

入力位相差を考慮した連続高架橋の地震応答解析

岡山大学工学部 正員 竹宮 宏和
岡山大学大学院 〇学生員 甲斐 史朗

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。また、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、下部構造のインピーダンス効果を考慮した3径間連続高架橋(図1)について、橋軸直角方向の地震時挙動を対象に、特に、地震波の伝播による入力位相差効果について検討したものである。定式化には動的サブストラクチャ法を適用している。

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、ガーダ部を合わせて上部構造と称す。

下部構造：単杭の杭頭インピーダンスは、一般に、

$$[K_{pile}] = \begin{bmatrix} (E_p I_p / H^3) F_{xx} & (E_p I_p / H^2) F_{x\theta} & 0 \\ (E_p I_p / H^2) F_{x\theta} & (E_p I_p / H) F_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & (E_p A_p / H) F_{\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $E_p I_p$ = 杭の曲げ剛性、 $E_p A_p$ = 軸力剛性、 F_{ij} = 変位関数(添字 j は力の作用方向、i は変位方向)、 H = 全杭長

支持層での入力(基盤入力)に対して、杭基礎の運動方程式は、

$$[M]_F \ddot{x}_F + (\Sigma [\alpha]_p^T [K_{pile}] [\alpha]_p) \{u\}_F = [\alpha]_p^T \{F\}_s + [\alpha]_p^T \{R\} \quad (2)$$

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力ベクトル、 $\{R\}$ = フーチング頂部の断面力ベクトル、 $\{x\}_F$ = 絶対変位ベクトル、 $\{u\}_F$ = 相対変位ベクトル

式(2)は、等価剛性、等価粘性減衰を定義することにより次のようになる。ただし、 $\{x\}_g$ = 基盤変位ベクトル

$$[M]_F \ddot{x}_F + [C]_F \dot{x}_F + [K]_F x_F = [\alpha]_p^T \{F\}_s + [\alpha]_p^T \{R\} + [C]_F \dot{x}_g + [K]_F x_g \quad (3)$$

上部構造：マトリックス構造解析より、運動方程式は、 $[M] \ddot{x} + [C] \dot{x} + [K] x = \{F\}$ (4) と与えられるが絶対変位ベクトル $\{x\}$ 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わす。いま、 $\{x_i\}$ を境界を拘束したときの動的変位 $\{x_i^0\}$ 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、 $\{x_i\} = \{x_i^0\} + \{\beta\} \{x_j\}$ (5) ただし、 $\{\beta\} = -[K_{ii}^{-1}] [K_{ij}]$ 式(5)の右辺の変位ベクトルを使って式(4)を表わせば次のようになる。

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

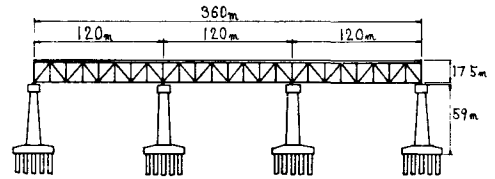


図1. 解析対象構造物

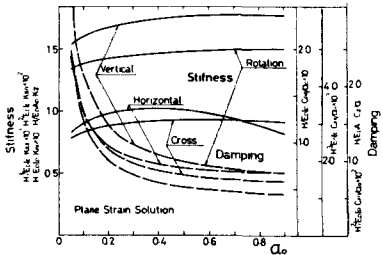


図2. 杭基礎の等価剛性・粘性減衰

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 $\{x_i\} = [\alpha] \{\tilde{x}\}_F$ (7) $\{R\} + \{F_i\} = \{0\}$ (8) を使って連成振動系とする動的ワブストラクチャ法により統合する。このとき、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、 $[E]^{-1}[M_{ii}][E] = [I]$ 、 $[E]^{-1}[C_{ii}][E] = [2\zeta_i \omega_i]$ 、 $[E]^{-1}[K_{ii}][E] = [\omega_i^2]$ 、 $[E]$ = 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次のようになる。

$$\begin{bmatrix} [I] & [E]^{-1}([M_{ii}][\beta] + [M_{ij}])[\alpha]_F \\ (\alpha)_F^T([\beta]^T[M_{ii}] + [M_{ji}])[E] & [M]_F + (\alpha)_F^T([\beta]^T[M_{ii}][\beta] + [M_{ji}][\beta] + [\beta]^T[M_{ij}] + [M_{jj}])[\alpha]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{x}\}_F \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [-2\zeta_i \omega_i] & [0] \\ [0] & [C]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{x}\}_F \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\omega_i^2] & [0] \\ [0] & [R]_F + (\alpha)_F^T([K_{ii}][\beta] + [K_{ji}])[\alpha]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{x}\}_F \\ \{\tilde{x}\}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ (\alpha)_F^T\{F\}_S + [C]_F\{Z\}_F + [R]_F\{Z\}_F \end{Bmatrix} \quad (9)$$

入力位相差：波動伝播モデルとして図3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 の2地点に対して位相遅れ時間 t_i はつぎのように表わされる。

$$t_i = \frac{D_i \sin \alpha}{V_s} \quad (10) \quad \text{ただし、} V_s = \text{基礎のせん断波速度}$$

よって、式(9)の外力項において、各基礎の入力には式(10)に従う位相差が存在する。

3. 解析結果

番, 州地盤モデル(地盤の非線形応答計算結果)について単杭 ($A_p = 4.52 \text{ m}^2$, $I_p = 3.46 \text{ m}^4$, $H = 52 \text{ m}$) の杭頭インピーダンスを計算したものを図2に、加速度および変位の時刻歴応答を図4, 図5に、また、加速度および変位の最大応答値を図6, 図7にそれぞれ示す。入力地震波形は、宮城県沖地震開北橋TR記録の最大加速度 100 gal に修正したものを用いている。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、応答倍率と同様に変位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)位相差入力

は、同時入力と比較して構造物全体では、振動モードの関係から最大応答値の現われる箇所が異なっている。

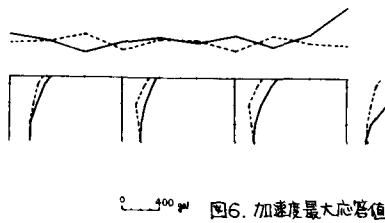


図6. 加速度最大応答値

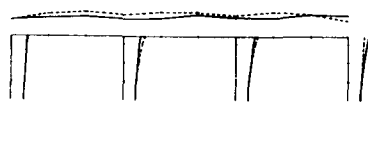


図7. 変位最大応答値

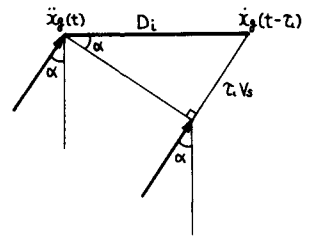


図3 波動伝播

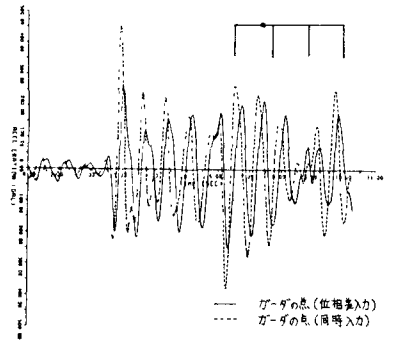


図4. 加速度時刻歴応答

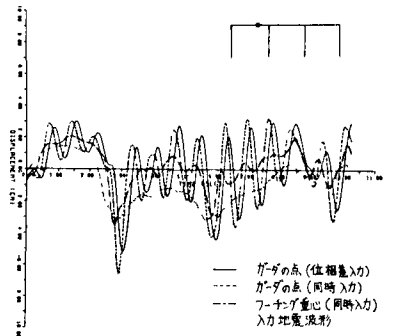


図5. 変位時刻歴応答

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) Takemiya, H. and Yamada, Y., "Layered Soil-Pile-Structure Dynamic Interaction", Int. J. Earthq. Eng. & Struc. Dyn. Vol. 9, 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, 6) 甲斐, 竹宮, "動的ワブ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.