

## (68) 群杭基礎の有効入力動に関する研究

清水建設(株) (正員) 田蔵 隆 (正員) 若原 敏裕  
(正員) 清水 勝美 (正員) 松崎 雅彦  
中央大学 (正員) 岡内 功

### 1. ま え が き

基礎を有する構造物の耐震性を論ずる上で、有効入力動に関する研究が重要な研究課題の一つとして指摘されている。本研究は群杭基礎の有効入力動に関して検討を行ったものである。まず、群杭基礎の有効入力動の理論的定式化を行い、それに基づく数値解析を試みた。次に、2種類の群杭基礎モデルに対して行った模型振動実験から、地盤変形による群杭効率群杭基礎の有効入力動に与える影響について考察した。さらに、群杭基礎の道路橋構脚に対して行った地震観測記録に基づく検討結果を示した。

### 2. 群杭基礎の有効入力動に関する理論的検討

図1に示すような群杭基礎モデルについて考える。表層地盤は均質一様な厚さHの弾性地盤であり、杭長ならびにフーチングの根入れ厚をそれぞれ $H_p$ および $H_b$ とした。この群杭基礎モデルの杭頭変位 $u_p^q(H_p, \omega)$ は、次式のように定義できる<sup>(1)(2)</sup>。

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

ここに、 $\omega$ 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。また、 $F^{q*}(H_p, \omega)$ および $G^{q*}(H_p, \omega)$ は、

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

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

である。上式において、 $F^{q*}(H_p, \omega)$ 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、 $G^{q*}(H_p, \omega)$ 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部の相対水平変位の増幅係数であり、 $e_N^q(\omega)$ は杭頭水平加振による群杭効率、 $e_N^g(\omega)$ は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。

群杭基礎の有効入力動 $u_{p0}^{qeff}(H_p, \omega)$ は、(1)式の右辺第2項で与えられる。つまり、

$$u_{p0}^{qeff}(H_p, \omega) = u_g \cdot e_N^g(\omega) \cdot G^*(H_p, \omega) \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。これは各杭の杭頭が無質量のフーチングに剛結されている群杭基礎において、地盤のせん断振動によって生じる杭頭変位を表している。

フーチングの側面に作用する土圧力 $P_e$ を考えた場合の群杭基礎の有効入力動 $u_{p1}^{qeff}(H_p, \omega)$ は、(1)式において $V$ を $P_e$ とすることによって、以下のように定義できる。

$$u_{p1}^{qeff} = P_e \cdot F^{q*}(H_p, \omega) + u_g \cdot G^{q*}(H_p, \omega) \quad \dots\dots\dots (4)$$

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埋設深さ $H_b$ で積分した合力により、次式のように求められる<sup>(3)</sup>。

$$P_e = P_1 u_{p1}^{qeff} + P_2 u_g \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式における右辺第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。 $P_1$ および $P_2$ の詳細は、参考文献(1)(2)に譲る。

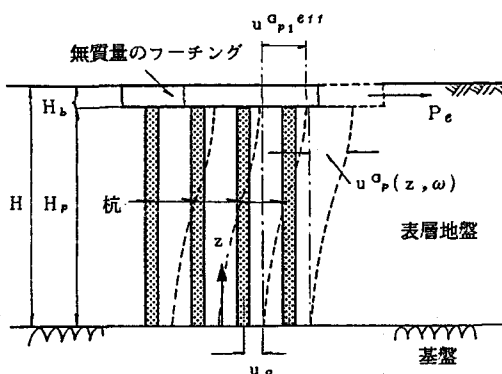


図1 群杭基礎の地震応答

(4)式と(5)式の関係から、根入れされたフーチングを有する群杭基礎の有効入力動 $u_{p1}^{eff}$ は、次式のように得られる。

$$u_{p1}^{eff} = [F^{Q*}(H_p, \omega) \cdot P_2 + G^{Q*}(H_p, \omega)] \cdot u_g / [1 - F^{Q*}(H_p, \omega) \cdot P_1] \quad (6)$$

### 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で定義した)の比を群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。

$$\eta(\omega) = | \{ u_{p1}^{eff} + 1 \} / [ (\omega/\omega_g)^2 \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \{ 4/(n\pi) \} (1/\xi_n^2) (-1)^{n-1} + 1 ] | \quad (7)$$

ここに、 $\xi_n = \sqrt{n^2 - (\omega/\omega_g)^2 + i 2 h_g n^2 (\omega/\omega_g)}$ 、 $i^2 = -1$ 、 $h_g$ は地盤の減衰定数である。 $\eta(\omega)$ 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している<sup>(4)</sup>。

数値解析例として、地盤の1次固有周期 $T_a$ 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2および図3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、 $T_a$ 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。群杭効率 $e_f^f(\omega)$ および $e_g^g(\omega)$ に対しては、静的な群杭効率、すなわち $\omega = 0$ の場合の値を適用した。

これより地盤の固有周期 $T_a$ 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 $T_a$ 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4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 $T_a$ が1.0秒の場合に関して、 $H_b = 4$ m、 $H_b = 2$ mおよび $H_b = 0$ mとしたときの $\eta(\omega)$ を比較したものである。これより地盤の固有周期( $T_{a1} = 1.0$ sec、 $T_{a2} = 0.33$ sec、 $T_{a3} = 0.2$ sec)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。

### 4. 模型振動実験<sup>(5)</sup>

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った。実験モデルおよび実験条件を図5および表1に示す。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性があることから、本実験では厚さ3mmの亚克力板によって各杭の杭頭部を剛結した。

杭本数は4本として、杭間隔が $3.85\phi$ (【モデル1】)と $1.54\phi$ (【モデル2】)の2種類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%( $V_s = 4.6$ m/s、 $T_g = 0.11$ 秒)として作製した。【モデル

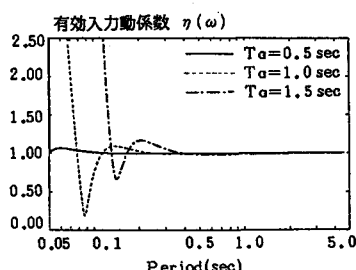


図2 群杭基礎(16本杭; 4列×4列)の有効入力動係数

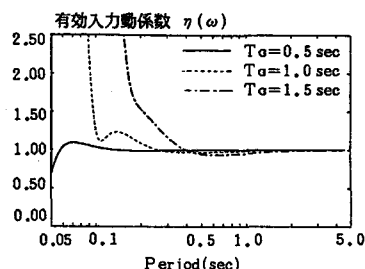


図3 群杭基礎(64本杭; 8列×8列)の有効入力動係数

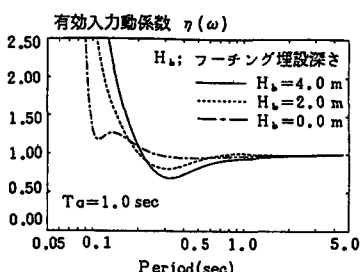
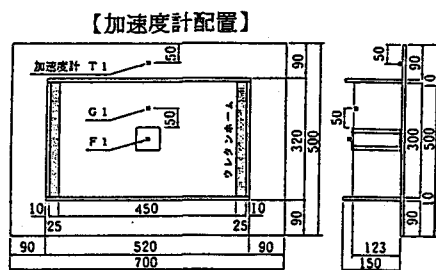


図4 フーチングの根入れが群杭基礎の有効入力動に及ぼす影響



(単位; mm)

図5 実験モデル

1]および【モデル2】に対する地盤変形による静的な群杭効率 $e'_{N=4}(\omega=0)$ は、それぞれ0.60および0.42である。

図6は【モデル1】および【モデル2】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、両者共に地盤の1次固有周期 $T_g=0.11$ 秒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地盤変形による群杭効率 $e'_{N=4}$ の比に対応している。

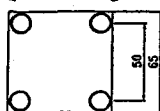
群杭効率 $e'_N$ は杭間隔が狭くなるに従って小さくなり、群杭効率 $e'_N$ が小さくなると杭頭変位(有効入力動)は小さくなる。すなわち、杭間隔が狭いほど地盤変形による杭・地盤系の見掛け上の剛性は大きくなることを示している。この傾向は杭頭水平荷重による杭・地盤系の見掛け上の剛性を考えた場合とは逆の現象である。これは(2)式から分かるように、地盤振動による杭頭水平変位の増幅係数 $G^{**}(H_p, \omega)$ は $e'_N(\omega)$ を乗ずることによって求められるのに対し、杭頭水平荷重に対する杭・地盤系の複素剛性の逆数 $F^{**}(H_p, \omega)$ の計算は、杭頭水平加振による群杭効率 $e'_N(\omega)$ で除すことによって与えられるからである。

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よう。

図6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と杭頭部の加速度応答の周波数伝達関数(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7は有効入力動係数 $\eta(\omega)$ に対する実験結果と解析結果について示したものである。なお、解析では $H_b=0$  mとした。【モデル1】および【モデル2】の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<sup>(6)</sup>の実験結果からも確認されている。また、図7の実験結果は解析結果と良く一致していることが分かる。

【モデル1】



【モデル2】

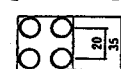


表1 実験条件

|                        | 実験条件                                                  |    |
|------------------------|-------------------------------------------------------|----|
| 杭の諸元<br>(アクリル<br>チューブ) | $EI = 5.04 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ |    |
|                        | $\phi = 13$                                           | mm |
|                        | $t = 1$                                               | mm |
|                        | $L = 120$                                             | mm |
| 杭間隔                    | 50 mm(モデル1), 20 mm(モデル2)                              |    |

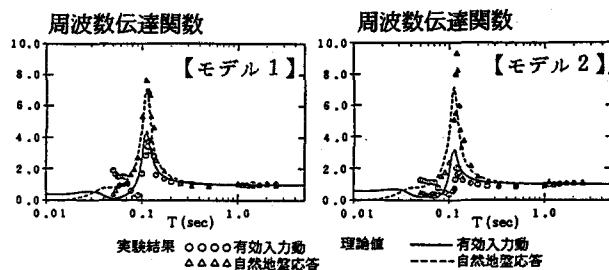


図6 【モデル1】および【モデル2】の実験結果 (周波数伝達関数)

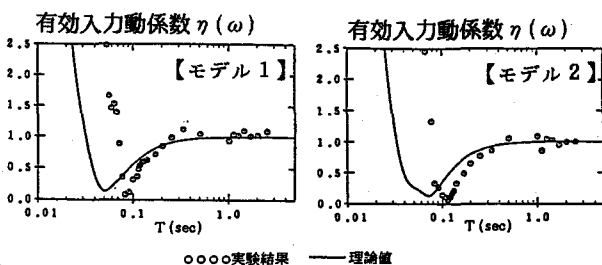


図7 【モデル1】および【モデル2】の実験結果 (有効入力動係数)

## 5. 地震観測記録に基づく群杭基礎の有効入力動に関する考察

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。地震観測の対象とした橋脚の基礎は8列×8列の群杭基礎である。表層厚Hは22mであり、地盤のせん断型の1次固有周期 $T_0$ は1.4秒である。なお、地震観測の詳細は参考文献(1)(2)に譲る。

図8は地震観測から得られた加速度記録に基づき、基盤に対する自然地盤地表部(図中破線)およびフーチング部(図中実線)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9は図8の平均周波数伝達関数の両者の比をとり、(7)式で定義される有効入力動係数 $\eta(\omega)$ との比較を行ったものである。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。

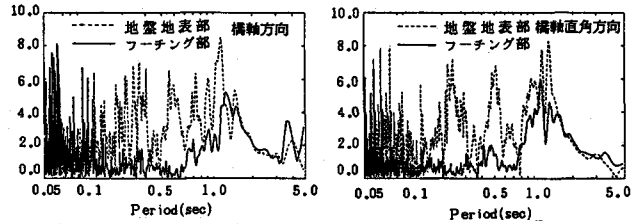


図8 地震観測記録による基盤に対する自然地盤地表部とフーチング部の平均周波数伝達関数

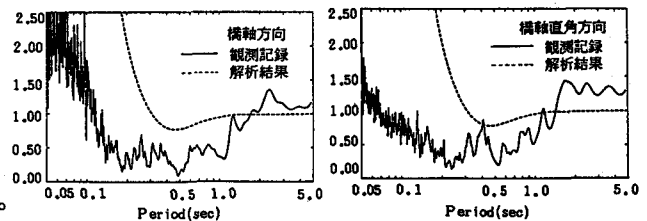


図9 自然地盤に対するフーチング部の周波数伝達関数

2. で述べたように、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天端の応答であることから、図9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。特に、地盤の1次固有周期 $T_0=1.4$ 秒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部工の振動と有効入力動が逆位相となる状態現れ、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9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実現象においても発生していると考えられる。

## 6. あとがき

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。

## 7. 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) 多賀、飯場：地震時の杭体の受ける変位・応力性状、第19回土質工学研究発表会、1984年6月。
- (4) 田蔵、若原、清水、松崎、岡内：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、1987年6月。
- (5) 田蔵、若原、清水、松崎、岡内：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、1987年4月。
- (6) 水野、飯場：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、1986年12月。