

地盤—杭基礎系の動的相互作用効果を考慮した ハイブリッド実験と地震観測事例の比較

土岐 憲三・佐藤 忠信・清野 純史
Nozar KISHI GARMROUDI・吉川 正昭

HYBRID EXPERIMENTS ON NONLINEAR SOIL-STRUCTURE INTER- ACTION OF SOIL-PILE SYSTEMS AND SEISMIC OBSERVATIONS

By *Kenzo TOKI, Tadanobu SATO, Junji KIYONO,*
Nozar KISHI GARMROUDI and Masaaki YOSHIKAWA

Synopsis

We developed an algorithm to study non-linear seismic soil-structure interaction through a hybrid procedure using pseudo-dynamic testing method which is modified to take into account frequency dependence and developed for foundation-soil systems. Four large scale pile foundations, 1-pile, 2-pile, 3-pile and 2-pile models, were used.

For piles and pile group design purposes, the system's responses in translation and rotation are considered to be independent of the axial deformations. In order to investigate and estimate this coupling and to study on the effect of increasing dead loading on the swaying-rocking response of piled foundations, the 3-pile group model was used. Four dead loadings of 10, 20, 30 and 40 ton were applied to increase the axial loads in the piles.

Some opportunities to observe seismic data for pile foundations were provided when earthquakes occurred at the site of experiments. The comparison between the computed and measured motions provided confidence in understanding the foundation mechanism and on the usefulness of the simplified modeling used.

1. ま え が き

特別な構造物や大規模なプロジェクトを除くほとんどの耐震設計では、まず基礎固定の仮定の下で上部構造物に作用する地震力を設定し、これに耐えうように上部構造物を設計する。そしてこの上部構造物より伝達される地震力と基礎自体に作用する地震力に周辺地盤が耐えられるように基礎を設計する。しかし、地震時における地盤—構造物系の動的相互作用では、地盤の揺れが構造物に影響し、さらにその構造物の運動自体が地盤の運動にも影響を及ぼすというフィードバック系が構成される。したがって、上部構造物の震動性状は基礎の震動特性の影響を強く受けるはずであり、基礎の震動により地震力エネルギーが消費されれば、上部構造物へ入力される地震動エネルギーは基礎を固定とした場合より小さく、それだけ上部構造物の強度を低減できる可能性が出てくる。また、構造物を取り巻く地盤は容易に非線形状態に入ることから、地盤を含めた構造系全体の終局状態を対象とする場合には、このような非線形性の把握も不

可欠である。こうした観点から、非線形挙動を考慮した上で地盤—基礎—上部構造物系の震動解析を実施して、構造物の変形能や耐震性能、あるいはエネルギーバランスに対する照査を行い、終局限界状態における信頼性を確認しておくことも要求されるようになってきている。

著者らは、この地盤—構造物系の非線形動的相互作用効果を考慮できるハイブリッド実験システム「HENESSI」(Hybrid Experiment on Nonlinear Earthquake-induced Soil-Structure Interaction)¹⁾²⁾³⁾を開発し、相互作用効果を把握して系を支配する復元力特性の数式モデルを提案するとともに、地盤—構造物系の耐震設計のための基礎資料を集積している。

ここでは、ハイブリッド実験に基づく1本杭、2本杭、3本杭、9本杭の4種類の杭基礎の地震時挙動の相互比較を行うとともに、3本杭を対象として上部構造物に重量を付加し、地盤—構造物系の非線形挙動や動的相互作用に及ぼす重量効果の影響を検討した。また、実験と並行して基礎及び周辺地盤では地震観測も行っているため、ハイブリッド実験と地震観測双方の入力波形と応答波形の比較も行った。

2. ハイブリッド実験の概要とシステムの構成

ここで開発した地盤—構造物系の非線形地震応答解析を行うためのシステムを示したものが Fig. 1 である。まず、主計算システムで試験体の予測応答変位を算出し、デジタルコントローラへこの計算変位を与える。デジタルコントローラは、アクチュエーターの変位指令—変位フィードバックの閉ループによる静的加力制御を行う。その後、2つのアクチュエーターの状態量(荷重、内部変位、外部変位)を読み取り、主計算システムでそれまでのステップのデータに基づいて次のステップの予測応答変位を計算する⁴⁾。この操作を繰り返す。

実際の地盤—構造物系の地震時応答は、非線形挙動を含めた動的相互作用の影響を内在しているわけであるが、ハイブリッド実験自体は仮動的(静的)であるので、周波数に依存した地盤の地下逸散減衰効果や付加質量効果はそのままの状態では取り入れることができない。したがって、非線形性と動的相互作用効果を分離し⁵⁾⁶⁾、相互作用効果をハイブリッド実験に取り入れるために、予め周波数に依存した複数剛性

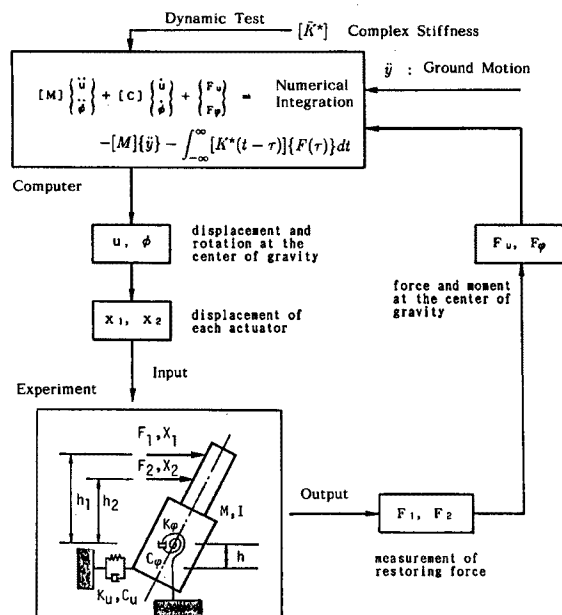


Fig. 1. Flow-chart of HENESSI.

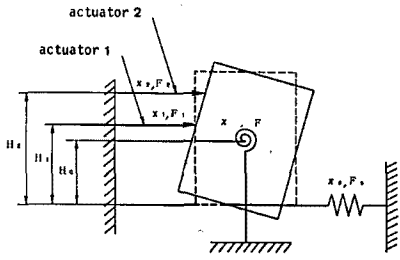


Fig. 2. Model of foundation.

に、振動数に依存するこれらのばねを静的実験の値と比較する目的で行った。これらの準備の下に、地震時の地盤—基礎構造物間の復元力特性や地盤の非線形特性が基礎の動特性に及ぼす影響を調べるためのハイブリッド実験を行った。ハイブリッド実験を行うに当たっては基礎のモデル化が必要であり、ここでは Fig. 2 に示すような剛体 2 自由度系の Sway-Rocking (SR) モデルを考えた。各実験手順の概略は以下の通りである。

系の静的な釣合方程式は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & -k_x(h_G - h_s) \\ -k_x(h_G - h_s) & k_\theta + k_x(h_G - h_s)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F, M はそれぞれ作用外力、重心まわりのモーメント、 x, θ はそれぞれ重心位置の水平変位量、重心まわりの回転角、 k_x, k_θ はそれぞれ水平ばね剛性、回転ばね剛性、そして、 h_G, h_s はそれぞれ重心までの高さおよび水平ばねの作用位置である。式(1) を解くことにより静的実験による剛性 k_x, k_θ が求まる。

次に、加振実験では、水平バネの作用位置をフーチング底面すると、重心に関する運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x & -c_x h_G \\ -c_x h_G & c_\theta + c_x h_G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & -k_x h_G \\ -k_x h_G & k_\theta + k_x h_G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ M(t) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここに c_x, c_θ はそれぞれ水平、回転の減衰係数である。試験体に作用する外力、モーメントは、加振振動数を ω 、水平力、モーメントの振幅をそれぞれ F, M とすると次式のように仮定できる。

$$F(t) = F \exp(i\omega t) \dots\dots\dots (3)$$

$$M(t) = M \exp(i\omega t) \dots\dots\dots (4)$$

したがって、応答の水平変位 x 、回転 θ は次式で表される。

$$x = X \exp\{i(\omega t - \phi_x)\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\theta = \Theta \exp\{i(\omega t - \phi_\theta)\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 X, Θ は水平変位及び回転角の振幅、 ϕ_x, ϕ_θ は応答の位相遅れである。

式(3), (4), (5), (6) を式(2) に代入して整理すると以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_0 + i\omega c_x + k_x & -(i\omega c_x + k_x) h_G \\ -(i\omega c_x + k_x) h_G & -\omega^2 I_0 + i\omega (c_\theta + c_x h_G^2) + (k_\theta + k_x h_G^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \exp(-i\phi_x) \\ \Theta \exp(-i\phi_\theta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

式(7) を解くことにより周波数に依存した $c_x, k_x, c_\theta, k_\theta$ を求めることができる。

ハイブリッド実験を行うにあたり、式(2)を一般化する。モデルの重心に関する運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx}(\omega) & c_{x\theta}(\omega) \\ c_{\theta x}(\omega) & c_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx}(\omega) & k_{x\theta}(\omega) \\ k_{\theta x}(\omega) & k_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} \dots (8)$$

ここに、 $c_{ij}(\omega)$, $k_{ij}(\omega)$ は周波数に依存した減衰と剛性である。この $c_{ij}(\omega)$, $k_{ij}(\omega)$ ($i, j=x, \theta$) を次式のように定数と ω に依存した項とに分解する。

$$c_{ij}(\omega) = c_{0ij} + c_{\omega ij} \dots (9)$$

$$k_{ij}(\omega) = k_{0ij} + k_{\omega ij} \dots (10)$$

式(9), (10)を式(8)に代入し、フーリエ変換を行って整理すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} c_{0xx} & c_{0x\theta} \\ c_{0\theta x} & c_{0\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{0xx} & k_{0x\theta} \\ k_{0\theta x} & k_{0\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y \\ \Phi \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{\omega xx} + i\omega c_{\omega xx} & k_{\omega x\theta} + i\omega c_{\omega x\theta} \\ k_{\omega \theta x} + i\omega c_{\omega \theta x} & k_{\omega \theta\theta} + i\omega c_{\omega \theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} \dots (11) \end{aligned}$$

ここで上式右辺の複素剛性項の実部と虚部を Hilbert 変換で結び付け、フーリエ逆変換を行う。ただし、簡単のため質量マトリクスを $[M]$ 、減衰マトリクスおよび剛性マトリクスの定数項をそれぞれ $[C_0]$, $[K_0]$ 、復元力を $\{F\}$ 、右辺の複素剛性項のフーリエ逆変換を $[\bar{K}^*]$ 、応答変位と入力項のベクトルをそれぞれ $\{x\}$, $\{y\}$ と置き直す。

$$[M] \{x\} + [C_0] \{x\} + \{F\} = - [M] \{y\} - \int_{-\infty}^{\infty} [\bar{K}^*(t-\tau)] \{F(\tau)\} dt \dots (12)$$

ただし、

$$\{F\} = [K_0] \{x\} \dots (13)$$

$$[\bar{K}^*] = [\bar{K}^*] [K_0]^{-1} \dots (14)$$

この $\{F\}$ の項を実験から取り入れて式(12)を計算機内で解き、再び実験にフィードバックする。この一連のステップを繰り返すことによって文字どおり計算機とアクチュエータをオンラインで組み合わせたハイブリッド実験が行われる。

3. 実験結果

3.1 杭本数の効果

Fig. 3 は、1, 2, 3, 9本杭の設置状況、寸法形状を示したものである。ただし、1本杭と3本杭は場所を共有させるために、1本杭の実験終了後、杭本数を増やして3本杭としている。杭基礎の諸元を Table 1 に示す。Fig. 4 は、各杭基礎の復元力特性の各载荷段階における最大点剛性を杭一本当りに換算して示したものである。(a) は並進、(b) は回転を示す。□, ○, △, +印がそれぞれ1, 2, 3, 9本杭に対応している。実線はこれらの傾向を見るために引いたものである。

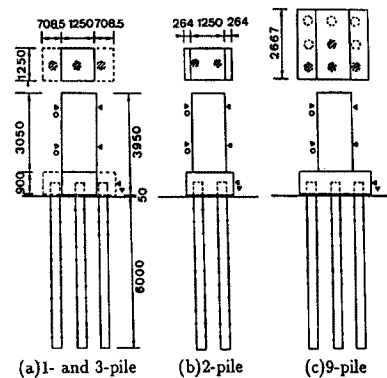


Fig. 3. Test set-up (1-, 2-, 3- and 9-pile)

Table 1. Parameters of pile foundations

	1 pile	2 pile	3 piles	9 piles
upper acuator (cm)	340	340	340	340
lower acuator (cm)	190	190	190	190
center of gravity (cm)	197.5	184.1	166.2	166.2
mass (tonf · s ² /cm)	0.0151	0.0166	0.0190	0.0406
moment of inertia (tonf · cm · s ²)	215.4	256.9	329.5	704.7

*Unit weight of reinforced concrete=2.4tonf/m³
 *Height is measured from ground surface

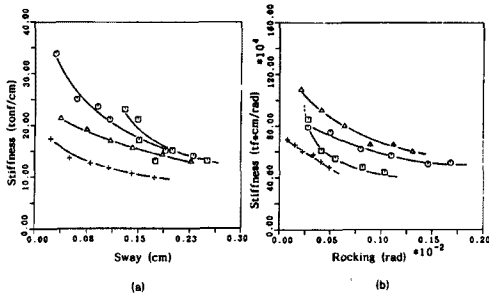


Fig. 4. Static secant stiffness.

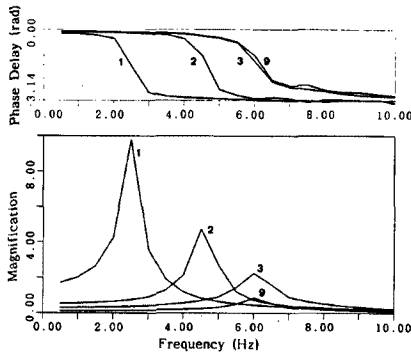


Fig. 5. Dynamic test results (phase and response curves)

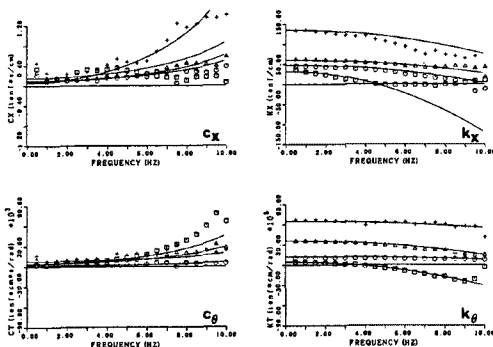


Fig. 6. Complex stiffness calculated from the data of dynamic tests.

加振方向に一列に並んだ1, 2, 3本杭を比較すると、1本杭の回転の初期の値を除き、ほぼ同じ値を持つことがわかる。しかし、加振方向には同じ本数であるが加振直交方向の本数が異なる3本杭(△印)と9本杭(+印)を比べると、杭1本あたりの剛性は明らかに9本杭の方が小さくなっている。

Fig. 5は各基礎の加振実験から得られた位相曲線と倍率曲線をまとめたものもある。1, 2, 3, 9本杭の共振振動数はそれぞれ2.5 Hz, 4.5 Hz, 6.0 Hz, 6.0 Hzであり、この振動数に対応して位相がπだけずれている。杭の本数が多くなるほど全体としての剛性が大きくなるため、倍率曲線の縦軸である単位力あたりの応答量は小さくなっている。

Fig. 6は実験で得られた位相曲線と倍率曲線から算出した複素剛性である。□, ○, △, +印はそれぞれ1, 2, 3, 9本杭の実験データを表している。複素剛性の虚部に相当する並進・回転の減衰係数は、振動数が高くなるとともに増加している。また実部に相当する並進・回転の剛性は振動数が高くなるにつれて放物線的に減少している。振動数領域でのこの剛性の2次関数的な変化によって地盤の質量作用が現れることになる。この剛性項、減衰項のデータをそのまま時間領域に変換すると、その時刻歴は因果性を満たさない。したがって、 k_x , k_g を2次関数で近似し、Hilbert変換によって c_x , c_g を求めたものが図の実線である。杭の本数が多い程、動的な剛性も大きい。減衰は低振動数側から5~6 Hzまではどの杭基礎も同じような値をとるが、その後並進では9本杭の減衰が大きく、回転では1本杭の減衰が大きくなる。

Fig. 7(a), (b)は1, 2, 3, 9本杭のハイブリッド実験におけるTaft入力波の振幅レベルを120, 180, 240, 300の4通りに変えた場合の並進と回転運動の時刻歴を示したものである。ほぼ数秒以上の長周期成分を除き、入力レベルが大きくなるにつれて振動数成

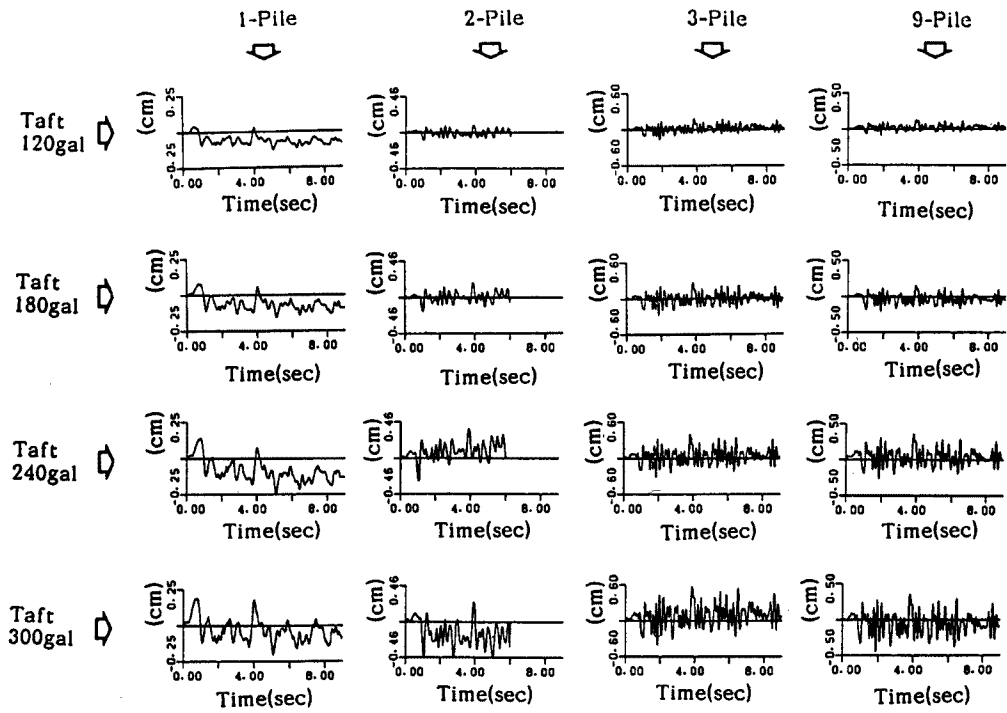


Fig. 7.(a) Swaying displacement responses for frequency-dependent model.

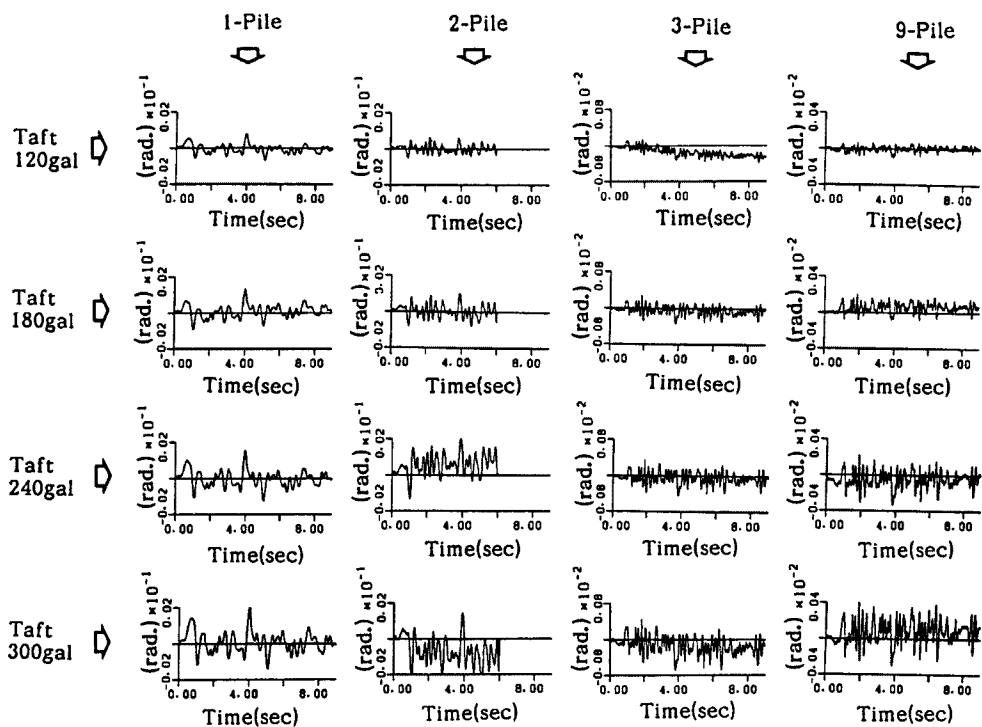


Fig. 7.(b) Rocking displacement responses for frequency-dependent model.

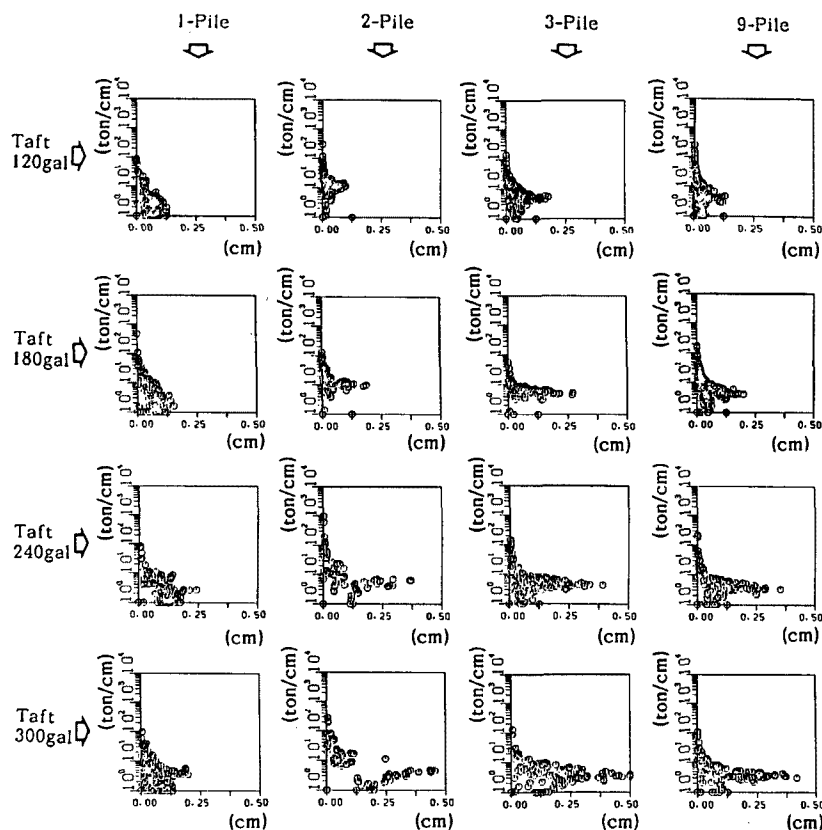


Fig. 8. Effective stiffness.

分相互の割合は一定のまま応答の振幅レベルが大きくなっている。また、入力レベル一定のまま杭本数が多くなるにつれて振幅も大きくなっている。しかし、回転運動では入力レベルが一定であると、杭本数が大きくなるにつれて逆に振幅が小さくなっている。このことは、杭本数の増加に伴う回転剛性の増加の割合が並進のそれよりも大きいことを示しており、杭本数の増加に伴って、入力エネルギーの消費の割合が回転運動から並進運動へ移って行くことを示している。基線からのズレにみられるような非線形挙動は入力レベルが大きい程顕著である。しかし、この傾向は入力波形によって異なっており、応答が非線形状態にはいるための閾値を通過する時刻やその時刻における周波数成分に関係するようである。

Fig. 8は1, 2, 3, 9本杭のハイブリッド実験において、並進運動に対する履歴ループの最大点剛性を杭一本当りに換算し、その時変化を示したものである。入力はTaft 120, 180, 240, 300 galである。振幅が増加する段階において、応答開始部分の初期剛性が指数関数的に減少し、しかもその値が入力レベルに拘らずある一定値に漸近する傾向を示している。また、応答の振幅が減少する段階では剛性は元の経路をたどらずに小さくなり、劣化型の履歴システムの特徴を示す。このことはモデル化に際し、この初期剛性と最大点剛性の漸近線が目安になり得ることを示唆している。

3.2 重量効果

地盤一基礎一上部工という相互作用を伴う振動系の応答解析では振動時における地盤をばね効果と減衰効果に置き換えて解析を行い、これらの効果は通常上部工の重量とは独立であると考えられている。ここで対象としている杭基礎でも、並進、回転運動における系の運動は鉛直軸方向変位や荷重に対して独立、すなわち杭への軸方向荷重は並進、回転運動には影響を及ぼさないとされている。

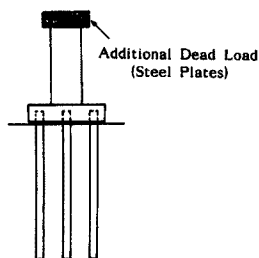


Fig. 9. Test set-up for additional dead loading. (3-pile)

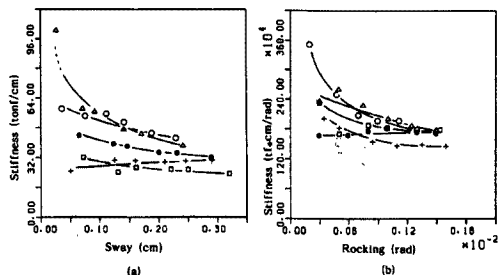


Fig. 10. Static secant stiffness of 3-pile with additional dead loading.

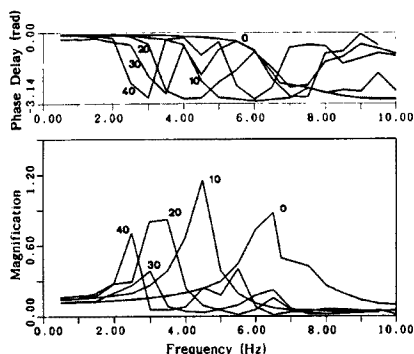


Fig. 11. Dynamic test results of 3-pile with additional dead loading.

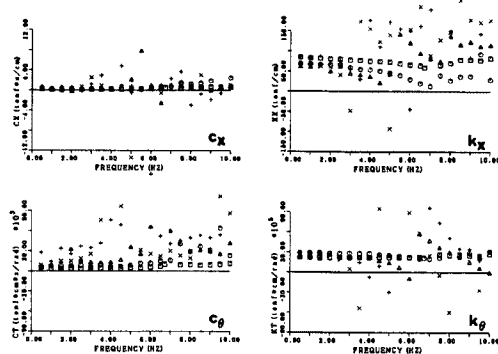


Fig. 12. Complex stiffness of sway and rocking of 3-pile with additional dead loading.

ここではこの重量効果が並進、回転運動に及ぼす影響を調べるために、3本杭の試験体を用いてハイブリッド実験を行った。付加した重量は10, 20, 30, 40 tonであり、鉄板を上部工の天端に載せ、独自に振動しないように固定するという方式を採った。これを示したものがFig. 9である。

静的実験は今までと同様、各重量を付加した試験体を0.5～3.0 mmまで0.5 mmごとに強制変位を加えた。この時の最大点剛性の変化を示したものがFig. 10(a), (b)である。(a)は並進、(b)は回転に対するものである。○, +, □, ●, △印がそれぞれ0, 10, 20, 30, 40 tonに対応している。実線はこれらの傾向を見るために引いたものである。これより、どの重量に対して変位の増加に伴う剛性の漸減傾向は見られるものの、重量の変化に対する剛性の値の違いには一定の傾向は見られず、全体として付加重量は剛性の変化に余り影響しないことがわかる。

Fig. 11は各重量の加振実験から得られた位相曲線と倍率曲線をまとめたものである。0, 10, 20, 30, 40 tonの共振振動数はそれぞれ6.2 Hz, 4.5 Hz, 3.5 Hz, 3.0 Hz, 2.0 Hzである。重量が増えるにしたがって、固有振動数が小さくなって行く。この位相曲線と倍率曲線から算出した複素剛性を示したものがFig. 12である。□, ○, △, +, ×印がそれぞれ0, 10, 20, 30, 40 tonに対応している。4～5 Hzまではどの杭の周波数依存性も同じ様な傾向をたどるが、30, 40 t 載荷では高周波部分でのばらつきが大きくなる。

Fig. 13は0, 10, 20, 30 tonの重量を付加した各杭に対してTaft 180 gal入力に対する応答変位である。左側は並進、右側は回転、また、上から順に0, 10, 20, 30 tonに対しての。並進、回転運動とも付加した重量が大きい程応答が大きく、その傾向は始めの10 ton 載荷で著しく現れる。以上より、重量付加による系の動特性の変化はそれほど大きなものではなく、同一入力に対する応答値の差は主に重量が増えることによる慣性力の増加に起因するものと判断できる。

Fig. 14はTaft 180 gal入力に対する復元力特性の一例である。ループの傾き自体はほぼ同じであるが、

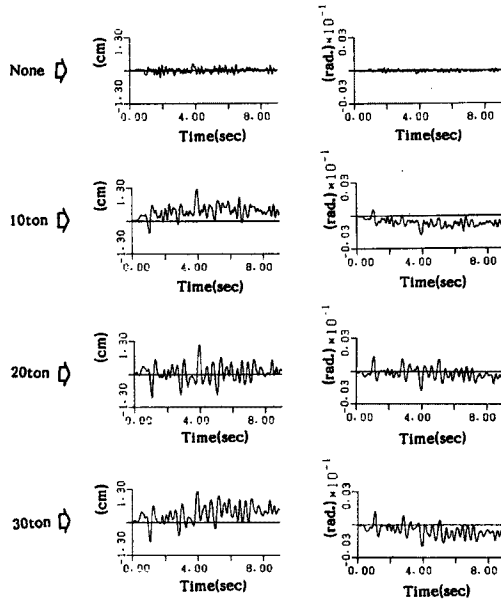


Fig. 13. Swaying and rocking displacement for Taft 180 gal input.

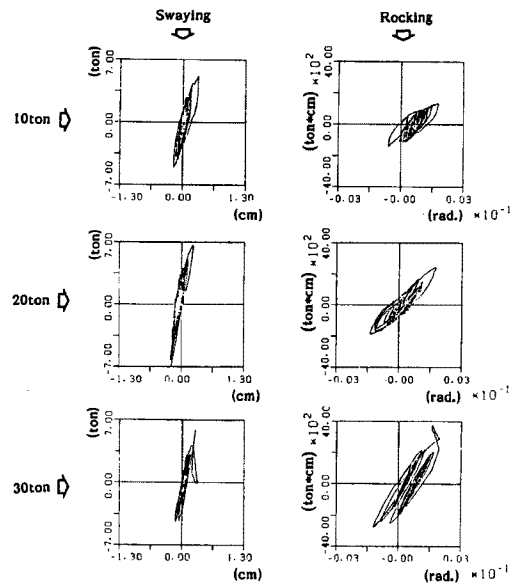


Fig. 14. Restoring force characteristic for Taft 180 gal input.

復元力の差に付加した重量の影響が現れている。

4. ハイブリッド実験と地震観測事例の比較

試験体基礎及び周辺地盤では地震観測も行っているため、ハイブリッド実験と地震観測双方の入力波形と応答波形の比較も行った。地震計の配置を示したものが Fig. 15(a), (b) である。(a) は杭基礎実験場所 (□) と、そこから約 80 m 南へ離れた自由地盤の位置関係を示したもので、(b) は杭基礎上の地震計 (▼) の配置を示したものである。ここで対象としたものは 2 本杭と 9 本杭で観測された波形である。それぞれ Fig. 16(a), (b) に対応しており、上側は自由地盤上の加速度記録、下側はフーチング基礎上の加速度記録を表す。ハイブリッド実験では、自由地盤上の観測記録を、その最大加速度を 120, 240, 360 gal に修正して入力波形としている。

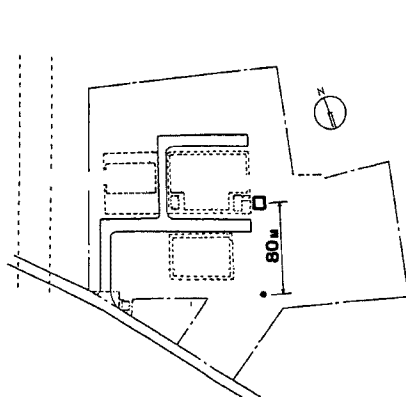


Fig. 15.(a) Location of the free-field and the test foundation site.

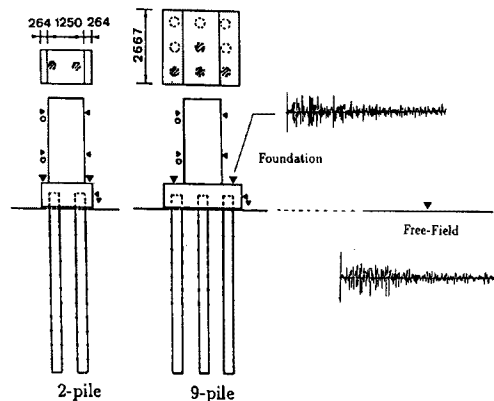


Fig. 15.(b) Arrangement of seismograms.

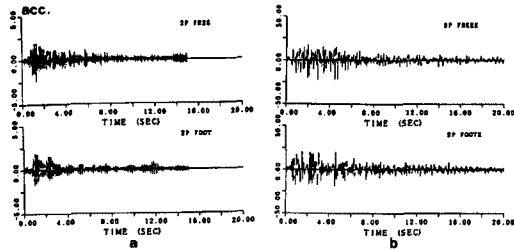


Fig. 16. Observed records of free-field and footing; (a)2-pile (b)9-pile.

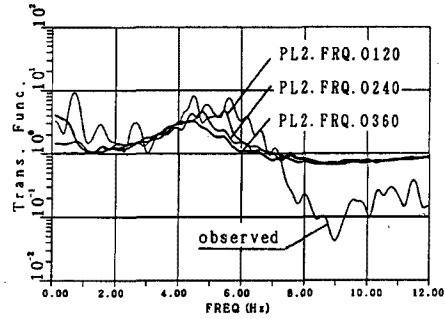


Fig. 17. Comparison of transfer functions for observation and experiment. (2-pile)

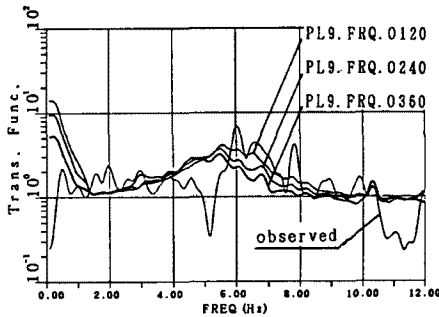


Fig. 18. Comparison of transfer functions for observation and experiment. (9-pile)

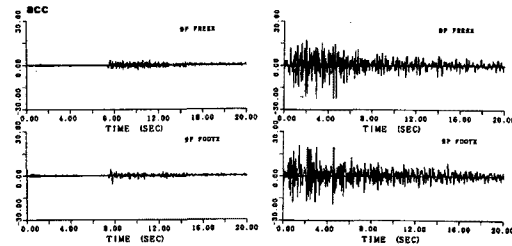


Fig. 19. Observed records of 9-pile.

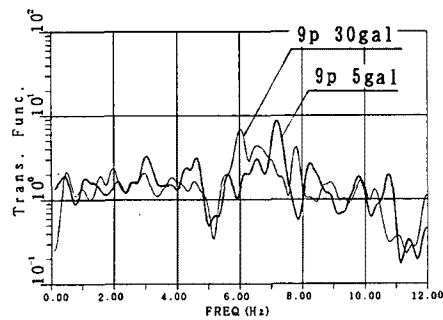


Fig. 20. Comparison of transfer functions.

Fig. 17 は 2 本杭の地震観測とハイブリッド実験双方の入力波形と応答波形の伝達関数を比較したものである。すなわち、前者は遠方地盤で観測された地震波とフーチング上で記録された地震波の伝達関数をとったもの、後者は遠方地盤で記録された地震波を上述の最大加速度に修正したものと実験で得られた重心での応答波形との伝達関数をとったものである。同じく Fig. 18 は 9 本杭に対応するものである。2 本杭、9 本杭の 1 次の固有振動数はそれぞれ 4.5 Hz、6 Hz であり、Fig. 17、Fig. 18 の卓越振動数はそれに対応している。2 本杭 120 ~ 360 gal、9 本杭 120 gal ~ 360 gal 入力 of ハイブリッド実験に基づく伝達関数は長周期部分を除いてはほぼ同じ形状であるが、これと観測波形とを比較すると、観測波形の伝達関数において高周波成分の減少が著しい。これは、遠方地盤の観測波形がキネマティックな相互作用の影響を受けていることを示している。

Fig. 19 は 9 本杭設置期間中に観測された 2 種類の波形を示したものである。最大加速度は 5 gal と 30 gal である。また、それぞれの伝達関数を比較したものが Fig. 20 である。入力レベルが大きい方の卓越振動数が長周期側に伸びていることがわかる。

5. 結 論

本研究では、地盤—構造物系の動的相互作用効果を考慮できるハイブリッド実験システム「HENESSI」を用いて 1 本杭、2 本杭、3 本杭、9 本杭の 4 種類の杭基礎の地震時挙動の相互比較を行うとともに、3

本杭を対象として上部構造物に重量を付加し、地盤—構造物系の非線形挙動や動的相互作用に及ぼす重量効果の影響を検討した。また、実験と並行して基礎及び周辺地盤では地震観測も行っているため、ハイブリッド実験と地震観測双方の入力波形と応答波形の比較も行った。得られた成果および知見は以下の通りである。

(1) 地盤—構造物間の動的相互作用効果を表現する地盤の質量効果や周波数に依存する逸散減衰効果を取り入れることのできるハイブリッド実験法を1本杭、2本杭、3本杭、9本杭の4種類の杭基礎に適用するとともに、3本杭の上部工に重量を付加することによって基礎の並進、回転運動に及ぼす軸方向荷重の影響を調べた。

(2) 1本杭、2本杭、3本杭、9本杭の4種類の杭基礎に対する静的実験から得られた剛性を杭1本あたりの剛性に換算すると、1本杭、2本杭、3本杭はほぼ同じ剛性を持つが、加振直交方向の本数が異なる9本杭の場合、その剛性は小さくなる。

(3) ハイブリッド実験において、杭本数が増加するにしたがって回転から並進へその卓越する運動が変化する。また、1本杭は他の杭と比べ杭全体としての剛性が小さく、周辺地盤が早く非弾性領域に入るため、応答波形に非線形性が顕著に現れる。

(4) 入力レベル一定のままで杭本数が増加すると、並進運動の振幅は大きくなるが回転運動では逆に振幅が小さくなる。このことは、杭本数の増加に伴う回転剛性の増加の割合が並進のそれよりも大きいことを示しており、杭本数の増加に伴って、入力エネルギーの消費の割合が回転運動から並進運動へ移って行くことを示している。

(5) 並進、回転運動とも付加した重量が大きい程応答が大きく、その傾向は始めの10 ton 載荷で著しく現れる。しかし、重量付加による系の動特性の変化はそれほど大きなものではなく、同一入力に対する応答値の差は主に重量の増加による慣性力の増加に起因するものと判断できる。

(6) ハイブリッド実験に基づく入力波形と応答波形の伝達関数は、入力レベルに関わらず長周期部分を除いてほぼ同じ形状であるが、これと観測波形とを比較すると、観測波形の伝達関数において高周波成分の減少が著しい。これは、遠方地盤の観測波形がキネマティックな相互作用の影響を受けていることを示している。

謝 辞

本研究は(株)奥村組との共同実験の一環として行われたものである。システム開発や実験に関しては奥村組筑波研究所の荒野研究員に多大な御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・Nozar KISHI GARMROUDI・吉川正昭：地盤—構造物系の非線形動的相互作用に関するハイブリッド実験法の開発，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，昭和63年4月，pp.23-38.
- 2) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・Nozar KISHI GARMROUDI・吉川正昭：杭基礎の非線形復元力に関するハイブリッド実験，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，平成元年4月，pp.11-22.
- 3) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・Nozar KISHI GARMROUDI・吉川正昭：地盤—杭基礎系の非線形動的相互作用に関するハイブリッド実験，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，平成2年4月，pp.13-23.
- 4) (株)奥村組筑波研究所：擬似動的加振システム実験結果報告書，昭和62年4月。

- 5) Toki, K., T. Sato, J. Kiyono, N. Kishi Garmoroudi, S. Emi and M. Yoshikawa: Hybrid Experiments on Non-linear Earthquake-induced Soil-Structure Interaction, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol.19, 1990, pp.709-723.
- 6) Toki, K., T. Sato, J. Kiyono, N. Kishi Garmroudi, S. Emi and M. Yoshikawa: Hybrid Experiments on Non-linear Earthquake-induced Soil-Structure Interaction, Proc. of 7th Conf. of Int. Assoc. for Comp. Meth. and Adv. in Geomech., 1991, pp.881-886.
- 7) Sato, T., K. Toki, J. Kiyono, N. Kishi Garmroudi, M. Kitazawa and M. Arano: Time Integration Scheme for Soil-Structure Systems with Frequency Dependent Complex Stiffness, Proc. of 7th Conf. of Int. Assoc. for Comp. Meth. and Adv. in Geomech., 1991, pp.1209-1214.