

群杭基礎の有効入力動と動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトルに関する研究

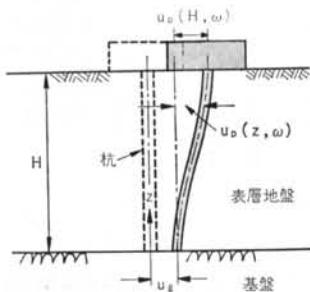
田 蔵 隆
(技術研究所)
若 原 敏 裕
(技術研究所)
清 水 勝 美
(技術研究所)
松 崎 雅 彦
(九州支店)

§ 1. はじめに

基礎・地盤・構造物系の動的相互作用は、基礎・地盤系の地盤震動に伴う相互作用と、構造物が振動することによって発生する慣性力による相互作用に分けて考えることができる。動的サブストラクチャー法の研究分野では、前者を Kinematic Interaction と称し、後者を Inertial Interaction と呼んでおり¹⁾²⁾、全体系の応答は両者の相互作用による応答の和として与えられる。

Kinematic Interaction による地震動は、一般に有効入力動あるいは有効地震動³⁾と称されており、無質量の基礎・構造物系を考えた場合の地盤震動に伴う基礎の地震応答として定義される。群杭基礎の有効入力動は、各杭の杭頭が無質量のフーチングに剛結されている状態における、地盤震動に伴う杭頭部の地震応答として表わされる。この地震応答が杭頭インピーダンスを介して構造物に入力され、動的相互作用を考慮した地震応答が最終的に得られることになる。

ところで、現行の耐震設計法では構造物に対する入力地震動として、自然地盤地表部で得られた地震記録が用いられている。しかし、基礎を有した構造物に入力される地震動は、動的相互作用の影響によって自然地盤地表部の地震動とは当然異なったものになっているはずであり、正しくは有効入力動を構造物に対する入力地震動とする必要がある。



図一 杭基礎構造物の杭変位

本研究は群杭基礎構造物の合理的な耐震設計法の確立を目的として、群杭基礎の有効入力動について検討し、さらに群杭基礎・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について考察したものである。

まず、群杭基礎の有効入力動に関する理論的な定式化を行ない、それに基づく数値実験を試みた。次に、群杭基礎の有効入力動の検討を目的とした模型振動実験を行ない、地盤変形による群杭効率率が杭基礎の有効入力動に与える影響について検討した。また、道路橋橋脚に対する地震観測記録に基づき、群杭基礎の有効入力動に関する知見を述べた。さらに、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算定式を提示し、これに基づく数値解析結果から、構造物が群杭基礎・地盤系と連成系を成すことによる固有周期の伸びが、加速度応答スペクトルに及ぼす影響度に関して考察した。

§ 2. 群杭基礎の有効入力動

2.1 有効入力動の定式化

上部工が剛体である場合の杭基礎構造物(図一)の基礎に対する杭の相対水平変位 $u_p(z, \omega)$ は、田治見によって以下のように導かれている⁴⁾。

$$u_p(z, \omega) = V \cdot F^*(z, \omega) + u_g \cdot G^*(z, \omega) \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 z は杭先端から上方に定めた座標変数、 ω は加振円振動数、 $u_g = u_0 e^{i\omega t}$ は基礎水平変位、 $V = V_0 e^{i\omega t}$ は杭頭に作用する水平荷重、 $F^*(z, \omega)$ は杭頭水平荷重に対する杭・地盤系の複素剛性の逆数、 $G^*(z, \omega)$ は地盤のせん断振動による基礎変位 u_0 に対する杭の相対変位の増幅係数であり、

$$F^*(z, \omega) = \frac{1}{EI} \left(\frac{2H}{\pi} \right)^4 \frac{2}{H} F(z, \omega) \quad \dots\dots(2)$$

$$G^*(z, \omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 G(z, \omega) \quad \dots\dots(3)$$

である。ここに、 EI は杭の曲げ剛性、 H は地盤表層厚、

ω_0 は地盤の1次固有円振動数であり、

$$F(z, \omega) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^4 - \alpha(\rho_p/\rho)(\omega/\omega_0)^2 + \alpha\xi_n^2\Omega_n} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad \dots\dots(4)$$

$$G(z, \omega) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha\{\Omega_n + (\rho_p/\rho)\}(4/n\pi)}{n^4 - \alpha(\rho_p/\rho)(\omega/\omega_0)^2 + \alpha\xi_n^2\Omega_n} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad \dots\dots(5)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} \Omega_n &= \frac{K_1(\eta_{ln}) + K_1(\eta_{tn})\xi_n}{K_1(\eta_{ln}) + \eta_{tn}K_0(\eta_{tn}) - K_1(\eta_{tn})\xi_n} \\ \xi_n^2 &= n^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + i2h_0n^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \\ \xi_n &= \frac{2K_1(\eta_{ln}) + \eta_{tn}K_0(\eta_{tn})}{2K_1(\eta_{tn}) + \eta_{tn}K_0(\eta_{tn})} \\ \eta_{ln} &= \xi_n\omega_0 a/V_p, \quad \eta_{tn} = \xi_n\omega_0 a/V_s \\ a &= \frac{\mu\pi}{EI} \left(\frac{2H}{\pi}\right)^4 \left(\frac{\pi a}{2H}\right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

である。さらに、 a は杭の半径、 ρ は地盤密度、 μ は地盤のせん断弾性係数、 h_0 は地盤の減衰定数、 ρ_p は内実断面に換算した杭の単位体積質量、 V_p 、 V_s はそれぞれ地盤のP波速度、S波速度である。また、 $K_0(\)$ 、 $K_1(\)$ はそれぞれ第2種0次、1次の変形ベッセル関数である。

杭基礎の有効入力動 $u_{p_0}^{eff}(H, \omega)$ は、式(1)において $z=H$ としたときの右辺第2項で与えられる。すなわち、
 $u_{p_0}^{eff}(H, \omega) = u_0 \cdot G^*(H, \omega) \quad \dots\dots(7)$

であり、これは杭頭が無質量のフーチングに剛結されている杭基礎の地盤のせん断振動によって生じる杭頭変位を表わしている。

図-2に示すような群杭基礎の地震時応答解 $u_p^G(H, \omega)$ は、次式のように定義できる³⁾。

$$u_p^G(H, \omega) = V \cdot F^{G*}(H, \omega) + u_0 \cdot G^{G*}(H, \omega) \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 $F^{G*}(H, \omega)$ および $G^*(H, \omega)$ は、

$$F^{G*}(H, \omega) = F^*(H, \omega) / (e^{f_N(\omega)} \cdot N) \quad \dots\dots(9)$$

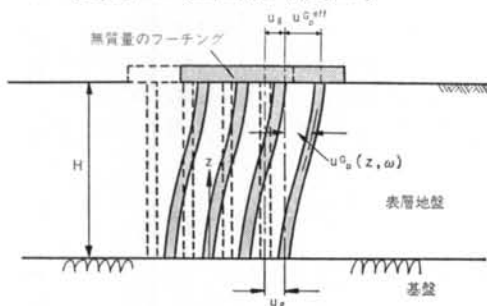


図-2 群杭基礎の有効入力動

$$G^{G*}(H, \omega) = e^{f_N(\omega)} \cdot G^*(H, \omega) \quad \dots\dots(10)$$

であり、 $e^{f_N(\omega)}$ 、 $e^{g_N(\omega)}$ はそれぞれ杭頭水平定常加振による群杭効率、地盤変形による群杭効率であり、また N は杭本数である。式(8)より、群杭基礎の有効入力動 $u_{p_0}^{eff}(H, \omega)$ は以下のように定義できる⁷⁾。

$$u_{p_0}^{eff}(H, \omega) = u_0 \cdot e^{g_N(\omega)} \cdot G^*(H, \omega) \quad \dots\dots(11)$$

2.2 フーチングの根入れを考慮した場合の有効入力動⁹⁾

図-3に示すように、フーチングが地盤中に根入れされている場合について考える。いま、杭長およびフーチングの根入れ厚を H_p 、 H_b とし、フーチング側面に作用する土圧力を P_e と書くことにすると、フーチングが地盤中に根入れされている場合の群杭基礎の有効入力動 $u_{p_0}^{eff}(H_p, \omega)$ は以下のように定義できる。

$$u_{p_0}^{eff}(H_p, \omega) = P_e \cdot F^{G*}(H_p, \omega) + u_0 \cdot G^{G*}(H_p, \omega) \quad \dots\dots(12)$$

ただし、式(12)中の $F^{G*}(H_p, \omega)$ および $G^{G*}(H_p, \omega)$ は、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³⁾⁶⁾。

なお、土圧力 P_e は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 で積分した合力により、次式のように求められる⁹⁾。

$$P_e = P_1 \cdot u_{p_0}^{eff}(H_p, \omega) + P_2 \cdot u_0 \quad \dots\dots(13)$$

ここに、 P_1 および P_2 は、

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= -\rho\pi b^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \xi_n^2 \omega_0^2 \Omega_n^b \frac{8H}{(n\pi)^2} \cdot \cos \left\{ \frac{n\pi(H-H_b)}{2H} \right\} e^{i\omega t} \\ P_2 &= \rho\pi b^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \xi_n^2 \omega_0^2 \Omega_n^b \frac{8H}{(n\pi)^2} \cdot \cos \left\{ \frac{n\pi(H-H_b)}{2H} \right\} \frac{1}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

である。ここに、 b はフーチングの等価半径であり、

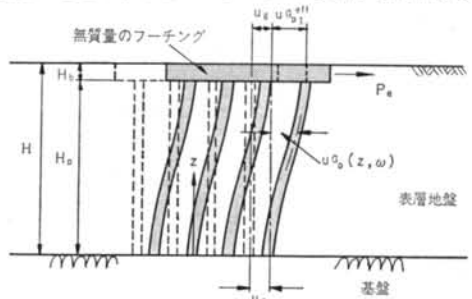


図-3 フーチングの根入れを考慮した場合の群杭基礎の有効入力動

Ω_n^b は式(6)で示した Ω_n の定義式において、杭の半径 a をフーチングの半径 b に置き換えたものに対応している。

ところで、式(13)における右辺第1項はフーチングの相対水平変位に比例する土圧力を表わし、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意味している。

式(12)と式(13)の関係から、フーチングが根入れされている場合の群杭基礎の有効入力動 $u_{p_i}^{G,eff}(H_p, \omega)$ は次式のように書ける。

$$u_{p_i}^{G,eff}(H_p, \omega) = \frac{F^{G*}(H_p, \omega) \cdot P_2 + G^{G*}(H_p, \omega) u_g}{1 - F^{G*}(H_p, \omega) \cdot P_1} u_g \quad \dots\dots(15)$$

2.3 数値解析例

本研究では、自然地盤地表部の加速度応答に対する群杭基礎の有効入力動（ここでは、加速度応答により定義した）の比を杭基礎の有効入力動係数 $\eta(\omega)$ と称することにし、これを以下のように定義する。

$$\eta(\omega) = \left| \frac{u_{p_i}^{G,eff}(H_p, \omega) + 1}{\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2 \left\{ \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{1}{\xi_n^2} \right\} + 1} \right| \quad (16)$$

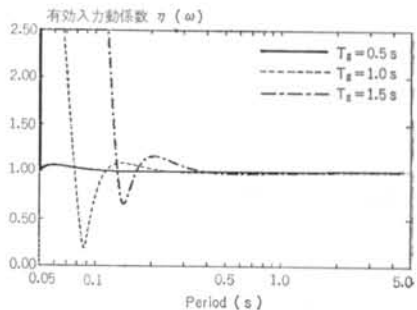
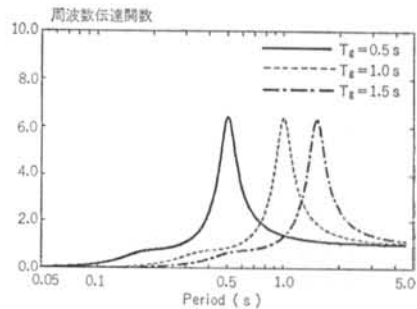
式(16)において、 $\eta(\omega)$ が1.0であれば群杭基礎の有効入力動が自然地盤地表部と同じ加速度応答を示すことを意味し、 $\eta(\omega)$ が1.0より大きい場合は、有効入力動が自然地盤地表部の応答より大きくなることを表わしている。

数値解析例として、地盤の1次固有周期 T_g と杭本数 N をパラメータとした場合の解析結果について示す。図一4および図一5は、それぞれ16本杭モデル（4列×4列）、64本杭モデル（8列×8列）に対する有効入力動係数 $\eta(\omega)$ であり、 T_g を0.5秒、1.0秒、1.5秒としたものである。また、杭配置は正方配列とし、杭径 $\phi=600$ mm、肉厚 $t=9$ mm、フーチングの根入れ厚 $H_b=0$ m、杭長 $H_p=20$ m（=表層厚 H ）、杭間隔はすべて $2.5\phi(=1.5$ m)とした。地盤変形による群杭効率 $e^{qN}(\omega)$ に対しては、静的な群杭効率 $e^{qN}(\omega=0)$ を適用した¹⁰⁾。

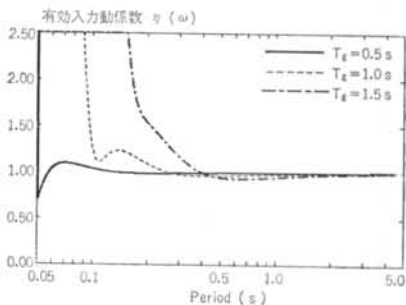
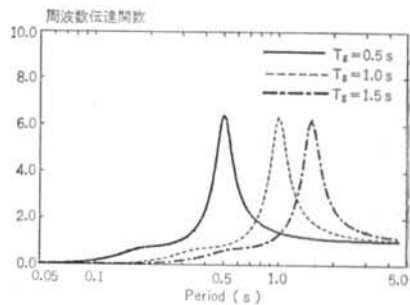
これより、地盤の固有周期 T_g が0.5秒の場合、図示した周期領域において $\eta(\omega)$ はほぼ1.0であり、有効入力動と自然地盤地表部の応答に大きな差は発生しないことが分かる。しかし、固有周期 T_g が1.0~1.5秒と地盤が軟弱になるに従い、短周期領域で $\eta(\omega)$ が1.0より小さくなる領域と $\eta(\omega)$ が1.0より大きくなる領域が現われる結果になっている。これは、杭部と地盤部の振動に位相のずれが生じるためである。

図一6は、フーチングの根入れが有効入力動に及ぼす

影響度について検討することを目的として、64本杭モデルの地盤の1次固有周期 T_g が1.0秒の場合に関して、 $H_b=4$ m、2m、0mとしたときの $\eta(\omega)$ を比較したも



図一4 16本杭（4列×4列）モデルの有効入力動の周波数伝達関数および有効入力動係数



図一5 64本杭（8列×8列）モデルの有効入力動の周波数伝達関数および有効入力動係数

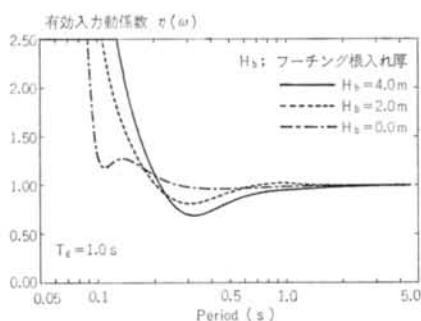


図-6 フーチングの根入れが有効入力動に及ぼす影響度
 のである。これより、地盤の固有周期 ($T_g=1.0$ s, T_{g1}
 $=0.33$ s, $T_{g2}=0.2$ s) に対応する周期領域を中心に、フ
 ーチングの根入れによる影響が発生していることが分か
 る。

2.4 模型振動実験¹¹⁾

群杭基礎の有効入力動の検討を目的とした模型振動実験を行なった。実験モデルならびに実験条件を図-7および表-1に示す。地盤材料としてはゼラチンを用い、杭はアクリルチューブとした。また、有効入力動に対する検討の条件として、杭頭が無質量のフーチングに剛結されている必要があることから、本実験では厚さ3mmのアクリル板によって各杭の杭頭部を剛結した。なお、地盤と振動箱の間には水を含んだウレタンホームを設置

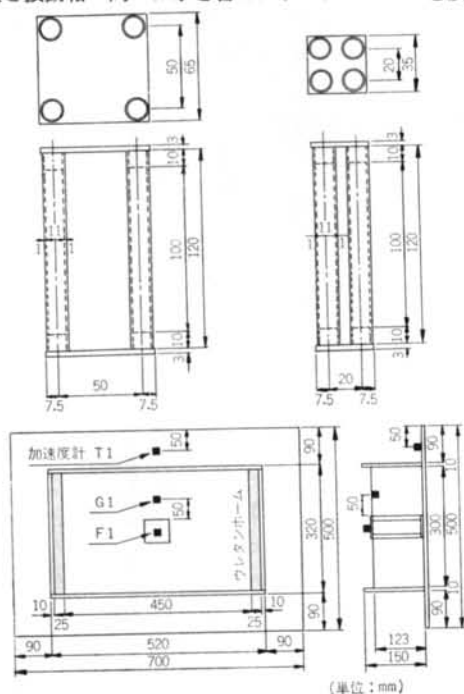


図-7 振動実験モデル

した。

杭の諸元は、外径 $\phi=13$ mm, 肉厚 $t=1$ mm, 杭長 $H_p=120$ mm, 曲げ剛性 $EI=5.04 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ である。杭本数は4本として、杭間隔を 50 mm ($=3.85\phi$: モデル1) とした場合と 20 mm (1.54ϕ : モデル2) の2つの群杭モデルを作製した。また、地盤はゼラチンの重量濃度を30% (せん断波速度 $V_s=4.6$ m/s, 地盤の1次固有周期 $T_g=0.11$ s: A地盤) とした場合と、ゼラチンの重量濃度を40% ($V_s=6.4$ m/s, $T_g=0.08$ s: B地盤) とした場合の2種類を作製した。

モデル1およびモデル2のA地盤に対する静的な地盤変形による群杭効率 $e_{N=4}^s(\omega=0)$ は、それぞれ $e_{N=4}^s=0.60$ および $e_{N=4}^s=0.42$ であり、B地盤に対する群杭効率は $e_{N=4}^s=0.63$ および $e_{N=4}^s=0.45$ である。

図-8は、モデル1およびモデル2のA地盤に対する実験結果であり、振動台からの入力加速度 (T1) に対する自然地盤地表部 (G1) および杭頭部 (F1) の加速度応答の周波数伝達関数について示したものである。モデル1とモデル2の実験結果を比較すると、両者ともに地盤の1次固有周期 $T_g=0.11$ s において伝達関数のピークが生じていることが分かる。ピーク値は杭間隔の狭いモデル2の方がモデル1より小さくなっており、ピーク値の両者の比は群杭効率 $e_{N=4}^s$ の比に対応している。

地盤変形による群杭効率 $e_{N=4}^s$ は杭間隔が狭くなるに従って小さくなり、式(1)から分かるように群杭効率 $e_{N=4}^s$ が小さくなると杭頭変位 (有効入力動) は小さくなる。すなわち、杭間隔が狭いほど地盤変形による杭・地盤系の見掛け上の剛性は大きくなることを示している。この傾向は、杭頭水平荷重による杭・地盤系の見掛け上の剛性を考えた場合とは逆の現象である。これは、式(9)および式(10)から分かるように、地盤震動による杭頭水平変位の増幅係数 $G^s(H_p, \omega)$ は $e_{N=4}^s(\omega)$ を乗ずることによって求められるのに対し、杭頭水平荷重に対する杭・地盤系の複素剛性の逆数 $F^s(H_p, \omega)$ の計算は、杭頭水平加振による群杭効率 $e_{N=4}^s(\omega)$ で除すことによって与えられ

	実験条件
杭の諸元 (アクリル チューブ)	$EI=5.04 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ $\phi=13$ mm $t=1$ mm $H_p=120$ mm
杭間隔	50mm (モデル1), 20mm (モデル2)
地盤定数	A地盤: $T_g=0.11$ s (30%) B地盤: $T_g=0.08$ s (40%) ()内はゼラチン重量濃度

表-1 実験条件

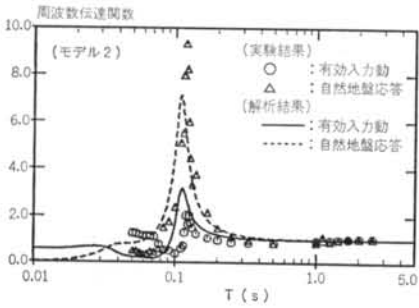
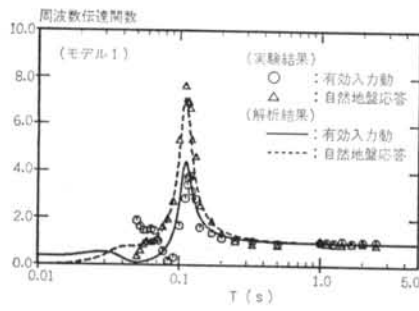


図-8 A地盤に対するモデル1およびモデル2の実験結果
(周波数伝達関数)

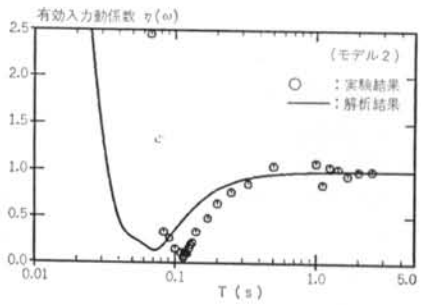
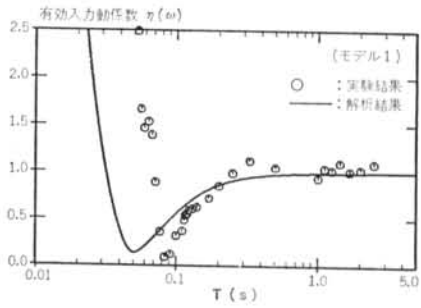


図-10 A地盤に対するモデル1およびモデル2の実験結果
(有効入力動係数)

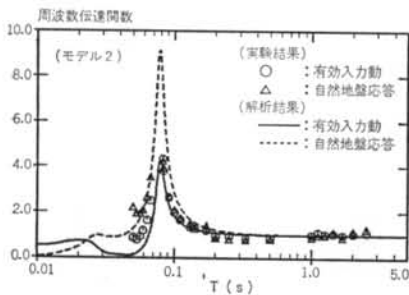
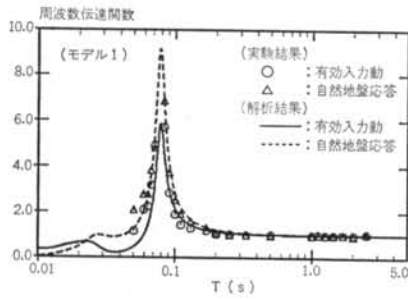


図-9 B地盤に対するモデル1およびモデル2の実験結果
(周波数伝達関数)

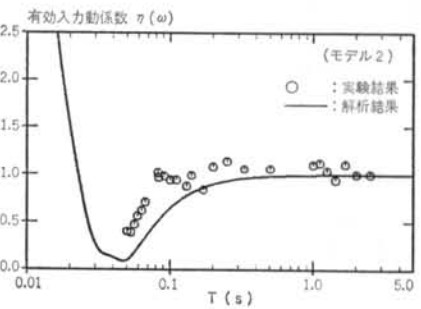
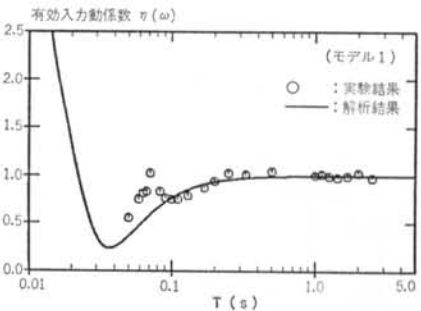


図-11 B地盤に対するモデル1およびモデル2の実験結果
(有効入力動係数)

るからである。

また、杭間隔が狭いほど地盤変形による群杭効率ηが小さくなり、杭・地盤系の見掛け上の剛性が大きくなるという現象は、杭の変形が地盤を変形させることになる杭頭水平荷重の場合とは逆に、地盤の変形が杭を変形させるという現象を考えることによって理解することができる。

図-8には、解析的に求めた入力加速度に対する自然地盤地表部の加速度応答と、杭頭部の加速度応答の周波数伝達関数（A地盤の減衰定数 $h_g=0.09$ ）を同時に示しているが、解析結果と実験結果の対応はきわめて良いものになっている。

図-9は、B地盤（ $h_g=0.07$ ）に対するモデル1およびモデル2の実験結果を示したものであるが、図-8のA地盤の場合と同様の考察が可能である。

図-10および図-11は、杭基礎の有効入力動係数 $\eta(\omega)$ についてそれぞれA地盤およびB地盤に対する実験結果を示したものであり、また式(1)により解析的に求めた有効入力動係数 $\eta(\omega)$ が図中に実線で示してある。

いずれの実験結果も、 $\eta(\omega)$ が短周期領域において1.0より大きくなっているが、これは杭部と地盤部の振動に位相のずれが生じるためであり、このような傾向は水野・飯場¹²⁾の実験結果からも確認されている。また、図-10および図-11における実験結果は、式(1)から求めた解析結果と良く一致していることが分かる。

2.5 地震観測記録に基づく有効入力動に関する考察⁵⁾

過去に実施した道路橋橋脚に対する地震観測記録に基づき、群杭基礎の有効入力動に関して考察した。地震観測を行なった橋脚の基礎は、8列×8列の群杭基礎である。図-12に、地震観測の対象とした橋脚の基礎ならびに加速度計の配置を示す。表層厚 H は22mであり、地盤のせん断型の1次固有周期 T_g は1.4秒である。なお、地震観測の詳細は参考文献5)、6)に譲る。

図-13は地震観測から得られた加速度記録に基づき、基盤 GB1 に対する自然地盤地表部 GS1（図中の破線）およびフーチング部 BS1（図中の実線）の平均周波数伝達関数について示したものである。また、図-14は図-13の平均周波数伝達関数の両者の比をとり、式(1)で定義される有効入力動係数 $\eta(\omega)$ との比較を行なったものである。なお、解析結果（破線）は $H_b=2.0$ m として計算したものである。

先に述べたように、群杭基礎の有効入力動とは上部工が無く、無質量のフーチングに杭頭が剛結されている群杭基礎の杭頭部の応答であることから、図-14の観測記

録に基づく曲線（実線）は有効入力動係数 $\eta(\omega)$ の定義に完全に合致したものにはなっていない。しかし、本橋脚下端を完全固定としたときの1次固有周期 T_1 はおよそ0.5秒であり、0.5秒より長い周期領域では同位相で振動する上部工の慣性力によって、フーチング部の応答は有効入力動以上となっているはずである。とくに、地盤の1次固有周期 $T_g=1.4$ s 付近ではその影響は顕著であると考えられる。一方、0.5秒以下の短周期領域では上

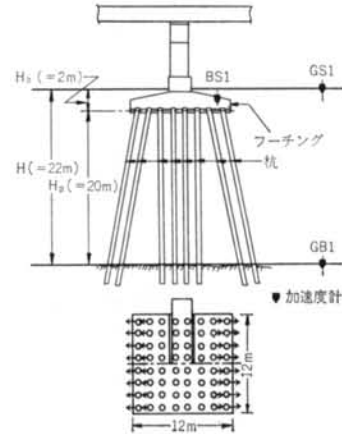


図-12 地震観測の対象とした道路橋橋脚基礎ならびに加速度計配置

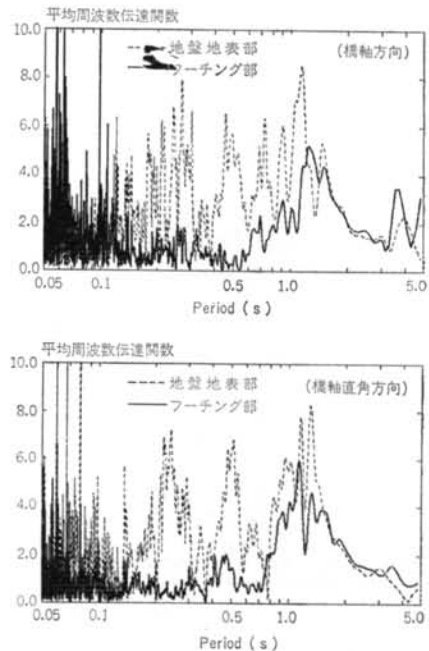


図-13 地震記録に基づく基礎に対する自然地盤地表部およびフーチング部の平均周波数伝達関数

部工の振動と有効入力動が逆位相となる状態が現われ、その周期領域でのフーチング部の応答は有効入力動以下になっていると考えられる。

図-14の観測記録に基づく曲線は、解析的に求めた有効入力動係数 $\eta(\omega)$ に対して上記の現象を反映したものになっていると見ることができ、群杭基礎の有効入力動が自然地盤の応答より小さくなる部分と大きくなる部分があり、実現象においても発生していると考えられる。

§ 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

3.1 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算定式⁷⁾¹³⁾

図-15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。この場合、杭頭に作用する水平外力 V は以下のように与えられる。

$$V = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) - m_0(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + P_e \quad \dots\dots(17)$$

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。

群杭基礎の杭頭部の水平変位 $u_p^G(H_p, \omega)$ とフーチン

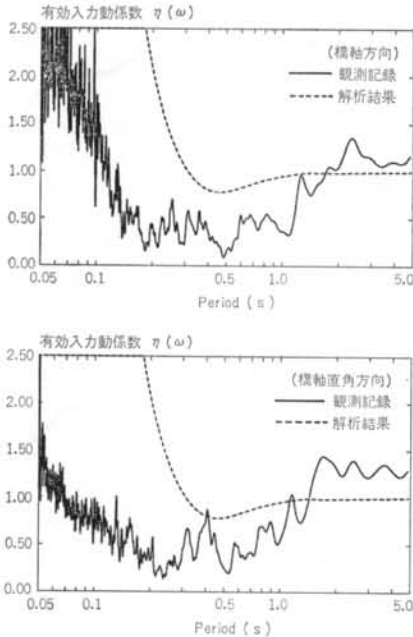


図-14 自然地盤地表部に対するフーチング部の平均周波数伝達関数

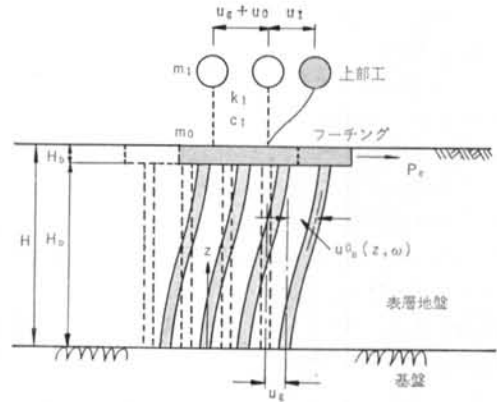


図-15 1質点ばね系の上部工を有する群杭基礎モデルの水平変位 u_0 の連続条件から、次式が成り立つ。

$$u_0 = u_p^G(H_p, \omega) \quad \dots\dots(18)$$

式(17)および式(18)を式(8)に代入し、これと以下に示す上部工の系に関する振動方程式

$$m_1\ddot{u}_1 + c_1\dot{u}_1 + k_1u_1 = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \quad \dots\dots(19)$$

を連立させて解くことにより、 u_1 および u_0 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。

$$u_1 = \frac{1 + \{B_1(H_p, \omega) - B_2(H_p, \omega)\} + G^{G*}(H_p, \omega)}{-A(H_p, \omega) + \Omega_1 B_1(H_p, \omega)} u_g \quad \dots\dots(20)$$

$$u_0 = \frac{A(H_p, \omega) + \Omega_1 \{1 - B_2(H_p, \omega) + G^{G*}(H_p, \omega)\}}{-A(H_p, \omega) + \Omega_1 B_1(H_p, \omega)} u_g \quad \dots\dots(21)$$

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、 $\Omega_1 = -1 + i2h_1(\omega_1/\omega) + (\omega_1/\omega)^2$ 、 $\omega_1^2 = k_1/m_1$ 、 $2h_1\omega_1 = c_1/m_1$ である。また、式(20)および式(21)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。

$$\left. \begin{aligned} A(H_p, \omega) &= (k_1 + i\omega c_1) F^{G*}(H_p, \omega) \\ B_1(H_p, \omega) &= 1 - F^{G*}(H_p, \omega)(\omega^2 m_0 + P_1) \\ B_2(H_p, \omega) &= 1 - F^{G*}(H_p, \omega)(\omega^2 m_0 + P_2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(22)$$

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、式(20)および式(21)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 $|\ddot{u}_0 + \ddot{u}_0 + \ddot{u}_1|_{\max}$ を計算することによって求めることができる。

3.2 数値解析例

数値解析の対象とした杭基礎は、図-16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、 $m_1=205\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 、 $m_0=83\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ とした。

地盤の1次固有周期 T_g 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 Gal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-17と図-18に示した。図-17および図-18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

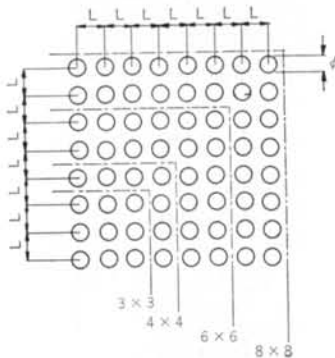


図-16 数値解析の対象とした群杭基礎モデルの杭配置

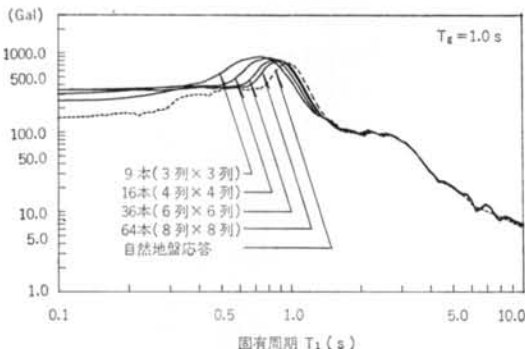
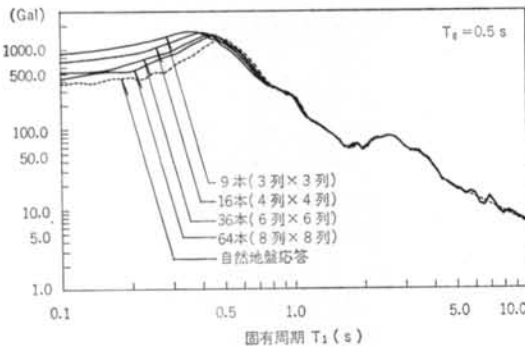


図-17 杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル(EL-CENTRO波NS成分, 100Gal入力)

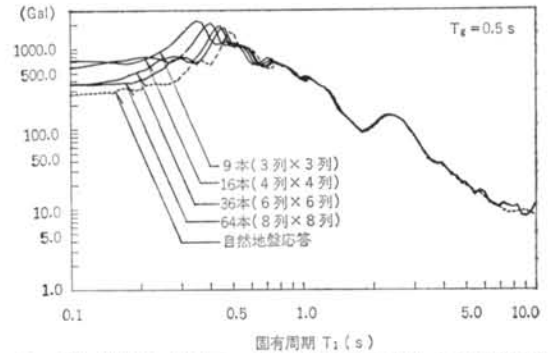
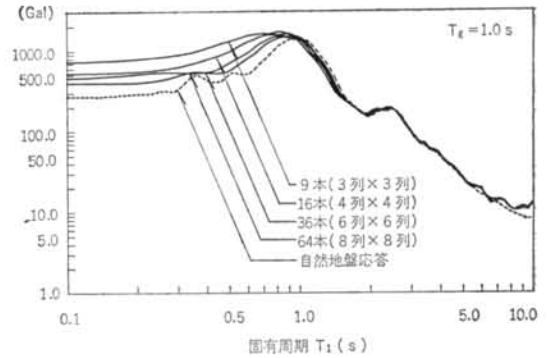


図-18 杭基礎・地盤系の動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル(十勝沖地震八戸記録EW成分, 100Gal入力)

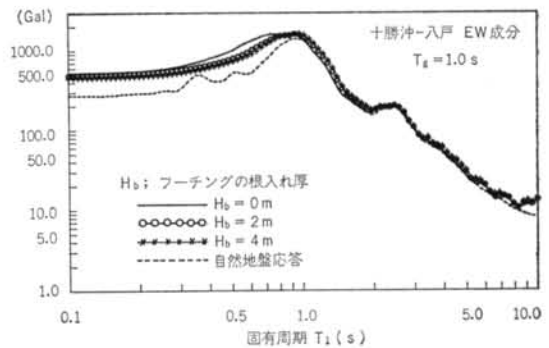
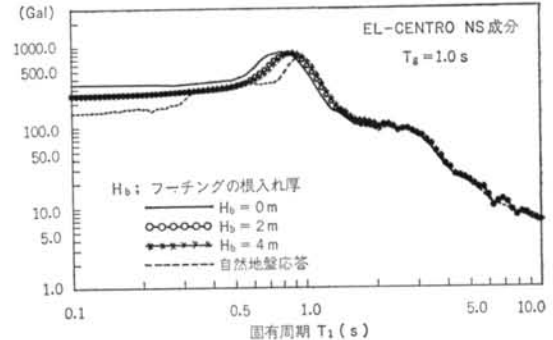


図-19 フーチングの根入れ厚が群杭基礎構造物の加速度応答スペクトルに及ぼす影響

に破線で示してある。

これより、地盤の1次固有周期 T_0 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次固有周期 T_0 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-17および図-18における自然地盤に対する加速度応答スペクトルとは、自然地盤地表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-17および図-18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-19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 $T_0 = 1.0$ s、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, 2, 4 mと変化させて計算した。入力地震波は、図-17および図-18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 Gal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さくなる傾向にあることが分かる。

なお、図-17から図-19の解析において、群杭効率 $e^f_N(\omega)$ および $e^g_N(\omega)$ はいずれも静的な値¹⁰⁾¹⁴⁾、つまり $e^f_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$ を用いた。図-20は、参考のために地盤の1次固有周期 T_0 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 $e^f_N(\omega=0)$ 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 $e^f_N(\omega=0)$ および $e^g_N(\omega=0)$ の値が小さくなることが分かる。

§ 4. おわりに

本研究によって得られた知見をまとめると、以下のようになる。

(1)短周期領域において、群杭基礎の有効入力動が自然地盤の応答より大きくなる部分が存在する。

(2)フーチングの根入れが群杭基礎の有効入力動に及ぼす影響は、地盤の固有周期に対応する部分において現われる。

(3)杭間隔を狭くすることにより群杭基礎の有効入力動の低減が図れるが、上部工からの慣性力による群杭基礎・地盤系の地震応答を考えた場合、杭間隔を広くする方が有利となり、両者の特性を考慮することによって最適な杭配置を決定する必要がある。

(4)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。

謝辞 2.4で示した群杭基礎の有効入力動のための模型

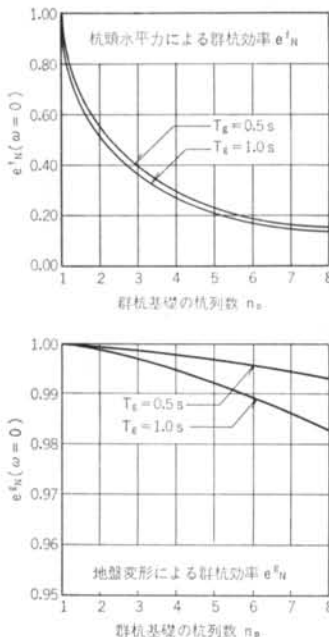


図-20 杭列数 n_p に対する群杭効率 $e^f_N(\omega=0)$ と $e^g_N(\omega=0)$ の変化

振動実験は、中央大学理工学部土木工学科鋼構造研究室において行なわれたものであり、実験を実施する上で中央大学 岡内功教授からご指導を賜った。また、筆者らは杭基礎構造物の地震時応答に関するこれまでの研究に

おいて、九州大学 小坪清真名誉教授、九州工業大学 高西照彦教授、岡山大学 竹宮宏和教授、九州大学 鳥野清助教授からご指導を賜っている。記して深謝の意を表わす次第である。

<参考文献>

- 1) J. P. Wolf: "Dynamic Soil-Structure Interaction" Prentice-Hall (1985)
- 2) 竹宮宏和: "地盤—基礎—上部構造物系の地震応答解析——動的サブ・ストラクチャー法の適用——" 土と基礎 第29巻, 第4号(1981年9月) pp. 27~34
- 3) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄: "有効地震動の計算式とその実測例による検討" 土木学会論文集 第362号(1985年10月) pp. 435~440
- 4) 田治見 宏: "深い基礎を有する構造物の地震時応答について" 第2回日本地震工学シンポジウム講演集(1966年10月) pp. 255~260
- 5) 大平 彰, 田藏 隆, 中松 新, 清水勝美: "軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究" 土木学会論文集 第362号(1985年10月) pp. 417~426
- 6) T. Tazoh, K. Shimizu & T. Wakahara: "Seismic Observations and Analysis of Grouped Piles (Proc. of Symposium on Dynamic Response of Pile Foundations)" ASCE Geotechnical Special Publication, No. 11 (April 1987) pp. 1~20
- 7) 田藏 隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦, 岡内 功: "群杭基礎構造物の有効入力動に関する研究" 第22回土質工学研究発表会発表講演集(1987年6月) pp. 829~832
- 8) 田藏 隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦, 岡内 功: "群杭基礎の有効入力動に関する研究" 第19回地震工学研究発表会講演概要(1987年7月) pp. 269~272
- 9) 飯場正紀: "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研究報告集(1984年2月) pp. 61~64
- 10) 若原敏裕, 小坪清真, 高西照彦, 鳥野 清: "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 第58巻, 第3号(1985年6月) pp. 199~205
- 11) 田藏 隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦, 岡内 功: "杭基礎構造物の有効入力動に関する 模型振動実験(その1), (その2)" 第14回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集(1987年4月) pp. 24~27
- 12) 水野二十一, 飯場正紀: "建物—杭—地盤系の動的相互作用に関する 実験的研究" 第7回日本地震工学シンポジウム講演集(1986年12月) pp. 853~858
- 13) 田藏 隆, 若原敏裕, 清水勝美, 松崎雅彦: "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" 第19回地震工学研究発表会講演概要(1987年7月) pp. 273~276
- 14) 小坪清真, 高西照彦, 鳥野 清, 岡田敏矢: "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8月) pp. 15~26