

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

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 INTERACTION OF SOIL-PILE SYSTEMS

By *Kenzo Toki, Tadanobu Sato, Junji Kiyono,*
Nozar Kishi Garmroudi and Masaaki Yoshikawa

Synopsis

Non-linear seismic soil-structure interaction is studied through a hybrid procedure using pseudo-dynamic testing method which is modified to take into account frequency dependence and developed for foundation-soil systems. The numerical scheme used in conventional pseudo-dynamic testing is improved by introduction of time-dependent pseudo-forcing function which is derived from frequency-dependent dynamic characteristics of the system by means of Hilbert transform in the frequency domain. Four large scale pile foundations, 1-pile, 2-pile, 3-pile and 4-pile models, were used. The mechanical characteristics of the systems were determined from static and forced vibration dynamic tests. An amplitude scaling technique, by which we could excite the systems with different maximum acceleration amplitude ranging from 60 to 300 gal, was used for the three accelerograms obtained.

1. ま え が き

構造物の地震時の非線形挙動を把握するための有効な手法の一つとして電算機—アクチュエーター—オンラインシステムによるハイブリッド実験法が挙げられる。これはおもに構造要素や構造部材、或いは構造物そのものを対象として開発されてきた。しかし、その地震時挙動の把握には構造物のみならず構造物をとりまく地盤の動特性の把握も重要な課題となる。本研究の目的は、この地盤と構造物の相互作用を考慮した実験法を開発するとともに、地盤—構造物系の地震応答を把握し、復元力特性の数式モデルを提案するための基礎的な実験を行うことである。

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。こうした系に特有の減衰効果や質量効果は周波数に依存したものとなり、これが複素剛性として動的相互作用を表現することになる。また、地盤は容易に非線形状態にはいるため、構造物基礎近傍の地盤の非線形挙動は構造物の応答に大きな影響を及ぼすことになる。

この現象を実験によって忠実に再現するには、地盤も含めたモデルを振動台によってリアルタイムで加振する方法が最良に思えるが、モデルの形状、寸法の制約、および地盤を扱うので土槽等の境界条件（保

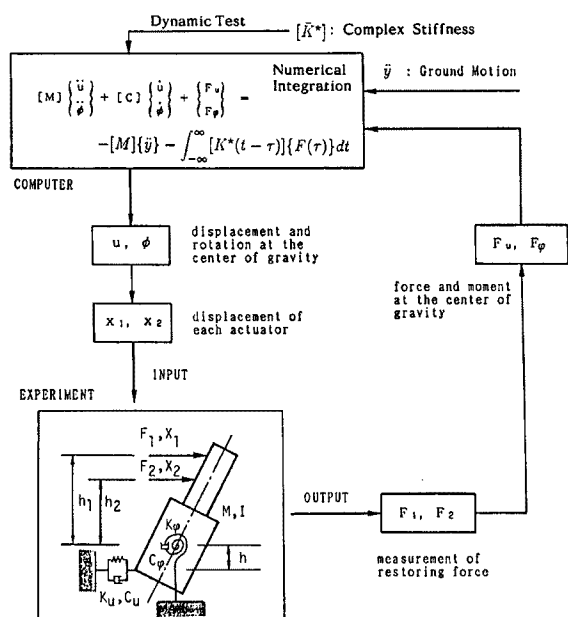


Fig. 1. Flow-chart of HENESSI.

行うためのシステムを示したものが Fig. 1 である。

ハイブリッド実験による研究は、構造物系の一部分である部材の履歴特性を実験によって把握し、これを計算機の中に実時間で取り入れることによって、構造物系の地震応答解析を行ったり、さらに実大構造物を対象として、その塑性域における全体系の力学特性を解明することなどを主眼として発展してきた^{4)~7)}が、これらの研究は主に上部構造物を対象としたものであった。

地盤の付加質量効果や地下逸散減衰効果をハイブリッド実験に取り入れるためには、地盤一構造物間の動的相互作用効果を表現する周波数に依存した複素剛性を加振実験によって実験的に求め、これら複素剛性の減衰項と剛性項を Hilbert 変換で結び付けた後、時間領域で合成積の操作を行うことによって系に作用させる応答変位を計算しなければならない。このため、ハイブリッド実験における地震応答解析の部分に時間積分の特別なルーチンを組み込んだ。

杭基礎の実験は1本杭、2本杭、3本杭、9本杭の4種類であり、それぞれの杭に対し、静的載荷実験、動的加振実験、ハイブリッド実験を行った。ハイブリッド実験では周波数に依存しない減衰項と剛性項を用いた定係数モデル、2次関数近似に依存しない減衰項と剛性項を用いた定係数モデル、2次関数近似した剛性項の ω^2 の項を質量項に付加した付加質量モデル、周波数に依存する減衰項と剛性項を用いた周波数依存モデルの3種類のケースを考えている。

2. 実験システムの構成と実験概要

実験システム⁸⁾は、アクチュエーター2台、アナログコントローラー2台、デジタルコントローラー(S/120)2台、MV-4000および各計測装置から構成されている。S/120は制御用コンピューターとして各アクチュエーターごとに設置されており、またMV-4000は地震波の各ステップでのアクチュエーター変位量を振動方程式を解いて求め、S/120へ出力するとともに、試験体に取り付けたセンサーからのデータを集録するために用いられる。計測装置はGP-IBインターフェースを用いてMV-4000と連結されており、各種のデータ計測を行うことができる。本実験システムでは主計算機システムで数値計算を

存系)の制約から非現実的なものとなる可能性もでてくる。そこで、本研究ではケーソン基礎や杭基礎を対象とした線形領域での動的加振実験から予め複素剛性を求めておき、これを計算機内に取り込んで地盤一構造物系の応答計算を行う。そして、この応答量に見合うだけの変位をアクチュエーターで試験体に加え、この時の地盤の非線形復元力特性を実験から直接求めるハイブリッド実験システム「HENESSI」(Hybrid Experiment on Non-linear Earthquake-induced Soil-Structure Interaction)を開発した¹⁾²⁾³⁾。すなわち、実際の地盤一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、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を線形現象とみなし、これと地盤の非線形現象を分離したわけである。ここで開発した地盤一構造物系の非線形地震応答解析を

行い、2台のデジタルコントローラに指令を与える。つまり、主計算機システムは、No. 1アクチュエーターとNo. 2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、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。アナログ制御盤には2台のアナログコントローラが内臓されている。このアナログコントローラはデジタルコントローラと同様にそれぞれの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制御を行っている。アクチュエーターは反力壁に取り付けられており、それぞれのアクチュエーターには変位計、荷重計が内臓され、これらの出力データは主計算機システムのAD変換器によって数値化され補助記憶装置（磁気ディスク装置、磁気テープ装置）に記録される。

実験は直接基礎（埋込み有り、埋込み無し）とケーソン基礎¹⁾、および1本杭、2本杭²⁾、3本杭、9本杭の4種類の杭基礎について行った。各杭基礎の寸法形状および設置状況をFig. 2に示す。ただし、1本杭と3本杭は実験場所を共用させるため加振方向に3本打設し、中央の1本を使って1本杭実験を行った後3本の杭の先端を固定して3本杭実験として使用することにした。この各々の基礎に対して、静的水平載荷実験、動的加振実験そしてハイブリッド実験を行った。以後、これらを静的実験、加振実験、ハイブリッド実験と呼ぶことにする。なお、これ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。

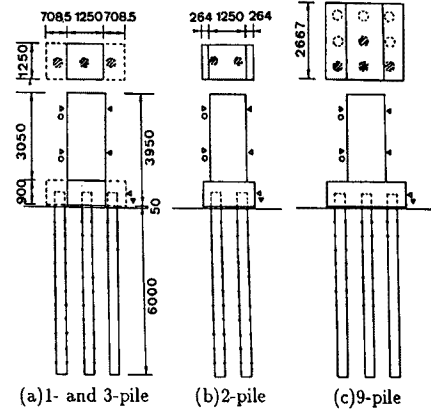


Fig. 2. Test set-up.

杭の種類、打設法および杭まわりの各計器は以下の通りである。表層と関東ロームの一部を掘削し、縦15 m×横15 m×深さ3 mを山砂で置換、整地した後、先端開放の14本の鋼管杭（直径(D): 355.6 mm, 肉厚: 9.5 mm, 杭長: 6500 mm)をデルマック（杭打機）で打設した。各杭の間隔は群杭効果の影響を無視できるとされている距離の下限値2.5 Dを採用し、889 mmとした。

杭周りの計器としては、杭の直ひずみ、曲げひずみを求めるために杭の加力方向両面に杭頭から50 cmピッチで2軸直行ひずみゲージ（WFCA-3-11）を貼付し、ハマタイトで防水加工をほどこした。また、フーチングと杭頭を剛結するためにフーチングの厚さを90 cmとし、杭頭をフーチング内に50 cm埋め込んだ。また、動揺運動によってフーチングと地表面が接触し、杭の復元力が正確に観測できないことのないように、地表面とフーチングの間に厚さ5 cmの発砲スチロールを入れ、フーチングと地表面間の接触を遮断し、底面摩擦を取り除いた。

2.1 静的実験

この実験は、初期ばね定数（並進、回転ばね）の算出、地盤反力の非線形性の検討および加振実験で得られる地盤ばねの評価のために行った。アクチュエーターの制御は変位制御であり、2台のアクチュエーターを0.5 mmピッチで0.5～2.5 mmまで動かして試験体に微小変位を与えた。

系の静的な釣合方程式は以力の式で与えられる。

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

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

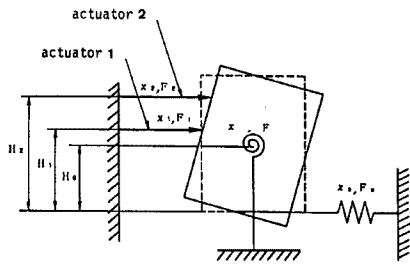


Fig. 3. Model of foundation.

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 k_x, k_θ を求めた。ただし、このモデルでは並進と回転ばねの連成効果を表すばね $k_{x\theta}, k_{\theta x}$ は考慮されていない。このモデルの概略を Fig. 3 に示す。

2.2 加振実験

この実験は、正弦波加振を行うことによってハイブリッド実験時にオンラインの応答計算に組み込む複素剛性を求めるとともに、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。実験は、上下2台のアクチュエーターのうちの1台を0.5mmと1.0mmの2通りの変位制御で0.5~20.0Hzまでの0.5Hz刻みで振動数を変化させて行った。この時得られる試験体の共振曲線、位相曲線から複素剛性を求めた。この手順は以下の通りである⁹⁾。

まず、水平ばね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。

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

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 は、回転角 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。

2.3 ハイブリッド実験

この実験は、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に行った。入力地震波としては Taft S 69 E, 八戸 NS, そして茨城県西部地震の筑波での観測波の計3波を考え、加振レベルは60 gal, 120 gal, 180 gal, 240 gal, 300 gal の5通りとして、すべて変位制御とした。

実験は case 1: 定係数モデル, case 2: 付加質量モデル, case 3: 周波数依存モデルの3ケースを考えた。case 1 とは周波数 ω に依存する減衰マトリクス $[C_\omega]$, 剛性マトリクス $[K_\omega]$ を周波数に依存しない $[C_0], [K_0]$ (=const.) で置き換えたもの, case 2 は $[C_\omega]$ を $[C_0]$ とし、2次関数で近似した $[K_\omega]$ の ω^2 の係数を質量項に付加したもの、そして case 3 が加振実験から求めた周波数に依存した複素剛性を用いたものである。

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

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

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

式 (11), (12) を式 (10) 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。

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

ここで上式のフーリエ逆変換を行う。ただし、簡単のため質量マトリックスを $[M]$ 、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 $[K^*]$ 、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。

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

ただし、

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

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

式 (12) が通常の運動方程式と異なる点は、右辺に積分区間 $(-\infty, \infty)$ の合成積の項が存在することである。式(9), (10) で表される複素剛性に対し、実験で得られた実部と虚部の近似関数を独立に決定した場合、複素剛性のフーリエ逆変換 $K^*(t)$ は Fig. 4 (a) に示されるように因果性を満たしていない。因果性を満たす $[K^*(t)]$ が決定できれば、式(12) の積分区間は $[0, t]$ となり、現時刻までの $\{F(t)\}$ のみを用いることによって合成積が表現できる。本研究では、式(11) の右辺の複素剛性項の実部と虚部を、次式で表される Hilbert 変換で結び付けることにより、式(12) の合成積を $0 \sim t$ の間の積分に変換した。

$$\bar{K}_{ij}^*(\omega) = R_{ij}(\omega) + iI_{ij}(\omega) \dots\dots\dots (15)$$

$$I_{ij}(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{ij}(y)}{y-\omega} dy \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $R_{ij}(\omega)$, $I_{ij}(\omega)$ はそれぞれ複素剛性のマトリクスの ij 要素の実部と虚部である。このようにして得られた $K^*(t)$ を示したものが Fig. 4 (b) である。

水平、回転バネ相互のカップリングを考えない場合、式(8) の減衰項、剛性項の非対角項は式(7) の対角項から求めることができる。case 2, 3 で用いた定式化はこの対角項に現れる R_{ij}

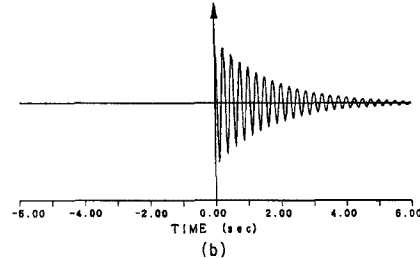
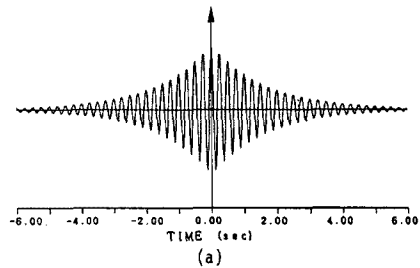


Fig. 4. Explanation of causarity.

(ω) を2次関数で近似したものである。一方、バネ相互のカップリングを考慮する場合¹⁰⁾には式(8)の減衰項、剛性項の要素は2通りの加振実験結果を用いて式(9)からそれぞれ独立に求めなければならない。

3. 実験結果

3.1 静的実験

実験は、並進と回転のカップリングを除くために2台のアクチュエータの動きを制御しながらそれぞれ独立に行われた。Fig. 5は各杭基礎の静的载荷の履歴を示したものである。1サイクル200秒周期の正弦波荷重であるためループ状の復元力特性を示している。

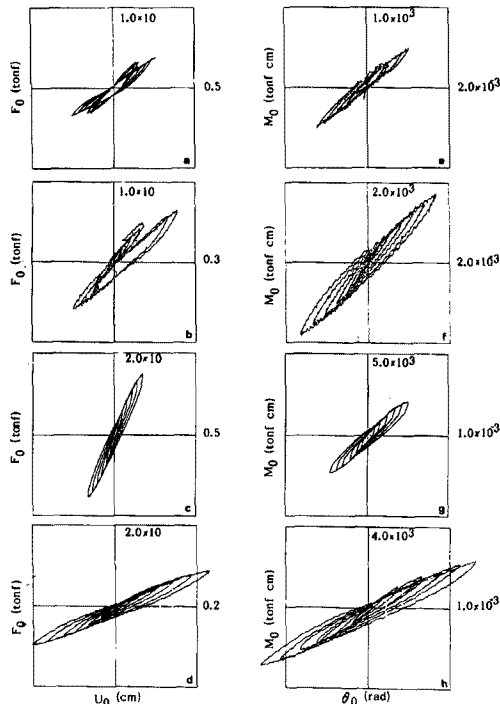


Fig. 5. Hysteretic loops of static tests. (long period cyclic load)

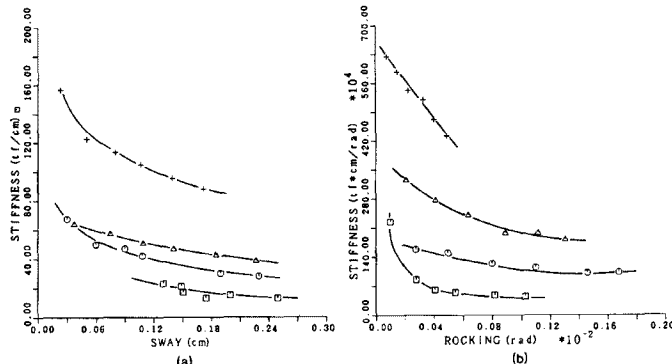


Fig. 6. Variation of stiffness.

(a)~(d), (e)~(h) はそれぞれモデルのバネ作用点での並進バネ、回転バネの復元力特性を示している。図の横軸は並進バネ作用点である底面での変位および回転角を示しており、縦軸はその時の水平反力およびモーメントを表している。変位、回転角が0のときに荷重軸が0となっていないのは、負荷を0としたときに残留変位が生じているためである。また、(a)からもわかるように、0.5 mmから0.5 mmピッチで平進運動を制御しても、実際には正確にその値は実現されていない。

Fig. 6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示したものである。(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。横軸には目標変位ではなく、実際の変位および回転角をプロットしている。

2本杭, 9本杭の並進, 1本杭, 9本杭の回転にみられるように変位と回転角が比較的小さな範囲(並進では0.06 cm以下, 回転角では 0.04×10^{-3} rad以下)で剛性の低下の割合が顕著であるが、変位や回転角がそれよりも大きくなると、どの杭も同じような漸減傾向をたどる。これを杭1本あたりの剛性に換算したものがFig. 7である。

(a)は並進、(b)は回転に対応している。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。

3.2 加振実験

Fig. 8 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である。実線は並進、破線は回転を表す。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. 9 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、振動数が高くなるにつれて増加している。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_θ を 2 次関数で近似し、Hilbert 変換によって c_x , c_θ 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. 10 は並進バネの剛性 k_x を杭 1 本あたりの剛性に換算したものである。1 本杭の加振実験結果は加振振動数の範囲内で 1 度変曲点を持ち、2 次関数近似しにくい形状を呈しているため、この影響で大きな付加質量効果が現れている。しかし、2, 3, 9 本杭に対しては曲線の形状、値ともほぼ一致しており、杭本数に関する複素剛性項に線形性が成りたつことがわかる。

3 本杭の加振実験結果をモデル化した値を用いて逆に位相曲線、倍率曲線を求めたものが Fig. 11 である。(a) は実験から直接求めたもの、(b) は Hilbert 変換で結び付けた実部と虚部を用いたもので case 3 に相当する。共振振動数、応答倍率ともほぼ一致しており、このモデル化の妥当性をよく表している。

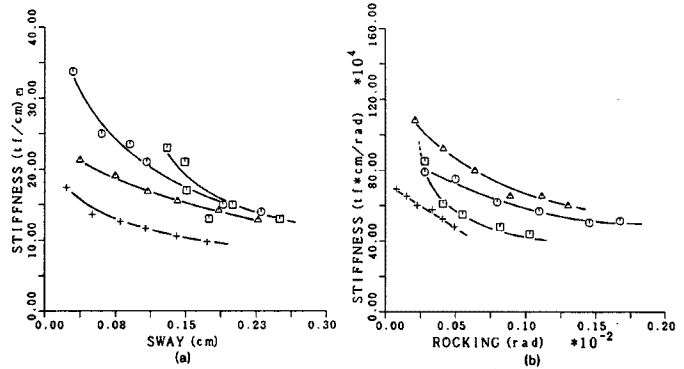


Fig. 7. Variation of stiffness per one pile.

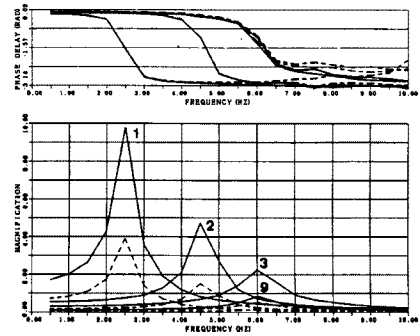


Fig. 8. Phase and response curves from dynamic tests.

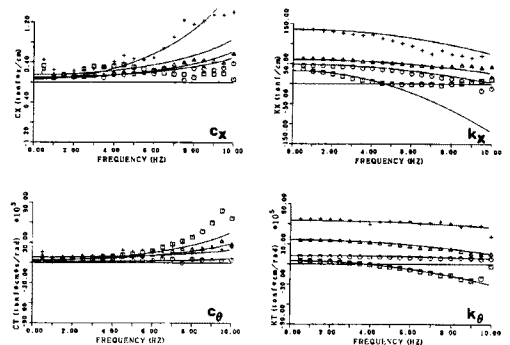


Fig. 9. Complex stiffness calculated from the data of dynamic tests.

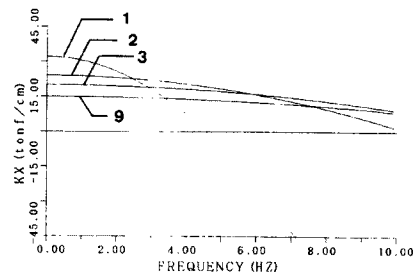


Fig. 10. Complex stiffness of sway per one pile.

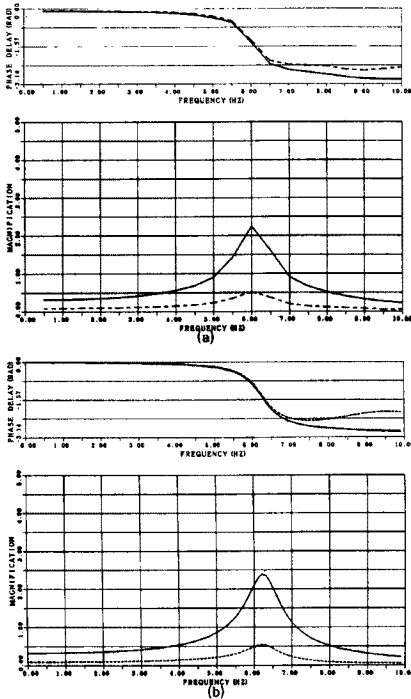


Fig. 11. Comparison of phase and response curves by use of experimental and approximate complex stiffness.

3.3 ハイブリッド実験

Fig. 12 は Taft 180 gal 入力に対する case 3 の実験から求められた応答変位である。(a)~(d) は並進, (e)~(h) は回転, また (a)(e), (b)(f), (c)(g), (d)(h) はそれぞれ 1, 2, 3, 9 本杭に対応している。Taft 加速度波形は 2~3 Hz 付近に卓越振動数を持つため, この振動数と各杭の固有振動数が明瞭に現れている。特に 1 本杭の 1 次の固有振動数はその卓越振動数にほぼ一致している。1 本杭は剛性が小さく, 他の杭と比べて周辺地盤が早く非弾性状態にはいるため, (a) に見られるように非線形性が顕著に現れる。また, (e) から回転運動が卓越していることもわかる。3 本杭(c)(e) と 9 本杭(d)(f) は固有振動数がほぼ一致しているため, 波形は似たような形状を示しているが, 9 本杭の方が剛性が大きいため変位が小さくなっている。(c)(d) と (g)(h) の比較から, 杭の本数が多くなるにつれて並進運動が卓越してくることがわかる。

Fig. 13 は Taft 180 gal 入力に対する case 3 の実験から求められた復元力特性の履歴ループの一例である。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ 1, 2, 3, 9 本杭の並進に対応している。ループの傾きから剛性は (a) では小さく (d) では大きい。すなわち, 杭本数が多いほど剛性が大きい。また, 杭本数の増加に伴って振幅が大きくなっているが, これは 3 本杭, 9 本杭では並進運動が卓越しているため, 回転運動に関しては

Fig. 12 からわかるように 1 本杭, 2 本杭の振幅が大きくなっている。

Fig. 14 は 3 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 通りに変えたものである。左側が並進運動の時刻

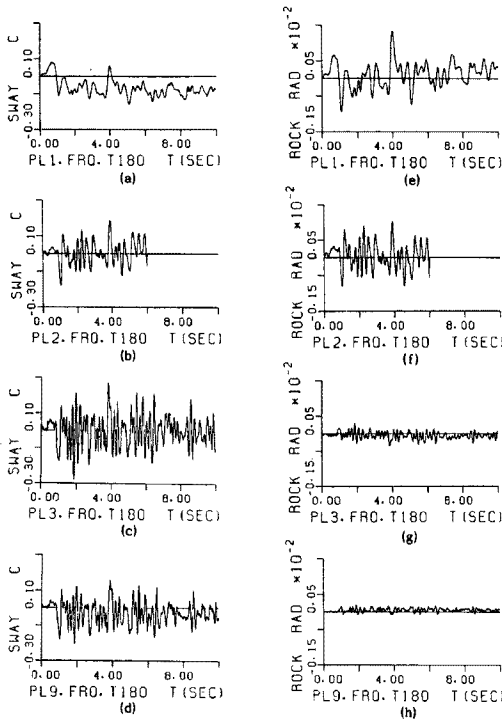


Fig. 12. Sway and rocking responses of 1-, 2-, 3- and 9-pile to Taft 180gal.

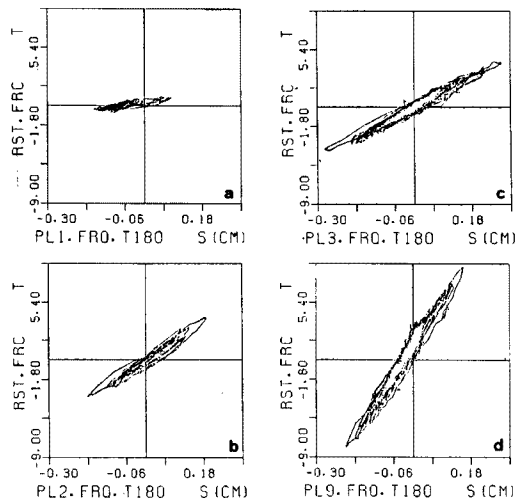


Fig. 13. Hysteretic loops of 1-, 2-, 3-, and 9-pile to Taft 180gal for sway.

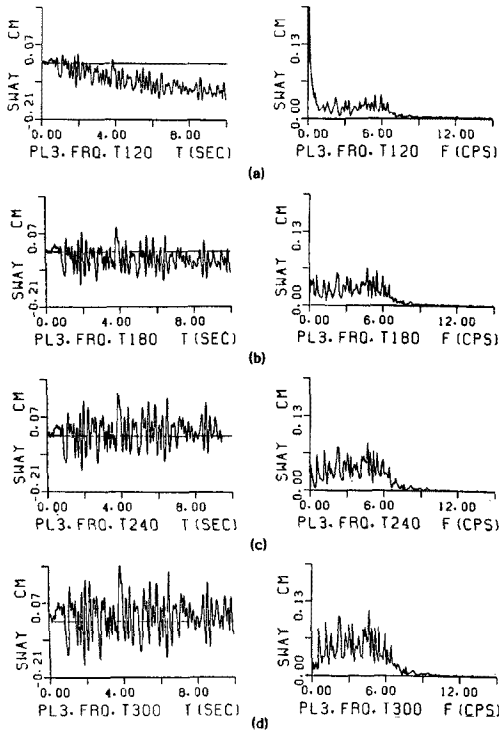


Fig. 14. Sway displacement responses of 3-pile to Taft 120, 180, 240, 300gal. (downwards)

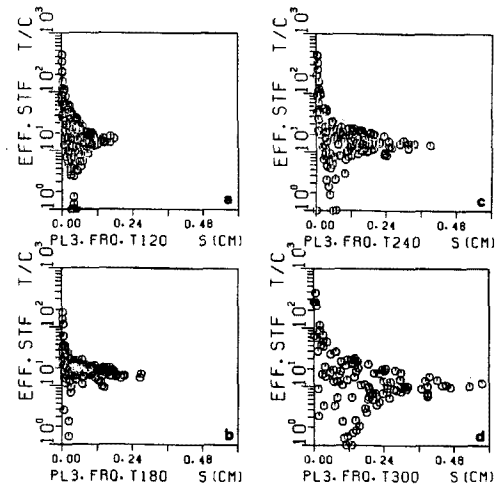


Fig. 15. Effective stiffness of 3-pile to Taft 120(a), 180(b), 240(c), 300gal(d) for sway.

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における周波数成分やその周波数のクランプの状態にも関係するようである。

Fig. 15 は 3 本杭のハイブリッド実験において並進運動に対する最大点剛性を示したものである。(a)～(d) はそれぞれ Taft 120, 180, 240, 300 gal に対応する。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。

Fig. 16 は 3 本杭を対象として基礎の絶対加速度応答から入力加速度の時刻歴を減じ、基礎と地盤の相互作用効果を調べたものである。上から Taft 180, 240, 300 gal であり、右側はそのフーリエスペクトルを表す。入力レベルが違うので振幅も異なっているが、フィルターとしての相互作用効果はほぼ一定であることがわかる。

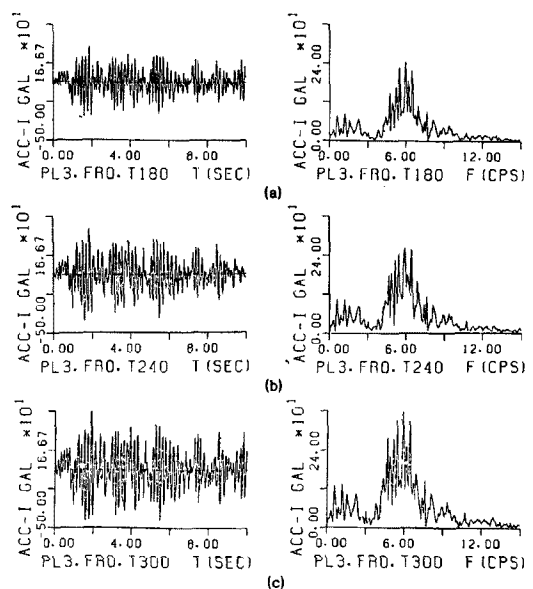


Fig. 16. Effect of soil-structure interaction.

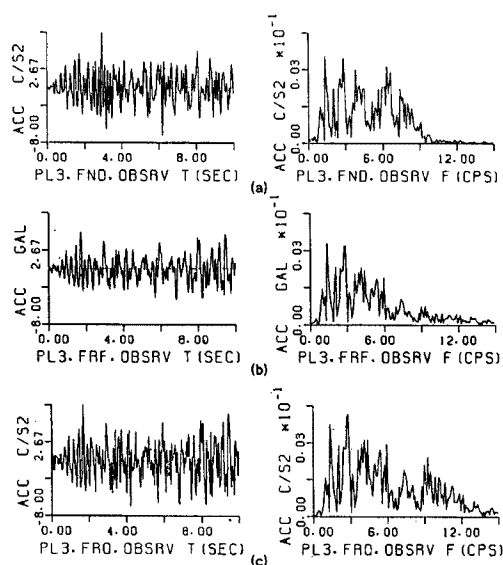


Fig. 17. Comparison of observed and simulated responses of 3-pile foundation.

れた加速度波形, (b) はこの基礎から約 90 m 離れた自由地盤上で観測された加速度波形である。この地震の最大加速度は, 加振方向と同一方向の自由地盤上において 6.2 gal と小さく, ハイブリッド実験の振幅制御範囲以下であるのでハイブリッド実験による直接の比較は不可能である。したがって, 数値シミュレーションにより線形領域での比較を行った。計算により得られたフーティング上での応答が (c) である。図右側のフーリエスペクトルによって実際の応答と比較すると, 9 Hz 以下で両者はよく一致するが, 9 Hz より高周波側で実際の応答にはない成分が現れている。これは, 数値計算では遠方の自由地盤の加速度波形を入力としているので, 実際には (d) に示された入力波がローパスフィルターを経た形の波形が入力しているものと思われる。

5. 結 論

本研究では, 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を開発するとともに, 復元力特性に着目して, 基礎構造物系の動的安定性評価のための基礎的実験を行うことを目的としている。地盤—構造物系の相互作用に関するハイブリッド実験がほとんど行われていない現状では, 相互作用に関する実験そのものが本研究の一つの成果である。現時点までに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複素剛性を加振実験によって実験的に求め, これら複素剛性の減衰項と剛性項を Hilbert 変換で結び付けた後, 時間領域で合成積をとることによって系に作用させる応答変位を計算する手法を開発し, 地盤の質量効果や周波数に依存する逸散減衰効果をハイブリッド実験に取り入れた。
- (2) 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) 加振実験結果から複素剛性を求めた後, 周波数に依存しない定係数のモデル化, 質量効果として剛性の 2 次の関数を質量項に付加したモデル化, そして周波数に依存したモデル化を行い, これを基に位相曲線, 倍率曲線を求めた。その結果, 周波数に依存した複素剛性のモデル化が実験データをよく再現していることがわかった。
- (4) 加振実験結果から求めた複素剛性から判断して, 杭本数に関する剛性項に線形性が成り立つことがわかった。
- (5) 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。
- (6) 履歴曲線の最大点剛性は, 応答の振幅が増加する段階においてまず初期剛性が指数関数的に減少し, その後入力振幅レベルに拘らずある一定値に漸近する。
- (7) 杭基礎上での観測波形を数値シミュレーションで再現させるには, キネマティックな相互作用を考慮した入力波形を選ばねばならない。

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助力を頂いた。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-2，1988，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-2，1989，pp.11-22.
- 3) Toki, K., T. Sato, J. Kiyono, N. Kishi Garmroudi, 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.
- 4) 伯野元彦・四俣正俊・原 司：計算機により制御されたはりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，No.171, 1969, pp.1-10.
- 5) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・岡田恒雄・田中 尚：電算機—試験機オンラインシステムによる構造物の非線形応答解析（その1）システムの内容，建築学会論文報告集，229号，1975，pp.77-83.
- 6) 岡田恒雄・関松太郎：電算機—アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組みの地震応答実験，建築学会論文報告集，275号，1979，pp.25-31.
- 7) Iemura, H.: Hybrid Experiments on Earthquake Failure Criteria of Reinforced Concrete Structure, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, 1984, pp.103-110.
- 8) (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集，1987.
- 9) 土岐憲三・小松昭雄：井筒基礎の地震応答解析に関する研究，土木学会論文報告集，第281号，1979，pp.29-40.
- 10) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・Noar KISHI GARMROUDI・江見 晋・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システムの開発，第34回土質工学シンポジウム，I-6，1989，pp.23-38.