

1. まえがき

地震時の構造物の応答性状において、基礎構造物が深い根入れを有する場合、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。当問題に対して、筆者らは動的サブストラクチャ法を開発してきた^{1,2,3,6)}。通常の構造物の耐震設計では同時入力状態の下で応答スペクトル手法が採用されているが、地震波の伝播を考えると、多点入力系では各入力の位相差効果を同時入力と比較し把握しておくことは重要である。今回の報告は、前回の報告に引き続き3径間連続高架橋(図1)について、入力における近似評価および地震波の伝播による入力位相差効果について検討を行った。

2. 定式化

本解析では、地盤-杭-フーチング部を下部構造、ピラー、ガーダー部を合わせて上部構造と称し、下部構造と上部構造を合わせて全体系とする。各構造の運動方程式および入力位相差について以下に示す。

下部構造:

$$[M]_F \{\ddot{x}\}_F + [C]_F \{\dot{x}\}_F + [K]_F \{x\}_F = [\alpha]_p^T \{F\}_s + [\alpha]_F^T \{R\} + [C]_F \{\dot{x}_g\} + [K]_F \{x_g\} \quad (1)$$

ただし、 $[M]_F$ =2自由度フーチングの質量マトリックス、 $[\alpha]_p$ =フーチングの重心から各杭頭位置への変位影響マトリックス、 $[\alpha]_F$ =同重心からその頂部への変位影響マトリックス、 $\{F\}_s$ =地盤振動と杭の変形に起因する外カベクトル、 $\{R\}$ =フーチング頂部の断面カベクトル、 $\{x\}_F$ =絶対変位ベクトル、 $\{x_g\}$ =地盤変位ベクトル、 $[C]_F, [K]_F$ =単杭の杭頭インピーダンス $[k_{pile}]$ より求められる $\sum [\alpha]_p^T [k_{pile}] [\alpha]_p$ の等価粘性減衰および等価剛性

上部構造:

$$\begin{bmatrix} [M_{ii}] & [M_{ij}][\beta] + [M_{jj}] \\ [\beta]^T [M_{ii}] + [M_{ji}] & [\beta]^T [M_{ii}][\beta] + [M_{ji}][\beta] + [\beta]^T [M_{ij}] + [M_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_i^c\} \\ \{\ddot{x}_j\}_{sup} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ii}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_i^c\} \\ \{\dot{x}_j\}_{sup} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [0] \\ [0] & [K_{ji}][\beta] + [K_{jj}] \end{bmatrix}_{sup} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x_j\}_{sup} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F_j\}_{sup} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、マトリックス構造解析による運動方程式 $[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}$ の絶対変位ベクトル $\{x\}$ を下部構造との境界節点のもの $\{x_j\}$ とそれ以外の自由節点のもの $\{x_i\}$ に分割し、それに応じて質量、減衰および剛性マトリックスを分割マトリックスで表す。また、 $\{x_i\}$ 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、 $\{x_i\} = \{x_i^c\} + [\beta]\{x_j\}$ ただし、 $[\beta] = -[k_{ii}]^{-1}[k_{ij}]$ とする。

全体系:

$$\begin{bmatrix} [I] & [\phi]^T ([M_{ii}][\beta] + [M_{jj}]) [\tilde{\alpha}]_F \\ [\tilde{\alpha}]_F^T ([\beta]^T [M_{ii}] + [M_{ji}]) [\phi] & [\tilde{M}]_F + [\tilde{\alpha}]_F^T ([\beta]^T [M_{ii}][\beta] + [M_{ji}][\beta] + [\beta]^T [M_{ij}] + [M_{jj}]) [\tilde{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_i^c\} \\ \{\ddot{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\xi_i \omega_i] & [0] \\ [0] & [\tilde{c}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_i^c\} \\ \{\dot{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\omega_i^2] & [0] \\ [0] & [K]_F + [\tilde{\alpha}]_F^T ([K_{ji}][\beta] + [K_{jj}]) [\tilde{\alpha}]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i^c\} \\ \{x\}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [\tilde{\alpha}]_p^T \{F\}_s + [C]_F \{\dot{x}_g\} + [K]_F \{x_g\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ただし、複数の下部構造と上部構造の切断面の連続条件より、 $\{x_j\} = [\alpha] \{x\}_F$ 、 $\{\ddot{R}\} + \{F_j\} = \{0\}$ 、上部構造の固有モード分解より、 $[x] [M_{\alpha}] [x] = [I]$ 、 $[x] [C_{\alpha}] [x] = [-2\zeta_j \omega_j]$ 、 $[x] [K_{\alpha}] [x] = [-\omega_j^2]$ 、 $\{x_j^i\} = [x] \{q^i\}$ 、 $[x] =$ 固有モードマトリックス

入力位相差：

波動伝播モデルとして図2に示すように、SH波が鉛直に対して α の角度をなして入射してくる場合、見かけ上の波動が水平方向に伝播することになる。水平距離 D_i 離れた各基礎に対する位相遅れ時間 t_i はつぎのように表わされる。

$$t_i = \frac{\sum D_i}{V_s} \sin \alpha \quad (4) \quad \text{ただし、} V_s = \text{基盤のせん断波速度}$$

よって、式(3)の外力項において、各基礎の入力には式(4)に従う位相差が存在することになる。

3. 解析結果

番、州地盤モデルについて杭頭インピーダンスを計算したものを下部構造特性として採用し、入力地震波形には、宮城県沖地震東北TR記録(継続時間18.80秒使用)の最大加速度 $100g$ に修正したものをを用いている。近似解法として地表面の動きを地盤-構造物系に入力している。加速度および変位の時刻歴応答を図3、4に、また加速度および変位の最大応答値分布を図5、6にそれぞれ示す。以上より得られた結果を要約すると、(1)対象構造物では、地盤との相互作用は応答倍率と同様に時刻歴応答においても地盤振動と地盤-構造物系の両者が顕著に現われている。(2)動的相互作用系の応答計算で、地表面入力を使用すると安全側の応答評価と与える。(3)位相差入力の場合、固有振動モードとの関連で最大応答値分布が同時入力の場合と異なり、断面によっては高次モードが増巾され応答が大きくなることもある。

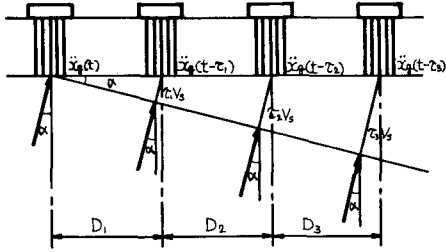


図2. 波動伝播モデル

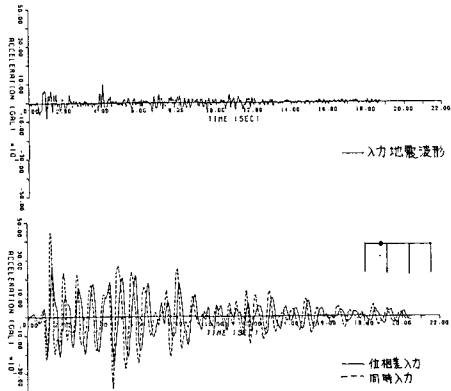


図3. 加速度時刻歴応答

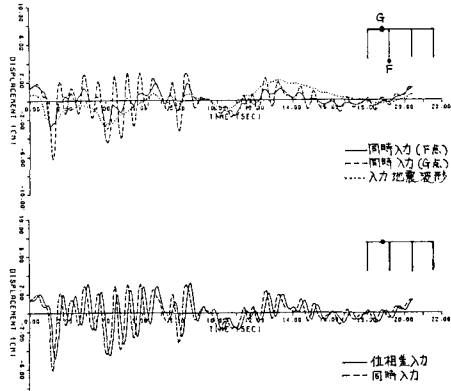


図4. 変位時刻歴応答

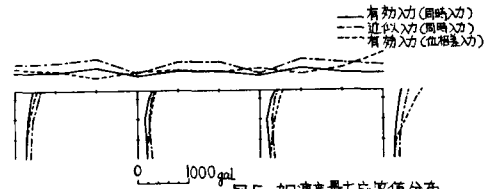


図5. 加速度最大応答値分布

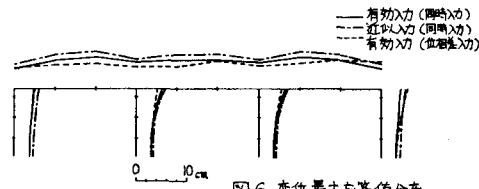


図6. 変位最大応答値分布

参考文献 1) 土木学会、高橋脚基礎の耐震設計に関する調査研究報告書、昭和53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) Takemiya, H. and Yamada, Y., "Layered Soil-Pile-Structure Dynamic Interaction", J. Earthq. Eng. & Struc. Dyn., Vol. 9、4) 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、5) 甲斐、竹宮、"動的ワストラクチャ法による地盤-構造物系の地震応答解析"、第35回土木学会年次学術講演会概要集I-267、1980、6) 竹宮、山田、"深い杭基礎を有する高橋脚の地盤との地震時動的相互作用"、土木学会論文報告集、投稿中、