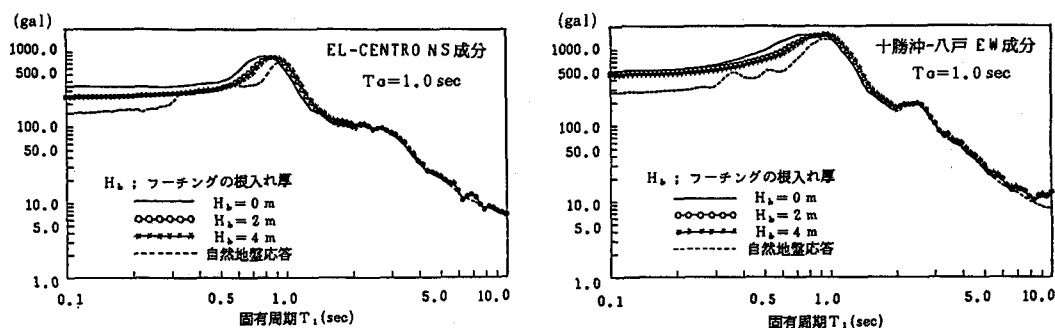


図5 加速度応答スペクトルに及ぼすフーチングの根入れの影響

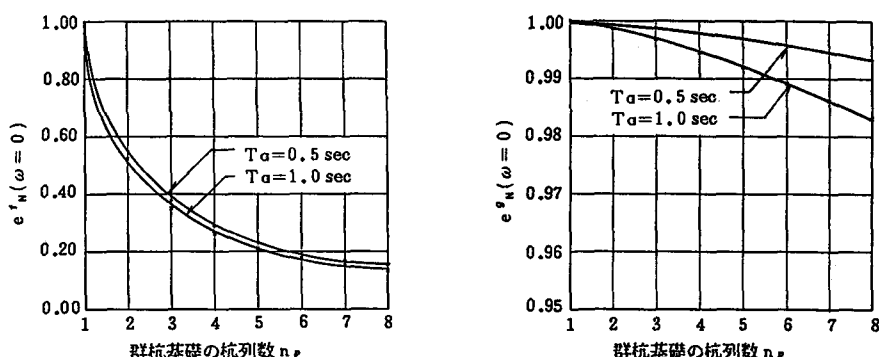


図6 静的群杭効率 $e'_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$

さくなる傾向にあることが分かる。このことは、杭基礎・地盤系の剛性が増加するためと考えられる。

なお、図3から図5の解析において、群杭効率 $e'_N(\omega)$ および $e^g_N(\omega)$ はいずれも静的な値⁽⁴⁾⁽⁵⁾、つまり $e'_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$ を用いた。図6は参考のために、地盤の1次固有周期 T_a が0.5秒と1.0秒の場合について、杭列数 n_p (杭本数 $N = n_p \times n_p$) に対する $e'_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$ の変化特性について示したものである。これより、杭列数 n_p が増加すると、 $e'_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$ の値が小さくなることが分かる。

4. あとがき

杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮することによって加速度応答スペクトルのピークは、動的相互作用を考慮しない場合の加速度応答スペクトルのピークより短周期側に移行するという結果が得られた。このことは今後の杭基礎構造物の耐震設計法を考える上での重要な検討事項の一つであると考えられる。

5. 参考文献

- (1) 大平、田蔵、中松、清水：軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究、1-4、土木学会論文集、第362号、1985年10月。
- (2) Tazoh, T., Shimizu, K., and Wakahara, T.: Seismic Observations and Analysis of Grouped Piles, Proc. of the Symposium on Dynamic Response of Pile Foundations: Experiment, Observation and Analysis, ASCE, April, 1987.
- (3) 飯場：構造物-杭-地盤連成系モデルの設定、日本建築学会東海支部報告集、1984年2月。
- (4) 小坪、高西、鳥野、園田：多柱基礎の荷重分担率と群杭効果、土木学会論文報告集、第312号、1981年12月。
- (5) 若原、大平、小坪、高西、鳥野：地盤変形による群杭効率の解析的研究、九州大学工学集報、1985年6月。