

岡山大学大学院 学生員 甲斐史朗

岡山大学工学部 正 員 竹宮宏和

1. まえがき

地震時の構造物の挙動において、地盤と構造物の動的相互作用の重要性が認識されて多くの解析例が報告されているが、筆者らは、当問題に対して動的サブストラクチャ法を開発してきた。この解析法の特徴は、まず下部、上部構造を独立して扱い、その後両者の連成系としての定式化を切断面における連続条件を適用して行なう。今回の報告は、多入力点を有する不静定構造物を対象としたもので、解析は深い根入れ基礎を有する多径間連続高橋脚橋(図1)の橋軸直角方向である。合わせて入力の近似評価法を提案する。

2. 定式化

本解析では、ピアー、ガーダ等を合わせて上部構造、地盤-机-フーチング等を下部構造と称す。

仮定: (1)上部構造を通常の3次元梁要素で離散化する。(2)各机は弾性梁で、先端は支持層に剛結、また机頭はフーチングに剛結状態とする。(3)机の縦振動と横振動は独立して扱う。(4)フーチングは並進と回転運動をする剛体とする。(5)地盤は剛基礎上の層状粘弾性とする。(6)机への地盤反力はBaranovの平面歪解を採用する。この近似度については既に報告した。^{1), 2)}

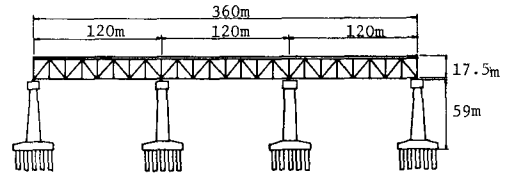


図1. 解析対象構造物

下部構造: 単机の机頭インピーダンスは一般に

$$[K_{pile}] = \begin{bmatrix} (E_P I_P / H^3) F_{xx} & (E_P I_P / H^2) F_{x\theta} & 0 \\ (E_P I_P / H^2) F_{\theta x} & (E_P I_P / H) F_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & (E_P A_P / H) F_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $E_P I_P$ = 机の曲げ剛性、 $E_P A_P$ = 軸力剛性、 F_{ij} = 変位関数で添字 j は力の作用方向、 i は変位方向を示す。H = 全机長。

支持層での入力(基盤入力)に対して、机基礎の運動方程式は¹⁾

$$[M]_F \ddot{\{x\}} + \left(\sum [a]_p^T [K]_{pile} [a]_p \right) \{u\}_F = [a]_p^T \{F\}_s + [a]_F \{R\} \quad (2)$$

ここに、 $[M]_F$ = 2自由フーチングの質量マトリックス、 $[a]_p$ = フーチングの重心から各机頭位置への変位影響マトリックス、 $[a]_F$ = 同重心からその頂部への変位影響マトリックス、 $\{F\}_s$ = 地盤振動と机の変形に起因する外力ベクトル、 $\{R\}$ = フーチング頂部の断面力ベクトル、 $\{x\}$ = 絶対変位ベクトル、 $\{u\}$ = 相対変位ベクトル、式(2)は、等価剛性、等価粘減衰を定義することにより $[M]_F \ddot{\{x\}} + [C]_F \dot{\{u\}}_F + [K]_F \{u\}_F = [a]_p^T F_s + [a]_F \{R\} \quad (3)$

上部構造: マトリックス構造解析より、運動方程式は $[M]_{sup} \ddot{\{x\}}_{sup} + [C]_{sup} \dot{\{x\}}_{sup} + [K]_{sup} \{x\}_{sup} = \{F\} \quad (4)$ と与えられるが、絶対変位ベクトル $\{x\}_{sup}$ を下部構造との境界節点のもの $\{x_j\}_{sup}$ とそれ以外の自由節点のもの $\{x_i\}_{sup}$ に分割する。それに従って質量、減衰および剛性マトリックスを分割マトリックスで表わす。いま $\{x_i\}_{sup}$ を、境界を拘束したときの動的変位 $\{x_i^c\}$ と、拘束を解除したことによる準静的変位との和と考えるならば²⁾

$$\{x_i\}_{sup} = \{x_i^c\}_{sup} + [\beta]_{sup} \{x_j\}_{sup} \quad (5) \quad \text{ただし} \quad [\beta] = -[K_{ii}]_{sup}^{-1} [K_{ij}]_{sup}$$

式(5)右辺の変位ベクトルを使って式(4)を表わせば

$$\begin{bmatrix} [M_{ii}] & [M_{ii}][\beta] + [M_{ij}] \\ [\beta]^T [M_{ii}] + [M_{ji}] & [\beta]^T [M_{ii}] + [\beta] + [M_{ji}] + [\beta][\beta]^T [M_{ij}] + [M_{jj}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ii}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [0] \\ [0] & [K_{jj}] + [\beta] + [K_{jj}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{F_j\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

全体系: 複数の下部構造と上部構造を切断面の連続条件式 $[\beta] \dot{\{u\}}_F = \{x_j\} \quad (7) \quad \{\ddot{R}\} + \{F_j\} = \{0\} \quad (8)$

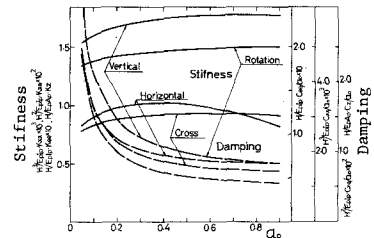


図2. 机基礎の等価剛性・粘性減衰

を使って連成振動系として総合する。この場合、上部構造の自由度を低減するため固有モード分解を行なう。すなわち、 $[\Phi]^T[M_{11}][\Phi] = [I]$; $[\Phi]^T[C_{11}][\Phi] = [2\xi_k\omega_k]$; $[\Phi]^T[K_{11}][\Phi] = [\omega_k^2]$; $[\Phi]$ =固有モードマトリックスを利用すると、全体系の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} [I] & [\Phi]^T([M_{11}][\beta]+[M_{1j}])[\ddot{\alpha}]_F \\ [\ddot{\alpha}]_F^T([\beta]^T[M_{11}]+[M_{j1}])[\Phi] & [\ddot{M}]_F+[\ddot{\alpha}]_F^T([\beta]^T[M_{1j}][\beta]+[M_{j1}][\beta]+[\beta]^T[M_{1j}]+[M_{jj}])[\ddot{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q^c\} \\ \{u\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\xi_k\omega_k] & [0] \\ [0] & [\ddot{c}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q^c\} \\ \{\dot{u}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\omega_k^2] & [0] \\ [0] & [K]_F+[\ddot{\alpha}]_F^T([K_{11}][\beta]+[K_{jj}])[\ddot{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q^c\} \\ \{u\}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -[M]_F\{\ddot{u}_g\} + [\ddot{\alpha}]_F^T\{F\}_s \end{Bmatrix} \quad (9)$$

3. 解析結果

番，州地盤について、単杭 ($A_p=4.52m^2$, $I_p=3.46m^4$, $H=52m$) の杭頭インピーダンスを計算したものを図2に、また上部構造物の固有値解析結果を図3に、基盤入力に対する全体系の応答倍率を図4に示す。地盤の振動解析より得た地表面応答を図4に描いてある。上部構造物の振動特性として、低次ではねじれが、高次(4~6)次で並進が卓越している。応答計算では、式(9)の厳密解と地表面の動きを地盤一構造物系に入力した近似解法を採った(絶対座標系を使用)。以上の結果として、(1)対象構造物では、地盤との相互作用は、地盤振動モードと地盤構造物系モード両者が顕著に現われている。(2)こうした振動系の近似応答計算は、地表面入力を地盤一構造物系に使用することによって十分な精度が期待できる。

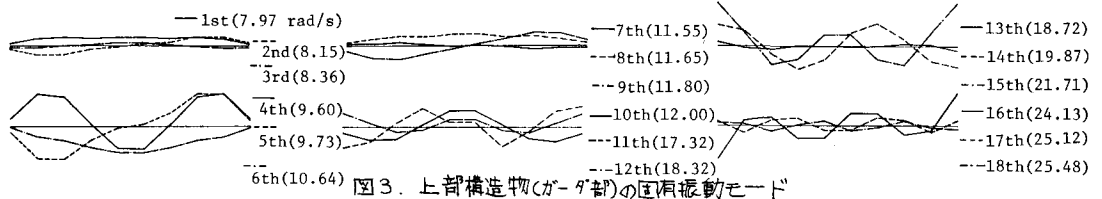


図3. 上部構造物(ガ-ガ部)の固有振動モード

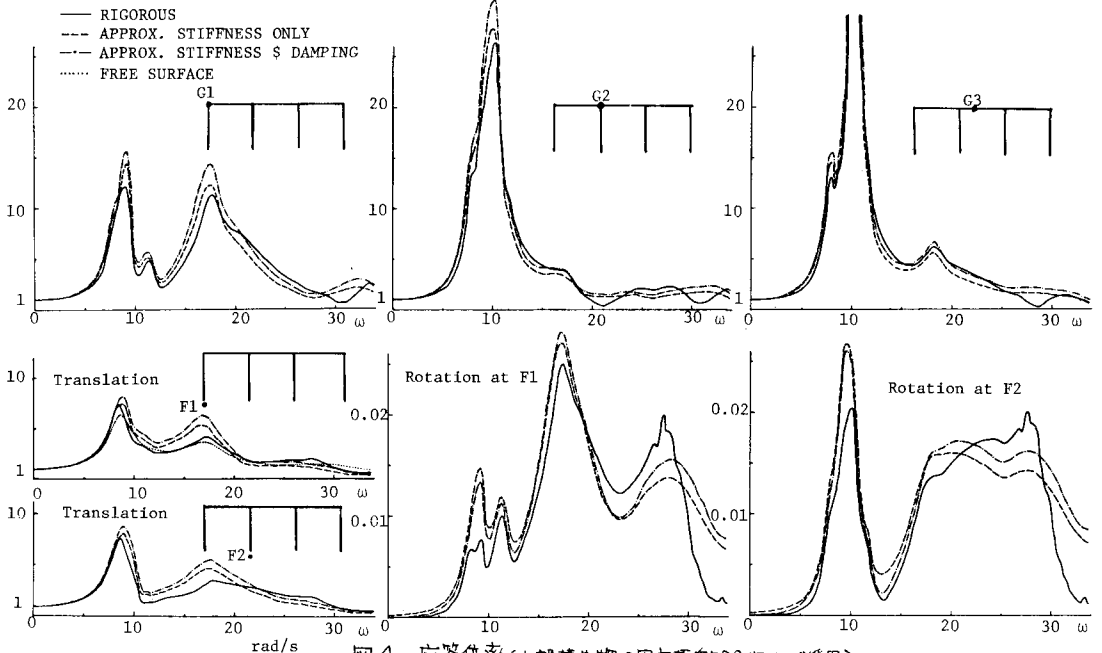


図4. 応答倍率(上部構造物の固有振動30次まで採用)

参考文献 (1)土木学会, 高橋脚橋梁の耐震設計に関する調査研究報告書, 昭和51年度, pp.29-31 (2)竹宮 山田, "多層地盤-杭基礎-上部構造物系の振動特性", 第34回土木学会年次学術講演会概要集I-198, 1979 (3)Yamada, Y. & Takemiya, H. "Layered Soil-Pile-Structure Dynamic Interaction", Int. J. Earthq. Eng. & Struc. Dyn. (to appear); (4)Kukreti, A.R. & Feng, C.C., "Dynamic Substructuring for Alternating Subsystems", J. Eng. Mech. Div., ASCE, Oct. 1978, pp.1113-1129 (5)土木学会, 本州四国連絡橋の耐震地盤に関する調査研究報告書, 昭和53年度, pp.18-21