

多スパン高架橋の地震応答解析

—動的サブストラクチャー法の適用—

岡山大学工学部 正員 竹宮宏和
 京都大学工学部 学生員 〇井上幸一
 同上 正員 山田善一

1. まえがき

最近、架設地の地理的条件から高橋脚を有する多スパン連続橋が建設される傾向にある。同橋梁の特徴は、ガーダ部とピア部ともにフレキシブルで、その地震時挙動の解析のためには両者の連成系としてのモデル化が肝要であろう。上記構造物の動的解析には、通常の有限要素法が直接適用できるが、コンピュータの容量、演算時間により分割数に制限がある。そのため解の精度もそれに依じたものとなる。本研究では、動的サブストラクチャー法を適用する。すなわち解析対象構造物をガーダ部とピアーフーチング系の構造部分系に分離し、それぞれをまず有限要素法で定式化し、固有モード解析する。その後、全体系の連成振動と両部分系の境界条件を介して総合する。採用する固有モード数の値減を計れば、通常的手法より多くの分割ができ、それぞれの部分系の特性をより忠実に導入した応答計算が効率よくできる。

2. 解析対象モデル

図1に示す連続高架橋の橋軸直角方向の運動を解析対象とした。これは地震時の橋梁上の走行安全性を検討するためである。解析に当たって次の仮定を設けた。

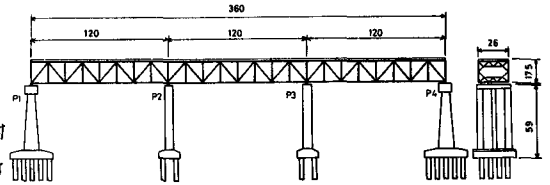


図1 3径間連続高架橋例

- (i) トラス構造のガーダ部、RC構造のピア部をそれぞれ等価断面梁に置換する。
- (ii) 橋軸直角方向の運動のみを捉える。従ってピアのねじれは無いものとする。
- (iii) ピア部は、下端においてフーチングに、上端においてガーダ部に剛結される。そしてガーダ部は自由端とする。
- (iv) フーチングは、並進と回転の2自由度とする。これに杭基礎インピンダンスとしての等価バネおよびダッシュポットをつける。

以上を考慮した解析モデルの断面諸元その他を表1に掲げる。

表1 構造諸元

GIRDER & PIER			
	E(t/m ²)	I(m ⁴)	W(t/m)
GIRDER	2.1 × 10 ⁷	76.9	66
PIER 1	2.69 × 10 ⁶	4720	117
PIER 2	2.69 × 10 ⁶	1826	257
PIER 3	2.69 × 10 ⁶	4720	117
PIER 4	2.69 × 10 ⁶	4720	117

FOUNDATION	
M(t ² s ² /m)	1.378 × 10 ³
J(t ² m ² s ²)	1.498 × 10 ⁵
K _H (t/m)	1.395 × 10 ⁶
K _R (t ² m)	6.078 × 10 ⁷
S _G (m)	2.5

3 定式化

ガーダ部 この部分のみを取り出し、梁要素で有限要素化すると一般に

$$[M]_G \ddot{x}_G + [C]_G \dot{x}_G + [K]_G x_G = \{F\}_G \quad (1)$$

となる。ここで $[M]_G$, $[C]_G$ および $[K]_G$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスを表わし、 $\{x\}_G$ は各節点の絶対変位ベクトル、 $\{F\}_G$ は外力ベクトルである。いま $\{x\}_G$ をピアとの接合点(境界節点)のもの $\{x_i\}_G$ と、それ以外の内部点(自由節点)のもの $\{x_j\}_G$ とに分離して上式を書き直せば

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

ここに $\{F_j\}_G$ はピアとの接合点に働く断面力である。ガーダ部の変位は、ピア部の変形があるため、それによって生じる量 $\{x_i^u\}_G$ と、接合部を拘束した状態で外力(慣性力)に起因する量 $\{x_i^c\}_G$ の和である(図2参照)。すなわち

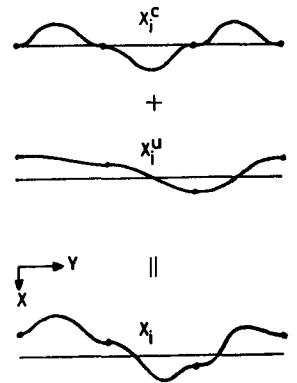


図2. ガーダ部の変形

$$\{x_i\}_G = \{x_i^u\}_G + \{x_i^c\}_G \quad (3) \quad \text{そして 前者は式(2)における静的フリあい状態から}$$

$$\{x_i^u\}_G = [\beta]_G \{x_j\}_G \quad (4) \quad \text{ただし } [\beta]_G = -[K_{ij}]_G^{-1} [K_{ij}]_G$$

$$\text{式(2)の変位ベクトルと、新しい変位ベクトルとは } \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i\} \end{Bmatrix}_G = \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [\beta] & [1] \end{bmatrix}_G \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i^c\} \end{Bmatrix}_G = [Y]_G \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i^c\} \end{Bmatrix}_G \quad (5)$$

なる関係があるので、式(2)に式(5)の変換を行ない、さらに左から $[r]_G^T$ を乗じると

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

ところで、式(4)および剛性マトリックスの対称性から 上式において

$$\left. \begin{aligned} [K_{jj}]_G + [\beta]_G^T [K_{ij}]_G + [K_{ji}]_G [\beta]_G + [\beta]_G^T [K_{ii}]_G [\beta]_G &= [K_{jj}]_G + [K_{ji}]_G [\beta]_G \\ [K_{ij}]_G + [K_{ii}]_G [\beta]_G &= [0] \quad [K_{ji}]_G + [\beta]_G^T [K_{ii}]_G = [0] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が成立する。式(7)はガーダ部とピア部の連成は慣性項に因ることを示している。減衰マトリックスについては

$$\left. \begin{aligned} [C_{jj}]_G + [\beta]_G^T [C_{ij}]_G + [C_{ji}]_G [\beta]_G + [\beta]_G^T [C_{ii}]_G [\beta]_G &= [0] \\ [C_{ij}]_G + [C_{ii}]_G [\beta]_G &= [0] \quad [C_{ji}]_G + [\beta]_G^T [C_{ii}]_G = [0] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)はガーダ部の内部減衰のみを考慮したことを意味する。

ピア-フーチング部 任意の i 番目の部分に有限要素化を行ない、境界節点と自由節点に分離すると

$$\begin{bmatrix} [M_{jj}] & [M_{ji}] & [M_{jf}] \\ [M_{ij}] & [M_{ii}] & [M_{if}] \\ [M_{fj}] & [M_{fi}] & [M_{ff}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i\} \\ \{x_f\}_{P,\ell} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{jj}] & [C_{ji}] & [C_{jf}] \\ [C_{ij}] & [C_{ii}] & [C_{if}] \\ [C_{fj}] & [C_{fi}] & [C_{ff}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_j\} \\ \{\dot{x}_i\} \\ \{\dot{x}_f\}_{P,\ell} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{jj}] & [K_{ji}] & [K_{jf}] \\ [K_{ij}] & [K_{ii}] & [K_{if}] \\ [K_{fj}] & [K_{fi}] & [K_{ff}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i\} \\ \{x_f\}_{P,\ell} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_j\} \\ \{0\} \\ \{F_f\}_{P,\ell} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで $\{x_j\}$ はガーダ部との接合点、 $\{x_i\}$ はフーチング天端との接合点の変位を表わす。 i 番目のフーチングの運動

方程式は、杭基礎のインピーダンスが与えられれば

$$\begin{bmatrix} m_F & 0 \\ 0 & J_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_F \\ \ddot{\theta}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{x\theta} \\ c_{\theta x} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_F \\ \dot{\theta}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{x\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_F \\ \theta_F \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ s_F & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q(t) \\ M(t) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

となる。図3を参照して、上式をフーチング天端の変位ベクトルに変換すると

$$\begin{bmatrix} m_F & -s_F m_F \\ \text{sym. } J_F + m_F s_F^2 & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_F \\ \ddot{\theta}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & -s_F c_{xx} + c_{x\theta} \\ \text{sym. } s_F^2 c_{xx} - 2s_F c_{\theta x} + c_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_F \\ \dot{\theta}_F \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_{xx} & -s_F k_{xx} + k_{x\theta} \\ \text{sym. } s_F^2 k_{xx} - 2s_F k_{\theta x} + k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_F \\ \theta_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q(t) \\ M(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

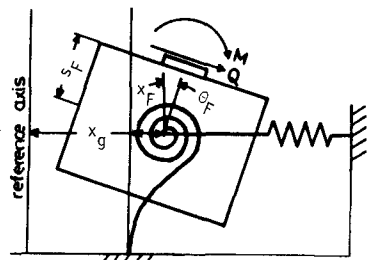


図3. フーチングの変位状態

$$\text{あるいは } [M]_F \ddot{x}_F + [C]_F \dot{x}_F + [K]_F x_F = \{F\}_F \quad (11')$$

$$\text{さらにピアとフーチングの接合点における境界条件 } \{x_f\}_{P,\ell} = \{x_f\}_{P,\ell} \quad \{F\}_{F,\ell} + \{F_f\}_{P,\ell} = \{0\} \quad (12)$$

式(9)と(11)に適用すれば

$$\begin{bmatrix} [M_{jj}] & [M_{ji}] & [M_{jf}] \\ [M_{ij}] & [M_{ii}] & [M_{if}] \\ [M_{fj}] & [M_{fi}] & [M_{ff}] + [M]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_j\} \\ \{\ddot{x}_i\} \\ \{\ddot{x}_f\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{jj}] & [C_{ji}] & [C_{jf}] \\ [C_{ij}] & [C_{ii}] & [C_{if}] \\ [C_{fj}] & [C_{fi}] & [C_{ff}] + [C]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_j\} \\ \{\dot{x}_i\} \\ \{\dot{x}_f\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{jj}] & [K_{ji}] & [K_{jf}] \\ [K_{ij}] & [K_{ii}] & [K_{if}] \\ [K_{fj}] & [K_{fi}] & [K_{ff}] + [K]_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i\} \\ \{x_f\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_j\} \\ \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{あるいは} \quad [M]_{PF, \ell} \ddot{x}_{PF, \ell} + [C]_{PF, \ell} \dot{x}_{PF, \ell} + [K]_{PF, \ell} x_{PF, \ell} = \{F\}_{PF, \ell} \quad (13)'$$

全体系 多径間連続橋におけるピア数を \$m\$ 本とすると、式(6)で支配されるガーダ部と式(13)で支配されるピアフーチング部が一体となった連成系の運動方程式は、両者の接合点における境界条件、つまり変位の適合条件式

$$\left. \begin{aligned} x_j^T_G &= (x_j^T_{PF,1} \ x_j^T_{PF,2} \ \cdots \ x_j^T_{PF,m}) \\ \text{と断面力のフりあい式} \quad \{F_j\}_G^T + \{ \{F_j\}_{PF,1}^T \ \{F_j\}_{PF,2}^T \ \cdots \ \{F_j\}_{PF,m}^T \} &= \{0\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

から得られる。ところで各ピアフーチング部についてこの式(13)を、ガーダ部との境界節点とそれ以外の節点にまとめる

$$\begin{bmatrix} [M_{jj}] & [\hat{M}_{ji}] \\ [\hat{M}_{ij}] & [\hat{M}_{ii}] \end{bmatrix}_{PF} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_j \\ \ddot{x}_i \end{Bmatrix}_{PF} + \begin{bmatrix} [C_{jj}] & [\hat{C}_{ji}] \\ [\hat{C}_{ij}] & [\hat{C}_{ii}] \end{bmatrix}_{PF} \begin{Bmatrix} \dot{x}_j \\ \dot{x}_i \end{Bmatrix}_{PF} + \begin{bmatrix} [K_{jj}] & [\hat{K}_{ji}] \\ [\hat{K}_{ij}] & [\hat{K}_{jj}] \end{bmatrix}_{PF} \begin{Bmatrix} x_j \\ x_i \end{Bmatrix}_{PF} = \begin{Bmatrix} \{F_j\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}_{PF} \quad (15)$$

$$\text{ここで} \quad \ddot{x}_i^T_{PF} = (\ddot{x}_i^T_{PF,1} \ \ddot{x}_i^T_{PF,2} \ \cdots \ \ddot{x}_i^T_{PF,m}) \quad x_j^T_{PF} = (x_j^T_{PF,1} \ x_j^T_{PF,2} \ \cdots \ x_j^T_{PF,m})$$

$$[M_{jj}]_{PF} = [M_{jj}]_{PF, \ell} \quad [\hat{M}_{ij}]_{PF} = [\hat{M}_{ij}]_{PF, \ell} \quad [\hat{M}_{ii}]_{PF} = [\hat{M}_{ii}]_{PF, \ell}$$

であるので、上式と式(13)を総合した結果は

$$\begin{bmatrix} [M]_{11} & [M]_{12} & [M]_{13} \\ & [M]_{22} & [M]_{23} \\ \text{sym.} & & [M]_{33} \end{bmatrix}_{GPF} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i^C_G \\ \ddot{x}_j \\ \ddot{x}_i^C_{PF} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{11} & [C]_{12} & [C]_{13} \\ & [C]_{22} & [C]_{23} \\ \text{sym.} & & [C]_{33} \end{bmatrix}_{GPF} \begin{Bmatrix} \dot{x}_i^C_G \\ \dot{x}_j \\ \dot{x}_i^C_{PF} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_{11} & [K]_{12} & [K]_{13} \\ & [K]_{22} & [K]_{23} \\ \text{sym.} & & [K]_{33} \end{bmatrix}_{GPF} \begin{Bmatrix} x_i^C_G \\ x_j \\ x_i^C_{PF} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}_{GPF}$$

$$\text{ただし} \quad [M]_{11} = [M_{ii}]_G, \quad [M]_{12} = [M_{ij}]_G + [M_{ii}]_G[\beta]_G, \quad [M]_{13} = [0], \quad [M]_{23} = [\hat{M}_{ji}]_{PF}, \quad [M]_{33} = [\hat{M}_{ii}]_{PF}; \quad (16)$$

$$[M]_{22} = [M_{jj}]_G + [\beta]^T [M_{ij}]_G + [M_{ji}]_G[\beta]_G + [\beta]^T_G [M_{ii}]_G[\beta]_G + [M_{jj}]_{PF}, \quad [K]_{11} = [K_{ii}]_G, \quad [K]_{23} = [K_{ji}]_{PF}$$

$$[K]_{12} = [0], \quad [K]_{13} = [0], \quad [K]_{22} = [K_{jj}]_G + [K_{ji}]_G[\beta]_G + [K_{jj}]_{PF}, \quad [K]_{33} = [K_{ii}]_{PF}, \quad [C]_{11} = [C_{ii}]_G,$$

$$[C]_{12} = [0], \quad [C]_{13} = [0], \quad [C]_{22} = [\beta]^T [C_{ij}]_G[\beta]_G + [C_{jj}]_{PF}, \quad [C]_{23} = [\hat{C}_{ji}]_{PF}, \quad [C]_{33} = [\hat{C}_{ii}]_{PF};$$

$$\text{あるいは} \quad [M]_{GPF} \ddot{x}_{GPF} + [C]_{GPF} \dot{x}_{GPF} + [K]_{GPF} x_{GPF} = \{0\} \quad (17)$$

そして地震入力に対する運動方程式は、上式の変位ベクトルを地動 \$\{x_g\}_k\$ と構造物の相対変位 \$\{y\}\$ に分離すればよい。

さて、ここでガーダ部およびピアフーチング部がそれぞれ単独状態で固有モード分解ができるものと仮定すると

$$\begin{aligned} \text{すなわち、前者は} \quad & \{x_i^C\}_G = [\Phi_i^C]_G \{q_i^C\}_G \quad \text{後者は} \quad \begin{Bmatrix} y_j \\ y_i \end{Bmatrix}_{PF, \ell} = [\Phi]_{PF, \ell} \{q\}_{PF, \ell} = \begin{bmatrix} [\Phi_j] \\ [\Phi_i] \end{bmatrix}_{PF, \ell} \{q\}_{PF, \ell} \quad (19) \\ \text{ただし} \quad & \begin{cases} [\Phi_i^C]^T [M_{ii}]_G [\Phi_i^C]_G = [I]_G, \\ [\Phi_i^C]^T [C_{ii}]_G [\Phi_i^C]_G \simeq [2\xi\omega]_G \\ [\Phi_i^C]^T [K_{ii}]_G [\Phi_i^C]_G = [\omega^2]_G \end{cases} \quad \text{ただし} \quad \begin{cases} [\Phi]_{PF, \ell}^T [M]_{PF, \ell} [\Phi]_{PF, \ell} = [I]_{PF, \ell} \\ [\Phi]_{PF, \ell}^T [C]_{PF, \ell} [\Phi]_{PF, \ell} = [2\xi\omega]_{PF, \ell} \\ [\Phi]_{PF, \ell}^T [K]_{PF, \ell} [\Phi]_{PF, \ell} = [\omega^2]_{PF, \ell} \end{cases} \end{aligned}$$

であるから、式(17)は、固有モード座標のみで表わされる。

$$[M^*]_{GPF} \ddot{q}_{GPF} + [C^*]_{GPF} \dot{q}_{GPF} + [K^*]_{GPF} q_{GPF} = \{F^*\}_{GPF}$$

$$\text{ここで} \quad [M^*]_{GPF} = \begin{bmatrix} [I] & [\Phi_i^C]^T ([M_{ij}]_G + [M_{ii}]_G[\beta]_G) [\Phi_j]_{PF} \\ \text{sym.} & [\Phi_j]_{PF}^T ([M_{jj}]_G + [\beta]_G^T [M_{ij}]_G + [M_{ji}]_G[\beta]_G + [\beta]_G^T [M_{ii}]_G[\beta]_G) [\Phi_j]_{PF} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[K^*]_{GPF} = \begin{bmatrix} [\omega^2]_G & [0] \\ \text{sym.} & [\Phi_j]_{PF}^T ([K_{jj}]_G + [K_{ji}]_G[\beta]_G) [\Phi_j]_{PF} + [\omega^2]_{PF, \ell} \end{bmatrix} \quad [C^*]_{GPF} = \begin{bmatrix} [2\xi\omega]_G & [0] \\ \text{sym.} & [2\xi\omega]_{PF, \ell} \end{bmatrix}$$

$$\{F^*\}_{GPF} = \begin{bmatrix} [\Phi_i^C]^T ([M_{ij}]_G + [M_{ii}]_G[\beta]_G) \\ [\Phi_j]_{PF}^T ([M_{jj}]_G + [\beta]_G^T [M_{ij}]_G + [M_{ji}]_G[\beta]_G + [\beta]_G^T [M_{ii}]_G[\beta]_G) + [\beta]_{PF}^T [M]_{PF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\{x_{gk}\} \\ -\{a\}\ddot{x}_{gk} \end{Bmatrix}$$

そして、\$\omega\$ は固有振動数、\$\beta\$ は固有モード減衰定数である。なお \$\{a\}\$ は 1 と 0 より成るベクトルで、入力状態より決められる。

4 解析結果

図1および表1に示した高架橋に対して、固有モード解析、地震応答解析を行なった。有限要素分割は図4のように、ガーダ部各径間を10要素、各ピア部を10要素にした。橋脚下端の支持条件として、完全固定と弾性支持の2種類を設けた。全体系の運動方程式を立てるに当り、各部分系の採用モード数をガーダ部に関しては4次まで、ピア-フーチング部に関しては3次までとし、合計16自由度に削減した。図5はピア下端完全固定の場合の全体系固有モードの振動数ならびに形状を描いたものである。同図より、応答に支配的な低次固有モードは、各径間、各ピア単独の基本固有モードが組み合わさってできている様子が判る。図6は地震応答解析結果で、入力にはEL CENTRO 1940.NS成分に対する各固有モード減衰5%の自乗平均値応答(RMS)と、他の解析から得られたフーチング天端での応答スペクトルの減衰5%曲線に対するRMS値を評価した。いずれも入力地震動としては最大加速度200galを有する。

今回の計算では、減衰定数を全体系の固有モードで仮定したが、実際ガーダ部とピア-フーチング部は構造特性もかなり異なることから、それに見合った値を使う必要がある。今後、两部分系のより忠実なデータに基づき高架橋の耐震解析を進めていく次第である。

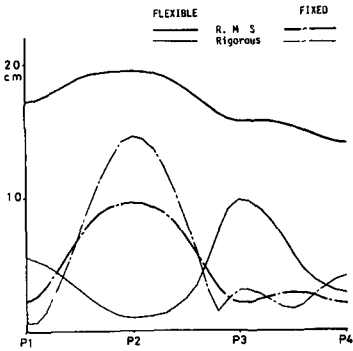


図7 相対変位応答

参考文献

- (1) 土木学会高橋脚橋梁耐震小委員会：高橋脚橋梁の耐震設計に関する調査研究報告書、昭和52年3月。
- (2) Kukreti, A.R., & Feng, C.C.: Dynamic Substructuring For Alternating Subsystem, J.Eng.Mech.Div., Vol.104, No.EM5, ASCE 1978, pp1113-1129
- (3) Yamada Y., Takemiya, H., & Kawano, K.: Random Response Analysis of A Nonlinear Soil-Suspension Bridge Pier, J.Earthq. Eng. & Struc. Dyn., Vol.7, 1979, pp.31-47
- (4) 竹宮 河野：地盤基礎 上部構造物の動的相互作用について、オラ回日本地震工学シンポジウム, 1978, pp.473-480

NODE NUMBER OF GIRDER & PIER

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67

図4.有限要素分割

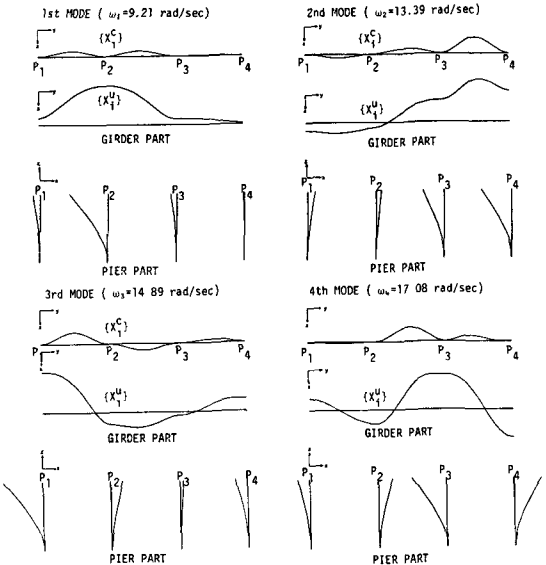


図5.全体系の固有モード

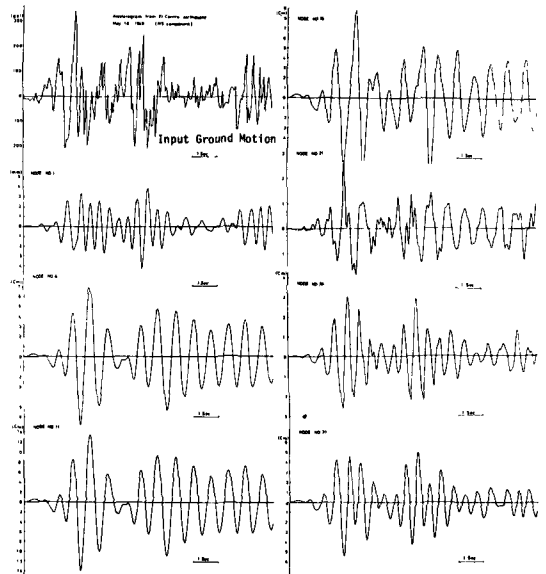


図6 Response Time History