

## 杭基礎の非線形復元力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 EXPERIMENT ON NONLINEAR RESTORING FORCE OF PILE FOUNDATIONS

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

#### Synopsis

A hybrid study of nonlinear, seismic soil-structure interaction was made by a numerical analysis of the governing equations of dynamic equilibrium, in which the nonlinear stiffness of the system was evaluated experimentally by pseudo-dynamic testing and the frequency dependence of the dynamic characteristics were taken into account by use of a new time domain numerical integration scheme based on Hilbert transformation in the frequency domain. 1-pile and 2-pile models of four large scale foundations were used. The mechanical characteristics of the systems were determined from static and forced vibration dynamic tests. An amplitude scaling technique was used for the three accelerograms obtained.

#### 1. ま え が き

地震時における地盤—構造物系の動的相互作用の問題が耐震工学上の研究の重要なテーマとなってから久しい。しかし、特別な構造物や大規模なプロジェクトを除き、そこで得られた成果や知見が一般の設計指針や基準に盛り込まれている例は少ない。これは動的相互作用そのものが非常に複雑な物理現象である上に、そこで得られた研究成果が指針や基準に取り入れられるような簡便な形で表現されていないことに1つの原因がある。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、上部構造物の振動性状は基礎の振動特性の影響を強く受けるはずであり、基礎の振動により地震力エネルギーが消費されれば、上部構造物の振動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。こうした観点から、非線形挙動を考慮した上で地盤—基礎—上部構造物系の振動解析を実施して、動的相互作用効果の一般的特性を把握しようとする研究が行われている。このためには地盤—構造物系を合理的にモデル化する必要がある。波動論に基づくモデル化、並進・回転バネを用いたモデル化、並列多質点系へのモデル化、有限要素法を用いたモデル化、境界積分法によるモデル化等がその例である。線形応答に限れば何れの解析法を用いても、モデル化の時点でモデルパラメータ間の等価性を十分に考慮することにより、ほぼ似たような解析結果を得ることができる。しかし、構造物を取り巻く地盤は容易に非線形状態に入るため、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

の把握は不可欠である。また、地盤—構造物系の動的相互作用は文字どおり地盤が構造物の運動に影響を及ぼし、またその構造物の運動が地盤へとフィードバックされる現象として捉えることができるので、このようなフィードバック系によって引き起こされる地盤の逸散減衰効果や質量効果は周波数に依存したものとなる。したがって、復元力特性としては上述のような周波数依存性と非線形性の両方の現象を考慮した検討が必要となる。

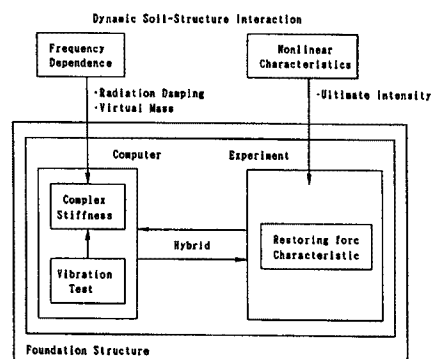


Fig. 1. Flow of the hybrid experiment.

ハイブリッド実験による研究は、構造物系の一部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が<sup>1)2)3)4)</sup>、これらの研究は主に上部構造物を対象としたものである。これに対し、著者らは Fig. 1 に示されるようにミニコンピュータと電気油圧式アクチュエーターをオンラインで結合して、地盤—構造物系の非線形地震応答解析を行うシステムを開発した。このシステムの目的は地盤—構造物系の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とともに、容易に数式に表現できないような場合

も含めて地盤—構造物系の地震応答を把握することである。このためには、ハイブリッド実験の動的応答解析を行う部分で時間積分に関する特別な考察が必要となる。

本研究では、ケーソン基礎のハイブリッド実験に対して既に開発済みの動的非線形応答計算を行うアルゴリズムを杭基礎のハイブリッド実験に適用するとともに、複素剛性の非対角項を動的加振実験から独立に求めてハイブリッド実験にとり入れる新たなアルゴリズムを開発し、そこで得られた復元力特性および応答波形の検討を行う。

## 2. 実験システムの構成<sup>5)</sup>と実験概要

実験システムは、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行い、2台のデジタルコントローラーに指令を与える。つまり、主計算機システムは、No. 1 アクチュエーター 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ーへこの計算変位を与える。デジタルコントローラーは、アクチュエーター加振機の変位指令-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ーが内蔵されている。このアナログコントローラーはデジタルコントローラーと同様にそれぞれのアクチュエーター加振機の変位指令-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。

Fig. 2 は、アクチュエーターの概略を示したものである。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、荷重計が内蔵され、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



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5cm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0.5mmピッチで0.5～2.5mmまで動かして試験体に微小変位を与えた。ここで、並進、回転ばね定数を1質点2自由度の系の静的釣合方程式から決定するためには、2つの自由度を非連成化する必要がある。本研究では並進または回転のどちらか一方のモードのみを生じさせるようにアクチュエーターの動きを調整した。すなわち、並進と回転の連成による効果を取り除いて並進のモードのみを出すために、2台のアクチュエーターが一定のスピードで動くように制御した。回転モードのみの変形場を出すためには重心位置での水平変位が0になるように上下のアクチュエーターの変位量を制御した。

系の静的な釣合方程式は以下の式で与えられる。

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

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、 $x$ 、 $\theta$ はそれぞれ重心位置の水平変位量、重心まわりの回転角、 $k_x$ 、 $k_\theta$ 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。このモデルの概略をFig. 5に示す。このモデルでは並進と回転の連成効果を表すバネ  $k_{x\theta}$ 、 $k_{\theta x}$  は考慮されていない。

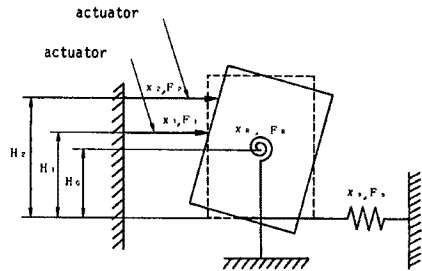


Fig. 5. Model of foundation.

実験の記録では上述のような非連成系は厳密には実現されておらず、 $\theta = 0$ あるいは $x = 0$ とはならない。そこで式(1)から  $k_x$ 、 $k_\theta$  を求めると以下ようになる。

$$k_x = \frac{F}{x - (h_G - h_S)\theta} \dots\dots\dots (2)$$

$$k_\theta = \frac{M + F \cdot (h_G - h_S)}{\theta} \dots\dots\dots (3)$$

2.2 加振実験

この実験は、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。複素剛性はアクチュエーターを変位制御で0.5～20.0Hzまで0.5Hz刻みで振動数を変化させ、この時得られる試験体の共振曲線、位相曲線から求めた。

加振には上下2台のアクチュエーターのうち1台を用いた。これは、特に高周波の入力に対して2台が同調できないためである。したがって、上下どちらかのアクチュエーターをそれぞれ単独で0.5～20.0Hzまで0.5Hz刻みで加振した。さらに共振振動数付近の共振曲線、位相曲線の挙動を細部にわたり把握するために、0.2Hz刻みで2.5～6Hzまでの加振を合わせて行った。また、地盤の非線形性、アクチュエー

ターの加振能力を考慮して振幅は 0.5 mm と 1.0 mm の 2 通りとし、(1) の静的実験と同様変位制御とした。共振曲線、位相曲線から複素剛性を求めるにあたり、ここでは 2 通りの方法を考慮した。

第一の方法はケーソン基礎で行った手法を踏襲したもので、1 組の加振実験から並進および回転の複素剛性の実部・虚部を求めるものである。運動方程式の複素剛性中に現れる非対角項は並進及び回転の複素剛性から計算できることになる。この手順は以下の通りである<sup>6)</sup>。

まず、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。

$$\begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x & -c_x h_G \\ -c_x h_G & c_\theta + c_x h_G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & -k_x h_G \\ -k_x h_G & k_\theta + k_x h_G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ M(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに  $c_x$ ,  $c_\theta$  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、モーメントは次式のように仮定できる。

$$F(t) = F \exp(i\omega t) \quad (5)$$

$$M(t) = M \exp(i\omega t) \quad (6)$$

したがって、 $x$ ,  $\theta$  は次式で表わされる。

$$x = X \exp\{i(\omega t - \phi_x)\} \quad (7)$$

$$\theta = \Theta \exp\{i(\omega t - \phi_\theta)\} \quad (8)$$

式 (5), (6), (7), (8) を式 (4) に代入して整理すると以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_0 + i\omega c_x + k_x & -(i\omega c_x + k_x) h_G \\ -(i\omega c_x + k_x) h_G & -\omega^2 I_0 + i\omega(c_\theta + c_x h_G^2) + (k_\theta + k_x h_G^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \exp(-i\phi_x) \\ \Theta \exp(-i\phi_\theta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 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。

ところで、杭基礎の場合、並進および回転だけの変形場を与えても系にモーメントおよび水平力が発生するため、複素剛性の非対角項を独立な連成系のバネとして捉える必要がある。第二の方法は、システムのカップリングとして現れる複素剛性の非対角項をそのまま独立に求めるものである。このように非対角項も独立に考慮すると、1 組の加振実験からすべての未知数は求められないので、アクチュエーターによる上側加振、下側加振のモードの異なる 2 組の実験から算出しなければならない。この手順を以下に示す。運動方程式は、式 (1) の表示を変えることにより次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{x\theta} \\ c_{\theta x} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{x\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、2 組の加振データを用いることを考慮した上で式 (5) ~ (8) を上式に代入すると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_0 + i\omega c_{xx} + k_{xx} & i\omega c_{x\theta} + k_{x\theta} \\ i\omega c_{\theta x} + k_{\theta x} & -\omega^2 I_0 + i\omega c_{\theta\theta} + k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \exp(-i\phi_{x1}) & X_2 \exp(-i\phi_{x2}) \\ \Theta_1 \exp(-i\phi_{\theta 1}) & \Theta_2 \exp(-i\phi_{\theta 2}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 & F_2 \\ M_1 & M_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ただし添字 1, 2 は 2 通りの加振データを表す。式 (11) を解くことにより周波数に依存した  $c_{xx}$ ,  $c_{x\theta}$ ,  $c_{\theta x}$ ,  $c_{\theta\theta}$ ,  $k_{xx}$ ,  $k_{x\theta}$ ,  $k_{\theta x}$ ,  $k_{\theta\theta}$  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う。入力地震波としては Taft S69E, 八戸 NS, そして (株) 奥村組によって地震観測が行われている筑波において観測された筑波観測波の 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。

実験は次の 4 種類のケースを考えた。

- 1) case 1 : 定係数モデル
- 2) case 2 : 付加質量モデル
- 3) case 3 : 周波数依存モデル 1 (対角項のみを考慮した合成積モデル)
- 4) case 4 : 周波数依存モデル 2 (非対角項を考慮した合成積モデル)

case 1 とは周波数  $\omega$  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.) としたものである。ただし、実験では  $[K_0]$  は  $[K_0] \cdot \{x\} = \{F\}$  の関係で復元力の中に含まれるのでこの値は用いていない。case 2 は  $[C_\omega]$  を  $[C_0]$  とし、2 次関数で近似した  $[K_\omega]$  の  $\omega^2$  の係数を質量項に付加したものである。

ハイブリッド実験における地震応答解析の部分には時間積分スキーム数値解析のルーチンを用意しておかなければならないが、上述の 4 ケースのうち 2), 3), 4) については加振実験で得られた周波数に依存する複素剛性を組み込む必要がある。ケーソン基礎のハイブリッド実験で開発された直接数値積分法の定式化<sup>7)</sup>に基づいて 4) に対する定式化を行うと以下ようになる。

重心に関する運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx}(\omega) & c_{x\theta}(\omega) \\ c_{\theta x}(\omega) & c_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx}(\omega) & k_{x\theta}(\omega) \\ k_{\theta x}(\omega) & k_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

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  $\omega$  に依存した項とに分解する。

$$c_{ij}(\omega) = c_{0ij} + c_{\omega ij} \dots\dots\dots (13)$$

$$k_{ij}(\omega) = k_{0ij} + k_{\omega ij} \dots\dots\dots (14)$$

式 (13), (14) を式 (12) 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。

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} c_{0xx} & c_{0x\theta} \\ c_{0\theta x} & c_{0\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{0xx} & k_{0x\theta} \\ k_{0\theta x} & k_{0\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y \\ \Phi \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{\omega xx} + i\omega c_{\omega xx} & k_{\omega x\theta} + i\omega c_{\omega x\theta} \\ k_{\omega \theta x} + i\omega c_{\omega \theta x} & k_{\omega \theta\theta} + i\omega c_{\omega \theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \Theta \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

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  $[C_0], [K_0]$ , 右辺の複素剛性項のフーリエ逆変換を  $[K^*]$ , また、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。

$$[M]\{x\} + [C_0]\{x\} + [K_0]\{x\} = -[M]\{y\} - \int_{-\infty}^{\infty} [K^*(t-\tau)]\{F(\tau)\}d\tau \dots\dots\dots (16)$$

ただし、

$$[F] = [K_0] \{x\} \dots\dots\dots (17)$$

$$[K^*] = [\bar{K}^*][K_0]^{-1} \dots\dots\dots (18)$$

通常の運動方程式と異なる点は、式 (16) の右辺に積分区間  $(-\infty, \infty)$  の合成積の項が入っていることである。ここで、 $[K^*(t)]$  が因果性を満たせば式 (16) の積分区間は  $[0, t]$  となり、現時刻までの  $[F(t)]$  の値を使うことによって合成積が可能となる。本研究では、式 (15) の右辺の複素剛性項の実部と虚部を Hilbert 変換で結び付けることにより、式 (16) の合成積を  $0 \sim t$  の間の積分に変換した。以下にこの手順を示す。

$[\bar{K}^*(t)]$  は、起振実験で得られる周波数に依存した  $[K_\omega]$ 、 $[C_\omega]$  から求められる。この  $[\bar{K}^*(t)]$  に因果性が成り立つためには  $[K_\omega]$  と  $[C_\omega]$  は互いに独立ではなく、一方が決まれば他方も決まるという関係が成り立たねばならない。Hilbert 変換は複素空間において実部と虚部を関係づける変換である。したがって、本研究では虚部に相当する式 (13) の  $[C_\omega]$  の項は起振実験で得られる値をそのままの形で用いず、式 (14) で表される実部から虚部を Hilbert 変換によって求めて  $[\bar{K}^*(t)]$  を算出した。

いま、複素剛性の  $ij$  要素の実部を  $R_{ij}(\omega)$ 、虚部  $I_{ij}(\omega)$  とすると、Hilbert 変換は次式で与えられる。

$$\bar{K}_{ij}^*(\omega) = R_{ij}(\omega) + iI_{ij}(\omega) \dots\dots\dots (19)$$

$$I_{ij}(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{ij}(y)}{y - \omega} dy \dots\dots\dots (20)$$

case 2, 3 で用いた定式化はケーソン基礎に関するハイブリッド実験で開発したものであるが、これは  $R_{ij}(\omega)$  を 2 次関数で近似したものである。ところが、case 4 のように非対角項を 2 通りの加振実験結果から求めた場合、この  $R_{ij}(\omega)$  が 2 次の関数で近似できないため、4 次の関数で以下のように近似した。

$$R_{ij}(\omega) = \begin{cases} a\omega^4 + b\omega^2 & \omega \leq \omega_1 \\ 0 & \omega > \omega_1 \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

これを式 (20) に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} I_{ij}(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\omega_1}^{\omega_1} \frac{ax^4}{x - \omega} dx + \frac{1}{\pi} \int_{-\omega_1}^{\omega_1} \frac{bx^2}{x - \omega} dx \\ &= \frac{2a\omega^3\omega}{3\pi} + \frac{2b\omega_1\omega}{\pi} + \frac{b\omega^2}{\pi} \log \frac{|\omega_1 - \omega|}{|\omega_1 + \omega|} + \frac{2a\omega_1\omega^3}{\pi} + \frac{a\omega^4}{\pi} \log \frac{|\omega_1 - \omega|}{|\omega_1 + \omega|} \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

ここで

$$I_{ij}(\omega) = \omega C_{ij}(\omega) \dots\dots\dots (23)$$

と置くと、式 (22) は次式のようになる。

$$C_{ij}(\omega) = \left( \frac{2a\omega_1^3}{3\pi} + \frac{2b\omega_1}{\pi} \right) + \frac{b\omega}{\pi} \log \frac{|\omega_1 - \omega|}{|\omega_1 + \omega|} + \frac{2a\omega_1\omega^2}{\pi} + \frac{a\omega^3}{\pi} \log \frac{|\omega_1 - \omega|}{|\omega_1 + \omega|} \dots\dots\dots (24)$$

以上より、case 3 は 1 通りの加振実験から得られた周波数依存の複素剛性を用いてケーソン基礎の場合と同様に解いたもの<sup>7)</sup>、そして case 4 は 2 通りの加振実験結果を用いて式 (16) をそのまま解いたものである。

3. 実験結果

3.1 静的実験

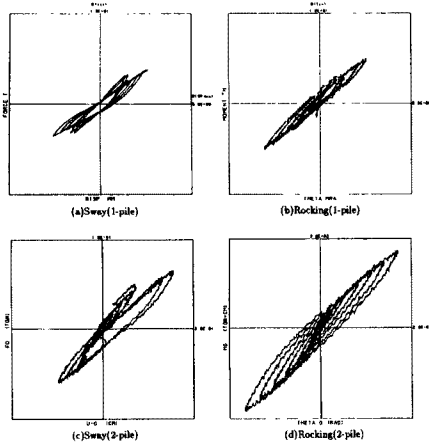


Fig. 6. Hysteresis loops of static tests. (long period cyclic load)

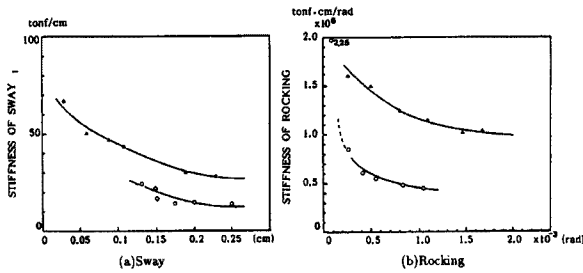


Fig. 7. Variation of stiffness.

回転角をプロットしている。変位の増加に伴う剛性の低下は並進バネ、回転バネとも顕著である。並進バネにおいては1本杭、2本杭とも同じような漸減傾向を示しており、0.2 cm以上で減少の割合が低下する傾向がある。一方、回転バネの剛性低下の割合は、1本杭の方が早めに小さくなる。

3.2 加振実験

Fig. 8は1本杭の加振実験に対し、上側アクチュエータの0.5 mm加振結果から得られた複素剛性である。○印は実験データであり、こ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、 $k_b, k_\theta$ を2次関数で近似してHilbert変換によって $c_b, c_\theta$ を求めたものが図の実線である。また、図の破線は $k, c$ を一定とした実験に用いるため、共振振動数を勘案してデータの平均的な値をとったものである。これらの値を用いて逆に位相曲線、倍率曲線を求めたものがFig. 9である。(a)は実験から直接求めたものであり、実線が並進、破線が回転を表す。共振振動数は2.5 Hz、この時

前述したように、静的実験は2台のアクチュエータの動きを制御することにより、並進と回転のカップリングを除いてそれぞれ独立に行った。Fig. 6は、静的実験により得られた復元力を示したものである。1サイクル200秒周期の正弦波载荷であるためループ状の復元力特性を示している。(a), (b)はそれぞれ1本杭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、(c), (d)は2本杭のそれに対応している。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), (c)からわかるように、0.5 mmから0.5 mmピッチで並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. 7はこれら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)は回転に対する剛性、また○印は1本杭、△印は2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

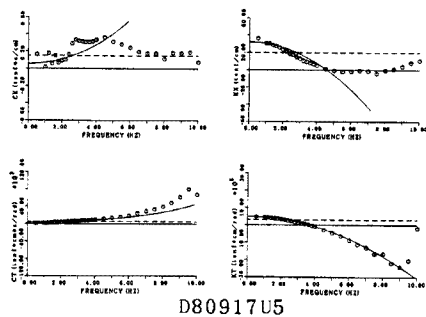


Fig. 8. Experimental and approximate complex stiffness from dynamic test.



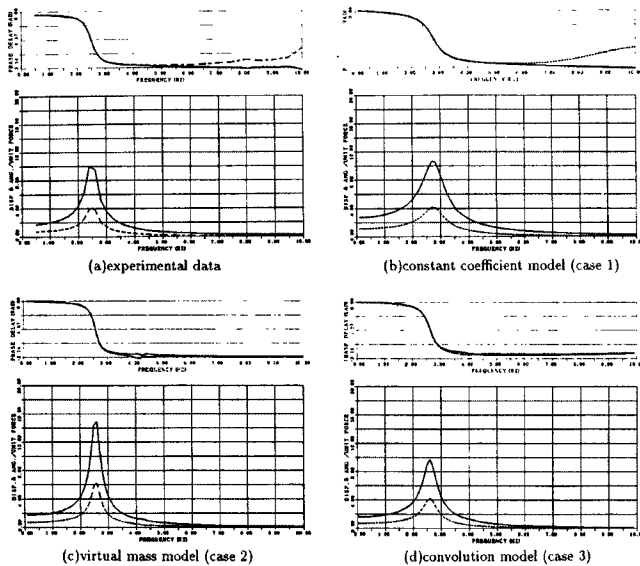


Fig. 9. Comparison of phase and response curves by use of experimental and approximate complex stiffness.

の並進の倍率は 10、回転の倍率は 4 程度である。この振動数は回転の卓越するモードであり、この加振実験では動揺運動が卓越していることがわかる。また、この 1 次の振動数を境に位相が  $\pi$  だけずれている。(b) は case 1 に相当し、Fig. 8 の破線で示される値を用いたものである。共振振動数が約 2.8 Hz と高周波側に移動しており、倍率も並進において 11 倍と多少大きくなっている。(c) は 2 次関数で近似した剛性  $k_p$ 、 $k_\theta$  の 2 次の係数を付加質量として考慮した case 2 に対応するが、この場合、共振振動数は一致するものの応答倍率のピークが並進 15 倍、回転 6 倍と大きめに現れている。(d) は case 3 に相当する。共振振動数、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。

以上は 1 本杭の加振実験に対する実験結果であるが、2 本杭実験では 2 種類の加振

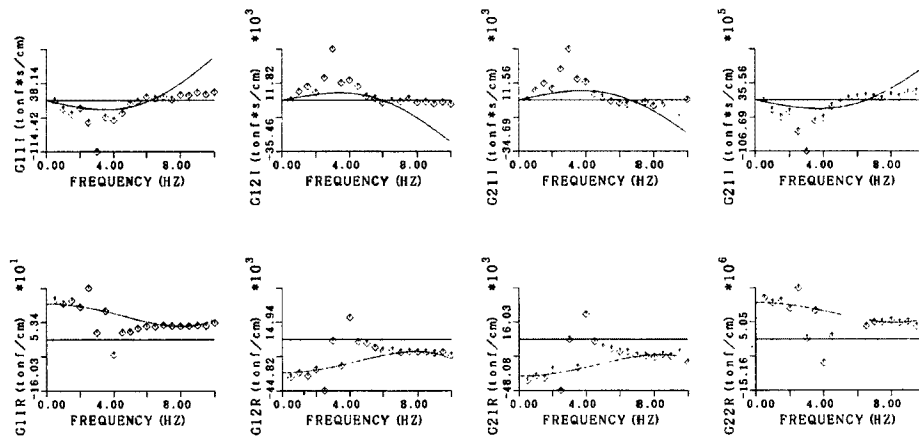


Fig. 10. Experimental and approximate complex stiffness considering nondiagonal coupling term.

実験結果を用いて複素剛性を求めた。これを示したものが Fig. 10 である。△印が実験データであり、下段は剛体 2 自由度系の剛性マトリクスの各要素に、上段は減衰マトリクスの各要素に対応している。

1 本杭の場合と同様、このままではフーリエ変換後の時刻歴は因果性を満たさない。また、1 通りの加振実験から複素剛性マトリクスの対角項だけを用いて求めたデータのように単純な 2 次関数として近似しえないため、これを図中の下段の実線のように 4 次関数で近似した。上段の実線はこれを Hilbert 変換することによって求めたものである。Fig. 11 はこの関数近似したデータを基に逆フーリエ変換によって複素剛性の時刻歴を求めたものである。式 (21) のカットオフ周波数を 15 Hz としたため、この振動数が卓越した時刻歴となっている。また、因果性も満足していることがわかる。

### 3.3 ハイブリッド実験

Fig. 12 に 1 本杭、2 本杭に対する case 3 (対角項のみを考慮した合成積モデル) の実験より求められた復元力の履歴ループを示す。図において、左側の (a)、(b) は 1 本杭、右側の (c)、(d) は 2 本杭、

また、上段の (a), (c) は並進、下段の (b), (d) は回転の履歴である。(a), (c) を比べると剛性、振幅とも2本杭の方が大きくなっている。1本杭ははじめの数回の履歴の後にループ全体が負の変位方向に移動し、残留変位の残る傾向を示している。これは1本杭の剛性が小さいため、同じ加力でも2本杭より変位が大きくなり、地盤の応答が非線形領域に入るためである。Fig. 13(a), (b) は Taft S 69 E の最大加速度を 30, 60, 120, 180, 240, 300 gal に設定して入力加速度とし、それぞれ1本杭, 2本杭に対して case 3 の実験を行ったものである。図には重心点での水

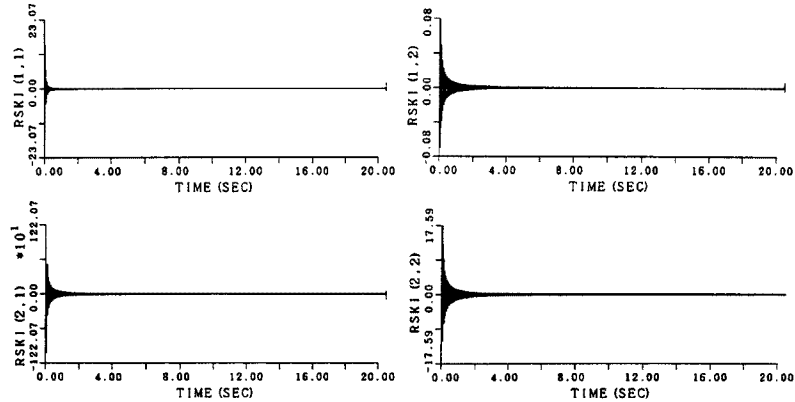


Fig. 11. Time history of complex stiffness.

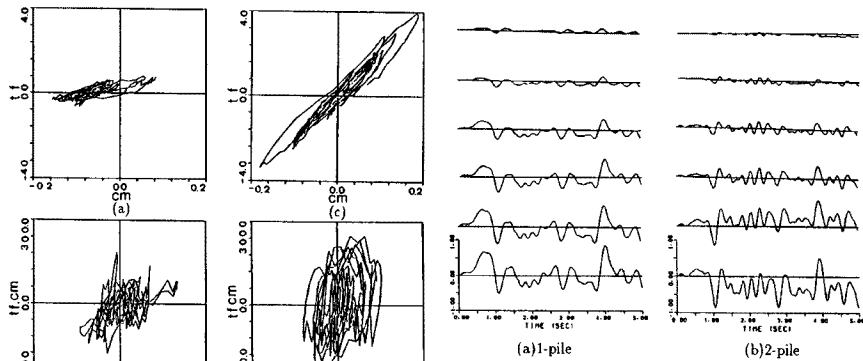


Fig. 12. Restoring force characteristics of 1- and 2-pile systems (left & right) in sway and rocking modes (up & down).

Fig. 13. Responses of 1- and 2-pile systems at the center of gravity (case 3) for Taft record modifying maximum acceleration as 30, 60, 120, 180, 240, and 300 gal.

平変位が示されており、上から入力加速度の大きさが増加する方向に整理してある。2本杭の方が1本杭よりも高振動数が卓越している。これは1本杭の卓越振動数が2.5 Hz, 2本杭の卓越振動数が4.5 Hzであるためである。Fig. 13から、1本杭では Taft 180 gal 入力において地盤の塑性変形によって時刻歴が基線からずれる傾向を持つものに対し、2本杭では杭全体としての剛性が大きいため240 gal からこの傾向が現れ始め、300 gal では1本杭と比べかなり大きな残留変形を示している。また、1本杭では1秒までの時点で大きな変位が現れ、これによって塑性領域に入ると思われる。この傾向は120 gal から現れ始める。

Fig. 14 は2本杭 180 gal 入力の case 3 の実験における入力波形を Taft, 八戸そして筑波観測波の3通りに変えた場合である。重心点における水平変位の最大振幅は Taft, 八戸が約 0.5 cm, 筑波観測波が約 0.4 cm である。これは Fig. 15 のスペクトル図からも分かるように、2本杭の1次の固有振動数付近である 3~5 Hz における筑波観測波の周波数成分の振幅が Taft, 八戸に比べて小さいためである。

2本杭のハイブリッド実験の Taft 180 gal 入力に対して、case 1~case 4 までのすべてのケースについての応答を示したものが Fig. 16 である。ケース分けは上から順に 1, 2, 3, 4 となっている。(a) は重心点での変位、(b) は重心周りの回転角を表している。case 1 から case 4 まで波形に現れる周期はほぼ同じであるが、case 1 の定係数モデルと case 2 の付加質量モデルの振幅は他の2つのケースの振幅よ

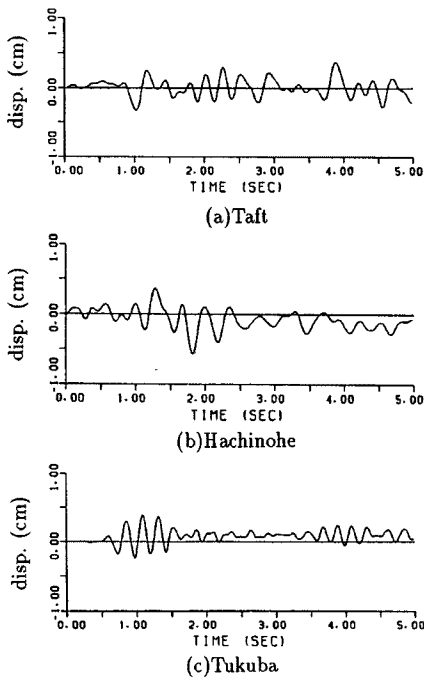


Fig. 14. Responses of 2-pile system (case 3) for Taft, Hachinohe and Tukuba records with maximum acceleration of 180 gal.

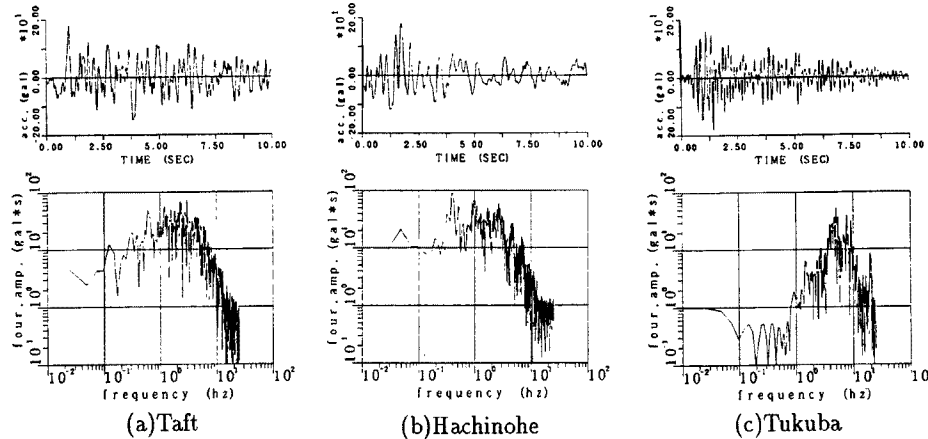


Fig. 15. Time histories and Fourier spectra of Taft, Hachinohe and Tukuba records. (modified maximum accelerations)

り大きくなっている。これは高振動数になるにしたがって2次関数的に増加する減衰の影響が考慮されていないためである。これに対し、システムとしての並進と回転の連成の生じないモデルである case 3 と、これらの連成を考慮して非対角項も独立に求めた case 4 とでは波形、振幅とも一致しており、case 3 の様より簡単なモデル化でも実際の現象を十分表現できることがわかる。また、case 1, 2 と case 3, 4 を相互に比較するとわかるように、質量効果および地下逸散減衰効果を考慮すると応答の振幅が 0.5 ~ 0.6 程度小さくなり、また付加質量という形で質量効果を取り入れただけでは十分でないことがわかる。

### 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。杭基礎に関する実験はさらに杭本数を増やして今後とも継続されるが、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) 1 本杭の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、倍率曲線を求めたところ、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することがわかった。定係数、付

加質量モデルは応答を大きめに見積る可能性がある。

(2) 1 本杭は 2 本杭より杭全体としての剛性が小さいため、同じ入力でも杭まわりの地盤は早く非線形領域に入り、時刻歴の早い時間帯で大きな変位が現れる。その結果、残留変形の出易い状態となる。

(3) システムとしての並進と回転の連成を考慮して複素剛性の非対角項を 2 通りの加振実験結果から独立に求めたモデル化の応答は、対角項のみを 1 通りの加振実験から求めたモデル化に対する応答と一致した。これより、ケーソン基礎に対するハイブリッド実験で開発した簡単なモデル化でも実際の現象を十分表現

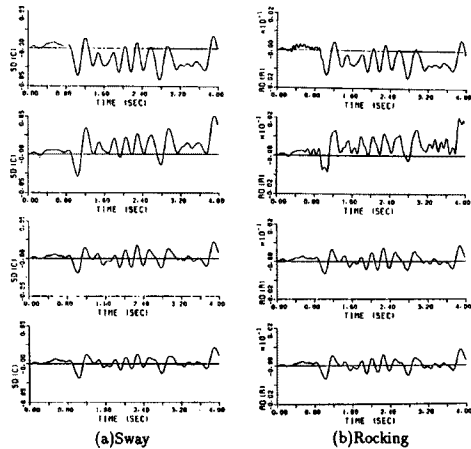


Fig. 16. Comparison of responses of 2-pile system at the center of gravity for four different expression of the frequency dependency of complex stiffness. (Taft 180 gal input)

できることがわかった。

(4) 周波数に依存した複素剛性によって質量効果と地下逸散減衰効果を考慮すると、応答の振幅はこれを考慮しないものに比べほぼ1/2程度に減少する。また、付加質量という形で質量効果を取り入れただけでは十分でないことがわかった。

#### 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杉本研究員、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) 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.
- 2) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・岡田恒雄: 電算機-アクチュエーターオンラインシステムによる構造物の非線形応答解析, 建築学会論文報告集, 229号, 1975.
- 3) 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.
- 4) Iemura, H.: Hybrid Experiments on Earthquake Failure Criteria of Reinforced Concrete Structure, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1984.
- 5) (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, 1987.
- 6) 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.
- 7) 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.