

(91) 付加重量による群杭基礎の地震応答特性

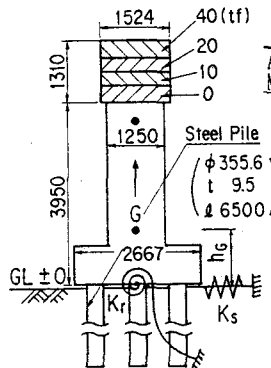
京都大学防災研究所 土岐憲三 佐藤忠信 清野純史 N.kishi G.
 ㈱奥村組筑波研究所 技術課 ○吉川正昭 耐震研究室 荒野政信

1. はじめに

反力壁と砂地盤の筑波実験場で、剛体基礎や杭基礎を築造し、ミニコンピュータと2台の電気油圧式加振機をオンラインで結合した。実験から、モデル化の非常に複雑な地盤-基礎の非線形復元力特性を求める。振動数に依存した動的相互作用効果を考慮できる振動方程式の数値解析と実験を並行して行える地震応答解析の総合システム(HENESSI)を開発した。このシステムの妥当性を地震観測結果との比較や加振実験結果から検証している。一連の実験では、上部構造は簡単な柱体を用いている。これは動的サブストラクチャ法^{1)・2)}を利用するためである。この手法は、FEMによる全体解析法で、構造物の自由度がそれほど大きくないとき、容易に解ける。しかし、複数の基礎や長大橋では自由度が相当大きくなり、大型コンピュータでもモデル化に制約を受ける。この不合理な点を対処すべく開発された。この手法で、地盤と構造物の動的相互作用を定式化する際、地盤-基礎と構造物を一時分割する。それぞれの動特性をそれらの間の境界部点に集約する形で求めておき、再び同節点での連続性から两部分系を総合する。同様に、HENESSIを上部構造物に比べて、非線形性の大きい地盤-基礎部に適用する。すなわち、地盤-基礎部の復元力特性を実験で求め、sway-rockingの2自由度モデルに取り入れる。この結果を上部構造物をモデル化した地震応答解析の中に組込む。このとき、上部構造物の重量により、どの程度地盤-基礎部の復元力特性が変わるかを予め求めておく必要がある。そこで、本研究では3本杭の柱体上部に付加重量を4段階に分けて、静的荷重実験、加振実験とハイブリットによるHENESSI実験³⁾を行い、それぞれの実験結果を比較考察した。

2. 付加重量による実験と目的

付加重量は平均厚さ25mmの鉄板を橋脚上部に設置した。3本杭の鉛直方向の極限支持力が約65tfであるため、2/3の約45tfを許容支持力と考えた。目標付加重量は10tfきざみで、10tf、20tf、30tf、40tfとした。鉄板を重ねたため、実施できた重量はFig.1に示すように目標値と少し異なる。最大付加重量40tf時の全橋脚重量は約59tfとなる。



| Additional Mass (tf) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W | 183 | 277 | 378 | 472 | 577 |
| h_g | 1.0 | 1.5 | 2.1 | 2.6 | 3.2 |
| I_g | 1662 | 2495 | 3011 | 3346 | 3674 |
| | 3232 | 7043 | 9874 | 12063 | 14843 |
| M_0 | 1.0 | 2.2 | 3.1 | 3.7 | 4.6 |
| | 0.186 | 0.283 | 0.386 | 0.482 | 0.589 |

W: total weight on the pile (kN)
 h_g : center of gravity (mm)
 I_g : mass moment of inertia (kN·cm·sec²)
 M_0 : mass (kN·cm⁻¹·sec²)

Fig. 1 Additional Mass of 3 Piles

構造物の重心位置は無載荷時の1662mmに比べ、付加重量のため、上方に移動する。40tf載荷時、フーチング下端から3674mmとなり、無載荷比べて約2mも上方に移動する。HENESSIによるサブストラクチャ法への適用の第一段階として、同一形状の杭基礎を有する5種類の重心位置の相違した実験を付加重量を変えて行い、応答特性を比較し、付加重量の影響を求めている。

3. 実験結果と考察

静的水平荷重試験(重心位置で並進または動揺のいずれかのモードを生じるように、200秒周期の正弦波1波を与える)による復元力特性、骨格曲線をFig.2,3に示す。履歴曲線は0tf、10tf、30tfを示す。骨格曲線は20tf載荷時を除いて、ほぼ似た形状になる。次に、各種付加重量の加振実験(上側アクチュエータを用い、0.5mmの変位制御で正弦波を与える)から、得られた動揺と並進の位相特性と応答倍率の共振曲線をFig.4に示す。応答倍率の縦軸は単位加振力1tfあたりの応答回転角又は変位を示す。同図から、付加重量0、10、20の単峰型に対し、30、40では連峰型の共振曲線を示す。30で6Hz、40で5Hzの2次の共振振動数

は付加重量に用いた積み重ねた鉄板の上下振動によるものと考えた。1次の共振振動数をTable-1に示す。並進と動揺時の共振振動数は同じとなる。重量を加えると共振振動数は低下する。Kを一定とし、 M_0 を5段階に変えた値を併記した。計算値は実験結果より小さくなる。同一試験体に付加重量を加えたため、少しずつ地盤強度が低下したことも原因である

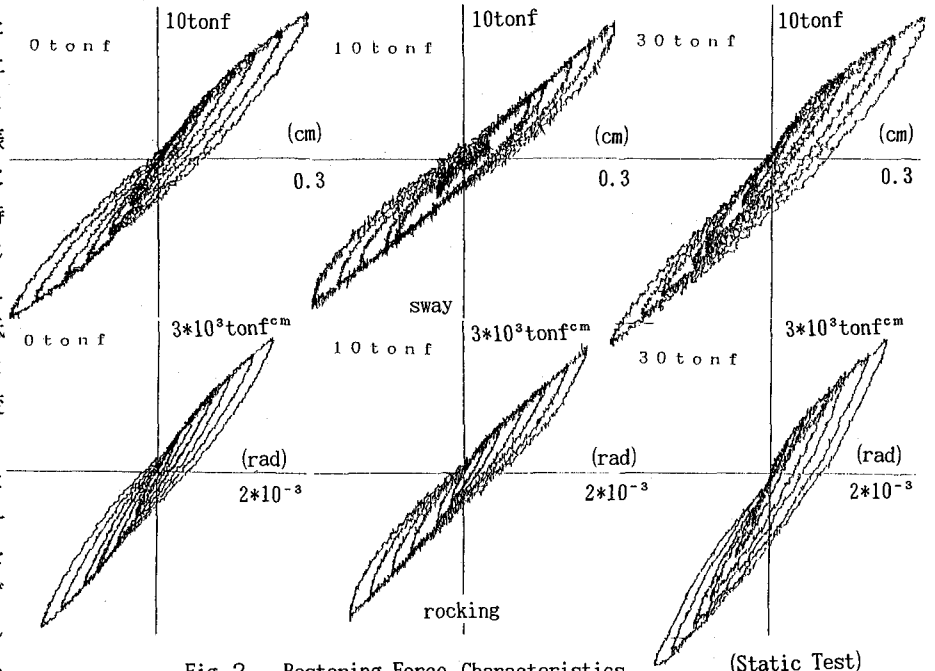


Fig. 2 Restoring Force Characteristics (Static Test)

う。並進では付加重量を加えていくと、1次共振時のピーク値が低下する。逆に、動揺では増加する。これは後述の各付加重量に対するばね定数の増加(並進)、減少(動揺)に対応する。付加重量の増加につれ、並進モードが減少し、動揺モードが卓越する。重心が上方に移動したトップヘビィな構造物になるにつれ、動揺モードが卓越することがわ

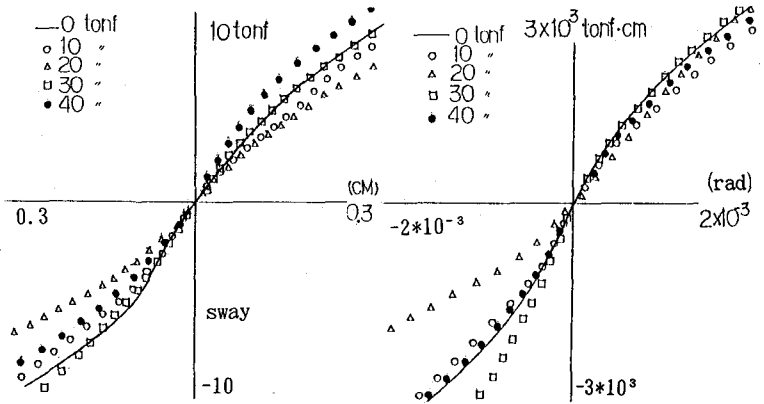


Fig. 3 Skeleton Curve (Static Test)

かる。更に、共振曲線を用いて、複素剛性を求め、Fig.5に示す。実数部は無載荷時に振動数に依存して低下するのに対し、付加重量が増えると、1次の共振振動数を越えると急激に増加する。虚数部は振動数に依存して増加する。加振実験の入力変位は0.5mmと小さくしたので、実数部の0Hz付近は初期剛性に対応する。高振動数領域で値がばらつくのは鉄板の上下振動による影響のためと考えられる。1次の共振振動数以下で、付加重量による影響は小さい。次に、120ガルの連続スイープ波入力によるHENESSを用いたときの復元力特性曲線をFig.6に示す。並進と動揺の復元力特性曲線で大きな変化は示さない。更に、共振振動時に復元力特性曲線の接線勾配(${}_1K_s, {}_1K_R$)と割線勾配(${}_sK_s, {}_sK_R$)より求めたばね定数をFig.7に示す。共振時に、非線形復元力により失われたエネルギーをヒステリシスと囲む面積に等価した等価粘性減衰定数 h を求め、点線で同図に併記した。並進ばねの初期剛性、割線剛性は、共に付加重量が増えると多少増加する。逆に動揺ばねは多少減少する。いずれも大きな変化ではない。等価減衰定数は9%から13%と増加する。次に、タクト180ガルの付加重量10, 20, 30に投入したときの重心位置の水平変位と回転角をFig.8に示す。各載荷時の応答変位と回転角の波形は類似し、各最大値も大差ない。

4. サブストラクチャ法

上部構造に代表例として、1質点の弾性せん断型の構造物を考える。基礎の復元力が上部構造と分離できるように最下段の式(1),(2),(3)を用いる。今回のモデルを

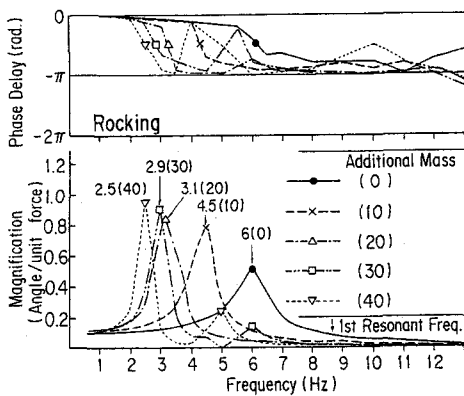


Table-1 Resonant Frequency (Sway and Roking Mode)

| Additional Mass | (tf) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|--------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1st Resonant Frequency (Hz) | | 6.0 | 4.5 | 3.1 | 2.9 | 2.5 |
| $f=1/(2\pi) \cdot \sqrt{K/M_0}$ (Hz) | | 6.0 | 4.8 | 4.1 | 3.7 | 3.4 |

Fig.9 に示す。入力定数は次のようになる。

$M_F = M_B = 0.186, K_B = 981, K_{S0} = K_S + K_{S1} f^2 = 588.6, K_{S1} = 0.081,$

$K_{R0} = K_R + K_{R1} f^2 = 35.3 \times 10^6, K_{R1} = 51.5 \times 10^2, h_1 = 3, h_2 = 3.4,$

$h_3 = 1.9, h_G = 1.6, I_F =$

$8370.1,$ 単位 (kN, cm, s)

は省略する。

基礎の水平変位 U_B , 回転角 θ_B , 上部構造の水平変位 U_u をタフト 180 ガルを入力して求める。

式(1)の非対角項を考慮しない K_S, K_R を式(2),(3)に代入し, H ENESS I 実験より求める。 U_u, U_B, θ_B を Fig.10 に示す。このとき用いた地盤-基礎の復元力特性曲線を Fig.11 に示す。 Fig.10 にシミュレーションで求めた線型解析結果を併記した。

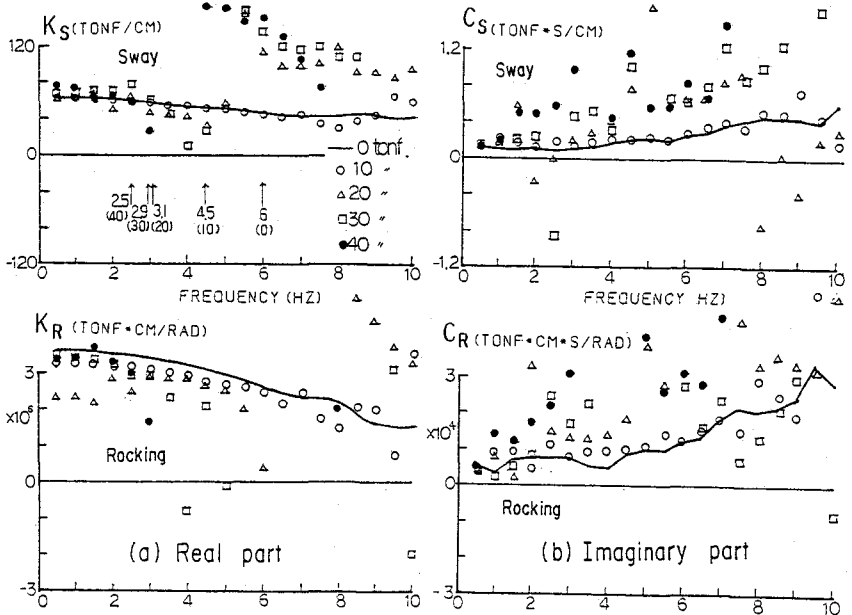


Fig. 5 Complex Stiffness

Equation for Substructuring Method [E q. (1), (2), (3)]

$$\begin{bmatrix} M_B & M_B & M_B h_1 \\ M_B & M_B + M_F & M_B h_1 + M_F h_G \\ M_B h_1 & M_B h_1 + M_F h_G & M_B h_1^2 + M_F h_G^2 + I_G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_u \\ \ddot{U}_B \\ \ddot{\theta}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_B & 0 & 0 \\ 0 & C_S & 0 \\ 0 & 0 & C_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_u \\ \dot{U}_B \\ \dot{\theta}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_B & 0 & 0 \\ 0 & K_S & 0 \\ 0 & 0 & K_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_u \\ U_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_B \\ M_B + M_F \\ M_B h_1 + M_F h_G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \ddot{U}_g \\ 0 \end{Bmatrix} \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} K_B \\ K_S \\ K_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_u \\ U_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_B \\ F_F \\ M \end{Bmatrix} \dots (2)$$

$$\begin{Bmatrix} F_F \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ h_2 & h_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \dots (3)$$

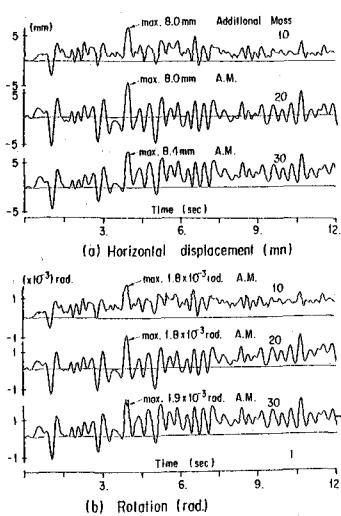


Fig. 8 Time Series Wave Form at Gravity Center (Taft, 180 cm/sec²)

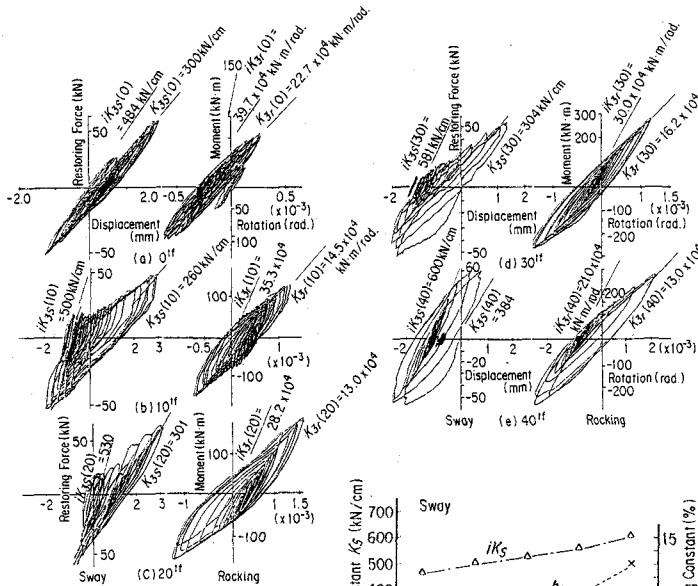


Fig. 6 Restoring Force Characteristics (Additional Mass of 3 Piles)

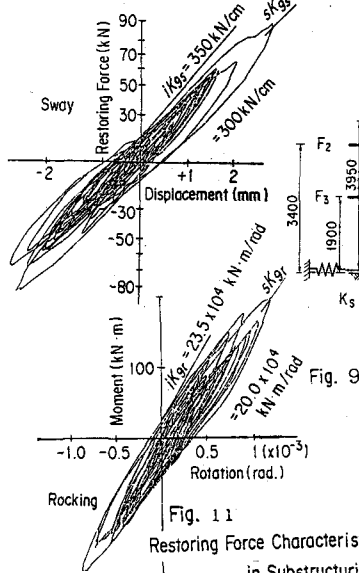


Fig. 9

Model for Substructuring Applications

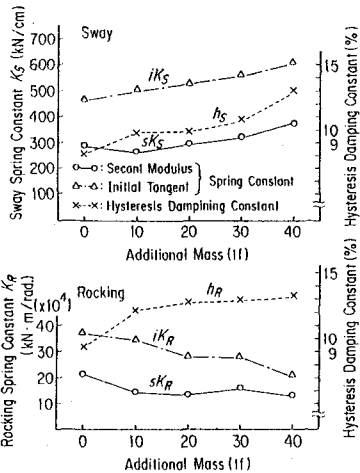


Fig. 7 $iK_{S,R}$, $sK_{S,R}$, $h_{S,R}$ and Additional Mass

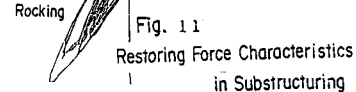


Fig. 11

Restoring Force Characteristics in Substructuring

5. まとめ

付加重量を変えて、HENESS I による地震応答解析を行った。重心が変わるため、共振振動数が移動し、別の振動系となる。しかし、ばね定数に大きな変化はなく、このばねを組み入れた全体系を開発できた。

参考文献 1) 竹宮：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法の適用，土と基礎 1981, 9, PP. 27 ~ 34 2) Lysmer, Tabatabaie, Tajirian etc; SASSI-A system for analysis of soil-structure interaction, UCB Report, 1981 3) 吉川他；3種類の剛体基礎の地盤反力係数と復元力特性，第20回地震工学研究発表会，1989, 7, PP. 349 ~ 352

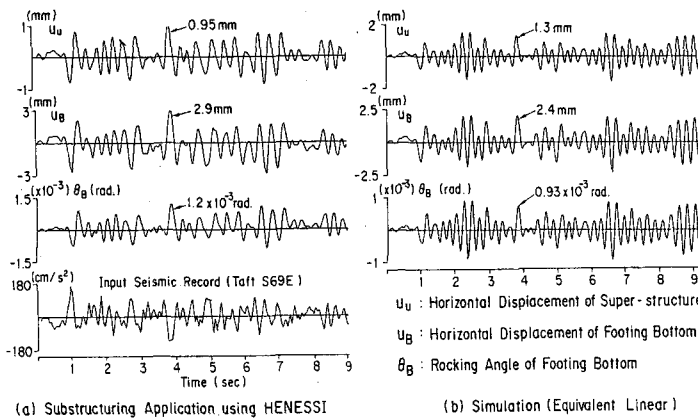


Fig. 10: Substructuring Application using HENESS I